ӨЖІКЕН АСЫЛБЕК ҚАСЫМБЕКҰЛЫ

«Разработка и исследование электромеханического привода с адаптивной системой управления для экзоскелета голеностопного сустава»

Диссертационная работа, представленная на соискание степени доктора философии (PhD) по специальности

6D060300 – «Механика»

АННОТАЦИЯ

Актуальность темы исследования. Заболевания и травмы опорно-двигательного аппарата в настоящее время являются одной из наиболее актуальных проблем мировой медицины. По данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), инсульт, нейроортопедические заболевания, спортивные травмы и ограничение двигательной активности в пожилом возрасте непосредственно влияют на качество повседневной жизни пациентов. В частности, повреждения голеностопного сустава приводят к нарушению функции ходьбы и требуют проведения полноценной реабилитации.

В настоящее время наряду с применением классических физиотерапевтических методов использование роботизированных экзоскелетов открывает новые возможности для телереабилитации и реабилитации в домашних условиях. Основными преимуществами таких устройств являются возможность точного воспроизведения движений, равномерного распределения нагрузки и адаптации к индивидуальным биомеханическим особенностям пациента.

Однако ряд существующих экзоскелетов характеризуется высокой стоимостью, сложностью конструкции и ориентированностью преимущественно на применение в клинических условиях, что ограничивает их широкую доступность. В связи с этим разработка легкого, гибкого, дистанционно управляемого экзоскелета голеностопного сустава, соответствующего биомеханическим требованиям, является актуальной научной и инженерной задачей.

Актуальность данной работы заключается в разработке системы экзоскелета, воспроизводящей физиологический диапазон движений голеностопного сустава, оснащенной элементами безопасности и поддерживающей дистанционное управление на основе Bluetooth-модуля. Предлагаемое устройство позволяет проводить реабилитацию не только в клинических, но и в домашних условиях, способствуя повышению качества жизни пациентов и доступности реабилитационных мероприятий.

Цель работы. Целью работы является проектирование электромеханического привода экзоскелета голеностопного сустава, разработка адаптивной системы управления и исследование эффективности его движений в процессе реабилитации.

Объект исследования. Активный реабилитационный экзоскелет, предназначенный для воспроизведения движений голеностопного сустава человека в соответствии с биомеханическими требованиями.

Предмет исследования. Электромеханические приводы и адаптивные системы управления экзоскелета голеностопного сустава.

Задачи исследования. В соответствии с поставленной целью в диссертации сформулированы следующие задачи:

- спроектировать экзоскелет голеностопного сустава на основе анализа его анатомического строения, диапазона движений и клинических ограничений;
- синтезировать программное движение экзоскелета голеностопного сустава на основе разработанной модели;
- разработать динамическую модель движения электромеханических приводов экзоскелета голеностопного сустава;
- исследовать адаптивное управление электромеханическими приводами экзоскелета голеностопного сустава;
- разработать прототип экзоскелета голеностопного сустава, провести экспериментальные исследования и оценить эффективность его движений в процессе реабилитации.

Методы исследования. В ходе исследования применялись аналитические методы, биомеханический анализ и математическое моделирование. Для описания кинематики и динамики экзоскелета голеностопного сустава были разработаны уравнения движения и динамические модели.

Компьютерное моделирование проводилось с использованием программного комплекса SolidWorks 3D CAD, что позволило спроектировать конструктивные элементы экзоскелета и проверить их кинематическую совместимость.

Для исследования динамического поведения системы и верификации алгоритмов адаптивного управления проводилось имитационное моделирование в среде MATLAB/Simulink.

Кроме того, были проведены экспериментальные исследования разработанного прототипа экзоскелета, в ходе которых оценивались параметры его движения, точность управления и эффективность применения в процессе реабилитации.

Научная новизна исследования

- предложено новое конструктивное решение экзоскелета с электромеханическим приводом, учитывающее биомеханические особенности движения голеностопного сустава;
- для предложенного механизма разработана кинематическая модель, обеспечивающая воспроизведение физиологических движений голеностопного сустава;
- разработана динамическая модель электромеханических приводов предложенного экзоскелета и определены ее параметры;

• разработан алгоритм адаптивного управления, обеспечивающий точное и устойчивое выполнение движений;

• на основе предложенной модели разработан экспериментальный прототип, эффективность которого подтверждена экспериментально.

Теоретическая и практическая значимость исследования. Разработанный экзоскелет позволяет осуществлять восстановление движений голеностопного сустава после травм или при неврологических нарушениях. Предложенные алгоритмы управления обеспечивают устойчивое и точное выполнение движений в режиме реального времени. Разработанный прототип адаптирован для применения в медицинских реабилитационных центрах. Результаты исследования могут служить основой для дальнейшего развития отечественной медицинской робототехники.

Основные положения, выносимые на защиту

– конструкция экзоскелета, соответствующая физиологическим и биомеханическим закономерностям движения голеностопного сустава;

– кинематическая и динамическая модели экзоскелета, а также математические зависимости, обеспечивающие точность движения;

– адаптивный алгоритм управления электромеханическими приводами и его свойства устойчивости;

– экспериментальные результаты, подтверждающие эффективность движений предложенного прототипа экзоскелета в процессе реабилитации.

Достоверность и обоснованность научных результатов диссертационной работы. Обоснованность представленных в диссертации научных результатов обеспечивается применением методов классической механики, биомеханики и теории автоматического управления. В ходе исследования использовались программные комплексы MATLAB/Simulink и SolidWorks, на основе которых были разработаны кинематическая и динамическая модели экзоскелета.

Достоверность полученных научных результатов подтверждена экспериментальными исследованиями, проведенными на разработанном прототипе экзоскелета. Хорошее соответствие результатов моделирования в среде MATLAB/Simulink экспериментальным данным подтверждает корректность предложенной математической модели и алгоритма адаптивного управления.

Связь результатов исследования с планами научно-исследовательских программ. Представленные результаты получены в рамках проекта программно-целевого финансирования Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан BR24992820 «Инновационные медицинские технологии и устройства для совершенствования хирургических вмешательств при протезировании и реабилитации в области ортопедии и медицинской реабилитации» (договор №376 от 01.10.2024 г.).

Автор также является руководителем научного проекта по гранту «Жас Ғалым» AP22688590 «Исследование динамики управления приводами роботизированного манипулятора».

Апробация результатов исследования. Основные результаты диссертации были представлены на следующих международных и республиканских научно-технических конференциях, а также опубликованы в авторитетных научных изданиях:

1. Өжікен А.Қ., Рахметова П.М. Разработка математической модели адаптивного управления роботом манипулятора // Труды Международных Сатпаевских чтений «Научное наследие Шахмардана Есенова». – 2017. – С. 626–629.
2. Ozhiken A., Ivanov K., Gonzalez-Cruz C.A., Ceccarelli M., Cafolla D. Design and Experiences of a Planetary Gear Box for Adaptive Drives // EuCoMeS 2018. Mechanisms and Machine Science. Vol. 59. Springer. DOI: 10.1007/978-3-319-98020-1_33.
3. Өжікен А.Қ., Рахметова П.М. Исследование и разработка динамики движения систем адаптивного управления робота манипулятора // Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы информатики, механики и робототехники». – Алматы, 2018. – С. 124.
4. Tuleshov A., Ozhiken A. et al. Modeling the Dynamics of a Heavy-Duty Mobile Robot Based on Gauss's Principle of Least Constraint // Journal of Applied and Computational Mechanics. – 2025. – 11(4). – P. 946–960. DOI: 10.22055/jacm.2024.47902.4833. (Scopus Q1).
5. Өжікен А.Қ., Тулешов А.Қ. и др. Адаптивная система управления движением манипулятора // Вестник НИА РК. – 2025. – №1(95). – С. 160–169. DOI: 10.47533/2025.1606-146X.17. (КОКНВО).
6. Өжікен А.Қ., Тулешов А.Қ. и др. Манипулятор үшін беріктілігі жоғары басқарудың адаптивті жүйесін әзірлеу // Вестник КазАТК. – 2025. – №137(2).–С.133–141.DOI:10.52167/1609-1817-2025-137-2-133-141. (КОКНВО).
7. Sergazin G., Ozhiken A. et al. Development of an Ankle Exoskeleton: Design, Modeling, and Testing // Sensors. – 2025. – 25(7):2020. DOI: 10.3390/s25072020. (Scopus Q1).
8. Ozhiken A., Sergazin G. et al. Research and Experimental Testing of a Remotely Controlled Ankle Rehabilitation Exoskeleton Prototype // Sensors. – 2025. – 25(21):6784. DOI: 10.3390/s25216784. (Scopus Q1).
9. Karasheva M., Ozhiken A. et al. Sensor-Driven Control Strategies for Post-Stroke Shoulder Rehabilitation Exoskeletons: A Systematic Review // MethodsX. – 2025. DOI: 10.1016/j.mex.2025.103648. (Scopus Q1).

Личный вклад автора. Основные научные результаты и выводы, представленные в диссертации, получены при непосредственном участии автора и являются результатом самостоятельно выполненных научных исследований.

Автор разработал конструктивное решение экзоскелета голеностопного сустава, построил его кинематическую и динамическую математические модели, разработал алгоритм адаптивного управления и выполнил

моделирование в среде MATLAB/Simulink. Кроме того, автор принимал непосредственное участие в проектировании и разработке экспериментального прототипа экзоскелета, реализации системы управления, проведении прочностного анализа в среде SolidWorks, а также в организации и проведении экспериментальных исследований.

В научных работах, опубликованных в соавторстве, автор внес основной вклад в анализ литературы, разработку математических моделей, проведение экспериментальных исследований, обработку полученных результатов и подготовку научных публикаций.

Реализация и внедрение результатов работы. Прототип экзоскелета нижней конечности, разработанный при участии автора, используется в образовательном процессе КазНИТУ им Сатбаева и проходит апробацию в Городской клинической больнице №4 города Алматы.

Структура диссертации. Поставленные в диссертации научная цель и задачи полностью выполнены. Диссертация состоит из титульного листа, нормативных ссылок, списка сокращений, введения, четырех разделов, заключения, списка использованных источников и приложений.

Краткое содержание по разделам. В первом разделе проведен анализ современного состояния развития реабилитационных экзоскелетов голеностопного сустава. Рассмотрены анатомические и биомеханические особенности голеностопного сустава, современные типы экзоскелетов и их приводов, технологии дистанционно управляемой реабилитации, а также типы электромеханических приводов.

Во втором разделе рассмотрены вопросы проектирования экзоскелета голеностопного сустава. Определены биомеханические требования к экзоскелету, разработаны его кинематическая и динамическая математические модели. Кроме того, предложен алгоритм программного управления, разработана адаптивная система управления электромеханическим приводом и проведено динамическое моделирование в среде MATLAB/Simulink.

В третьем разделе описаны конструкция экзоскелета, его основные элементы и система управления. Обоснован принцип работы винтового привода и представлены его преимущества. Кроме того, в среде SolidWorks Simulation проведен анализ прочности конструкции.

В четвертом разделе проведены экспериментальные исследования адаптивной системы управления электромеханическим приводом и описан испытательный стенд. Экспериментальные результаты сопоставлены с результатами моделирования в MATLAB/Simulink, на основании чего проведена оценка эффективности предложенной системы управления.

В заключительной части диссертации обобщены основные научные результаты проведенных исследований и сформулированы теоретические и практические выводы.