

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу
Перевузник Виктории 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

Роботизированные устройства в настоящее время начинают находить все более широкое применение для комплексной реабилитации больных с тяжелыми двигательными нарушениями различной этиологии. Проведено множество исследований, оценивающих эффективность роботизированной механотерапии в восстановительном лечении двигательной функции по сравнению с консервативной реабилитационной терапией. Экспериментально подтверждено, что роботизированная механотерапия имеет значительные преимущества при обучении навыкам ходьбы больных. Однако, анализ функциональных возможностей этих роботизированных систем и тренажерных комплексов позволил выявить ряд ограничений для их более широкого использования. В первую очередь стоит отметить большую стоимость роботизированных мультисуставных комплексов, а также необходимость оборудования специализированных помещений для их размещения. Более простые по конструкции тренажеры, отличающиеся доступностью и простотой использования, предназначены для формирования «плоских» движений, что лишь частично отражает анатомо-физиологические характеристики движения в суставах. Большинство систем реабилитации используют активный ортез с простой конструкцией, что ограничивает их динамические характеристики из-за наличия приводов в нижних конечностях. Другие системы имеют линейные приводы и высокие динамические характеристики, но имеют ограниченную рабочую область или не включают поддерживающие или ортопедические системы. Создание новых эффективных моделей, методов моделирования и оптимизации, проектирования и оптимального управления, а также прототипа РТС для обеспечения требуемых реабилитационных процедур, является актуальной задачей исследования.

Работа Перевузник В.С. была выполнена в рамках гранта РФФИ Аспиранты, проект № 20-31-90134 и Государственного задания Минобрнауки РФ, проект № FZWN-2020-0017 на базе научной лаборатории мехатроники и робототехники НИИ робототехники и систем управления с использованием высокотехнологичного оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных соискателем в диссертационной работе, обеспечивается применением методов и подходов в области механики машин и роботов, математического и имитационного моделирования, оптимизации и проектирования, а также методов планирования экспериментальных исследований и обработки их результатов с учетом важных аспектов реабилитационной медицины. Эти выводы подтверждаются обширным объемом экспериментальных данных и численного моделирования, проведенных с использованием современных методик и программных средств.

Научная новизна исследований

В качестве научных результатов диссертации выдвинуты следующие положения:

- разработана структура двухмодульной гибридной робототехнической системы на основе активных и пассивных механизмов с возможностью реабилитации как одной, так и обеих нижних конечностей в зависимости требуемой программы реабилитации, антропометрии пациента и особенностей заболевания.

- 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. Получены условия достижимости положений платформ, исключающие возможные пересечения и столкновения звеньев.

- разработан метод 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. Установлено, что увеличение уровня параметрических ограничений снижает показатели компактности конструкции, но при этом достигается существенное улучшение эргономичности и технологичности конструкции.

- разработан двухэтапный эвристический алгоритм оптимизации, с возможностью хранения структурированных массивов данных, описывающих геометрию робототехнической системы и особенности уровней параметрических ограничений, позволяющий учесть условия компактности конструкции и достижимости всех требуемых для реабилитации положений.

- предложено и экспериментально подтверждено использование для обеспечения безопасности подвешного 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 результатов исследований

Исследование имеет теоретическую значимость, поскольку оно направлено на разработку метода параметрического синтеза и автоматизированного проектирования робототехнических систем для реабилитации нижних конечностей. В рамках работы были созданы схемы, модели и алгоритмы. Кроме того, были разработаны эффективные методы оптимизации геометрических и конструктивных параметров, а также программно-аппаратное обеспечение для повышения производительности системы.

Практическая значимость исследования определяется разработкой эффективных методов и стратегий для оптимального проектирования и внедрения новых типов робототехнических систем в медицинскую практику. Эти системы предназначены для улучшения процесса реабилитации пациентов после различных нарушений двигательных функций нижних конечностей. Разработан полномасштабный экспериментальный образец двухмодульной робототехнической системы для реабилитации нижних конечностей с предохранительным устройством для компенсации избыточной нагрузки

Теоретические положения диссертационной работы и результаты экспериментальных исследований внедрены и используются в учебном процессе при подготовке студентов и магистров по направлению подготовки 15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» - профиль программы «Технология машиностроения» и направлению подготовки 15.04.06 «Мехатроника и робототехника» - профиль программы «Робототехника и искусственный интеллект». Реализовано применение полученных в диссертационной работе результатов в проектно-конструкторской и производственной деятельности ООО «Протезное предприятие» (г. Курск).

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций обеспечена выполнением экспериментальных исследований на высоком техническом уровне с использованием высокотехнологичного сертифицированного оборудования, подтверждается сходимостью теоретических и экспериментальных результатов, а также не противоречит общепризнанным научным фактам и результатам российских и зарубежных исследований. Приведенные в работе результаты экспериментальных исследований подкреплены их значительным объемом и теоретическим обоснованием.

Основные положения работы опубликованы в 17 публикациях, 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.

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.

Структура и содержание работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов по работе, списка литературы, приложений. Работа изложена на 179 страницах основного текста, включающего 17 таблиц, 101 рисунок и 4 приложения, список литературы из 178 наименований.

Диссертация изложена доступным языком и оформлена в соответствии с требованиями государственных стандартов и ВАК РФ. Структура и содержание соответствует поставленной цели исследования и решаемым задачам. Работа содержит рисунки и таблицы, наглядно демонстрирующие полноту экспериментальных данных и достоверность полученных результатов

В первой главе выполнен обзор и анализ существующих робототехнических систем для реабилитации нижних конечностей. Представлены основные клинические аспекты в области реабилитации. Выявлены требования к разрабатываемой робототехнической системе для реабилитации. Робототехническая система для реабилитации нижних конечностей должна обладать высокими показателями структурной жесткости, эргономичности и компактности с возможностью использования на различных этапах восстановительной медицины.

Во второй главе представлена математическая модель предлагаемой робототехнической системы для реабилитации нижних конечностей 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, исключая возможные пересечения и столкновения звеньев 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. Описан разработанный метод параметрического синтеза робототехнической системы, учитывающий сформированные уровни параметрических ограничений в зависимости от

эргономичности и технологичности конструкции. Представлен алгоритм оптимизации геометрических параметров, реализующий двухэтапный эвристический поиск оптимальных конфигураций. В алгоритме предусмотрена возможность хранения структурированных массивов данных, описывающих геометрию робототехнической системы и особенности уровней параметрических ограничений. Для выполнения оптимизации разработан программный комплекс, включающий модуль оптимизации на языке программирования C++ с использованием параллельных вычислений для одновременного вычисления критериальной функции различных особей популяции PSO алгоритма, а также модули визуализации на языке Python, которые позволяют построить графики изменения положения центров шарниров и визуализировать движение робототехнической системы с учётом пересечений для проверки оптимальных конфигураций.

В третьей главе для смягчения нагрузки разработана инновационная конструкция подвешенного рычажного предохранительного устройства, которая автоматически компенсирует движения активного манипулятора, учитывая физиологию пациента. Это гарантирует безопасность при проведении реабилитационных упражнений и позволяет точно настраивать движения робототехнической системы в зависимости от потребностей пациентов. С применением метода проектирования на основе CAD/CAE-систем была создана детальная электронно-цифровая модель двухмодульной гибридной робототехнической системы с высокой степенью соответствия реальному механизму. Это позволяет автоматизировать процесс проектирования и значительно ускорить его выполнение. На основе разработанной имитационной модели был проведен динамический анализ робототехнической системы при заданных траекториях движения, что обеспечило полное понимание взаимосвязей между кинематическими и динамическими параметрами активного манипулятора и пассивного ортеза. Были учтены инерционные характеристики как одного, так и двух модулей, используемых одновременно для обеих конечностей робототехнической системы, а также силы, действующие в приводных парах при различных сценариях реабилитации.

В четвёртой главе для подтверждения теоретических результатов разработан экспериментальный образец РТС для реабилитации. Для построения экспериментального образца выполнено детальное проектирование узлов и компонентов, разработана конструкторская документация и отлажена система управления приводными механизмами для выполнения требуемых реабилитационных программ. Выполнена интеграция системных компонентов, датчиков, контроллера и экспериментального образца двухмодульной гибридной РТС. Проведены экспериментальные исследования, направленные на оценку эффективности механического предохранительного устройства в процессе реабилитации пациентов. Результаты исследования позволили оптимизировать безопасность выполнения восстановительных упражнений и коррекцию движения РТС в зависимости от индивидуальных усилий пациентов. Также в рамках

экспериментальных исследований была изучена траектория реабилитации в сагиттальной плоскости. Анализ зависимости углов в суставах пациента от времени позволил выявить расхождение между требуемыми и фактическими значениями, что дало возможность определить ошибки и улучшить методики реабилитации.

Главы диссертации заканчиваются соответствующими выводами, в заключении работы представлены основные результаты и рекомендации. Материалы диссертационной работы и автореферата изложены грамотным техническим языком.

Автореферат полностью раскрывает содержание диссертационной работы.

Замечания по диссертационной работе

1. В работе не указано, какие из приведенных на рис. 2.1 терапевтических методов лечения нижних конечностей могут быть реализованы с помощью других известных устройств, а какие с помощью предлагаемой системы.

2. В работе недостаточно обоснован выбор в качестве критерия оптимизации компактности конструкции устройства.

3. Метод автоматизированного проектирования двухмодульной гибридной робототехнической системы с использованием CAD/CAE-систем следует скорее отнести к технической новизне работы, чем к научной.

4. Работа бы существенно выиграла, если бы в ней больше внимания было уделено кинематике и динамике устройства.

5. В работе имеются отдельные неточности и опечатки, например вторая буква М в слове «иммитационное» в названии 3 главы, пропущенные слова в абзаце после рис. 3.15, отклонения от стандартов при оформлении списка литературы и т.д.

Замечания и отмеченные недостатки не снижают общей положительной оценки диссертации. Диссертация Перевузнник В.С. является законченной научно-квалификационной работой, выполненной самостоятельно на должном уровне.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней

Диссертационная работа Перевузнник Виктории Сергеевны «Методы параметрического синтеза и проектирования гибридной робототехнической системы для реабилитации нижних конечностей» соответствует областям исследований, указанным в пунктах 1, 4 и 11 паспорта специальности 2.5.4 - Роботы, мехатроника и робототехнические системы: п. 1. Развитие теоретических основ и методов анализа, структурного и параметрического синтеза и автоматизированного проектирования роботов и робототехнических систем; п. 4. Математическое и полунатурное

моделирование мехатронных и робототехнических систем, включая взаимодействие со средой, анализ их характеристик, оптимизация и синтез по результатам моделирования; п. 11. Методы и средства автоматизированного проектирования, анализа и оптимизации роботизированных систем, комплексов, ячеек и линий. Исследование, повышение эффективности и безопасности эксплуатации автоматизированных технологических процессов, создаваемых на базе робототехнических и мехатронных систем.

Диссертационная работа имеет научную и практическую значимость в рассматриваемой области исследований, является завершенной научно-квалификационной работой, выполненной на высоком уровне. Основные ее результаты опубликованы в 17 статьях и прошли апробацию на международных и всероссийских научных конференциях.

Диссертационная работа соответствует пунктам 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24.09.2013 г., а ее автор, Перевузник Виктория Сергеевна, достоин присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.4. - Роботы, мехатроника и робототехнические системы.

Официальный оппонент:

Доктор технических наук, доцент
(специальность 05.02.07 Технология
и оборудование механической и
физико-технической обработки),
профессор кафедры
информационных и
робототехнических систем ФГАОУ
ВО «Белгородский государственный
национальный исследовательский
университет».



Афонин Андрей Николаевич

«05» марта 2024 г.

Контактная информация:

308015, г. Белгород, ул. Победы, д. 85

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет»

Телефон: +7 (953) 619-18-21

E-mail: afonin@bsu.edu.ru

Личную подпись
удостоверяю
Ведущий специалист
по кадрам
департамента управления
персоналом

