

## **ОТЗЫВ**

### **официального оппонента**

на диссертационную работу Перевузник Викторией Сергеевны на тему «Методы параметрического синтеза и проектирования гибридной робототехнической системы для реабилитации нижних конечностей», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.4. - Роботы, мехатроника и робототехнические системы.

**Актуальность темы исследования.** Работа посвящена решению актуальной проблемы - расширение функциональных возможностей робототехнических систем для реабилитации больных и инвалидов с нарушениями двигательных функций нижних конечностей, выполненных на базе активного механизма и пассивного ортеза для поддержки конечности, имеющих повышенные характеристики структурной жесткости, компактности, точности позиционирования и управляемости связанных с типом требуемой терапии и состоянием пациентов, для обеспечения стабильного и безопасного перемещения нижних конечностей пациентов. В настоящее время в практическом здравоохранении существует ряд задач, оптимальным способом решения которых является применение робототехнических средств. Роботизированная механотерапия является эффективным и широко применяемым методом лечения и реабилитации, в котором используются специальные робототехнические устройства для воздействия на ткани и мышцы пациента. Для активно-пассивной роботизированной механотерапии необходимо, чтобы аппараты и системы соответствовали определенным критериям, связанным с движением и его биомеханическими параметрами. Эти критерии включают объем движения, его направление, усилие, прилагаемое пациентом, степень облегчения движения, характер работы мышц, скорость, точность воспроизведения задания. Несмотря на неоднозначные результаты, полученные при использовании робототехнических систем в качестве помощников в лечении двигательных расстройств, этот подход считается одним из наиболее перспективных в области нейрореабилитации и требует дальнейшего систематического накопления и анализа научных фактов, что подтверждает актуальность исследования.

**Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций** обеспечивается применением новых методов и подходов механики машин и роботов, математического и имитационного моделирования, оптимизации, проектирования с учетом важных аспектов клинической и реабилитационной медицины, а также подтверждается

значительным объемом экспериментальных данных и численного моделирования, выполненных на основании современных апробированных методик с использованием современных программных средств Siemens PLM Software NX и MATLAB, прикладных программных средств, созданных на C++.

**Достоверность полученных результатов** подтверждается сходимостью теоретических и экспериментальных результатов, а также результатами идентификации параметров математической модели гибридной робототехнической системы для реабилитации нижних конечностей.

Диссертационная работа прошла широкую апробацию на Международных и Всероссийских конференциях, сформулированные автором научные положения, выводы и рекомендации логичны и обоснованы, согласуются с результатами проведенных теоретических и экспериментальных исследований. Результаты работы получили внедрение в учебный процесс.

Публикации автора и автореферат в полной мере отражают содержание диссертации, соответствующей специальности 2.5.4. - Роботы, мехатроника и робототехнические системы.

**Научная новизна исследований.** Автором предложена кинематическая схема двухмодульной гибридной робототехнической системы, модульная структура которой позволяет изменять параметры системы в зависимости от антропометрии пациента и особенностей заболевания.

Соискателем 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 подвижным платформе и их конфигураций.

На основе использования эвристических подходов и поиске оптимальных конфигураций по критерию в виде двухкомпонентной свёртки разработан метод параметрического синтеза робототехнической системы, учитывающий сформированные уровни параметрических ограничений в зависимости от эргономичности и технологичности конструкции.

Разработан 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.

Разработан метод автоматизированного проектирования двухмодульной гибридной робототехнической системы, позволяющий моделировать рабочие процессы, полноценно оценить компоновку конструкции, ремонтпригодность и эргономику робототехнической системы.

Новизна технических решений подтверждается патентом на изобретение и программами для ЭВМ.

**Теоретическая и практическая 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 заключается в развитии методов и методик оптимального проектирования для создания и внедрения новых видов робототехнических систем в клиническую практику с целью улучшения реабилитации пациентов после инсульта, спастических параличей и других неврологических заболеваний, а также после травм, операций и протезирования суставов нижних конечностей, что поможет ускорить процесс восстановления и значительно повысить качество жизни пациентов.

На основе полученных результатов соискателем 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.

**Структура и объем диссертации. Соответствие содержания автореферата тексту диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных результатов и выводов, списка литературы, приложений. Общий объем диссертации 194 страницы. Работа изложена на 179 страницах основного текста, включающего 17 таблиц, 101 рисунок и 4 приложения. Список литературы представлен на 22 страницах из 178 наименований.

Автором обоснована актуальность избранной темы исследований, степень ее разработанности, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, сформулированы цель и задачи исследований, положения,

выносимые на защиту, приводится методология и методы исследований, степень достоверности результатов и их апробация.

Выполнен анализ существующих робототехнических систем для реабилитации нижних конечностей, а также анализ исследований в области оптимизации, которые могут применяться для задач оптимизации конструктивных и геометрических параметров механизмов в процессе проектирования. Первая глава изложена на с. 15 - с. 74.

Во второй главе выполнено математическое моделирование двухмодульной гибридной робототехнической системы. Разработана структура и математическая модель двухмодульной гибридной робототехнической системы для реабилитации нижних конечностей, выполненной на базе двух идентичных по структуре модулей, включающих активный манипулятор для перемещения стопы пациента и пассивный ортез для поддержки нижней конечности. Разработанный метод параметрического синтеза робототехнической системы, учитывающий сформированные уровни параметрических ограничений в зависимости от эргономичности и технологичности конструкции. Разработан алгоритм оптимизации геометрических параметров, реализующий двухэтапный эвристический поиск оптимальных конфигураций с возможностью хранения структурированных массивов данных, описывающих геометрию робототехнической системы и особенности уровней параметрических ограничений оптимизации. Представлены результаты оптимизации для различных уровней параметрических ограничений. Проанализирована производительность робототехнической системы, что позволило оценить требуемый уровень ее эффективности и способствует улучшению условий труда физиотерапевтов при выполнении реабилитационных тренировок. Вторая глава изложена на с. 75 - с. 111.

В третьей главе разработан метод автоматизированного проектирования двухмодульной гибридной робототехнической системы с использованием CAD/CAE-систем, включающий создание точной параметризованной электронно-цифровой и имитационной динамической моделей. Разработанная электронно-цифровая модель робототехнической системы обладает высоким уровнем идентичности с реальным механизмом, что позволило автоматизировать процесс проектирования и значительно ускорить его реализацию. Выполнен динамический анализ робототехнической системы при заданных траекториях движения, что позволило получить полное представление о взаимосвязях кинематических и динамических параметров активного манипулятора и пассивного ортеза. Разработана конструкция подвесного рычажного предохранительного устройства, которое за счет упругих элементов компенсирует движения

активного манипулятора, недопустимые физиологией пациента. Выполнена корректировка параметров робототехнической системы, полученных на основе оптимизации с учетом технологичности и эргономичности механизмов и силовых параметров, а также собираемости и возможности изготовления. Третья глава изложена на с. 112 - с. 139.

В четвёртой главе проведены экспериментальные исследования разработанного образца с предохранительным устройством для оценки его срабатывания с целью обеспечения безопасности при выполнении восстановительных упражнений и корректировки движения робототехнической системы в зависимости от усилий пациентов. На основе проведенных экспериментальных исследований, состоящие в отработке траектории реабилитации получены зависимости значения углов в суставе пациента от времени в процессе реабилитации, проанализирована ошибка, состоящая в расхождении между требуемыми углами в суставах пациента и экспериментальными. Расхождение обусловлено особенностями конструкции пассивного ортеза и не оказывает критического влияния в рамках терапевтических движений реабилитации нижних конечностей, но может быть компенсировано за счет коррекции ошибки в системе управления активного механизма. Четвертая глава изложена на с. 140 - с. 152.

В заключение диссертации приводятся выводы, перспективы дальнейшей разработки темы, список использованной литературы и приложения. Основные положения диссертации отражены в опубликованных автором печатных работах.

Диссертация соответствует паспорту специальности 2.5.4. - Роботы, мехатроника и робототехнические системы.

В автореферате изложены основные идеи и выводы диссертации. Автореферат полностью отражает основное содержание диссертации и удовлетворяет всем пунктам «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24.09.2013 г.

#### **Замечания по диссертации:**

1. В работе приведен большой обзор по существующим в мире устройствам (экзоскелетам) помогающим восстанавливаться после травм. Большинство примеров приводятся из зарубежных источников, хотя подобные работы ведутся и в России.
2. В обзоре большое внимание уделяется функциональным качествам механизмов и мало говорится о структуре (кинематической схеме) поэтому трудно сделать вывод о недостатках конструкции приведенных в примерах.

