

УТВЕРЖДАЮ

Исполнительный директор

АО «НПО «Андроидная техника»

кандидат технических наук

Е.А. Дудоров

«22» февраля 2024 г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Акционерного общества «Научно-производственное объединение

«Андроидная техника»

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 диссертационной работы

В области практического здравоохранения многие проблемы успешно решаются благодаря использованию робототехнических средств. Эти задачи не ограничиваются только лечением и реабилитацией пациентов с нарушениями опорно-двигательного аппарата, но также включают выполнение функций самообслуживания, социальной адаптации и восстановления утраченных двигательных и коммуникационных навыков. Роботизированная механотерапия широко используется для реабилитации больных с функциональными нарушениями опорно-двигательной системы, вызванными последствиями сосудистых заболеваний, нарушений нейрорегуляции двигательной активности, травм и патологии опорно-двигательного аппарата. Применение сложных и дорогостоящих медицинских устройств этого типа позволяет отнести механотерапию к категории

высокотехнологичных средств, внедрение которых в клиническую практику, их разработка и производство являются одной из ключевых программ развития медицинской техники. Разработка, создание и использование новых видов реабилитационных робототехнических комплексов с улучшенными характеристиками структурной прочности механической конструкции, эргономичности и компактности системы представляют собой актуальное и приоритетное направление в реабилитации пациентов. В этой связи, тема диссертационной работы Перевузык В.С. является современной и актуальной и представляет, как теоретический, так и практический интерес.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ Аспиранты, проект № 20-31-90134 и Государственного задания Минобрнауки РФ, проект № FZWN-2020-0017.

Структура и содержание диссертационной работы

Диссертационная работа включает введение, четыре главы, заключение и список литературы из 178 источников. Диссертационная работа изложена на 194 страницах, содержит 17 таблиц, 101 рисунок и 4 приложения. Каждая глава работы заканчивается формулированием выводов, которые соотносятся с задачами проводимых исследований.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследований, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, а также дана информация об апробациях результатов проделанной работы, публикациях по теме исследования и основных положениях, выносимых на защиту.

В первой главе выполнен обзор и анализ существующих робототехнических систем для реабилитации нижних конечностей. Выявлено, что в настоящее время 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. Показана целесообразность создания и применения новых типов реабилитационных робототехнических комплексов с высокими показателями структурной жесткости, эргономичности и компактности, которые могут быть использованы на различных этапах восстановительной медицины и обеспечивать не только сгибание/разгибание конечностей, но и отведение/приведение конечностей пациента.

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. 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. Представлены результаты оптимизации для различных уровней параметрических ограничений. По результатам численного эксперимента получена наилучшая конфигурация для проектирования. 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.

В третьей главе разработан метод автоматизированного проектирования двухмодульной гибридной робототехнической системы с использованием CAD/CAE-систем с использованием, которого получена точная параметризованная электронно-цифровая модель двухмодульной гибридной РТС, которая обладает высоким уровнем идентичности с реальным

механизмом, что позволяет автоматизировать процесс проектирования и значительно ускорить его реализацию. Разработана имитационная модель на основе которой проведен динамический анализ робототехнической системы при заданных траекториях движения. Это позволило получить полное представление о взаимосвязях кинематических и динамических параметров активного манипулятора и пассивного ортеза. Также были учтены инерционные характеристики, когда использовались один или два модуля одновременно, а также рассмотрены силы, действующие в приводных парах при различных сценариях реабилитации. Выявлена необходимость внесения изменений в конструкцию шарнирных соединений, чтобы обеспечить необходимые движения при сохранении установленных кинематических соотношений.

Четвертая глава посвящена выбору технических средств, разработке системы управления и полномасштабного экспериментального образца РТС. 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. Проведены экспериментальные исследования, направленные на отработку траектории реабилитации в сагиттальной плоскости. Полученные данные позволили выявить зависимость между значениями углов в суставе пациента и временем проведения реабилитации. В ходе анализа была обнаружена ошибка, связанная с расхождением между требуемыми углами в суставах пациента и экспериментально полученными данными. Максимальное расхождение между теоретическими и экспериментальными значениями углов составило $2,82^\circ$, а среднее расхождение составило $1,2^\circ$. Расхождение обусловлено особенностями конструкции пассивного ортеза и не оказывает критического влияния в рамках терапевтических движений реабилитации нижних конечностей.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций

Достоверность научных положений, результатов и выводов, сформулированных соискателем в диссертационной работе, обеспечена строгими математическими выводами, согласованностью с опубликованными результатами научных исследования других авторов, подтверждаются результатами компьютерного моделирования, экспериментальными исследованиями разработанного образца гибридной робототехнической системы для реабилитации нижних конечностей. Достоверность результатов подтверждена высокой сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований. Полученные данные имеют высокую воспроизводимость и не противоречат общепринятым данным и работам других авторов.

Научная новизна

Показана возможность за счет модульной структуры разработанной робототехнической системы изменять параметры системы в зависимости требуемой программы реабилитации, антропометрии пациента и особенностей заболевания.

Получены условия достижимости положений платформ, исключаящие возможные пересечения и столкновения звеньев на основе разработанной математической модели, которая описывает 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.

Разработан метод параметрического синтеза гибридной робототехнической системы модульной структуры с учётом сформированных уровней параметрических ограничений. 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 геометрических параметров, в котором предусмотрена возможность хранения структурированных массивов данных, описывающих геометрию робототехнической системы и особенности уровней параметрических ограничений. Получена наилучшая конфигурация для проектирования.

Выявлена необходимость корректировки в конструкции шарнирных соединений для обеспечения требуемых движений при сохранении полученных кинематических соотношений на основе разработанной имитационной динамической модели. 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 диссертационной работы

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

Практическая значимость исследования заключается в развитии методов оптимального проектирования и внедрения новых типов робототехнических систем в клиническую практику для реабилитации пациентов нарушениями двигательных функций нижних конечностей. Разработана конструкция полномасштабного экспериментального образца двухмодульной гибридной

робототехнической системы, оснащенной предохранительным устройством для компенсации избыточной нагрузки, что позволяет ускорить процесс реабилитации, которая система способна компенсировать движения активного манипулятора, несовместимые с физиологией пациента за счет упругих элементов.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы

Полученные результаты могут быть использованы в практике отечественных медицинских учреждений, таких как реабилитационные центры, стационары, клиники. Применение этих результатов позволит расширить возможности персонализированной медицины, включая реабилитацию пациентов с нарушениями функций нижних конечностей.

Теоретические положения диссертационной работы и результаты экспериментальных исследований рекомендуются к использованию 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».

Основные публикации, отражающие содержание диссертации

По материалам диссертационной работы Перевузник В.С. 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.

Автореферат достаточно полно отражает основные положения, результаты, выводы и содержание диссертации.

Замечания по диссертационной работе

По диссертационной работе имеются следующие замечания:

1. На с. 101 диссертации указано, что оптимальные конфигурации получены в результате итеративной оптимизации. Однако, в работе не описано, что именно подразумевается под итеративной оптимизацией и как алгоритмически она реализована.

2. Траектории движения выходного звена на рисунке 2.8 (с. 95 диссертации) и на рисунке 4.10 (с. 150 диссертации) не совпадают. Габаритный размер контура траектории на рис. 2.8 составляет более 1000 мм, а на рис. 4.10 менее 700 мм. Это никак не обосновано

3. В таблице 2.2 (с. 93 диссертации) приведены антропометрические измерения нижних конечностей для различных стран, однако размеров для России не приведено.

4. В ходе оптимизации рассмотрено 4 уровня ограничений, однако по результату был выбран вариант с максимальным уровнем ограничений, обеспечивающий максимальную эргономику и технологичность. Неясно зачем было необходимо выполнить анализ других трёх уровней ограничений, если заведомо известно, что они менее эргономичны и технологичны.

5. В ходе оптимизации рассмотрено 4 уровня ограничений, однако по результату был выбран вариант с максимальным уровнем ограничений, обеспечивающий максимальную эргономику и технологичность. Неясно зачем было необходимо выполнить анализ других трёх уровней ограничений, если заведомо известно, что они менее эргономичны и технологичны.

6. На рисунке 4.2 (с. 143 диссертации) не указаны обозначения основных компонентов прототипа, в соответствии с рисунком 2.4 (с. 81 диссертации).

Несмотря на указанные замечания, работа в целом производит положительное впечатление и соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Соответствие диссертации научной специальности

Представленная диссертационная работа соответствует паспорту специальности 2.5.4 –Роботы, мехатроника и робототехнические системы, а именно областям исследований: 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.

Заключение по диссертационной работе

Диссертационная работа Перевузки Виктории Сергеевны «Методы параметрического синтеза и проектирования гибридной робототехнической системы для реабилитации нижних конечностей» является завершенной научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно обоснованные схемно-технические решения, модели и алгоритмы робототехнической системы для реабилитации нижних конечностей модульной структуры. Работа обладает научной новизной, теоретической и практической ценностью. Соответствует требованиям п. 9 - 14 «Положения о присуждении ученых степеней» (утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842), предъявляемых к диссертациям на

соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.4 – Роботы, мехатроника и робототехнические системы.

Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании научно-технического совета акционерного общества «Научно-производственное объединение «Андроидная техника», протокол заседания № 47 от 19.02.2024 г.

Кандидат технических наук
(15.02.16 «Технология машиностроения»),
Ведущий инженер-конструктор
НПО «Андроидная техника»

Ю.А. Пожидаев
«20» февраля 2024 г.

Подпись заверяю

Генеральный директор

НПО «Андроидная техника»

Сведения о ведущей организации:

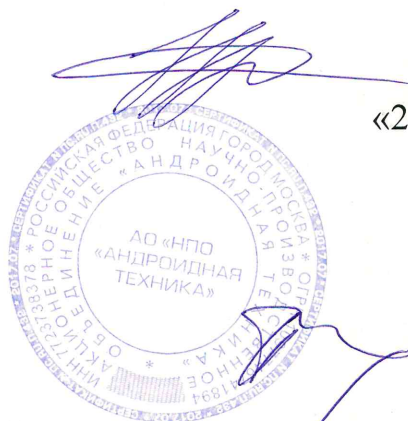
Акционерное общество "Научно-производственное объединение
"Андроидная техника" (АО «НПО «АТ»)

Адрес: 109518, г. Москва ул. Грайвороновская, д.23

Телефон: +7 (495) 226-02-99

E-mail: info@npo-at.ru

Сайт: <https://npo-at.com/>



А.Ф. Пермяков