

На правах рукописи



Перевузник Виктория Сергеевна

**МЕТОДЫ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ
ГИБРИДНОЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ
РЕАБИЛИТАЦИИ НИЖНИХ КОНЕЧНОСТЕЙ**

Специальность: 2.5.4 - «Роботы, мехатроника и робототехнические системы»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Белгород – 2024

Работа выполнена на кафедре технологии машиностроения Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Рыбак Лариса Александровна

Официальные оппоненты: **Мисюрин Сергей Юрьевич**,
доктор физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт машиноведения
им. А.А. Благонравова Российской академии
наук, главный научный сотрудник;

Афонин Андрей Николаевич,
доктор технических наук, доцент,
ФГАОУ ВО «Белгородский
государственный национальный
исследовательский университет», кафедра
информационных и робототехнических
систем, профессор.

Ведущая организация: Акционерное общество «Научно-
производственное объединение
«Андрoidная техника», г. Москва

Защита состоится «26» марта 2024 года в 14.00 на заседании диссертационного совета 24.2.276.07 созданного на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» по адресу: 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, ауд. 214

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова» и на сайте www.bstu.ru по ссылке https://gos_att.bstu.ru/dis/Perevuznik

Автореферат разослан «__» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Малышев Дмитрий Иванович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В сфере практического здравоохранения многие проблемы эффективно решаются с помощью робототехнических средств. Эти задачи не ограничиваются лечением и реабилитацией пациентов с нарушениями опорно-двигательного аппарата, а также включают выполнение функций самообслуживания, социальной адаптации и восстановления утраченных двигательных и коммуникационных способностей. Роботизированная механотерапия широко применяется в реабилитации больных с функциональными нарушениями опорно-двигательной системы, вызванными последствиями сосудистых заболеваний, нарушений нейрорегуляции двигательной активности, травм и патологии опорно-двигательного аппарата. Применение достаточно сложных и дорогих медицинских изделий данного вида обуславливает причисление механотерапии к классу высокотехнологичных устройств, внедрение которых в клиническую практику, их разработка и производство является одной из приоритетных программ развития медицинской техники. Существенный вклад в развитие теории робототехнических систем различного назначения внесли ученые: Глазунов В.А., Каляев И.А., Болотник Н.Н., Брискин Е.С., Яцун С.Ф., Пшихопов В.Х., Жога В.В., и др. В последнее время в ранней реабилитации после травм и оперативных вмешательств на опорно-двигательной системе получила широкое распространение СРМ-терапия (Continuous Passive Motion – продолжительное пассивное движение). Она представляет собой реабилитационную методику, связанную с продолжительной пассивной разработкой различных суставов человека. В основе данной методики лежит осуществление длительно повторяющихся движений в суставах с применением специализированной робототехнической системы (РТС) для реабилитации без участия собственной силы мышц пациента. При этом РТС должна быть безопасной, занятия не должны вызывать функциональное перенапряжение, когнитивного дискомфорта. Многие ученые отмечают, что применение роботизированной механотерапии для пациентов, переживших острый или хронический инсульт, позволяет более эффективно восстановить двигательные функции и повысить повседневную активность, чем при использовании стандартных методов реабилитации. Несмотря на неоднозначные результаты, продемонстрированные ассистирующими роботами в терапии двигательных расстройств, этот метод является одним из самых перспективных направлений нейрореабилитации и требует дальнейшего систематического накопления и анализа научных фактов, что подтверждает актуальность исследований.

Целью диссертационной работы является разработка моделей двухмодульной гибридной робототехнической системы для реабилитации нижних конечностей с расширенными функциональными и эксплуатационными характеристиками и методов определения ее оптимальных геометрических и конструктивных параметров.

Для достижения поставленной цели в процессе работы решались следующие **задачи**:

1. Обзор и анализ клинических аспектов роботизированной механотерапии, достоинств и недостатков робототехнических систем для реабилитации, методов оптимизации;

2. Разработка структуры и математической модели двухмодульной гибридной робототехнической системы на основе активных и пассивных механизмов с возможностью реабилитации как одной, так и обеих нижних конечностей;

3. Разработка метода параметрического синтеза гибридной робототехнической системы модульной структуры с учётом особенностей антропометрии пациентов, требуемых для реабилитации траекторий и углов поворота суставов в соответствии с клиническими рекомендациями;

4. Разработка двухэтапного эвристического алгоритма оптимизации, позволяющего учесть условия компактности конструкции и достижимости всех требуемых для реабилитации положений, а также выполнять формирование и обработку геометрии робототехнической системы в процессе оптимизации с учётом различных уровней параметрических ограничений;

5. Разработка метода автоматизированного проектирования гибридной робототехнической системы с использованием CAD/CAE-систем, включая создание электронно-цифровой и имитационной динамической моделей, с учётом особенностей антропометрии пациентов и требуемых для реабилитации траекторий.

6. Разработка полномасштабного образца двухмодульной гибридной робототехнической системы с предохранительным устройством. Проведение экспериментальных исследований, сопоставление и анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Объект исследования – робототехнические системы для реабилитации нижних конечностей

Предметом исследования являются методы моделирования, параметрического синтеза, оптимизации параметров, автоматизированного проектирования

Методологическая основа исследования. Для решения поставленных задач проводится комплекс исследований, основанных на новых современных методах и подходах механики машин и роботов, математического и имитационного моделирования, оптимизации, проектирования с учетом важных аспектов клинической и реабилитационной медицины.

Для эффективного решения задач, связанных с моделированием и анализом данных, разработаны программные компоненты на языке программирования C++, использующие передовые технологии интервального анализа с помощью библиотеки Snowgoose и параллельных вычислений с помощью библиотеки OpenMP. Для визуализации результатов моделирования применено мощное программное обеспечение Blender, которое позволило

создавать уникальные и наглядные 3D-изображения. Для имитационного моделирования с использованием 3D-моделей задействованы программные комплексы Siemens PLM Software NX и MATLAB.

Научная новизна:

1. Предложена гибридная модульная структура робототехнической системы для реабилитации нижних конечностей, выполненная на базе двух идентичных по структуре модулей, включающих активный 3-PRRR манипулятор для перемещения стопы пациента и пассивный ортез на базе RRR механизма для поддержки нижней конечности. **Показана** возможность за счет модульной структуры изменять параметры системы в зависимости требуемой программы реабилитации, антропометрии пациента и особенностей заболевания, использовать как один модуль для одной конечности, так и два модуля одновременно для обеих конечностей.

2. Разработана математическая модель, описывающая зависимость положений звеньев активных и пассивных механизмов двух модулей от углов в шарнирах пассивного ортеза с учётом вариантов креплений кинематических цепей активных манипуляторов к подвижной платформе и их конфигураций. **Получены** условия достижимости положений платформ, исключающие возможные пересечения и столкновения звеньев.

3. Разработан метод параметрического синтеза гибридной робототехнической системы модульной структуры с учётом сформированных уровней параметрических ограничений в зависимости от эргономичности и технологичности конструкции на основе критерия в виде свёртки, включающей два компонента, один из которых основан на минимизации недостижимых точек траектории с учётом особенностей антропометрических данных, а другой - на компактности конструкции. **Установлено**, что увеличение уровня параметрических ограничений снижает показатели компактности конструкции в пределах от 0,57 до 10,56%. Но при этом достигается существенное улучшение эргономичности и технологичности конструкции.

4. Разработан двухэтапный эвристический алгоритм оптимизации геометрических параметров, на первом этапе которого выполняется поиск области допустимых конфигураций, а на втором область оптимальных конфигураций. Это обеспечивается вариативностью критерия оптимизации за счёт обнуления второго компонента с использованием функции Хевисайда в случае наличия недостижимых положений. В алгоритме **предусмотрена** возможность хранения структурированных массивов данных, описывающих геометрию робототехнической системы и особенности уровней параметрических ограничений. По результатам численного эксперимента **получена** наилучшая конфигурация для проектирования.

5. Разработан метод автоматизированного проектирования двухмодульной гибридной робототехнической системы с использованием CAD/CAE-систем, включающий создание точной параметризованной электронно-цифровой и имитационной динамической моделей. с учетом

особенностей антропометрических и физиологических данных пациентов, силомоментных характеристик в приводах. **Выявлена** необходимость корректировки в конструкции шарнирных соединений для обеспечения требуемых движений при сохранении полученных кинематических соотношений. **Предложено и экспериментально подтверждено** использование для обеспечения безопасности подвешенного предохранительного устройства для компенсации избыточной нагрузки, действующей со стороны активного манипулятора на конечность пациента, что позволяет за счет упругих элементов компенсировать движения активного манипулятора, недопустимые физиологией пациента.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость заключается в развитии научных основ параметрического синтеза, моделирования и автоматизированного проектирования гибридных робототехнических систем для реабилитации нижних конечностей, включая созданные новые схемно-технические решения, модели, алгоритмы и экспериментальный образец робототехнической системы, а также высокопроизводительные методы оптимизации геометрических и конструктивных параметров и программно-аппаратное обеспечение.

Практическая значимость состоит в развитии методов и методик оптимального проектирования для создания и внедрения новых типов робототехнических систем в клиническую практику для реабилитации больных после инсульта, при спастических параличах и других неврологических заболеваний, а также после травм, реконструктивных операций, эндопротезирования суставов нижней конечности ускорит реабилитацию и существенно улучшит качество жизни пациентов. Разработана конструкция полномасштабного экспериментального образца двухмодульной гибридной робототехнической системы для реабилитации нижних конечностей с предохранительным устройством для компенсации избыточной нагрузки, действующей со стороны активного манипулятора на конечность пациента, что позволяет за счет упругих элементов компенсировать движения активного манипулятора, недопустимые физиологией пациента. Проведены экспериментальные исследования на полномасштабном экспериментальном образце двухмодульной гибридной робототехнической системы, подтверждающие результаты теоретических исследований.

Положения, выдвигаемые на защиту:

1. Кинематическая схема двухмодульной гибридной робототехнической системы на базе активного механизма параллельной структуры для перемещения стопы пациента и пассивного ортеза для поддержки конечности, модульная структура которой позволяет изменять параметры системы в зависимости от антропометрии пациента и особенностей заболевания, использовать как один модуль для одной конечности, так и два модуля одновременно для обеих конечностей.

2. Математическая модель, описывающая зависимость положений звеньев активных и пассивных механизмов двух модулей от углов в шарнирах

пассивного ортеза с учётом вариантов креплений кинематических цепей активных манипуляторов к подвижной платформе и их конфигураций.

3. Метод параметрического синтеза робототехнической системы, учитывающий сформированные уровни параметрических ограничений в зависимости от эргономичности и технологичности конструкции, основанный на использовании эвристических подходов и поиске оптимальных конфигураций по критерию в виде двухкомпонентной свёртки, учитывающей особенности антропометрических данных пациента и компактность конструкции.

4. Алгоритм оптимизации геометрических параметров гибридной робототехнической системы, реализующий двухэтапный эвристический поиск оптимальных конфигураций с возможностью хранения структурированных массивов данных, описывающих геометрию робототехнической системы и особенности уровней параметрических ограничений оптимизации.

5. Метод автоматизированного проектирования двухмодульной гибридной робототехнической системы с использованием CAD/CAE-систем, включающий создание точной электронно-цифровой и имитационной динамической моделей с учетом антропометрических данных и требуемых для реабилитации траекторий, позволяющий моделировать рабочие процессы, полноценно оценить компоновку конструкции, ремонтпригодность и эргономику робототехнической системы.

Наиболее существенные научные результаты, полученные автором и выдвигаемые для защиты.

1. Разработана гибридная модульная структура робототехнической системы для реабилитации нижних конечностей, выполненная на базе двух идентичных по структуре модулей

2. Разработана математическая модель, описывающая зависимость положений звеньев активных и пассивных механизмов двух модулей от углов в шарнирах пассивного ортеза с учётом вариантов креплений кинематических цепей активных манипуляторов к подвижной платформе и их конфигураций.

3. Разработан метод параметрического синтеза гибридной робототехнической системы модульной структуры с учётом сформированных уровней параметрических ограничений в зависимости от эргономичности и технологичности конструкции

4. Разработан двухэтапный эвристический алгоритм оптимизации геометрических параметров

5. Разработан метод автоматизированного проектирования двухмодульной гибридной робототехнической системы с использованием CAD/CAE-систем, включающий создание точной параметризованной электронно-цифровой и имитационной динамической моделей

Достоверность и обоснованность полученных результатов обеспечивается строгими математическими выводами, согласованностью с опубликованными результатами научных исследований других авторов, подтверждаются результатами компьютерного моделирования (с проверкой

примененных моделей и алгоритмов на задачах, имеющих аналитическое решение), лабораторными испытаниями разработанного экспериментального образца гибридной робототехнической системы для реабилитации нижних конечностей с использованием высокотехнологичного оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова. Результаты диссертации докладывались и обсуждались на российских и международных научных конференциях и получили положительный отзыв научной общественности, а также предприятий, специализирующихся в области разработки систем реабилитации и механотерапии.

Апробация работы. Основные результаты были представлены на следующих конференциях:

- IX, X, Международная конференция “Оптимизация и Приложения” OPTIMA (Петровац, Черногория, 2017, 2019);
- Латиноамериканский симпозиум по промышленным и робототехническим системам (Тампико, Мексика, 2019);
- 7-я международная конференция по оптимизации и промышленным приложениям COIA (Баку, Азербайджан, 2020);
- Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова (г. Белгород, БГТУ им. В.Г. Шухова, 2019, 2020, 2021);
- 23rd CISM IFToMM Symposium on Robot Design, Dynamics and Control (Саппоро, Япония, 2020)
- XXXIII - Международная научная конференция «Математические Методы в Технике и Технологиях» ММТТ (г. Казань, КНИТУ, 2020);
- Ежегодная международная конференция по когнитивным архитектурам, созданным на основе модели человеческого мозга для искусственного интеллекта BICA (Гвадалахара, Мексика, 2022);
- XXXIV Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов МИКМУС (г. Москва, ИМАШ им. А.А. Благонравова РАН, 2022);
- Международный семинар IFToMM по целям устойчивого развития I4SDG (Бильбао, Испания, 2023)
- Международная конференция IFToMM по механизмам, передачам и приложениям MeTgApp (Пуатье, Франция, 2023).

Публикации. По результатам работы опубликовано 17 статей, в том числе 3 статьи в центральных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 14 статей в изданиях, индексируемых базами Web of Science и Scopus, получен 1 патент РФ на изобретение, 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации: 194 страницы. Диссертационная работа содержит 17 таблиц, 101 рисунок и 4 приложения. Список литературы включает 178 источников.

ОСНОВНОЕ ОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введение представлена общая характеристика работы, обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи исследования, определены научная новизна и положения, выносимые на защиту. Описаны методы исследования, используемые в работе. Представлены сведения об апробации работы, публикациях, теоретической и практической значимости результатов исследования.

В первой главе выполнен обзор и анализ существующих робототехнических систем для реабилитации нижних конечностей, основные клинических аспектов в области реабилитации.

Выполнен анализ состояния исследований в области робототехнических систем для реабилитации. Одной из первых систем такого типа является робототехнический ортопедический тренажер для восстановления навыков ходьбы, утраченных в процессе болезни или травмы Lokomat (Hocoma AG) (Швейцария). РТС состоит из активного ортеза для ходьбы и усовершенствованной системы поддержки веса тела в сочетании с беговой дорожкой. В нем используются управляемые компьютером двигатели (приводы), которые встроены в ортез для ходьбы в каждом тазобедренном и коленном суставе (рисунок 1). Известны робототехнические системы для реабилитации нижних конечностей с использованием шагающих механизмов. Так РТС для опорно-двигательной терапии G-EO была разработана для обучения пациентов, перенесших инсульт, его механическая конструкция меньше, чем у HapticWalker. Помимо движения стоп, движение тела пациента контролируется в вертикальном и боковом перемещениях. MotionMaker - стационарная РТС, разработанная в Швейцарии, позволяет пациентам с парализованными конечностями выполнять упражнения с активным участием. Для имитации естественных сил реакции опоры, конечности прикрепляются к ортезам только на уровне стопы (рисунок 2). Известны многие другие робототехнические системы для реабилитации тазобедренного, коленного и голеностопного суставов, например, AKROD (США) обеспечивает переменное демпфирование коленного сустава.



Рисунок 1 – Робототехнический ортопедический тренажер Lokomat



Рисунок 2 - Реабилитационная система MotionMaker

Показано, что большинство систем реабилитации имеют большую массу и габариты для обеспечения требуемой жесткости. Кроме того, универсальная

РТС для реабилитации должна обладать способностью синхронизированного хода манипуляторов для обеспечения движений во всех основных суставах (или одного, двух) конечности в пределах заданных параметров. В связи с этим существует необходимость создания новых типов робототехнических систем с расширенными функциональными характеристиками.

На основе клинических рекомендаций в работе сформулированы следующие требования к разрабатываемой РТС:

1. Тазобедренный сустав. Движения с сагиттальной плоскости (сгибание/0/разгибание) от 20° до $130^\circ/0^\circ$ от 0° до 10° . Это основная плоскость движения. Движения во фронтальной плоскости (отведение/0/приведение) $30^\circ - 50^\circ/0^\circ/20^\circ - 30^\circ$. Ротационные движения (внутренняя ротация/0/наружная ротация) $30^\circ/0^\circ/40^\circ$. В тазобедренном суставе основное движение происходит в сагиттальной плоскости.

2. Коленный сустав. Движения с сагиттальной плоскости (сгибание/0/разгибание) $60^\circ - 120^\circ/0^\circ/0^\circ$. Для коленного сустава нейтральным является положение голени и бедра в одной продольной оси.

3. Голеностопный сустав. Движения с сагиттальной плоскости (сгибание/0/разгибание) $20^\circ - 40^\circ/0^\circ/10^\circ - 20^\circ$. Нормальным положением голеностопного сустава считается расположение стопы под углом 90° к голени.

Среднее время тренинга от 15 до 45 минут (определяет врач). Скорость движения подбирается индивидуально. Оптимально 1 фаза за 1,5 - 2 сек. при отсутствии болевого синдрома (имитация медленной ходьбы). При болевом синдроме скорость должна быть уменьшена до 3 - 5 мин. на фазу при безболевого объеме движения. Динамические нагрузки на сустав так же зависят от болевого синдрома и вида контрактуры. Начальные параметры от 1 до 6 кг, средние значения 12 - 15 кг и максимальные до 40 кг.

Во второй главе рассмотрена математическая модель предлагаемой РТС и алгоритм оптимизации геометрических параметров, реализующий двухэтапный эвристический поиск оптимальных конфигураций с возможностью хранения структурированных массивов данных, описывающих геометрию РТС и особенности уровней параметрических ограничений. Представлены результаты оптимизации для различных уровней параметрических ограничений.

С целью повышения эффективности проведения реабилитационных процедур для двух нижних конечностей в работе предложена двухмодульная гибридная РТС, состоящая из двух идентичных по структуре модулей, каждый из которых выполнен на базе активного 3-PRRR механизма параллельной структуры, обеспечивающего перемещения закрепленной стопы пациента, и плоского RRRR механизма последовательной структуры в качестве пассивного ортеза для поддержания нижней конечности (рисунок 3). Модульная структура позволяет изменять параметры систем в зависимости от метода реабилитации и в зависимости от антропометрии и особенностей заболевания использовать как один, так и два модуля одновременно. Взаимное перемещение выходных звеньев двух механизмов позволяют выполнять имитацию походки здорового человека,

при этом реализованы алгоритмы безопасного движения с учетом возможных пересечений (столкновений) звеньев.

Модель пассивного ортеза на базе плоского RRRR механизма показана на рисунке 4. Его шарниры соответствуют суставам пациента.

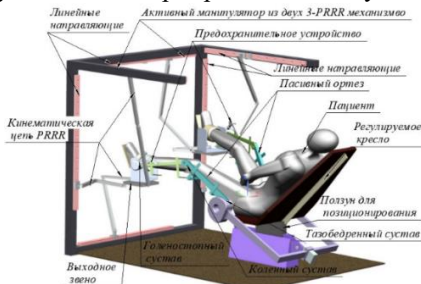


Рисунок 3 – 3D модель двухмодульной гибридной ПТС

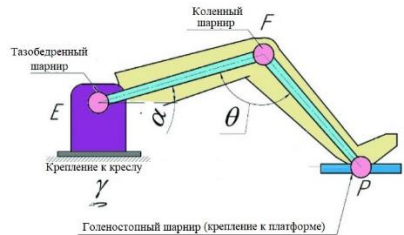


Рисунок 4 – Пассивный ортез

В шарнире Е обеспечивается два движения тазобедренного сустава: вращение в сагиттальной плоскости с углом α и отведение конечности с углом ψ – между проекцией звена EF на плоскость XOY и осью OY. В шарнире F коленного сустава обеспечивается поворот звена FP относительно EF на угол θ .

Рассмотрим структуру предлагаемой системы (рисунок 5). На рисунке обозначен I - левый модуль для левой конечности, II - для правой конечности. Механизм 3-PRRR, который обеспечивает перемещение конечности пациента за счет активных приводов, состоит из трех кинематических цепей, неподвижного основания и подвижной платформы. 3-PRRR механизм обеспечивает необходимые степени свободы (поступательные перемещения по трём осям) и отсутствие особых положений, так как матрица Якоби механизма является единичной. Каждая цепь содержит одну приводную поступательную пару (P) и три вращательных шарнира (R). Линейные приводы соединены с активными линейными поступательными парами, которые в свою очередь соединены с направляющими и пассивными RRR-цепями, соединенными с подвижной платформой. Конфигурации кинематических цепей $A_{ij}B_{ij}C_{ij}D_{ij}$ (здесь и далее в формулах i – индекс модуля: 1 - левый модуль, 2 - правый модуль, j – индекс кинематических цепей активных механизмов) являются вариативными, что означает возможность выгибания цепей в различных направлениях. Каждая из цепей имеет 2 возможные конфигурации, обозначенные как l_{ij} (рисунок 5). Также представленная структура в сравнении с одномодульной предполагает использование формы платформ $D_{i1}D_{i2}D_{i3}$ не в виде правильного треугольника, а в виде прямоугольного треугольника с вариативностью вариантов крепления кинематических цепей к платформе (рисунок 6). Это предполагает, что шарниры D_{ij} могут располагаться с различной стороны относительно центра платформы (D_{i1} может располагаться как в отрицательном, так и в положительном направлении вдоль оси Y, D_{i2} - вдоль оси X, D_{i3} - вдоль оси Z). Активный механизм связан с пассивным ортезом через звено GP, соединяющее шарнир G

голеностопного сустава пассивного ортеза и центр Р подвижной платформы активного манипулятора. Каждый из пассивных ортезов включает 4 вращательных шарнира, два из которых соответствуют тазобедренному суставу (E_i с углами α_i сгибания/разгибания и γ_i отведения/приведения сустава), один коленному (F_i с углом β_i сгибания/разгибания сустава) и один голеностопному (G_i с углом θ_i сгибания/разгибания сустава). На рисунке 5 наглядно видно влияние изменения координат направляющих на конфигурацию системы на примере второй направляющей A_{12} (модуль I), имеющей меньшее значение координаты Z в сравнении с первой направляющей A_{11} (модуль I) и первой и второй направляющими модуля правой конечности A_{21} и A_{22} (модуль II).

Параметры РТС должны обеспечивать достижимость всех точек траекторий при выполнении реабилитационных процедур. Для проверки достижимости положения РТС с учётом возможных пересечений их звеньев необходимо определить положения всех звеньев активного механизма и пассивного ортеза.

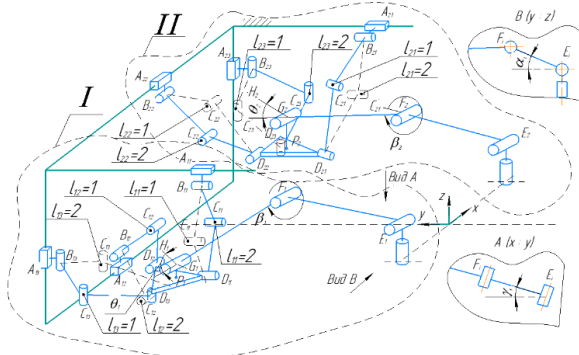


Рисунок 5 – Кинематическая схема РТС

Входными данными являются размеры звеньев и углы в суставах пациента: α_i сгибания тазобедренного сустава, γ_i отведения тазобедренного сустава, β_i сгибания коленного сустава и θ_i сгибания голеностопного сустава. В этом случае координаты центров шарниров E_i определим

$$\mathbf{E}_1 = \begin{bmatrix} -L_{OE} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{E}_2 = \begin{bmatrix} L_{OE} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

С учётом углов α_i и γ_i координаты центров шарнира F_i имеют вид

$$\mathbf{F}_i = \mathbf{E}_i + \begin{bmatrix} L_{EF} \cos \alpha_i \sin \gamma_i \\ L_{EF} \cos \alpha_i \cos \gamma_i \\ L_{EF} \sin \alpha_i \end{bmatrix}, \quad (2)$$

С учётом угла β_i координаты центров шарниров G_i определим как

$$\mathbf{G}_i = \mathbf{F}_i + \begin{bmatrix} L_{FG} \cos(\alpha_i + \beta_i) \sin \gamma_i \\ L_{FG} \cos(\alpha_i + \beta_i) \cos \gamma_i \\ L_{FG} \sin(\alpha_i + \beta_i) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

С учётом угла θ_i координаты крайней точки звена G_iH_i , соответствующего стопе пациента имеют вид

$$\mathbf{H}_i = \mathbf{G}_i + \begin{bmatrix} L_{GH} \cos(\alpha_i + \beta_i + \theta_i) \sin \gamma_i \\ L_{GH} \cos(\alpha_i + \beta_i + \theta_i) \cos \gamma_i \\ L_{GH} \sin(\alpha_i + \beta_i + \theta_i) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

Координаты центров P_i подвижных платформ активных механизмов определим

$$\mathbf{P}_i = \mathbf{G}_i + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -L_{GP} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Центр P_i подвижных платформ находится в центре окружности, вписанной в треугольник платформы с катетами d_x и d_y , а высоте платформы по оси Z в середине платформы, имеющей толщину d_z . Для определения координат центров шарниров D_{ij} рассмотрим варианты крепления кинематических цепей к платформе (рисунок 6).

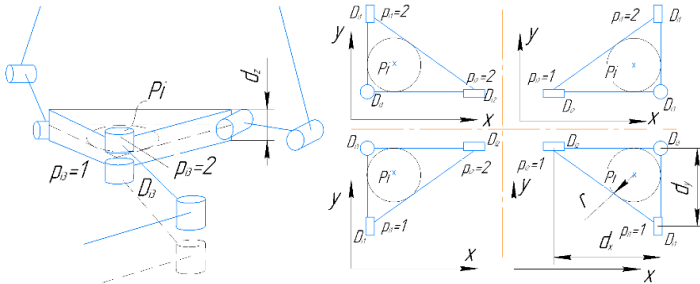


Рисунок 6 – Расчетная схема крепления кинематических цепей к платформе

Обозначим варианты крепления шарнира D_{ij} через p_{ij} , которая может принимать значение 1 (в случае крепления в отрицательном направлении по соответствующей оси координат) или 2 (в положительном направлении). Для использования значений 1 и 2 в формулах координат шарниров введем следующую функцию, которая в случае аргумента 1 возвращает значение -1, а в случае аргумента 2 возвращает значение 1:

$$\lambda(x) = (2x - 3) \quad (6)$$

С учётом (6) координаты центров шарниров центров D_{ij} определим как

$$\mathbf{D}_{i1} = \mathbf{P}_i + \begin{bmatrix} -r\lambda(p_{i2}) \\ (d_y - r)\lambda(p_{i1}) \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{D}_{i2} = \mathbf{P}_i + \begin{bmatrix} (d_x - r)\lambda(p_{i2}) \\ -r\lambda(p_{i1}) \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$\mathbf{D}_{i3} = \mathbf{P}_i + \begin{bmatrix} -r\lambda(p_{i2}) \\ -r\lambda(p_{i1}) \\ \frac{d_z\lambda(p_{i3})}{2} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где j – индекс кинематических цепей активных механизмов: 1 – цепь с линейным перемещением направляющей по оси Y, 2 – по оси X, 3 – по оси Z r – радиус вписанной окружности платформы, который определим по формуле

$$r_i = \frac{d_{xi} + d_{yi} - \sqrt{d_{xi}^2 + d_{yi}^2}}{2}$$

Координаты центров шарниров B_{ij} по двум измерениям зависят от положения направляющих (координаты, не зависящие от положения платформы) и по третьему соответствуют координате центра шарнира D_{ij} , то есть

$$\mathbf{B}_{i1} = \begin{bmatrix} x_{Bi1} \\ y_{Di1} \\ z_{Bi1} \end{bmatrix}, \mathbf{B}_{i2} = \begin{bmatrix} x_{Di2} \\ y_{Bi2} \\ z_{Bi2} \end{bmatrix}, \mathbf{B}_{i3} = \begin{bmatrix} x_{Bi3} \\ y_{Bi3} \\ z_{Di3} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Или

$$\mathbf{B}_{11} = \begin{bmatrix} x_{B11} \\ y \cos \gamma_1 (L_{FG} \cos(\alpha_1 + \beta_1) + L_{EF} \cos \alpha_1) + (d_y - r)\lambda(p_{11}) \\ z_{B11} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$\mathbf{B}_{12} = \begin{bmatrix} x \sin \gamma_1 (L_{FG} \cos(\alpha_1 + \beta_1) + L_{EF} \cos \alpha_1) - L_{OE} + (d_x - r)\lambda(p_{12}) \\ y_{B12} \\ z_{B12} \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$\mathbf{B}_{13} = \begin{bmatrix} x_{B13} \\ y_{B13} \\ z_{L_{FG} \sin(\alpha_1 + \beta_1) + L_{EF} \sin \alpha_1 - L_{GP} + \frac{d_z \lambda(p_{13})}{2}} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$\mathbf{B}_{21} = \begin{bmatrix} x_{B21} \\ y \cos \gamma_2 (L_{FG} \cos(\alpha_2 + \beta_2) + L_{EF} \cos \alpha_2) + (d_y - r)\lambda(p_{21}) \\ z_{B21} \end{bmatrix}, \quad (13)$$

$$\mathbf{B}_{22} = \begin{bmatrix} x \sin \gamma_2 (L_{FG} \cos(\alpha_2 + \beta_2) + L_{EF} \cos \alpha_2) + L_{OE} + (d_x - r)\lambda(p_{22}) \\ y_{B22} \\ z_{B22} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\mathbf{B}_{23} = \begin{bmatrix} x_{B23} \\ y_{B23} \\ z_{L_{FG} \sin(\alpha_2 + \beta_2) + L_{EF} \sin \alpha_2 - L_{GP} + \frac{d_z \lambda(p_{23})}{2}} \end{bmatrix} \quad (15)$$

Обозначим варианты конфигураций кинематических цепей как l_{ij} , которые принимают значение 1 и 2 в соответствии с рисунком 5. Учитывая, что центр шарнира C_{ij} располагается на пересечении окружности с центром B_{ij} и радиусом L_{BCij} и окружности с центром D_{ij} и радиусом L_{CDij} координаты C_{ij} можно определить как

$$\mathbf{C}_{i1} = \begin{bmatrix} \frac{x_{Bi1} + s_{i1}(x_{Di1} - x_{Bi1}) - \lambda(l_{i1})g_{i1}(z_{Di1} - z_{Bi1})}{L_{BDi1}} \\ y_{Di1} \\ \frac{z_{Bi1} + s_{i1}(z_{Di1} - z_{Bi1}) + \lambda(l_{i1})g_{i1}(x_{Di1} - x_{Bi1})}{L_{BDi1}} \end{bmatrix}, \quad (16)$$

$$C_{i2} = \begin{bmatrix} x_{Di2} \\ \frac{y_{Bi2} + s_{i2}(y_{Di2} - y_{Bi2}) - \lambda(l_{i2})g_{i2}(z_{Di2} - z_{Bi2})}{L_{BDi2}} \\ \frac{z_{Bi2} + s_{i2}(z_{Di2} - z_{Bi2}) + \lambda(l_{i2})g_{i2}(y_{Di2} - y_{Bi2})}{L_{BDi2}} \end{bmatrix}, \quad (17)$$

$$C_{i3} = \begin{bmatrix} \frac{x_{Bi3} + s_{i3}(x_{Di3} - x_{Bi3}) - \lambda(l_{i3})g_{i3}(y_{Di3} - y_{Bi3})}{L_{BDi3}} \\ \frac{y_{Bi3} + s_{i3}(y_{Di3} - y_{Bi3}) + \lambda(l_{i3})g_{i3}(x_{Di3} - x_{Bi3})}{L_{BDi3}} \\ \frac{z_{Di3}}{L_{BDi3}} \end{bmatrix}, \quad (18)$$

где $s_{ij} = \frac{L_{BCij}^2 - L_{CDij}^2 + L_{BDij}^2}{2L_{BDij}}$, $g_{ij} = \sqrt{L_{BCij}^2 - s_{ij}^2}$, $L_{BDij} = \|\mathbf{D}_{ij} - \mathbf{B}_{ij}\|$, $x_{Dij}, y_{Dij}, z_{Dij}$ – координаты центров шарниров D.

Для обеспечения работоспособности РТС и достижимости требуемых для реабилитации положений рабочих платформ двух модулей в пространстве, исключая при этом возможные их столкновения и взаимные пересечения звеньев необходимо обеспечить условие, определяющее эти критерии. Для этого, используя выражения (1) – (18) выполним проверку ориентации механизмов на возможные пересечения звеньев. Для звеньев, соединённых посредством шарниров, проверка пересечений выполнена на основе вычисления значения угла между звеньями, при этом минимально допустимое принято равным 10° . Для звеньев, не соединённых между собой, пересечения проверены на основе определения минимального расстояния между отрезками, проведёнными между центрами шарниров.

Запишем условие недостижимости положения подвижной платформы, выраженное длинами звеньев активного манипулятора в виде системы 6 неравенств

$$L_{BD1j} > L_{BC1j} + L_{CD1j}, \quad L_{BD2j} > L_{BC2j} + L_{CD2j} \quad (19)$$

где i – индекс конечности человека меняется от 1 до 2 (1 – левая конечность, 2 – правая конечность), j – индекс кинематических цепей активных механизмов: 1 – цепь с линейным перемещением направляющей по оси Y, 2 – по оси X, 3 – по оси Z меняется от 1 до 3

Полученную систему неравенств будем далее использовать для выбора оптимальных конфигураций РТС. Рассмотрено формирование траектории движения конечностей, которая будет использоваться далее в ходе оптимизации, на основе повторения движений, соответствующих походке человека и отведению конечности в тазобедренном суставе.

Под имитацией походки примем движение каждой из конечностей в соответствии со следующим законом:

$$\begin{aligned} \alpha_i(t) &= 0.5(\alpha_{max} + \alpha_{min} + \sin(t + 180^\circ(i - 1))(\alpha_{max} - \alpha_{min})) \\ \beta_i(t) &= 0.5(\beta_{max} + \beta_{min} - \cos(t + 180^\circ(i - 1))(\beta_{max} - \beta_{min})), \end{aligned}$$

где i – индекс конечности человека (1 – левая конечность, 2 – правая конечность), $\alpha_{min}, \alpha_{max}$ – минимальный и максимальный угол сгибания тазобедренного сустава, β_{min}, β_{max} – коленного сустава. Для увеличения рабочего диапазона

отработки сгибания тазобедренного сустава α_{min} был принят равным $\alpha_{min} = -20^\circ$. Остальные ограничения углов в суставах были приняты в соответствии с клиническими сведениями выше, то есть $\alpha_{max} = 20^\circ$, $\beta_{min} = -60^\circ$, $\beta_{max} = 0^\circ$.

Постановка задачи оптимизации.

1. Параметры оптимизации

В качестве непрерывных параметров оптимизации используем длины звеньев L_{BCij} , L_{CDij} , положения направляющих x_{Bi1} , z_{Bi1} , y_{Bi1} , z_{Bi1} , x_{Bi3} , y_{Bi3} и горизонтальные размеры платформ. В качестве дискретных параметров используем варианты p_{ij} креплений кинематических цепей к подвижным платформам посредством шарниров D_{ij} (рисунок 6) и варианты l_{ij} конфигураций кинематических цепей (рисунок 5).

2. Критерий оптимизации.

Так как в результате оптимизации необходимо определить геометрические параметры, при которых обеспечена наилучшая компактность конструкции, то критерий оптимизации запишем как

$$F = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^3 (L_{BCij} + L_{CDij}) \rightarrow \min$$

Ограничением оптимизации является достижимость всех точек траектории, описанной ранее в разделе 2 и отсутствие пересечений звеньев в каждой из этих точек, то есть $N^- = 0$, где N^- – количество точек траектории с учётом заданной точности Δt , которые недостижимы.

Ввиду значительного сокращения области допустимых значений параметров вследствие ограничения оптимизации, которое может быть в составе критерия оптимизации в виде $N^- \rightarrow \min$, исключим ограничение оптимизации, однако учтём его в критерии. Разложим N^- на два компонента: N_L^- – положения, не достижимые по условию (19), и N_I^- – положения, достижимые по условию (19), но имеющие пересечения звеньев. Тогда

$$F' = \vartheta \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^3 (L_{BCij} + L_{CDij}) + \rho_1 N_L^- + \rho_2 N_I^- + \rho_3 (1 - \vartheta) \rightarrow \min \quad (20)$$

где, ρ – заданный коэффициент штрафа, ϑ – функция Хэвисайда:

$$\vartheta = \begin{cases} 1, & \text{если } N^- = 0 \\ 0 & \text{– иначе} \end{cases}$$

В соответствии с этим синтезирован алгоритм оптимизации параметров на основе параллельной модификации генетического PSO алгоритма. Блок-схема синтезированного алгоритма приведена на рисунке 7. Минимизация критерия (20) с использованием функции Хэвисайда позволяет последовательно выполнять поиск области допустимых конфигураций, а затем оптимальных конфигураций. Это обеспечивается вариативностью критерия за счёт обнуления компонента $\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^3 (L_{BCij} + L_{CDij})$ в случае наличия недостижимых положений. В алгоритме предусмотрена возможность хранения структурированных массивов данных, описывающих геометрию робототехнической системы и особенности уровней параметрических ограничений.

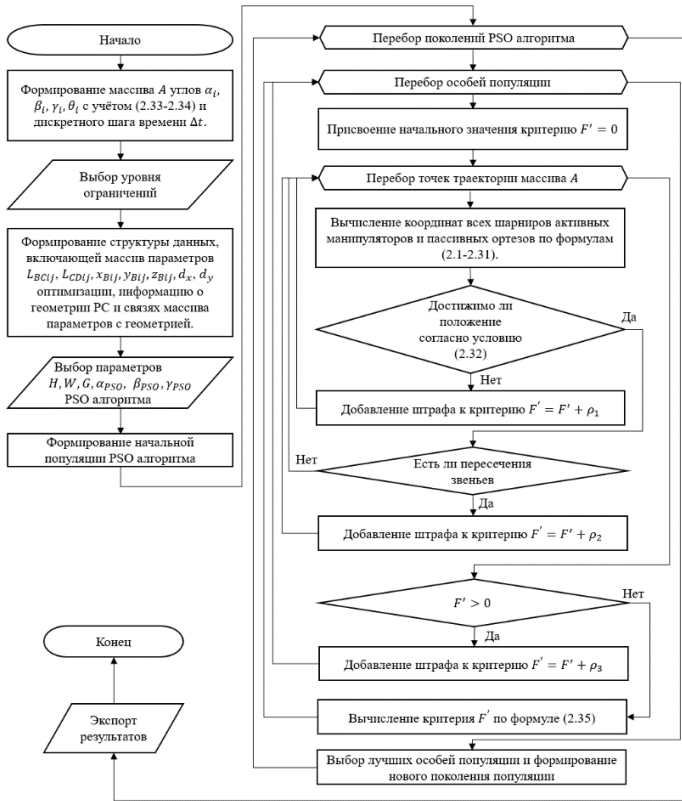


Рисунок 7 – Блок-схема алгоритма оптимизации

Исходные данные для моделирования: угол в голеностопных суставах $\theta_i = 90^\circ$. Размеры звеньев пассивных ортезов заданы в соответствии с антропометрическими данными. L_{OE} определим как половину разницы ширины и диаметра бедра, то есть $L_{OE} = (531 - 260)/2 = 135,5$ мм, $L_{EF} = 703$ мм, $L_{FG} = 738$, $L_{GH} = 326$, диаметры звеньев ортеза $d_{EF} = 259$ мм, $d_{FG} = 194$ мм, $L_{GH} = 176$ мм. Диаметры звеньев активных манипуляторов приняты равными $d_{link} = 80$ мм. Для обеспечения возможности движения $C_{i3}D_{i3}$ под платформой без столкновения со звеньями $C_{i1}D_{i1}$ и $C_{i2}D_{i2}$ должно выполняться условие $d_z > 2d_{link}$, следовательно примем размер $d_z = 170$ мм. Размер L_{GP} для исключения столкновений между звеньями ортезов и звеньями $C_{i3}D_{i3}$ вычислим как:

$$L_{GP} = d_{FG} + 1,1d_{link} + 0,5d_z = 270 \text{ мм}$$

Диапазоны параметров оптимизации: 1. Непрерывные: размеры звеньев:

$L_{BCij} \in [200; 900]$, $L_{CDij} \in [200; 900]$, координаты направляющих:
 $x_{B11} \in [-2000; -50]$, $z_{B11} \in [-1500; 1500]$, $y_{B12} \in [0; 2000]$, $z_{B12} \in [-1500; 1500]$, $x_{B13} \in [-50; 2000]$, $y_{B13} \in [0; 2000]$,
 $x_{B21} \in [50; 2000]$, $z_{B21} \in [-1500; 1500]$, $y_{B22} \in [0; 2000]$,

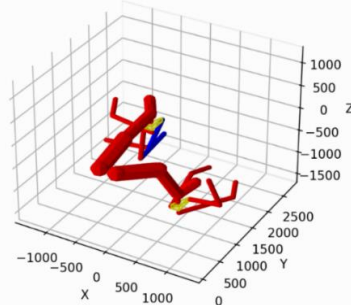
$z_{B22} \in [-1500; 1500]$, $x_{B23} \in [50; 2000]$, $y_{B23} \in [0; 2000]$,
размеры платформ: $d_x \in [100; 300]$, $d_y \in [100; 300]$.

2. Дискретные: варианты креплений кинематических цепей к подвижным платформам $p_{ij} \in 1,2$., варианты конфигураций кинематических цепей $l_{ij} \in 1,2$.

Шаг времени при проверке точек траектории $\Delta t = 5$, коэффициенты штрафа $\rho_1 = 1,2$, $\rho_2 = 1$, $\rho_3 = 100000$. Параметры алгоритма PSO: количество особей в начальной популяции $H = 10000$, число поколений $W = 4$, число групп $G = 2$, значения свободных параметров $\alpha_{PSO} = 0,7$, $\beta_{PSO} = 1,4$, $\gamma_{PSO} = 1,4$. Для повышения эффективности каждая из итераций поиска оптимальных конфигураций выполняется в два этапа. На первом этапе выполняется поиск оптимального решения с исходными диапазонами параметров, на втором этапе диапазон каждого из параметров уменьшается в 5 раз, а центр новых диапазонов совпадает с лучшим найденным решением по результату первого этапа.

Для выполнения оптимизации разработан программный комплекс на языке программирования C++ для одновременного вычисления критерия оптимизации различных особей популяции PSO алгоритма, а также визуализации на языке Python. Пример визуализации показан на рисунке 8. Визуализация движения включает множество положений РТС с дискретным шагом. Для каждого из положений выполняется визуализация всех звеньев модулей с учётом их размеров, окрашенных в красный цвет, а также подвижных платформ, окрашенных в жёлтый цвет. В случае столкновения пересекающиеся звенья имеют синий цвет. Пример визуализации с использованием разработанного программного комплекса показан на рисунке 8. На рисунке показано одно из положений произвольной конфигурации РТС, при котором платформа модуля правой конечности находится ниже платформы левой конечности. Визуализация позволила наглядно показать пересечение звеньев $B_{12}C_{12}$ и $C_{11}D_{11}$, которые имеют синий цвет.

Для сбалансированного выбора геометрических параметров из широкого диапазона возможных, с учётом эргономики и технологичности конструкции РТС, моделирование выполнено для четырёх уровней ограничений



Уровень ограничений 1. Ввиду немонотонного характера критерия (20) и большой размерности пространства поиска при итеративном поиске оптимальных конфигураций, в результате выполнения алгоритма получены различные варианты конфигураций, соответствующие локальным экстремумам. Получено 10 локально оптимальных конфигураций.

Уровень ограничений 2. На втором уровне добавлено ограничение на равенство координат Y всех направляющих, то есть $y_{B12} = y_{B13} = y_{B22} = y_{B23}$, а также равенство координат X направляющих для левой и правой конечности, то есть $x_{B11} = x_{B13}$ и $x_{B21} = x_{B23}$. Это позволяет уменьшить размерность пространства параметров и обеспечить более эргономичную и технологичную конструкцию РТС. На рисунке 9 показано сравнение взаимного расположения направляющих для первого и второго уровня ограничений. Направляющие показаны красным цветом. Как видно из рисунка 9, б, ограничение позволяет получить более упорядоченные конфигурации РТС.

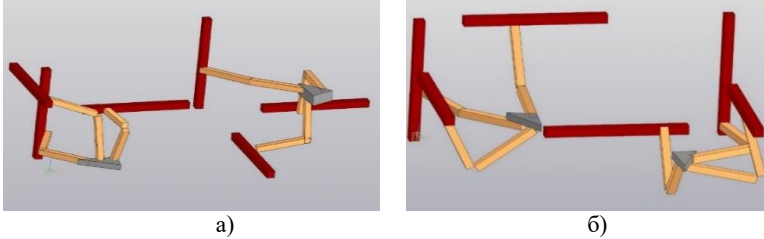


Рисунок 9 - Пример взаимного расположения направляющих при различных уровнях ограничений: а) уровень 1, б) уровень 2

В результате оптимизации получено 10 конфигураций. Введение ограничения повлияло на минимальное значение критерия оптимизации, которое составило для второго уровня 7265,1 (конфигурация 7), что на 3,19% больше, чем значение критерия для конфигурации 8 для уровня 1, которое составляет 7040,7.

Уровень ограничений 3. Дополнительно добавлены ограничения на основе диапазонов переменных координат направляющих, предполагающие расположение направляющих для каждой из цепей в пределах 300 мм выше или ниже диапазона изменения переменных координат направляющих (рисунок 10). Это в дополнение к ограничению второго уровня также увеличивает эргономичность и технологичность конструкции РТС.

Ограничение имеет вид

$$\begin{cases} z_{Bij} \in [\underline{z_{B13}} - 300; \underline{z_{B13}}] \vee z_{Bij} \in [\overline{z_{B13}}; \overline{z_{B13}} + 300], j \in 1,2, \\ x_{B1j} \in [\underline{x_{B12}} - 300; \underline{x_{B12}}], x_{B2j} \in [\overline{x_{B22}}; \overline{x_{B22}} + 300], j \in 1,3, \\ y_{Bij} \in [\underline{y_{B11}}; \overline{y_{B11}} + 300], j \in 2,3, \end{cases}$$

где $\underline{x_{B12}}$ и $\overline{x_{B12}}$ – границы диапазона перемещения x_{B12} направляющих, $\underline{z_{B13}}$ и $\overline{z_{B13}}$ –диапазона z_{B13} , $\overline{y_{B11}}$ – верхняя граница диапазона перемещения y_{B11} . Исходя из

кинематики РТС, предполагающей равенства $x_{B12} = x_{P1}$, $x_{B22} = x_{P2}$, $y_{B11} = y_{P1}$, $z_{B13} = z_{P1} \pm d_z/2$. График изменения координат центров платформ P_i в процессе обработки траектории показан на рисунке 11.

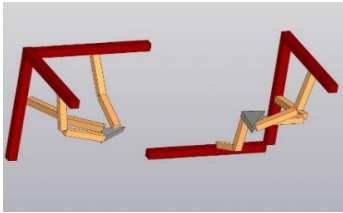


Рисунок 10 - Пример взаимного расположения направляющих

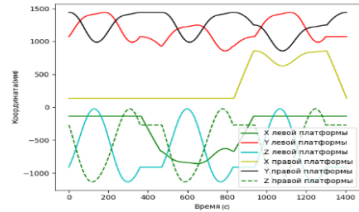


Рисунок 11 - Изменение координат центра платформ P_i при обработке траектории

Ввиду неоднозначности определения положения платформы согласно равенству $z_{B13} = z_{P1} \pm d_z/2$, примем допущение $z_{B13} \approx z_{P1}$ для вычисления параметрических ограничений. С учётом диапазонов изменения координат P_i диапазоны параметров оптимизации, соответствующие координатам направляющих для уровня ограничений 3 имеют значения

$$\begin{aligned} x_{B11} = x_{B13} &\in [-1155.5; -855.5], x_{B21} = x_{B23} \in [855.5; 1155.5], \\ y_{B12} = y_{B13} = y_{B12} = y_{B13} &\in [1441; 1741], \\ z_{Bij} &\in [-25; 275] \vee z_{Bij} \in [-1132,96; -1432,96] \end{aligned}$$

Следствием введения дополнительных ограничений третьего уровня является увеличение значения критерия оптимизации на 6,5% в сравнении со вторым уровнем. Тем не менее, это позволило существенно повысить эргономику и технологичность конструкцию, что можно наглядно оценить при сравнении конфигураций 2 уровня (рисунок 9, б) и 3 уровня (рисунок 10).

Уровень ограничений 4. Помимо ограничений 3-го уровня добавим ограничение на равенство длин звеньев модулей $L_{BC1j} = L_{BC2j}$, $L_{CD1j} = L_{CD2j}$. В этом случае количество параметров уменьшается до 27. Увеличение минимального значения критерия для 4-го уровня в сравнении с третьим составило 0,57%. Увеличение критерия оптимизации в сравнении с первым уровнем составило 10,56%. Конфигурация 9 с минимальным значением критерия значительно превосходит другие девять найденных конфигурации 4-го уровня и предоставляет возможность выполнить унификацию звеньев в сравнении с уровнем 3 (рисунок 12).

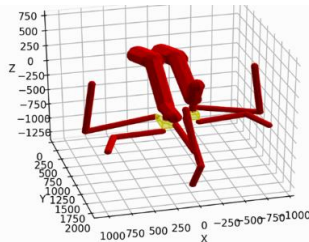


Рисунок 12 - Визуализация движения выбранной оптимальной конфигурации

Учитывая незначительное изменение критерия оптимизации при существенном увеличении показателей технологичности и эргономичности, выбрана конфигурация 9 уровня.

В третьей главе рассмотрена разработка электронно-цифровой модели РТС и имитационное моделирование. Рассмотрены вопросы проектирования конструктивных узлов РТС с применением САПР, а также корректировка параметров РТС, полученных в главе 2 с учетом технологичности и эргономичности, силовых параметров, а также собираемости. Выбранная в результате оптимального синтеза конфигурация использована на этапе проектирования РТС. Ключевыми элементами конструкции являются двигатели, направляющие и ШВП (рисунок 13).

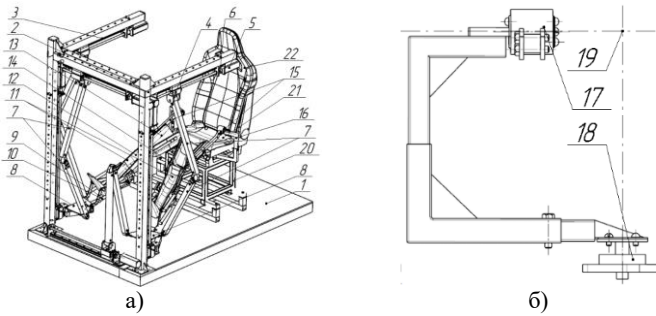


Рисунок 13 - РТС для реабилитации нижних конечностей; а – общий вид, б – карданный шарнир

Создание электронно-цифровой модели (ЭЦМ) начинается с разработки структуры сборки (рисунок 14) и изготовление ортеза (рисунок 15): 1 – деталь голеностопа, 2 – деталь бедра, 3 – пластина голени правая, 4 – пластина бедра правая, 5 – шарнир бедра правый, 6 – ось шарнира правого, 7 – пластина голени левая, 8 – пластина голени левая, 9 – шарнир левый, 10 – ось шарнира

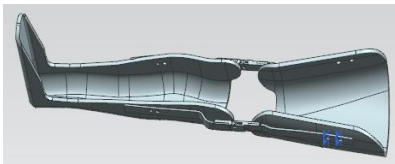


Рисунок 14 – ЭЦМ ортеза

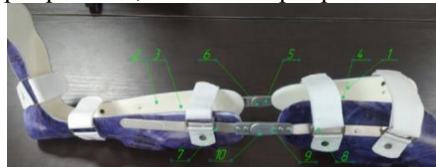


Рисунок 15 – Конструкция ортеза

Создана ЭЦМ тазобедренного шарнира. Для того, чтобы обеспечить подвижность в тазобедренном суставе предусмотрен шарнир 1 с возможностью регулировки высоты положения пассивного ортеза за счет механизма 2 (рисунок 16). В верхней части кресла предусмотрен цилиндрический шарнир 4, который обеспечивает возможность поворота пассивного ортеза в процессе реабилитации. Использование телескопического механизма обеспечивает возможность регулировки длины звена 4.

С целью обеспечения безопасности работы РТС разработана конструкция подвесного предохранительного устройства (ПУ) (рисунок 17). РТС обеспечивает требуемое усилие для реабилитации, которое может травмировать пациента в случае, когда конечность попадает в положение, не предусматриваемое физиологией. ПУ обеспечивает амортизацию опасной для пациента нагрузки в процессе реабилитации.

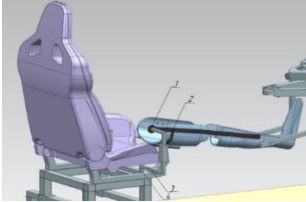


Рисунок 16 - Общий вид системы шарниров

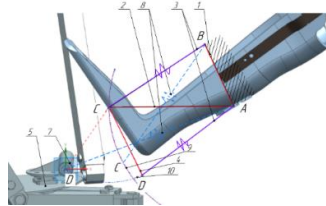


Рисунок 17 - Схема расположения звеньев подвесного предохранительного устройства

Разработана ЭЦМ двух идентичных по структуре модулей активного механизма РТС на базе 3-PRRR механизмов (рисунок 18). На каждой из трех направляющих установлены подвижные каретки, соединенные с соответствующими тремя линейными электроприводами, размещенными на общей раме. К линейным электроприводам, включающим шарико-винтовые пары (ШВП) и двигатели, шарнирно крепятся звенья, образуя параллельную структуру, и крепятся также к двум независимым платформам. Центральный шарнир звена имеет Г-образное соединение звеньев, что позволяет выполнять полное складывание кинематической цепи механизма. В результате создана ЭЦМ РТС (рисунок 19), которая имеет все необходимые степени свободы для выполнения задач реабилитации, а собираемость этой конструкции доказана.

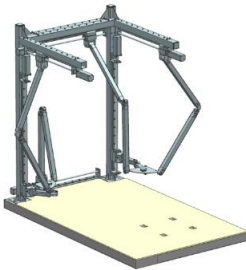


Рисунок 18 - ЭЦМ двух модулей активного РТС

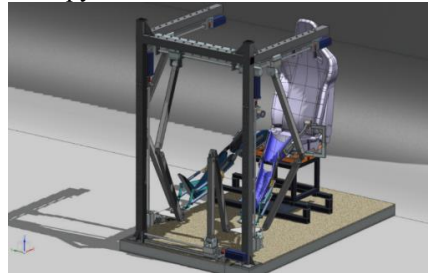


Рисунок 19 - Электронно-цифровая модель РТС

Для задания траектории движения активного механизма необходимо задать вращение каждому из винтов ШВП, для чего аналитически решалась обратная задача кинематики. Траектория движения выбрана таким образом, чтобы были обеспечены разные углы сгибания пассивных ортезов РТС.

После того как движения были заданы, определены параметры решения (рисунок 20). На данном этапе происходит назначение таких основных

переменных, как: время симуляции - 1 с. количество шагов симуляции за отведенное время – 24.

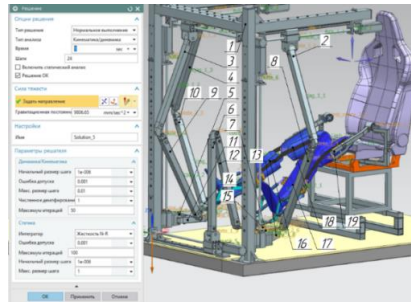


Рисунок 20 – Назначение параметров решения

На рисунках 21 показаны графики изменения угловой скорости относительно каждой из осей коленного сустава, при этом правый ортез (рисунок 21, а) выполняет движение только в сагиттальной и горизонтальной плоскостях, а левый ортез выполняет одновременно приведение и отведение конечности в сагиттальной, горизонтальной и профильной плоскости (рисунок 21, б).

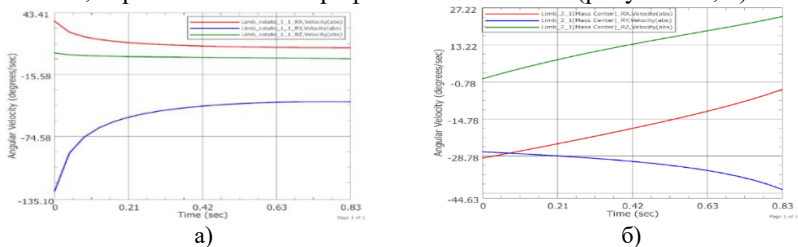


Рисунок 22 – Графики угловой скорости коленного сустава: а) – правый ортез, б) – левый ортез

На рисунке 22 представлены графики сил, действующих в приводных парах каждого из модулей активного манипулятора. Максимальное усилие, требуемое для заданного движения ортеза, наблюдалось по вертикальной оси левой конечности 336 Н, где требовалось одновременно выполнять приведение и сгибание пассивного ортеза, однако разница предельной нагрузки между правым и левым модулем отличается незначительно. Самая нагруженная цепь реализует перемещение выходного звена по оси Z, так как на него действует не только нагрузка от ортеза, но и от остальных звеньев механизма.

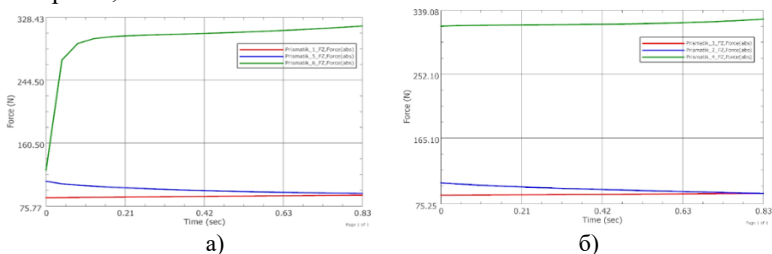


Рисунок 22 – Графики сил, действующих в приводных парах каждого из модулей активного манипулятора: а) – правый ортез, б) – левый ортез

В четвертой главе рассмотрен выбор технических средств, экспериментальные исследования разработанного экспериментального образца РТС, сопоставление и анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований. Для создания экспериментального образца РТС выполнено детальное проектирование узлов и компонентов, разработана конструкторская документация и отлажена система управления приводными механизмами для выполнения требуемых реабилитационных программ. Выполнен тщательный подбор компонентов, выбраны ШВП, которые обеспечивают высокую точность и плавность движения, а также двигатели. В качестве ШВП была выбрана SFU01610-4. РТС изготовлена на основе цифрового проектирования в CAD/CAE - системе NX. РТС состоит из двух идентичных по структуре активных модулей (рисунок 23), которые могут управляться независимо друг от друга. Каждый активный модуль имеет датчики положения и нагрузки. Для управления экспериментальным образцом РТС использован контроллер ОВЕН ПЛК 210, создан и визуализирован интерфейс оператора. Обмен данными с драйверами серводвигателей выполняется через интерфейс RS-485. Для исключения травм пациента ортез соединен с выходным звеном манипулятора подвесным предохранительным устройством с упругими элементами, обеспечивающим амортизацию при возникновении опасной нагрузки.

Проведены экспериментальные исследования РТС, целью которых являлась оценка срабатывания механического предохранительного устройства (ПУ), которое является связующим звеном между активным 3-PRRR механизмом и пассивным ортезом. В начальном положении отсутствуют внешние силы, действующие на ортез, все упругие элементы ПУ находятся в разжатом состоянии, их длина максимальна (рисунок 24).



Рисунок 23 - Экспериментальный образец РТС



Рисунок 24 - Положение ПУ без приложения нагрузки

По результатам экспериментальных исследований показано, что ПУ функционирует корректно, срабатывает при необходимой нагрузке и позволяет обеспечить безопасность при выполнении реабилитационных движений нижних конечностей. Проведена отработка траектории движения в процессе реабилитации. Траектория движения выходного звена активного механизма

представлена на рисунке 25. Изменение углов в суставах пациента представлено на рисунке 26.

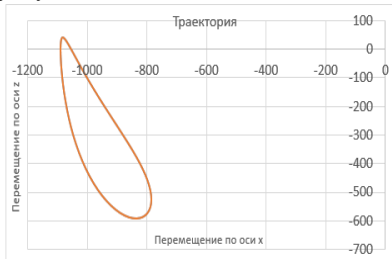


Рисунок 25 - Траектория движения выходного звена активного механизма

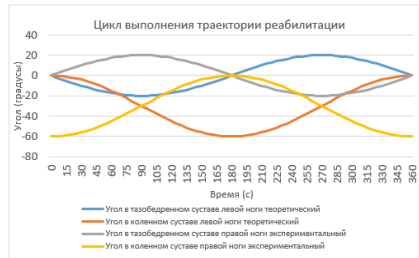


Рисунок 26 - Значения углов в суставах пациента при отработке тестовой траектории

На рисунке 27 показано расхождение между экспериментальными и теоретическими значениями углов в суставах пациента.



Рисунок 27 - Расхождение экспериментальных и теоретических значений углов при отработке реабилитационных движений.

Максимальное расхождение между теоретическими и экспериментальными значениями углов составило $2,82^\circ$, а среднее расхождение составило $1,2^\circ$. Данное расхождение обусловлено особенностями конструкции пассивного ортеза, которые сложно учесть при проектировании и расчетах механизма. Это не оказывает критического влияния в рамках терапевтических движений реабилитации, но их можно компенсировать за счет коррекции ошибки в системе управления активного механизма.

В заключении работы сформулированы основные результаты диссертации.

1. Разработана кинематическая схема и математическая модель двухмодульной гибридной PTC для реабилитации нижних конечностей, выполненной на базе двух идентичных по структуре модулей, включающих активный 3- PRRR механизм для перемещения стопы пациента и пассивный ортез на базе RRR механизма для поддержки нижней конечности.

2. Разработан метод параметрического синтеза гибридной РТС с учётом сформированных уровней параметрических ограничений в зависимости от эргономичности и технологичности конструкции на основе критерия в виде свёртки, включающей два компонента, один из которых основан на минимизации недостижимых точек траектории с учётом особенностей антропометрических данных, а другой - на компактности конструкции.
3. Разработан двухэтапный эвристический алгоритм оптимизации геометрических параметров, на первом этапе которого выполняется поиск области допустимых конфигураций, а на втором область оптимальных конфигураций.
4. Для демпфирования нагрузки разработана конструкция подвесного рычажного предохранительного устройства, которое за счет упругих элементов компенсирует движения активного манипулятора, недопустимые физиологией пациента.
5. С использованием метода автоматизированного проектирования на базе CAD/ CAE - систем получена точная параметризованная электронно-цифровая модель двухмодульной гибридной РТС, которая обладает высоким уровнем идентичности с реальным механизмом.
6. Проведены экспериментальные исследования образца РТС для оценки срабатывания механического предохранительного устройства, а также отработки траектории реабилитации в сагиттальной плоскости. Получены зависимости значения углов в суставе пациента от времени в процессе реабилитации.

Список работ, опубликованных по теме диссертации:

Статьи в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень

ВАК РФ

1. Рыбак Л.А., Малышев Д.И., Гапоненко Е.В., Перевузник В.С., Волошкин А.А. Оптимизация параметров ПИД-регулятора системы управления динамической платформы подвижности на базе гексапода для тренажерных комплексов / Л.А. Рыбак, Д.И. Малышев, Е.В. Гапоненко, В.С. Перевузник, А.А. Волошкин // Вестник Национального исследовательского ядерного университета "МИФИ". - 2022. -Т. 11. - № 3. - С. 254-259.

2. Бондаренко И.Р., Волошкин А.А., Перевузник В.С., Ковалев Л.А. Расчет силовых и кинематических параметров передаточного механизма на основе цепи скручивающихся рычагов / И.Р. Бондаренко, А.А. Волошкин, В.С. Перевузник, Л.А. Ковалев // Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don). - 2022. - Т. 22. - № 2. - С. 91-98.

3. Вирабян Л.Г., Халапян С.Ю., Кузьмина В.С. Оптимизация траектории позиционирования выходного звена планарного параллельного робота / Л.Г. Вирабян, С.Ю. Халапян, В.С. Кузьмина // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. - 2018. - № 9. - С. 106-113.

Статьи в зарубежных изданиях, включённых в систему цитирования Scopus

4. Pisarenko A., Malyshev D., Rybak L., Pervuznik V. Application of Recursive Algorithms for Optimization and Approximation of Workspace of Parallel Robots / A. Pisarenko, D. Malyshev, L. Rybak, V. Pervuznik // *Communications in Computer and Information Science*. - 2023. – V. 1913. – P. 256-267.

4. Thomas M.J., Mohan S., Pervuznik V., Rybak L. Simulation-Based Comparative Study and Selection of Real-Time Controller for 3-PRRR Cartesian Parallel Manipulator / M.J. Thomas, S. Mohan, V. Pervuznik, L. Rybak // *Mechanisms and Machine Science*. – 2023. – V. 124 MMS. – P. 138–151

6. Voloshkin A., Gaponenko E., Rybak L., Pervuznik V. Comparison of Methods of Finite Element Analysis in the Design of Mobile Robot Modules / A. Voloshkin, E. Gaponenko, L. Rybak, V. Pervuznik // *Mechanisms and Machine Science*. – 2023. – V. 124 MMS. – P. 254–263

7. Rybak L.A., Khurtasenko A.V., Pervuznik V.S., Chuev K.V., Malyshev D.I. Optimization of the Design Parameters of a 6-DOF Mobility Platform / L.A. Rybak, A.V. Khurtasenko, V.S. Pervuznik, K.V. Chuev, D.I. Malyshev // *Mechanisms and Machine Science*. – 2023. – V. 134 MMS. –P. 115–124

8. Duyun T., Duyun I., Rybak L., Pervuznik V. Simulation of the structural and force parameters of a robotic platform using co-simulation / T. Duyun, I. Duyun, L. Rybak, V. Pervuznik // *Procedia Computer Science*. – 2022. – V. 213. – P. 720–727

9. Pervuznik V.S., Cherednikov I.I., Malyshev D.I. Simulating cable tension in robotic systems for various conditions of upper and lower extremity rehabilitation / V.S. Pervuznik, I.I. Cherednikov, D.I. Malyshev // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2022. – V. 2176. – No.1: 012031

10. Gaponenko E.V., Malyshev D.I., Kuzmina V.S., Rybak L.A. Geometric Parameters Optimization of Cable-Driven Parallel Robot with a Movable Gripper / E.V. Gaponenko, D.I. Malyshev, V.S. Kuzmina, L.A. Rybak // *Studies in Systems, Decision and Control*. – 2021. - V. 342. – P. 61–71

11. Kuzmina V.S., Malyshev D.I., Gaponenko E.V., Khalapyan S.Y., Rybak L.A. Investigation of possible paths to implement the planar 3RPR robot movement along a predetermined trajectory / V.S. Kuzmina, D.I. Malyshev, E.V. Gaponenko, S.Y. Khalapyan, L.A. Rybak // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2020. – V. 1661. – No. 1: 012117

12. Gaponenko E.V., Anciferov S.I., Kholoshevskaya L.R., Kuzmina V.S. Method of designing robotic complexes with relative manipulation modules / E.V. Gaponenko, S.I. Anciferov, L.R. Kholoshevskaya, V.S. Kuzmina // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2020. – V. 945. –No. 1: 012077

13. Gaponenko E.V., Anciferov S.I., Kuzmina V.S. Cable robot design method using the NX CAD/CAM/CAE system / E.V. Gaponenko, S.I. Anciferov, V.S. Kuzmina // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2020. – V. 905. – No. 1: 012027

14. Khalapyan S.Y., Rybak L.A., Kuzmina, V.S., Ignatov A.D., Popov M.V. The study of the accuracy of the robot movement along a given path considering the workspace boundaries, velocity and inertial properties of the drive / S.Y. Khalapyan, L.A. Rybak, V.S. Kuzmina, A.D. Ignatov, M.V. Popov // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – V. 1582. – No. 1: 012074

15. Anciferov S.I., Gaponenko E.V., Kuzmina V.S. Robotic system development using CAD/CAM/CAE of NX / S.I. Anciferov, E.V. Gaponenko, V.S. Kuzmina // Journal of Physics: Conference Series. - 2019. - P. 082001.

16. Pashchenko V.N., Meleshchenko D.I., Rashoyan G.V., Malyshev D.I., Kuzmina V.S. Decision of the direct position problem of the joint relative manipulation mechanism with five degrees of freedom / V.N. Pashchenko, D.I. Meleshchenko, G.V. Rashoyan, D.I. Malyshev, V.S. Kuzmina // International Journal of Applied Mechanics and Engineering. - 2018. - V. 23. – No. 4. – P. 1025-1033.

17. Rybak L., Gaponenko E., Kuzmina V. Synthesis of optimal discrete controller for robotic vibroprotective system control / L. Rybak, E. Gaponenko, V. Kuzmina // CEUR Workshop Proceedings. - 2017. – P. 489-496.

Патенты

18. Пат. 2802462 Российская Федерация, МПК А 61 Н 1/02, А 63 В 21/005, А 63 В 23/04. Тренажерный комплекс для механотерапии нижних конечностей / А.А. Волошкин, Л.А. Рыбак, В.С. Перевузник, Д.И. Малышев, А.В. Ноздрачева, В.В. Черкасов; заявитель и патентообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова. – № 2023104424; заявл. 28.02.2023; опубл. 29.08.2023, Бюл. № 25

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ

19. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022666742 Российская Федерация. Моделирование конструктивных параметров роботизированной платформы подвижности на основе виртуального прототипа и интерфейса Adams-Python: № 2022665899: заявлено 26.08.2022: опубликовано 06.09.2022 / И.А., Дуюн, Т.А. Дуюн, Л.А. Рыбак, А.В. Хуртасенко, Е.В. Гапоненко, Д.И. Малышев, В.С. Перевузник, А.А. Волошкин, В.В. Черкасов, Д.В. Гаврилов, К.В. Чуев; правообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова. – Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ.

Подписано в печать 22.01.24 г. Заказ № 20. Тираж 100 экз. Печ. л. 1

Формат 60 x 80 1/16. Бумага офсетная. Печать трафаретная.

Отпечатано в типографии Издательства БГТУ им. В.Г. Шухова 308012, г.

Белгород, ул. Костюкова, 46.