

На правах рукописи



Малышев Дмитрий Иванович

**РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ В РЕШЕНИИ ЗАДАЧ АНАЛИЗА
РАБОЧЕГО ПРОСТРАНСТВА И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
МЕХАНИЗМОВ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ**

Специальность: 05.02.18 –
«Теория механизмов и машин»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Белгород – 2022

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время механизмы параллельной структуры находят широкое применение во многих областях промышленности, в том числе в машиностроении, а также в медицине для роботизированной механотерапии и реабилитации конечностей пациентов. Одной из важнейших задач в этой связи является разработка новых методов проектирования, анализа и оптимизация параметров механизмов параллельной структуры.

Для решения задач автоматизированного цифрового проектирования новых типов механизмов различной архитектуры с повышенными функциональными возможностями и характеристиками важное значение имеет повышение производительности решения многих оптимизационных задач, в том числе анализа рабочего пространства, а также выбора и оптимизации параметров. Сложность вычислительных задач, возникающих в процессе проектирования механизмов, обуславливает необходимость разработки новых высокопроизводительных методов для их решения и универсальных подходов. Следовательно, разработка новых высокопроизводительных методов и алгоритмов решения оптимизационных задач является перспективным направлением исследований. В ходе проектирования требуется выбрать конструктивные параметры механизма, исходя из некоторого числа критериев. Одним из них является максимизация объёма рабочей области, которая определяется множеством всех возможных положений рабочего звена механизма с учётом пересечений звеньев и особых положений. Анализ рабочей области механизмов параллельной структуры сложнее, чем механизмов последовательной структуры, особенно если механизм имеет более трех степеней свободы. На данный момент известны различные методы определения рабочей области механизмов параллельной структуры. Однако, как правило, эти методы основаны на геометрических или дискретных алгоритмах, имеющих существенные недостатки. Необходимость получения универсальных и точных методов анализа рабочего пространства с учётом пересечений звеньев и особых положений, а также методов оптимизации параметров механизмов параллельной структуры с использованием рабочего пространства обосновывают актуальность исследований.

Цель работы. Разработка новых высокопроизводительных методов и алгоритмов определения рабочего пространства механизмов параллельной структуры с учетом особых положений и пересечений звеньев, а также оптимизации геометрических параметров для их автоматизированного проектирования.

Задачи научного исследования:

1. Выполнить анализ состояния проблемы и методов ее решения.
2. Разработать детерминированный метод глобальной оптимизации для определения рабочего пространства, повысить его точность и производительность.
3. Синтезировать алгоритмы аппроксимации нелинейных неравенств и

уравнений с использованием интервальных оценок и сеточной аппроксимации для определения рабочей области различных типов механизмов параллельной структуры с учётом особых положений и пересечений звеньев.

4. Разработать алгоритмы многокритериальной оптимизации параметров гибридных механизмов параллельно-последовательной структуры с учётом требуемой рабочей области пассивного последовательного механизма для выполнения требуемых движений активным параллельным механизмом.

5. Разработать программный комплекс для реализации алгоритмов на высокопроизводительных вычислительных системах.

6. Разработать имитационную модель и провести экспериментальные исследования на образце гибридного робота параллельно-последовательной структуры, анализ результатов исследований.

Научная новизна исследования.

1. Разработан метод математического моделирования механизмов параллельной структуры и алгоритм, позволяющий эффективно решать задачи определения рабочей области механизмов различных конфигураций на основе аппроксимации как систем нелинейных неравенств, так и уравнений, описывающих кинематические зависимости, на основе преобразования покрывающих множеств с целью сокращения объём вычислений при обеспечении заданной точности аппроксимации.

2. Разработаны метод кинематического анализа особых положений на основе определителя матрицы Якоби и геометрический метод определения пересечений звеньев, позволяющие эффективно определить зоны рабочей области, свободные от сингулярностей и пересечений, что необходимо учитывать при проектировании механизмов параллельной структуры с целью исключения столкновений звеньев.

3. Разработан метод многокритериальной оптимизации параметров гибридного механизма параллельно-последовательной структуры, состоящего из двух модулей, с ограничением на множество допустимых значений параметров активного механизма параллельной структуры, учитывающим условие обеспечения требуемого рабочего пространства пассивного механизма последовательной структуры и исключения столкновения звеньев с учётом взаимного расположения модулей.

4. Разработаны алгоритмы и универсальный многофункциональный программный комплекс с применением параллельных вычислений, ориентированный на выполнение на современных высокопроизводительных вычислительных системах для реализации разработанных методов определения рабочей области с использованием преобразования покрывающих множеств и оптимизации геометрических параметров гибридного механизма параллельно-последовательной структуры.

Теоретическая значимость работы состоит в разработке высокопроизводительных методов и алгоритмов определения рабочего

пространства и определении параметров плоских и пространственных механизмов параллельной структуры с различным числом степеней свободы, а также гибридного механизма параллельно-последовательной структуры. Для реализации алгоритмов разработан многофункциональный программный комплекс, ориентированный на выполнение на современных высокопроизводительных вычислительных системах.

Практическая значимость работы заключается в том, что синтезирован новый гибридный механизм, выполненный на базе активного 3-PRRR механизма и пассивного RRRR механизма, который может быть использован в медицине для реабилитации нижних конечностей пациентов с нарушениями опорно-двигательного аппарата.

Методы исследования. Поставленные задачи решаются с применением методов теоретической механики, математического моделирования, методов векторной алгебры, вычислительной математики. Для решения задач разрабатывались программные модули на языке программирования C++ с использованием библиотеки интервального анализа Snowgoose и библиотеки параллельных вычислений OpenMP. Для визуализации результатов моделирования использовалось программное обеспечение Blender. Для имитационного моделирования с 3D-моделями использовались программные комплексы Siemens PLM Software NX (модуль Симуляция кинематических механизмов), MATLAB.

Положения, выносимые на защиту:

1. Универсальный высокопроизводительный численный метод определения рабочей области механизмов параллельной структуры с применением методов интервального анализа и разработанного подхода к преобразованию покрывающих множеств в частично упорядоченное множество целых чисел, позволяющий существенно повысить точность и быстродействие обработки рабочего пространства.

2. Метод многокритериальной оптимизации гибридного механизма, состоящего из двух модулей различной структуры с ограничением на множество допустимых значений параметров активного механизма параллельной структуры, учитывающим условие обеспечения требуемого рабочего пространства пассивного механизма последовательной структуры и исключения столкновения звеньев с учётом взаимного расположения модулей.

3. Программный комплекс на языке C++ для определения рабочей области и оптимизации геометрических параметров гибридных механизмов параллельно-последовательной структуры, используя разработанные методы, с применением параллельных вычислений, ориентированный на выполнение в высокопроизводительной вычислительной среде.

4. Экспериментальный образец гибридного механизма для реабилитации нижних конечностей, состоящий из активного механизма параллельной структуры

и пассивного механизма последовательной структуры.

Достоверность результатов основывается на применении известных теоретических положений фундаментальных наук (аналитической механики, теории машин и механизмов, теоретической механики, вычислительной математики и др.). Разработанные математические модели основываются на классических утверждениях и теоремах и не противоречат известным результатам. Для исследования и моделирования полученных уравнений используются апробированные аналитические и численные методы решения. Теоретические результаты подтверждены результатами экспериментальных исследований.

Результаты работы имеют высокий потенциал практического использования, разработанные методы, алгоритмы и программное обеспечение могут быть использованы для автоматизированного проектирования роботов параллельной структуры для различных применений, в том числе в машиностроении и медицине. Работа выполнена в рамках Государственного задания Минобрнауки РФ № FZWN-2020-0017 по теме «Разработка интегрированной интеллектуальной роботизированной системы на основе манипуляторов параллельной и последовательной структуры для аликвотирования биологического материала в биомедицине». Результаты исследований внедрены в учебный процесс кафедры «Технология машиностроения» БГТУ им. В.Г. Шухова.

Личный вклад автора

Малышев Д.И. разработал: метод определения пересечений звеньев с учётом диаметра звеньев, не требующий большого количества итераций в сравнении с методами, предполагающими итеративное определение расстояния между точками, располагающимися на оси звеньев с дискретным шагом; метод преобразования покрывающих множеств рабочего пространства механизмов в частично упорядоченное множество целых чисел; метод оптимизации гибридных механизмов, состоящих из нескольких механизмов, учитывающий их взаимное расположение и условие обеспечения требуемого рабочего пространства.

Апробация работы. Основные результаты доложены на следующих научно-технических конференциях:

- XXV, XXVII, XXVIII, XXIX Международная инновационно-ориентированная конференция молодых ученых и студентов МИКМУС (г. Москва, ИМАШ им. А.А. Благонравова РАН, 2015, 2016, 2017, 2017, 2018);
- XII, XIII Международная конференция по теории машин и механизмов ТММ (Либерец, Чехия, 2016, 2021)
- Вторая Российско-Тихоокеанская конференция по компьютерным технологиям и приложениям RPC (г. Владивосток, 2017).
- IX, X, XI, XII Международная конференция “Оптимизация и Приложения” OPTIMA (Петровац, Черногория, 2018, 2019, 2020, 2021)
- 9-я Международная конференции по вычислительным методам ICSSM (Рим, Италия, 2018)

- 14-я Международная конференции “Мехатронные системы и материалы” MSM (Закопане, Польша, 2018)
- 15-й Мировой конгресс IFTOMM (Краков, Польша, 2019)
- 6-й Международный симпозиум IFTOMM по робототехнике и мехатронике (Тайбэй, Тайвань, 2019)
- Латиноамериканский симпозиум по промышленным и робототехническим системам (Тампико, Мексика, 2019)
- 7-я международная конференция по оптимизации и промышленным приложениям COIA (Баку, Азербайджан, 2020)
- 23-й Симпозиум IFTOMM по проектированию, динамике и управлению роботами ROMANSY (Токио, Япония, 2020)
- 14-й Международный симпозиум «Интеллектуальные Системы» INTELS (Москва, 2020)
- 29-я Международная конференция по робототехнике в регионе Альпы-Адрия-Дунай RAAD (Футуроскоп-Пуатье, Франция, 2021)
- 5-й Международный симпозиум по проектированию механизмов в робототехнике MEDER (Футуроскоп-Пуатье, Франция, 2021)

Публикации. По результатам диссертации опубликована 25 научных работ, в том числе 2 статьи в журналах из списка ВАК, 20 публикаций, входящих в базы Scopus и Web of Science и 3 – в других изданиях.

Структура диссертации. Диссертация состоит из: введения, четырех глав, основных результатов и выводов, списка использованной литературы и одного приложения.

Диссертация включает: 95 рисунков; 164 источника использованной литературы; 1 приложение; общий объем диссертации – 173 стр.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена общая характеристика работы: определена её актуальность, сформулированы цель работы и решаемые в диссертационном исследовании задачи, определена научная новизна работы и показана её практическая значимость. Представлены сведения об апробации работы и основных публикациях.

В первой главе представлен анализ состояния исследований в области механизмов параллельной структуры (МПС), используемых в машиностроении, а также в медицине для реабилитации пациентов. Значительный вклад в развитие МПС внесли такие исследователи, как В.А. Глазунов, J.-P. Merlet, С.М. Gosselin, М. Сессарелли, V. Arakelian. Значительным преимуществом таких механизмов, применяемых в машиностроении, в отличие от многокоординатных последовательных систем является компенсирование погрешности, в результате чего точность может достигать долей микрона. Повышенная жесткость и несущая способность МПС обеспечивают жесткое соединение штанг и отсутствие «мертвого хода». За счет своих достоинств такие механизмы находят свое

применение в особо точных станках и различном технологическом оборудовании. Однако, большая часть производимого оборудования находится на этапе экспериментальной проверки и доработки. В связи с этим актуальной задачей является создание новых методов анализа и оптимизации геометрических параметров для проектирования механизмов.

В ходе обзора МПС, применяемых в медицине для реабилитации конечностей пациентов, выявлены как их преимущества, так и недостатки. Некоторые из них не позволяют проводить реабилитацию нижних конечностей пациентов на ранних этапах реабилитации. Другие из них в качестве физиотерапевтических движений обеспечивают только сгибание-разгибание в коленном суставе, однако не обеспечивают приведение-отведение конечности в тазобедренном суставе, что является существенным недостатком. В связи с этим важной задачей является проектирование новых типов механизмов, обеспечивающих эффективный процесс реабилитации.

Выполнен анализ существующих методов определения рабочей области МПС. Как правило, эти методы основаны на геометрических или дискретных алгоритмах. Для некоторых механизмов возможно относительно простое определение рабочей области, что отражено в работах R. Clavel и R. Di Gregorio для механизма Дельта, R. Alizade, F. Vulca и V. Arun - для сферических механизмов, M. Husty - для плоскопараллельных механизмов. Задача определения рабочей области для различных типов механизмов параллельной структуры с применением дискретных и геометрических методов рассматривалась во многих работах учёных ИМАШ РАН под руководством В.А. Глазунова. Геометрические методы дают точное описание, но применимы лишь к простейшим механизмам. К недостаткам можно также отнести трудность учёта всех ограничений, а полученный результат трудно применить при планировании траектории. Полученные с использованием дискретных методов результаты легко применить к планированию траектории, однако процесс вычисления трудоёмок, а также имеется ряд недостатков. Точность границы зависит от шага дискретизации, который используется для создания сетки. Возникают трудности, если рабочая область имеет пустоты или же границы могут иметь большое количество узлов. В связи с этим, актуальным является разработка новых универсальных и высокопроизводительных методов анализа рабочего пространства МПС, позволяющих учесть все ограничения с заданной точностью аппроксимации.

Также в главе выполнен анализ исследований в области детерминированных и эвристических методов глобальной оптимизации. Эти методы могут применяться для решения задач оптимизации параметров механизмов и определения их рабочего пространства. Исследования в этой области рассмотрены в трудах таких учёных, как Ю.Г. Евтушенко, М.А. Потапов, А.В. Лотов, В.А. Бушенков, Г.К. Каменев, Р.Б. Статников, K. Deb, M. Ehrgott, E. Zitzler, H.P. Benson, A. Pascoletti, P. Serafini, K. Miettinen и другие. Как показывает проведенный анализ, исследования в области оптимизации связаны в основном с применением детерминированных

методов, которые требуют значительных вычислительных ресурсов, в особенности применительно к сложным объектам, которыми являются МПС. В связи с этим особую актуальность приобретает создание новых высокопроизводительных методов и подходов решения оптимизационных задач.

Во второй главе рассматриваются разработанные методы и алгоритмы, связанные с повышением производительности детерминированных методов оптимизации, позволяющие в пределах заданной точности аппроксимации существенно снизить объём данных, требуемых для выполнения вычислительных процедур, тем самым повысить их быстродействие. Алгоритмы апробированы на плоских и пространственных МПС.

Ограничения рабочей области механизма можно представить в виде системы нелинейных неравенств или уравнений. Рабочая область в таком случае может быть описана множеством решений этой системы. Синтезированы алгоритмы аппроксимации множества решений систем нелинейных неравенств и уравнений.

1. Система уравнений.

Рассмотрим систему нелинейных уравнений

$$\begin{cases} g_1(x) = 0, \\ \dots \\ g_m(x) = 0 \\ a_i \leq x_i \leq b_i, i = 1, \dots, n. \end{cases} \quad (1)$$

Интервалы переменных x_i системы уравнений заданы в виде n -мерного параллелепипеда. Начальный параллелепипед Q , который включает в себя весь набор решений X , определяется ограничениями интервалов $a_i \leq x_i \leq b_i, i = 1, \dots, n$. Покрытие представляет собой множество параллелепипедов с диаметром, меньшим или равным заданной точности аппроксимации δ . Рассмотрим произвольный параллелепипед B . Пусть $m(B) = \max_{i=1, \dots, m} \min_{x \in B} g_i(x)$ и $M(B) = \min_{i=1, \dots, m} \max_{x \in B} g_i(x)$. Если $m(B) > 0$ или $M(B) < 0$, то B не содержит возможных точек для системы (1). Такие параллелепипеды исключаются. Если параллелепипед не может быть исключён, он разделяется на два меньших, если его диаметр не меньше заданной точности (рисунок 1).

2. Система неравенств.

Рассмотрим систему нелинейных неравенств, полученную на основе системы (1). Алгоритм для аппроксимации множества решений системы неравенств аналогичен алгоритму для системы (1). Различие состоит в условии на исключение параллелепипедов, а также в добавлении условия для внесения параллелепипеда в покрывающее множество рабочей области. Пусть $m(B) = \max_{i=1, \dots, m} \min_{x \in B} g_i(x)$ и $M(B) = \max_{i=1, \dots, m} \max_{x \in B} g_i(x)$. Если $m(B) > 0$ то B не содержит возможных точек для системы неравенств. Предложенный алгоритм исключает такие параллелепипеды. Если $M(B) \leq 0$, то каждая точка параллелепипеда является возможным решением. Поэтому он может быть добавлен к покрытию как внутренний параллелепипед.

Разработанный подход является универсальным и позволяет учесть ограничения, заданные в виде как систем нелинейных неравенств, или уравнений, так и смешанных систем, а также использовать инструменты интервального анализа. Тем не менее, получение и обработка покрывающего множества рабочей области требует значительных вычислительных ресурсов для высокой точности аппроксимации. Для сокращения объема данных, описывающих покрывающее множество, при сохранении гарантированной точности предложен подход к преобразованию покрывающего множества в частично упорядоченное множество целых чисел. Основу подхода составляют: уменьшение количества параллелепипедов и переход из пространства действительных в пространство целых чисел. На рисунке 2 слева показана рабочая область до преобразования, справа – после. Как видно из рисунка, выполнение преобразования позволяет значительно сократить количество параллелепипедов в рамках заданной точности.

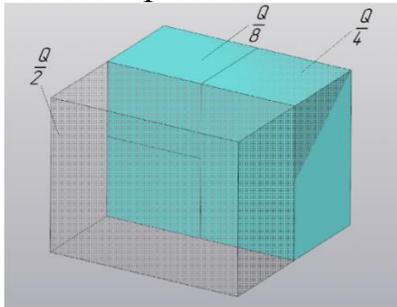


Рисунок 1 – Деление исходного параллелепипеда Q

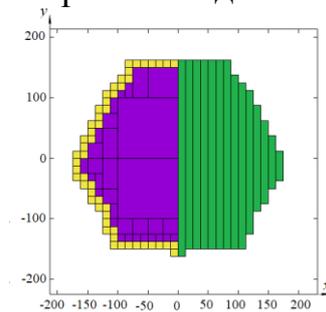


Рисунок 2 – Сравнение рабочих областей с учётом преобразования

Важной задачей при проектировании МПС является определение особых положений и пересечений звеньев с целью исключения их из рабочей области. Эти вопросы рассмотрены также в главе 2. Использован метод определения особых положений, предложенный С. Gosselin, который основан на анализе матрицы Якоби J_A . Условие возникновения особых положений соответствует нулевому значению определителя матрицы Якоби $\det(J_A) = 0$. Изменение знака $\det(J_A)$ предполагает прохождение механизма через особое положение, следовательно, при этом необходимо учитывать условие знакопостоянства определителя $\det(J_A)$.

В главе 2 рассмотрен анализ пересечений звеньев механизма. Рассмотрены две группы пересечений: 1) Пересечения при малых значениях углов между звеньями, 2) Пересечения звеньев, не соединённых между собой.

Первую группу пересечений определяем, учитывая ограничения на углы поворота в шарнирах. Для определения второй группы пересечений разработан геометрический метод, основанный на определении минимального расстояния между отрезками, проведёнными между центрами шарниров каждого из звеньев. Он состоит в следующем. Представим звенья в виде сфероцилиндров. Пусть A_1A_2 и A_3A_4 – отрезки, соединяющие центры шарниров звеньев (рисунок 3, а).

В этом случае, условие отсутствия пересечений записано как

$$r_{link1} + r_{link2} < \sqrt{(x')^2 + (y')^2 + (z')^2}, \quad (2)$$

где r_{link1}, r_{link2} – радиусы звеньев, x', y', z' – расстояние между ближайшими точками отрезков по каждой из осей и определяются как

$$x' = \begin{cases} \min_{i \in 1,2} x_{Ai} - \max_{j \in 3,4} x_{Aj} & \text{if } \min_{i \in 1,2} x_{Ai} > \max_{i \in 1,2} x_{Ai}, \\ \min_{i \in 3,4} x_{Aj} - \max_{i \in 1,2} x_{Ai} & \text{if } \min_{i \in 3,4} x_{Aj} > \max_{i \in 1,2} x_{Ai}, \\ 0 & \text{if } \left[\min_{i \in 1,2} x_{Ai}; \max_{i \in 1,2} x_{Ai} \right] \cap \left[\min_{i \in 3,4} x_{Aj}; \max_{j \in 3,4} x_{Aj} \right]. \end{cases}$$

Значения y' и z' определяются аналогично. В случае, если условие (2) не выполняется, проводится следующая проверка на отсутствие пересечений, когда минимальное расстояние u между отрезками A_1A_2 и A_3A_4 больше, чем сумма радиусов звеньев $r_{link1} + r_{link2}$.

Рассмотрим 2 случая взаимного расположения звеньев.

Случай 1. Звенья параллельны. Определим минимальное расстояние между отрезками, повернув отрезки относительно точки A_1 так, чтобы они стали перпендикулярны плоскости YOZ. Обозначим точки A_2, A_3, A_4 после поворота как A_{12}, A_{13}, A_{14} соответственно. Расстояние между отрезками определяется как

$$u = \sqrt{u_1^2 + u_2^2}, \quad (3)$$

где u_1 – расстояние между отрезками A_1A_{12} и $A_{13}A_{14}$ в проекции на плоскость YOZ, u_2 – расстояние между ближайшими точками отрезков по оси X.

На рисунке 3, б представлен пример проверки для 1-го случая пересечения звеньев, когда $u_1 > 0$ и $u_2 > 0$, при этом $u > r_{link1} + r_{link2}$. В этом случае пересечение отсутствует.

Случай 2. Звенья не параллельны. Построим вспомогательную плоскость, в которой будет лежать отрезок A_3A_4 , отрезок A_1A_2 параллелен этой плоскости.

В этом случае расстояние между отрезками определяем по формуле (3), где u_1 – расстояние между отрезком A_1A_2 и вспомогательной плоскостью, u_2 – расстояние между ближайшими точками отрезков A_3A_4 и проекции $A_{11}A_{12}$ отрезка A_1A_2 на вспомогательную плоскость.

Для определения u_1 вычислим вектор нормали $N = [N_x \quad N_y \quad N_z]^T$

Определим расстояние u_1

$$u_1 = \sqrt{(N_x k)^2 + (N_y k)^2 + (N_z k)^2},$$

$$\text{где } k = \frac{N_x(x_{A1} - x_{A3}) + N_y(y_{A1} - y_{A3}) + N_z(z_{A1} - z_{A3})}{x_{A1}N_x + y_{A1}N_y + z_{A1}N_z}.$$

Для определения u_2 повернём вспомогательную плоскость вокруг точки A_{11} , которая является проекцией точки A_1 на вспомогательную плоскость, таким образом, чтобы вспомогательная плоскость стала параллельна плоскости YOZ. Обозначим точки A_3, A_4 и проекцию точки A_2 на вспомогательную плоскость после поворота как A_{13}, A_{14} и A_{12} соответственно. В результате определение u_2 сводится к задаче вычисления расстояния между ближайшими точками отрезков $A_{11}A_{12}$ и $A_{13}A_{14}$ на двумерной плоскости.

На рисунке 3, в представлен пример проверки для второго случая пересечения

звеньев, $u_2 > 0$, то есть отрезки не пересекаются в проекции, однако $u < r_{link1} + r_{link2}$, соответственно отрезки пересекаются.

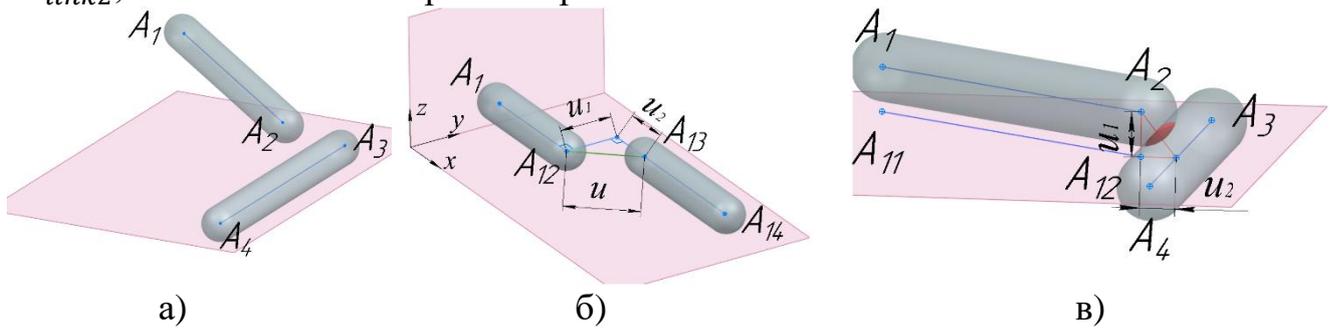


Рисунок 3 - Проверка пересечения звеньев.

Рассмотренный метод учитывает диаметр звеньев, а также не требует большого количества итераций в сравнении с методами, предполагающими итеративное определение расстояния между точками, располагающимися на оси звеньев с дискретным шагом. Синтезированный алгоритм определения рабочей области с учетом особых положений и пересечений звеньев апробирован для плоских механизмов DexTAR и 3-RPS. Пример полученной рабочей области механизма 3-RPS показан на рисунке 4.

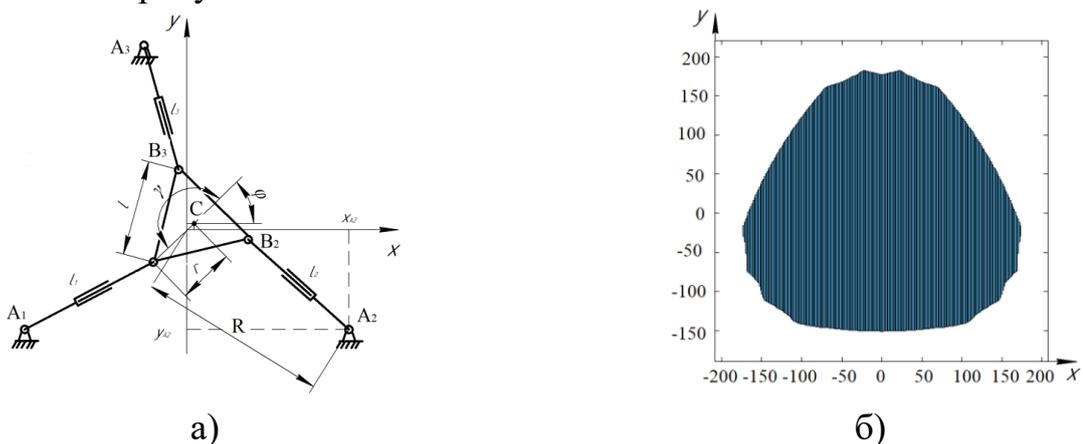


Рисунок 4 – 3-RPS механизм: а) структурная схема, б) рабочая область

Во второй главе рассмотрено также применение разработанных методов для решения задачи анализа рабочей области пространственных механизмов. На рисунке 5, а показана структурная схема механизма-трипода. Исследовано изменение рабочей области трипода при различных фиксированных углах ориентации выходного звена ψ вокруг оси X и θ вокруг оси Y. Рабочие области являются симметричными при углах $\psi = -60^\circ$, $\psi = 60^\circ$ и при углах $\psi = -30^\circ$, $\psi = 30^\circ$ (рисунок 5, б). При увеличении или уменьшении угла ψ габариты рабочей области уменьшаются, увеличивается ее кривизна и габаритный размер по оси Y. Исследованы изменения рабочей области при различных углах ориентации θ . Рабочая область достигает максимальных размеров по оси X при $\theta = -60^\circ$, по оси Y при $\theta = 60^\circ$, по оси Z при $\theta = 30^\circ$. При изменении угла θ от -60° до 60° уменьшается кривизна рабочей области.

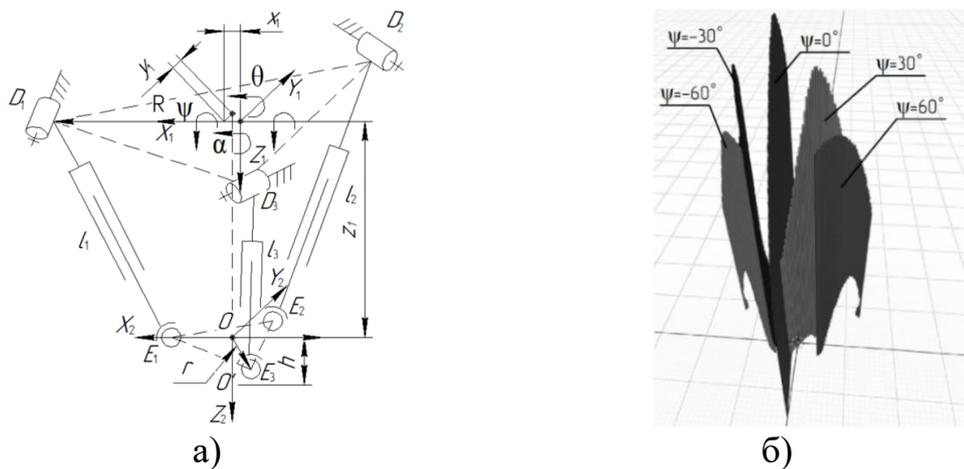


Рисунок 5 – Механизм-трипод: а) структурная схема, б) рабочие области трипода при различных углах ориентации ψ

Рассмотрено влияние пересечений звеньев на характеристики рабочей области с учетом ограничений на углы поворота выходного звена. Результаты моделирования показали, что для диапазонов углов $\theta \in [-90^\circ; 90^\circ]$ и $\psi \in [-90^\circ; 90^\circ]$ пересечения звеньев отсутствуют. Увеличение диапазонов углов приводит к возникновению пересечений. При этом объём увеличивается незначительно. На рисунке 6 показаны некоторые случаи пересечений.

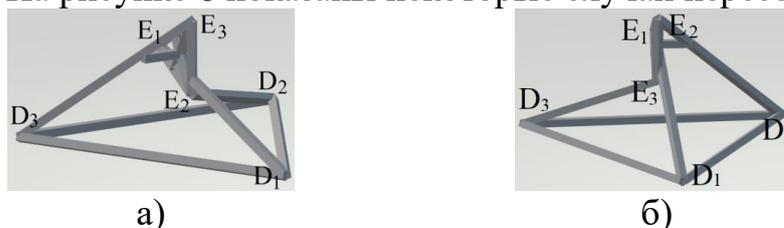


Рисунок 6 – Примеры пересечений звеньев для диапазона углов θ и $\psi \pm 95^\circ$

Выполнен анализ особых положений механизма Delta (рисунок 7). Для этого было учтено условие знакопостоянства определителя матрицы Якоби. Для этого механизма существует неоднозначность решения обратной задачи кинематики, когда для одних и тех же координат точки Р, располагающейся в центре подвижной платформы, существует два возможных угла поворота для каждого приводного вращательного шарнира (рисунок 8).

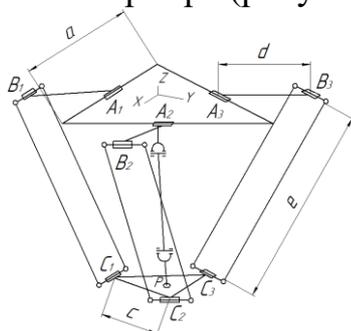


Рисунок 7 – Структурная схема Дельта-механизма

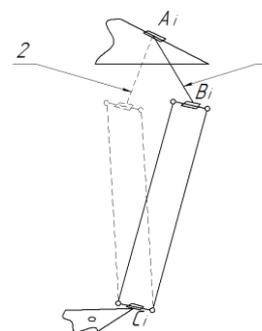


Рисунок 8 – Возможные положения цепи

Построены рабочие области с учетом пересечений звеньев и особых положений для различных конфигураций Дельта-механизма, связанных с неоднозначностью обратной задачи кинематики (рисунок 9). Первая конфигурация соответствует решению обратной задачи кинематики, соответствующему положению 1 для всех кинематических цепей. Вторая конфигурация предполагает решение, соответствующее положению 1 для двух цепей и положению 2 для третьей.



Рисунок 9 – Рабочая область механизма для конфигурации: а) 1, б) 2

На рисунке 10 показаны некоторые из возникающих пересечений звеньев.

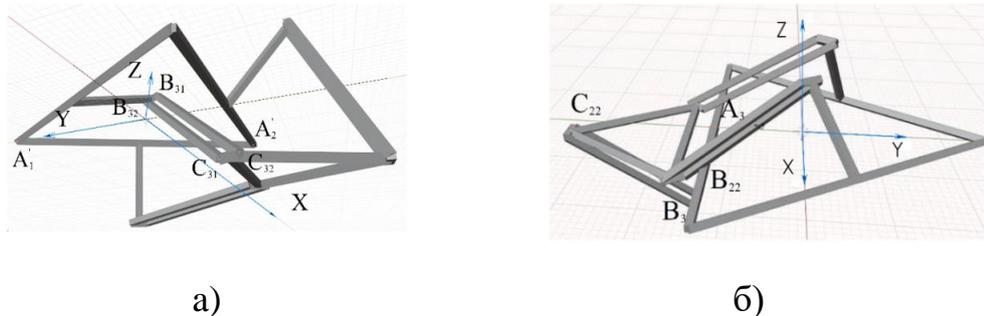


Рисунок 10 – Примеры выявленных пересечений звеньев: а) звеньев $B_{31}C_{31}$ и $B_{32}C_{32}$ с неподвижной платформой, б) звена A_2B_2 со звеном $B_{22}C_{22}$

Аналогичным образом выполнен анализ 3-PRRR механизма (рисунок 11). 3-PRRR механизм также имеет неоднозначность, связанную с различными положениями кинематических цепей (рисунок 12).

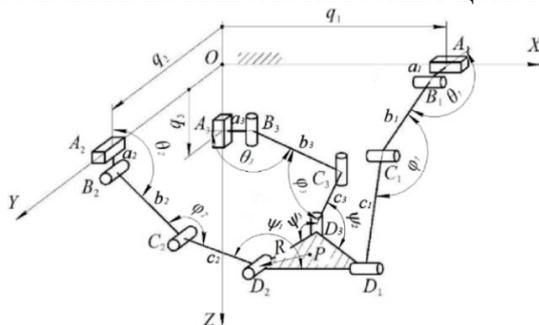


Рисунок 11 – Структурная схема 3-PRRR механизма

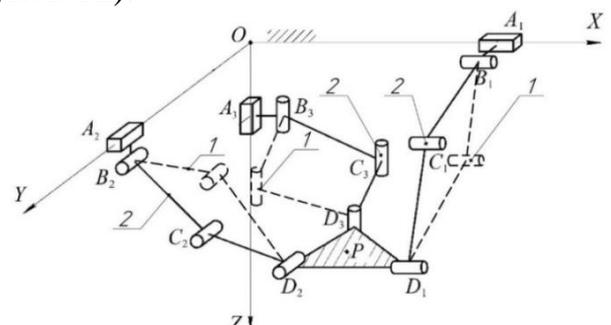
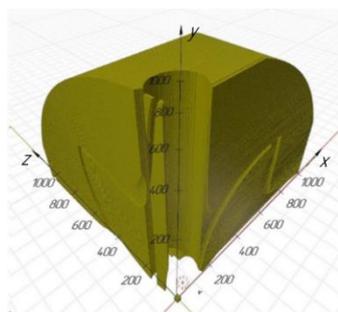
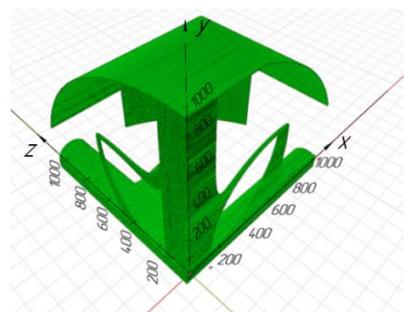


Рисунок 12 – Неоднозначность задачи определения координат точек C_i

Выбрана конфигурация 3-PRRR механизма, при которой объём областей пересечений минимален (все кинематические цепи в положении 2). Рабочая область и области пересечений для выбранной конфигурации показаны на рисунке 13.



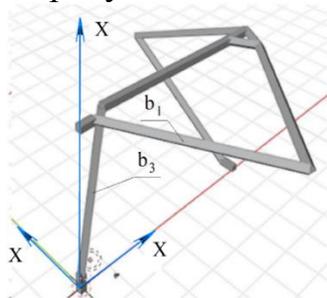
а)



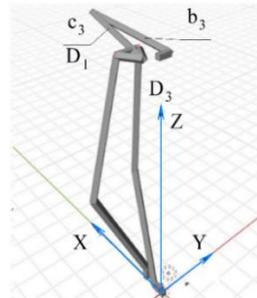
б)

Рисунок 13 – Рабочая область 3-PRRR механизма: а) рабочая область после исключения областей пересечений, б) области пересечений

Выполнена визуализация положения звеньев, при которых происходит их пересечение. На рисунке 14 показаны некоторые из возникающих пересечений.



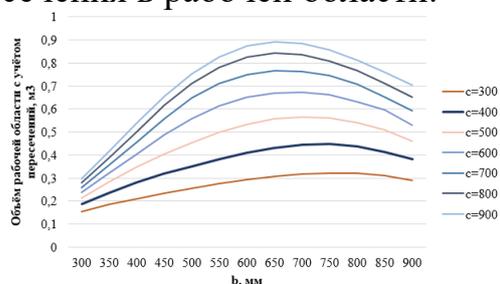
а)



б)

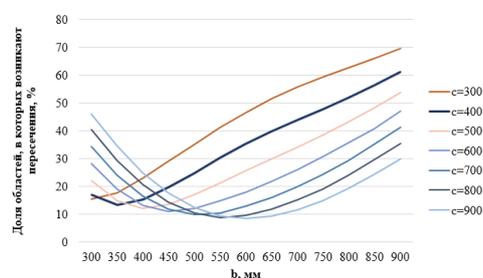
Рисунок 14 – Примеры выявленных пересечения звеньев: а) звена b_1 со звеном b_3 , б) звена c_3 с подвижной платформой

Выполнен анализ зависимости объёма рабочей области от изменения длины звена b для фиксированных значений радиуса подвижно платформы $R = 50$ мм и диапазонов длин приводных координат $q = 1000$ мм. Результаты показаны на рисунке 15. Максимальная рабочая область достигнута при $b = 676$ мм, $c = 678$ мм, $R = 50$ мм. Для такого соотношения размеров общий объём рабочей области составляет 1.0065 м^3 , из них 0.9198 м^3 область без пересечения звеньев. На рисунке 16 показана зависимость доли областей, в которых возникают пересечения в общем объёме рабочей области в зависимости от длин звена b . На графиках видно, что при малых и больших значениях длин звеньев увеличивается доля областей пересечения в рабочей области.



а)

Рисунок 15 – Зависимость объёма рабочей области от длины b



б)

Рисунок 16 – Зависимость отношения областей от длины b

В результате анализа можно сделать вывод, что на форму и размеры рабочей области МПС существенное влияние оказывают ограничения, связанные с наличием особых положений и пересечений звеньев. В зависимости от размеров и конфигураций механизмов области особых положений и пересечений звеньев могут составлять более половины рабочего пространства механизма, что необходимо учитывать при их проектировании.

В третьей главе рассмотрены вопросы оптимизации геометрических параметров гибридного механизма для реабилитации нижних конечностей с целью обеспечения требуемой рабочей области. В состав гибридного механизма входит активный 3-PRRR механизм параллельной структуры и пассивный RRRR механизм для поддержания ноги пациента (рисунок 17). Активный 3-PRRR механизм обеспечивает требуемые физиотерапевтические движения, а пассивный RRRR механизм обеспечивает требуемые для реабилитации углы поворота суставов конечностей. На рисунке 18 приведена структурная схема механизма. В шарнире E пассивного механизма обеспечивается два движения тазобедренного сустава: вращение в вертикальной (сагиттальной) плоскости на угол α и отведение ноги на угол 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 . Согласно медицинским рекомендациям необходимо обеспечить углы поворотов в суставах при имитации ходьбы в следующих диапазонах: $\alpha \in [-20^\circ, 10^\circ]$, $\theta \in [120^\circ, 180^\circ]$, $\psi \in [0^\circ, 25^\circ]$.

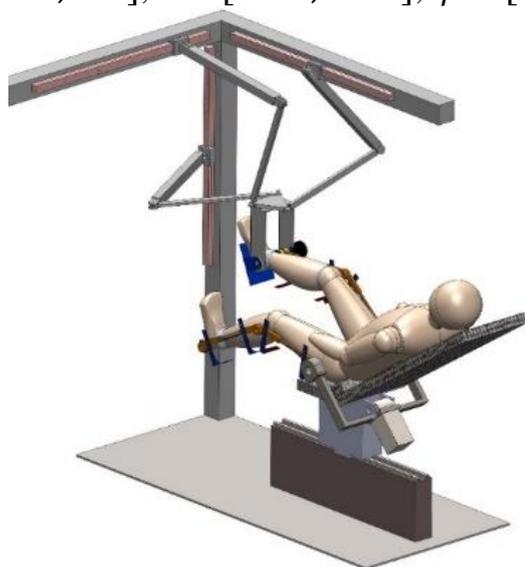


Рисунок 17 – 3D модель

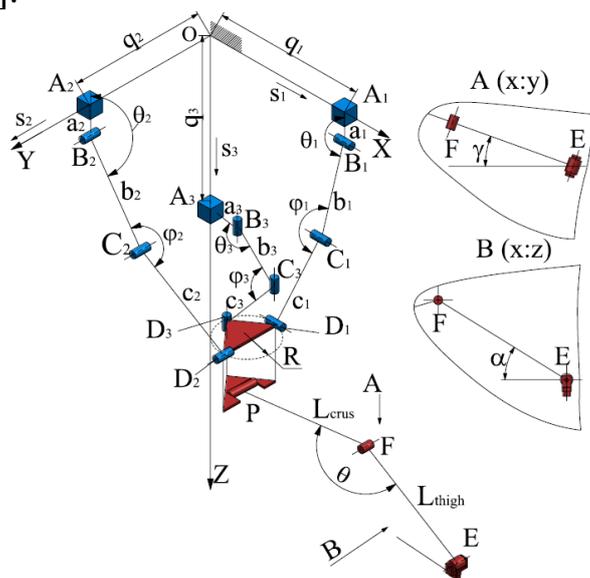


Рисунок 18 – Структурная схема

Оптимизационная задача с целью обеспечения компактности конструкции заключается в определении минимально возможных параметров механизма: изменения длин штанг активного механизма (обобщённые координаты q_i) и длин звеньев b_i и c_i . Так как подвижная платформа P для закрепления стопы пациента является выходным звеном как активного, так и пассивного механизма, то возможные положения платформы P определяются требуемыми для реабилитации

углами. При этом размеры звеньев должны выбираться с учетом достижимости всех найденных положений и взаимного расположения механизмов. На первоначальном этапе определялась рабочая область пассивного RRRR механизма для обеспечения требуемых углов. На втором этапе выполнялась оптимизация параметров активного механизма. Выбраны два критерия оптимизации. В качестве первого критерия выбрана сумма длин звеньев $b_i + c_i + q_i, i \in 1, 3$. Размеры a_i и R приняты постоянными. Критерий оптимизации k_1 записан в виде

$$k_1 = \sum_{i=1}^3 (b_i + c_i + q_i). \quad (4)$$

При выборе второго критерия с учетом обеспечения необходимой прочности учитывался тот факт, что максимальные нагрузки возникают в кинематической цепи $A_3B_3C_3D_3$ и возрастают с увеличением размеров b_3 и c_3 . Критерий оптимизации k_2 имеет вид

$$k_2 = b_3 + c_3 \quad (5)$$

Блок-схема, иллюстрирующая процесс оптимизации геометрических параметров, показана на рисунке 19.

Для выбора оптимального взаимного расположения механизмов при различных параметрах активного механизма использован метод поиска восхождением к вершине (рисунок 20). Для каждого из сочетаний параметров определено такое взаимное расположение механизмов, при котором число параллелепипедов из покрывающего множества RRRR механизма, не входящих в рабочую область активного 3-PRRR механизма, является минимальным.

Для реализации алгоритма оптимизации разработана программа на языке C++. Оптимизация выполнялась для следующих размеров звеньев: $a = 100$ мм, $R = 115$ мм, $\varphi_{min} = \theta_{min} = \psi_{min} = 10^\circ$, $\varphi_{max} = \theta_{max} = \psi_{max} = 170^\circ$, $D_{link} = 20$ мм. Диапазоны изменения параметров оптимизации: $b_i \in [50; 1050]$, $c_i \in [50; 1050]$, $q_1 \in [383; 1383]$, $q_2 \in [450; 1450]$, $q_3 \in [759; 1759]$. В результате получено множество Парето оптимальных решений для параметров, соответствующих пяти различным конфигурациям размеров активного механизма. Рисунок 21 иллюстрирует полученные результаты: рабочая область пассивного механизма полностью входит в рабочую область активного механизма.

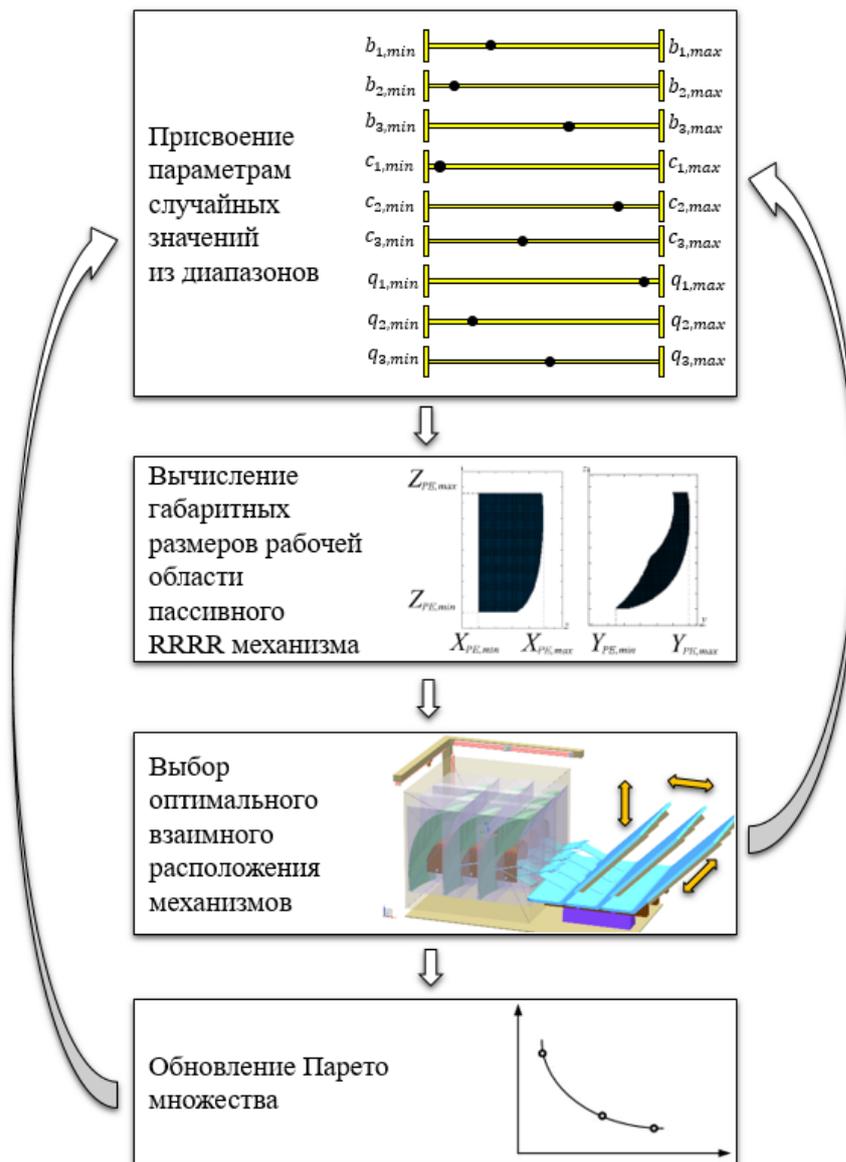


Рисунок 19 – Блок-схема алгоритма оптимизации

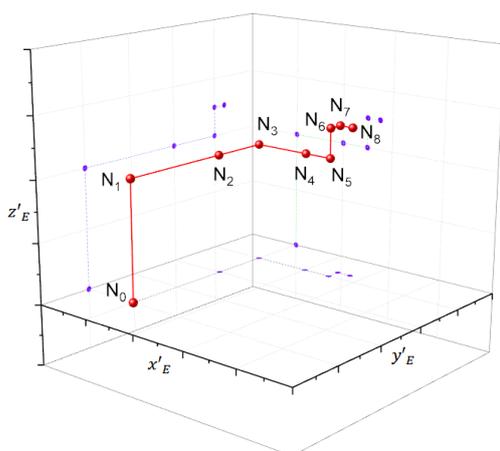


Рисунок 20 – Поиск восхождением к вершине

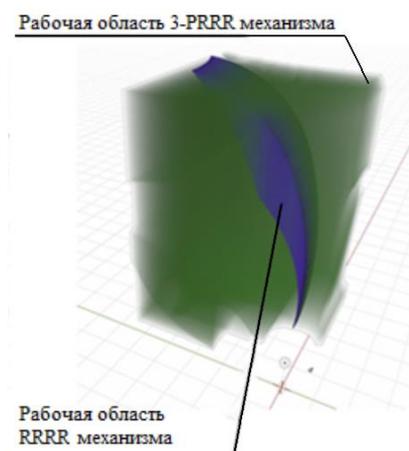


Рисунок 21 – Рабочие области механизмов

В четвертой главе рассмотрена имитационная модель гибридного механизма и приведены результаты экспериментальных исследований. Исследованы пять конфигураций механизма, согласно полученному множеству Парето в 3 главе. Для построения имитационной модели и выбора оптимальной конфигурации из пяти введен общий критерий $k = ak_1 + k_2$, где a – коэффициент, учитывающий отношение двух критериев (4) и (5).

На рисунке 22 приведён график зависимости значения общего критерия от коэффициента a . Из рисунка 22, а видно, что для диапазона коэффициента $a \in [0.5; 10]$ общий критерий для пятой конфигурации значительно уступает остальным четырём критериям. На рисунке 22, б приведена зависимость разницы общего критерия и средней арифметической общих критериев первых четырёх конфигураций от коэффициента a . Из графика видно, что минимальное значение общего коэффициента для диапазона коэффициента $a \in [0.5; 7]$ соответствует первой конфигурации.

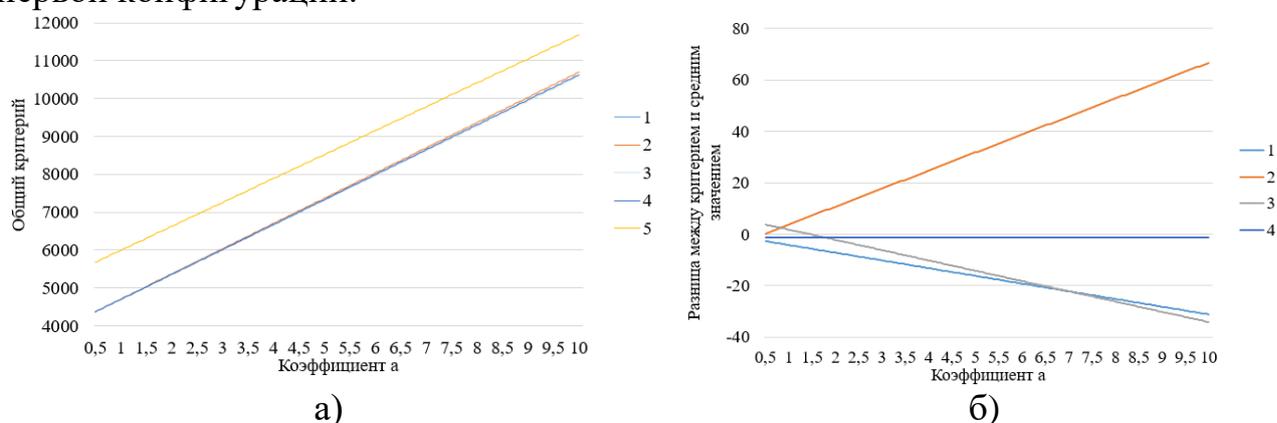


Рисунок 22 – Зависимость значения общего критерия от коэффициента a

Выполнено сопоставление результатов имитационного и численного моделирования при определении рабочей области. Получены габаритные размеры рабочей области активного механизма на имитационной модели. Они составили 845 мм по оси X, 463 мм по оси Y и 828 мм по оси Z. Погрешность составила 4,5%, 2,9 % и 3,9 % по осям X, Y, Z соответственно. На имитационной модели проверялись положения механизмов, при которых возникают пересечения звеньев. Результаты исследований полностью соответствуют результатам математического моделирования.

Выполнена симуляция процесса перемещения ноги пациента в соответствии с траекторией движения при имитации походки. Симуляция выполнена для различных углов отведения ноги пациента в тазобедренном суставе (рисунок 23). Взаимное расположение механизмов и геометрические размеры активного 3-PRRR механизма полностью обеспечивают требуемые движения. На основе анализа имитационной модели разработан и изготовлен экспериментальный образец гибридного механизма (рисунок 24), который состоит из рамы с закрепленными на ней тремя шарико-винтовыми парами, приводимыми в движение сервомоторами, трех линейных направляющих с каретками, платформы и трёх кинематических

цепей.

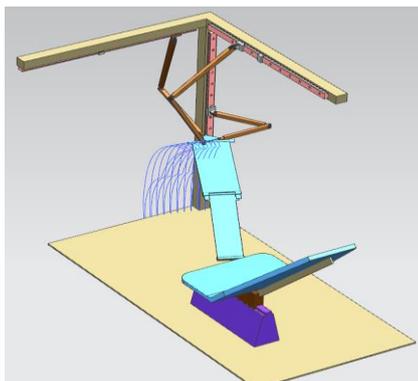
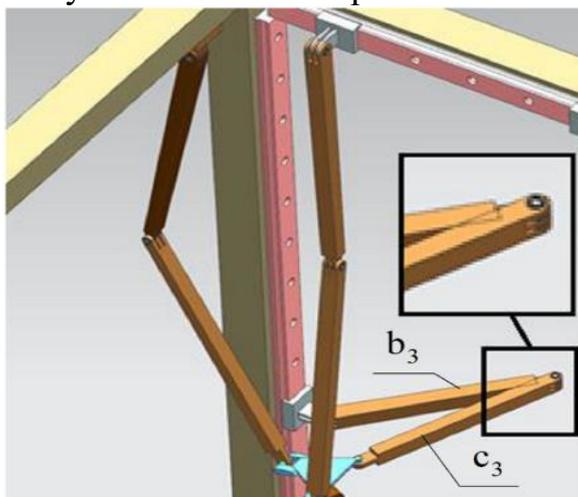


Рисунок 23 – Симуляционная модель



Рисунок 24 – Экспериментальный образец

В конструкцию экспериментального образца с учетом результатов математического моделирования внесены изменения, которые позволили избежать пересечения звеньев b_i и c_i . Крепления штанг b_i и c_i между собой производятся через соединитель с углом в 90° , благодаря чему звено может совершать перемещения в диапазоне от 0 до 300° без пересечения штанг между собой. На рисунке 25 показано сравнение положения звеньев b_3 и c_3 в имитационной модели (рисунок 25, а) и в экспериментальном образце с соединителем (рисунок 25, б). В первом случае возникает пересечение звеньев b_3 и c_3 , во втором оно отсутствует.



а)



б)

Рисунок 25 – Сравнение пересечения на имитационной модели и экспериментальном образце

Для исключения пересечений звеньев c_i между собой и с подвижной платформой (рисунок 26) на экспериментальном образце изменены крепления штанг к подвижной платформе (рисунок 27). Закрепление в точке D_2 производится снизу платформы, а крепления точек D_1 и D_3 вынесено на 35 мм от платформы, что позволило избежать пересечения звеньев с платформой.

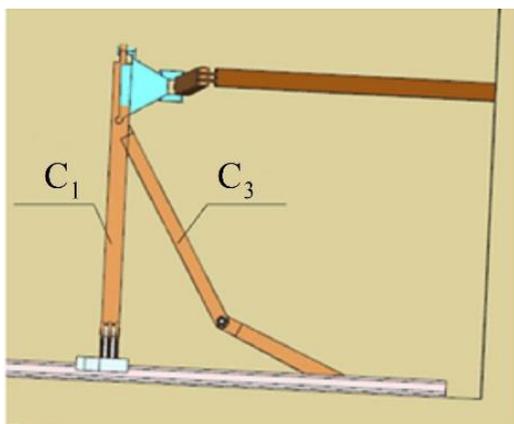


Рисунок 26 – Пересечение звеньев c_1 со звеном c_3 и подвижной платформой

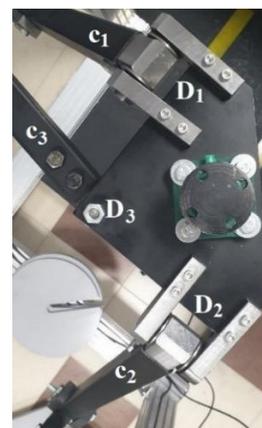


Рисунок 27 – Крепление звеньев c_i к платформе на образце

На экспериментальном образце выполнено исследование, состоящее в отработке траектории реабилитации в сагиттальной плоскости (рисунок 28).



Рисунок 28 – Экспериментальные исследования

На рисунке 29 показано изменение значения приводных координат q_i в процессе реабилитации. На рисунке 30 показан график изменения углов в тазобедренном и коленном суставах пациента согласно расчётным и экспериментальным данным.

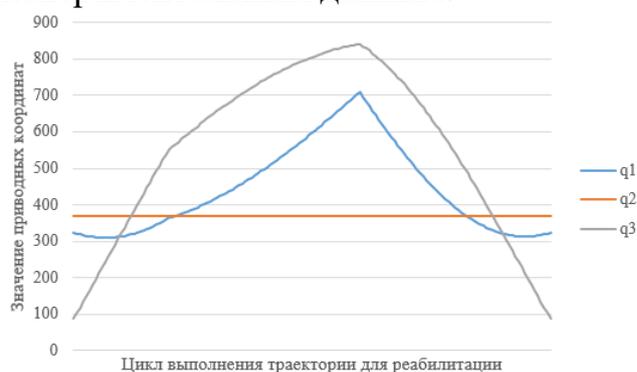


Рисунок 29 – Зависимость координат q_i от времени

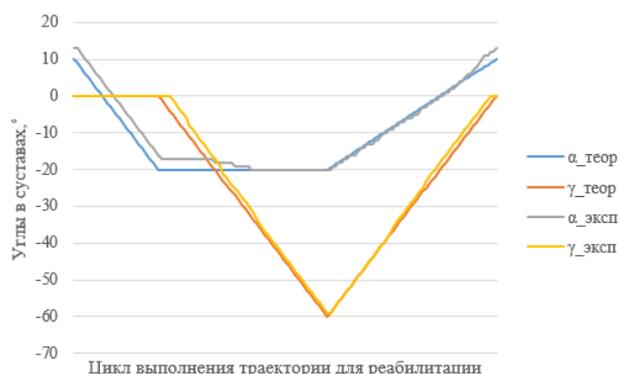


Рисунок 30 – Зависимость углов в суставах пациента от времени

На рисунке 31 приведён график изменения ошибки, состоящей в расхождении между требуемыми углами в суставах пациента и экспериментальными. Синим цветом показана ошибка в тазобедренном суставе, оранжевым – коленном.

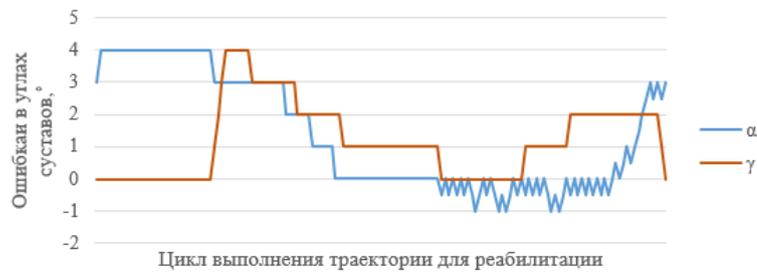


Рисунок 31 – Расхождение требуемых и экспериментальных значений углов

Максимальное расхождение в значении углов в суставах составило 4° , среднее расхождение составило $1,4^\circ$. Расхождение является следствием особенностей суставов пациента и конструкции, которые затруднительно учесть в расчётах. Однако, их можно компенсировать за счёт использования датчиков обратной связи и измерения углов в суставах пациента и коррекции ошибки в системе управления.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В работе получены следующие результаты:

1. Построены математические модели для плоских и пространственных МПС, описывающие ограничения, накладываемые на рабочее пространство механизмов, заданные как в виде систем нелинейных неравенств или уравнений, так и смешанных систем, с учётом особых положений и пересечений звеньев.
2. Разработаны высокопроизводительные методы и алгоритмы определения рабочей области с применением методов интервального анализа и разработанного подхода к преобразованию покрывающих множеств в частично упорядоченное множество целых чисел, позволяющие существенно повысить точность и быстродействие вычислений.
3. Разработан геометрический метод определения пересечений звеньев, основанный на определении минимального расстояния между отрезками, проведёнными между центрами шарниров с учётом радиусов звеньев, представленных в виде сфероцилиндров.
4. Разработан программный комплекс для реализации разработанных алгоритмов на языке программирования C++, позволяющий выполнять высокопроизводительные вычисления за счёт многопоточности, а также экспортировать полученные объёмные модели механизмов при определённых положениях и рабочего пространства в универсальный формат 3D-моделей STL.
5. Выполнена апробация методов на различных типах плоских и пространственных МПС. Выполнен анализ объёма рабочей области для конфигураций пространственных механизмов Дельта и 3-PRRR с учетом неоднозначности решений обратной задачи кинематики.
6. Исследовано влияние пересечений и особых положений на форму и объём рабочей области при изменении длин звеньев пространственных МПС.
7. Разработан метод многокритериальной оптимизации параметров гибридного механизма для реабилитации, состоящего из двух модулей параллельной и

последовательной структуры, с ограничением на множество допустимых значений параметров активного МПС, учитывающий условие обеспечения требуемого рабочего пространства пассивного механизма последовательной структуры и исключения столкновений звеньев с учётом взаимного расположения модулей.

8. Разработан универсальный многофункциональный программный комплекс с применением параллельных вычислений, ориентированный на выполнение на современных высокопроизводительных вычислительных системах для реализации разработанных алгоритмов определения рабочей области с использованием преобразования покрывающих множеств и алгоритма оптимизации геометрических параметров гибридного механизма.

9. Получено множество Парето оптимальных решений в результате многокритериальной оптимизации параметров гибридного механизма, построенной с учётом клинических данных, требуемых для реабилитации.

10. Разработана имитационная модель и экспериментальный образец гибридного робота для реабилитации нижних конечностей, в котором для исключения пересечений звеньев внесены корректировки в крепления шарниров с учётом разработанных методов.

Проведенная работа позволяет сделать следующие выводы:

1. Анализ существующих МПС показал актуальность создания новых типов реабилитационных МПС для нижних конечностей, позволяющих выполнять реабилитацию на различных этапах восстановления пациента, а также обеспечивающих не только сгибание-разгибание, но и отведение ноги пациента.

2. Предлагаемые методы для определения рабочей области универсальны, подходят для механизмов различной структуры, позволяют учесть ограничения, заданные в виде как систем нелинейных неравенств, или уравнений, так и смешанных систем, а также использовать инструменты интервального анализа.

3. Разработанный метод для определения пересечений звеньев учитывает диаметр звеньев, а также не требует большого количества итераций в сравнении с методами, предполагающими итеративное определение расстояния между точками, располагающимися на оси звеньев с дискретным шагом.

4. Применение процедуры преобразования покрывающих множеств в частично упорядоченное множество целых чисел позволяет существенно сократить объём данных, требуемых для эффективной обработки результатов и визуализации при обеспечении заданной точности аппроксимации, тем самым повысив производительность.

5. На форму и размеры рабочей области МПС значительное влияние оказывают ограничения, связанные с особыми положениями и пересечениями звеньев. В зависимости от размеров и конфигурации механизма области особых положений и пересечений звеньев могут составлять более половины рабочего пространства механизма, что необходимо учитывать при проектировании.

6. Достижимость всех положений выходного звена активного механизма в соответствии с требуемым рабочим пространством пассивного механизма

определяется как параметрами звеньев механизмов в составе гибридного механизма, так и их взаимным расположением двух механизмов.

7. При решении задачи оптимизации параметров гибридного механизма особое значение приобретает поиск значений параметров активного механизма, удовлетворяющих ограничению, которое заключается в обеспечении требуемого рабочего пространства пассивного механизма с учётом пересечений звеньев и взаимного расположения двух механизмов.

8. Результаты математического и имитационного моделирования позволили выявить ряд неточностей на этапе проектирования и изготовлении экспериментального образца гибридного механизма, связанных с пересечением звеньев и взаимным расположением механизмов, что позволило своевременно внести изменения в соответствующие узлы крепления и шарниры. Разработанный экспериментальный образец гибридного механизма может быть рекомендован для использования в дальнейшем в качестве законченного стенда для отработки различных реабилитационных процедур и эффективной механотерапии.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в периодических изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Малышев Д.И., Посыпкин М.А., Рыбак Л.А., Усов А.Л. Анализ рабочей области робота DexTAR - dexterous twin-arm robot / Д. И. Малышев, М. А. Посыпкин, Л. А. Рыбак, А. Л. Усов // International Journal of Open Information Technologies. - 2018. - Т. 6. - № 7. - С. 15-20.

2. Горчаков А.Ю., Игнатов А.Д., Посыпкин М.А., Малышев Д.И. Параллельный алгоритм для аппроксимации рабочей области робота / А.Ю. Горчаков, А.Д. Игнатов, М.А. Посыпкин, Д.И. Малышев // International Journal of Open Information Technologies. - 2019. - Т. 7. - № 1. - С. 1-7.

Публикации в зарубежных изданиях, индексируемых Scopus и Web of Science:

1. Gaponenko E.V., Malyshev D.I., Behera L. Approximation of the parallel robot working area using the method of nonuniform covering / E.V. Gaponenko, D.I. Malyshev, L. Behera // Journal of Physics: Conference Series. - 2019. - V. 1333. - No. 5:052005.

2. Gaponenko E.V., Malyshev D.I., Behera L. Determination of output link positioning error of tripod module using numerical method / E.V. Gaponenko, D.I. Malyshev, L. Behera // Journal of Physics: Conference Series. - 2019. - V. 1353. - No. 1: 012083.

3. Rybak L.A., Gaponenko E.V., Malyshev D.I., Behera L. Determination of the working area and singularity zones of the 3-RRR robot based on the non-uniform coverings method / L.A. Rybak, E.V. Gaponenko, D.I. Malyshev, L. Behera // Journal of Physics: Conference Series. - 2019. - V. 1353. - No. 1: 012057.

4. Rybak L.A., Gaponenko E.V., Malyshev D.I., Virabyan L.G. The algorithm for planning the trajectory of the 3-RPR robot, taking into account the singularity zones based on the method of non-uniform covering / L.A. Rybak, E.V. Gaponenko, D.I.

Malyshev, L.G. Virabyan // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2019. - V. 489. - No. 1:012060.

5. Rybak L.A., Gaponenko E.V., Malyshev D.I. Numerical method of working area approximation of the tripod robot taking into account the singularity zones / L.A. Rybak, E.V. Gaponenko, D.I. Malyshev // Mechanisms and Machine Science. - 2019. - V. 73. - P. 741-750.

6. Malyshev D., Posypkin M., Rybak L., Usov A. Approaches to the determination of the working area of parallel robots and the analysis of their geometric characteristics / D. Malyshev, M. Posypkin, L. Rybak, A. Usov // Engineering Transactions. - 2019. - V. 67. - No. 3. - P. 333-345.

7. Gaponenko E.V., Rybak L.A., Malyshev D.I. Numerical Method for Determining the Operating Area of a Robot with Relative Manipulation Mechanisms / E.V. Gaponenko, L.A. Rybak, D.I. Malyshev // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. - 2020. - V. 49. - No. 6. - P. 474-489.

8. Malyshev D.I., Nozdracheva A.V., Kholoshevskaya L.R. Identification of the parallel 3-PRRR manipulator parameters considering the workspace boundaries and the passive orthosis movements / D.I. Malyshev, A.V. Nozdracheva, L.R. Kholoshevskaya // Journal of Physics: Conference Series. - 2020. - V. 1582. - No. 1:012062.

9. Rybak L., Malyshev D., Gaponenko E. Optimization Algorithm for Approximating the Solutions Set of Nonlinear Inequalities Systems in the Problem of Determining the Robot Workspace / L. Rybak, D. Malyshev, E. Gaponenko // Communications in Computer and Information Science. - 2020. - V. 1340. - P. 27-37.

10. Rybak L., Gaponenko E., Malyshev D. Approximation of the Workspace of a Cable-Driven Parallel Robot with a Movable Gripper / L. Rybak, E. Gaponenko, D. Malyshev // Industrial and Robotic Systems. - 2020. - V. 86. - P. 36-43.

11. Diveev A., Dubrovin G., Malyshev D., Nozdracheva A. Geometric Parameters and Workspace Optimization of Sitting-Type Lower Limb Rehabilitation Robot / A. Diveev, G. Dubrovin, D. Malyshev, A. Nozdracheva // Industrial and Robotic Systems. - 2020. - V. 86. - P. 279-289.

12. Malyshev D., Rybak L., Behera L., Mohan S. Workspace Modelling of a Parallel Robot with Relative Manipulation Mechanisms Based on Optimization Methods / D. Malyshev, L. Rybak, L. Behera, S. Mohan // Robotics and Mechatronics. - 2020. - V. 78. - P. 151-163.

13. Malyshev D., Nozdracheva A., Dubrovin G., Rybak L., Mohan S. A numerical method for determining the workspace of a passive orthosis based on the RRRR mechanism in the lower limb rehabilitation system / D. Malyshev, A. Nozdracheva, G. Dubrovin, L. Rybak, S. Mohan // New Trends in Mechanism and Machine Science. - 2020. - V. 89. - P. 138-145.

14. Mohan S., Mohanta J.K., Behera L., Rybak L., Malyshev D. Robust Operational-Space Motion Control of a Sitting-Type Lower Limb Rehabilitation Robot / S. Mohan, J.K. Mohanta, L. Behera, L. Rybak, D. Malyshev // Advances in Intelligent Systems and Computing. - 2020. - V. 1126. - P. 161-172.

15. Ahmetzhanov M., Rybak L., Malyshev D., Mohan S. Determination of the Workspace of the System Based on the 3-PRRR Mechanism for the Lower Limb Rehabilitation / M. Ahmetzhanov, L. Rybak, D. Malyshev, S. Mohan // *Advances in Mechanism Design III*. - 2021. - P. 193-203.

16. Malyshev D., Rybak L., Carbone G., Semenenko T., Nozdracheva A. Workspace and Singularity Zones Analysis of a Robotic System for Biosamples Aliquoting / D. Malyshev, L. Rybak, G. Carbone, T. Semenenko, A. Nozdracheva // *Advances in Service and Industrial Robotics*. - 2021. - P. 31-38.

17. 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 // *Cyber-Physical Systems: Design and Application for Industry 4.0*. - 2021. - P. 61-71.

18. Behera L., Rybak L., Malyshev D., Gaponenko E. Determination of Workspaces and Intersections of Robot Links in a Multi-Robotic System for Trajectory Planning / L. Behera, L. Rybak, D. Malyshev, E. Gaponenko // *Appl. Sci.* - 2021. - V. 11. - No. 11:4961.

19. Behera L., Rybak L., Malyshev D., Khalapyan S. Numerical simulation of the workspace of robots with moving bases in the multi-agent system / L. Behera, L. Rybak, D. Malyshev, S. Khalapyan // *Procedia Computer Science*. - 2021. - V. 186. - P. 431 – 439.

20. Malyshev D., Mohan S., Rybak L., Rashoyan G., Nozdracheva A. Determination of the Geometric Parameters of a Parallel-Serial Rehabilitation Robot Based on Clinical Data / D. Malyshev, S. Mohan, L. Rybak, G. Rashoyan, A. Nozdracheva // *CISM International Centre for Mechanical Sciences*. - 2021. - V. 601. - P. 556-566.

Публикации в других изданиях:

1. Малышев Д.И. Моделирование рабочего пространства робота-трипода в среде MATLAB / Д. И. Малышев. // *Труды XXIX конференции молодых учёных и студентов (МИКМУС - 2017) (6-8 декабря 2017, Москва, Россия)*. - 2018. - С. 309-312.

2. Вирабян Л.Г., Рыбак Л.А., Гапоненко Е.В., Малышев Д.И. Алгоритм решения прямой задачи о положениях 3-RPR робота на основе метода неравномерных покрытий / Л.Г. Вирабян, Л.А. Рыбак, Е.В. Гапоненко, Д.И. Малышев // *Труды Международной конференции молодых ученых и студентов (МИКМУС-2018) (20–23 ноября, 2018, Москва, Россия)*. - 2019. - С. 549-552.

3. Rybak L.A., Malyshev D.I., Gaponenko E.V. An algorithm for optimizing the cover of the workspace for solving robotics problems / L.A. Rybak, D.I. Malyshev, E.V. Gaponenko // *Proceedings of the 7th international conference on control and optimization with industrial applications (COIA) (August 26-28, 2020, Baku, Azerbaijan)*. - 2020. - P. 341-343.