

АННОТАЦИЯ

к диссертации У Гуйцзюня на тему «Алгоритм управления и динамика реабилитационного робота нижних конечностей на основе инновационного электропривода» на соискание ученой степени доктора философии (PhD) по направлению 650500 - Теоретическая и прикладная механика.

1. Диссертационная работа выполнена на кафедре «Механика и промышленная инженерия» Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова.

2. Тема и научные консультанты утверждены Ученым Советом Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова (протокол №3 от 24 ноября 2021 года).

3. Научные консультанты:

Дуйшеналиев Туратбек Болотбекович, доктор технических наук, профессор, Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова.

Меркурьев Игорь Владимирович, доктор технических наук, профессор, Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», Москва, Россия.

4. Актуальность темы исследования.

Нарушения двигательных функций нижних конечностей, вызванные инсультом и травмами спинного мозга, серьёзно влияют на восстановление двигательной активности и самостоятельность пациента. Традиционная реабилитация требует больших трудозатрат со стороны специалистов и отличается высокой стоимостью. Разработка робота, обеспечивающего поддержку, направленное движение и индивидуализированное управление, имеет важное значение для повышения качества и доступности медицинской реабилитации.

5. Цель исследования

разработка роботизированной системы для поддержки и тренировки нижних конечностей и поясницы пациента с использованием адаптивных и интеллектуальных методов управления.

6. Задачи исследования:

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе были решены следующие задачи:

Выполнен обзор современного состояния и тенденций развития реабилитационных роботов для нижних конечностей, определены ключевые технические требования и проблемы.

Разработана многосвободностная конструкция робота с модулями вертикального подъёма, горизонтального перемещения и поясничной поддержки.

Построены кинематическая и динамическая модели системы с использованием метода Денавита–Хартенберга и уравнений Лагранжа, учтено снижение трения за счёт нанесения наносмазки.

Реализованы комбинированные алгоритмы управления на основе адмитансного подхода, ПИД-регулирования и скользящего режима для обеспечения стабильного и мягкого управления.

Разработан модуль распознавания намерений пациента на основе сигналов давления и момента с использованием модифицированного нечеткого управления.

Проведено сравнение фильтров Kalman, FIR и IIR, выбрано оптимальное решение для фильтрации сенсорных сигналов в режиме реального времени.

Создан и протестирован экспериментальный образец, подтверждена работоспособность системы в условиях, приближенных к клиническим.

7. Научная новизна исследования заключается:

В рамках исследования разработана математическая модель многозвенного реабилитационного робота на основе метода Денавита–Хартенберга и уравнений Лагранжа, учитывающая снижение трения за счёт нанесения наносмазки. Предложен адаптивный комбинированный алгоритм управления, сочетающий импедансное и ПИД-регулирование, а также скользящий режим для повышения робастности. Впервые в подъемную колонну интегрирован гибридный вихретоковый тормоз, обеспечивающий бесконтактное плавное торможение. Используются износостойкие композитные материалы (высокохромистый чугун и высокомарганцевая сталь) и нанотехнологии для повышения надёжности конструкции. Система управления реализована на основе сигналов от сенсоров давления и момента с применением модифицированного метода нечеткого управления. Путём сравнения фильтров Калмана, FIR и IIR установлено преимущество фильтра Калмана в задачах реального времени.

8. Практическая значимость:

Разработанная система реабилитационного робота для нижних конечностей реализована в виде полнофункционального экспериментального образца и успешно прошла испытания в условиях, приближенных к реальной клинической реабилитации. В предложенном техническом решении использованы многосвободностная конструкция, гибридный вихретоковый тормоз с мягким торможением, а также алгоритмы импедансного, скользящего и ПИД-управления с обеспечением гибкого взаимодействия с пациентом. Система позволяет эффективно разгружать поясничный отдел, сопровождать движения пациента во время тренировки и активизировать его участие в процессе восстановления. Внедрение алгоритмов фильтрации сигналов и распознавания двигательных намерений пациента значительно расширяет возможности интеллектуального взаимодействия человек–машина. Полученные результаты имеют прикладное значение для создания серийных медицинских реабилитационных устройств, обладают высоким потенциалом коммерциализации и могут быть внедрены в клиническую практику.

9. Основные положения, выносимые на защиту:

Предложена многосвободностная конструкция реабилитационного робота с вертикальными и горизонтальными приводами, поясничной поддержкой и подвижной платформой;

Разработан комбинированный алгоритм управления «адмитанс + PID + адаптивное скользящее управление», обеспечивающий устойчивое и плавное слежение за заданной скоростью при наличии внешних возмущений;

Реализован модуль нечеткого управления, основанный на данных от датчиков давления и момента, позволяющий в реальном времени распознавать намерения пациента (движение вперед, поворот и др.);

В модуле подъема впервые использован гибридный вихретоковый тормоз, обеспечивающий безопасное и регулируемое торможение при экстренных ситуациях;

Направляющие скольжения изготовлены из композитного материала (высокохромистый чугун и сталь Хэдфилда), что обеспечивает прочность, вязкость и износостойкость конструкции ;

Применена технология нанесения наносмазки, что позволило снизить коэффициент трения и упростить построение динамической модели;

Сформирована и экспериментально подтверждена полная динамическая модель реабилитационного робота на основе параметров D-Н и уравнений Лагранжа.

10. Апробация и публикации результатов исследования:

В ходе выполнения диссертационной работы автором были получены промежуточные результаты в области моделирования динамики, разработки алгоритмов управления и создания прототипа реабилитационного робота для нижних конечностей. Эти результаты отражены в ряде научных публикаций и патентов на изобретения.

Меркурьев И.В., Дуйшеналиев Т.Б., У Гуйцзюнь, Журавлёв О.В. Управление реабилитационным роботом для нижних конечностей на основе скользящего режима сверхспирального типа и адмитансного контроллера // Мехатроника, автоматика и робототехника. – 2025. – № 15. – С. 33–44. – DOI: 10.26160/2541-8637-2025-15-33-44. (РИНЦ)— Работа посвящена разработке методов управления реабилитационным роботом нижних конечностей.

Wang F., Guo W., Wu G., Li S. Research on Braking Characteristics of Hybrid Excitation Rotary Eddy Current Retarder // World Electric Vehicle Journal. – 2024. – Т. 15, № 10. – С. 443. (индексация Scopus)— В статье представлена конструкция гибридного вихретокового тормоза, установленного в нижней части подъёмной колонны, обеспечивающего мягкое торможение при внезапном падении пациента.

Wu G., Merkuryev I.V., Liang Z., Duishenaliev T.B., Yuan G., Guo X. Microstructure and tensile behavior of high-chromium cast iron/Hadfield steel composite fabricated by hot rolling process // Materials Research Express. – 2025. – Т. 12, № 2. – С. 026510. (индексация Web of Science)— В работе представлены результаты по разработке композитного материала из высокохромистого чугуна и стали Хэдфилда, применённого в скользящих узлах между подъёмной колонной и модулем поясничной поддержки.

Yang K., Xiong Y., Wu G., Lin H., Tang J., Wu C., Chen H., Wang Y. Multi- Dimensional Nano- Additives for Their Superlubricity: Tribological Behaviors and Lubrication Mechanisms // Advanced Materials Interfaces. – 2024. – 23 декабря. – Статья № 2400796. – DOI: 10.1002/admi.202400796. (индексация Web of Science)— Статья посвящена использованию наноматериалов и технологии нанесения суперсмазки в подъёмном модуле робота, что позволило существенно снизить коэффициент трения и пренебречь его влиянием в уравнениях динамики.

Wu Y., Du S., Wu G., Guo X., Wu J., Zhao R., Ma C. Minimum maximum regularized multiscale convolutional neural network and its application in intelligent fault diagnosis of rotary machines // ISA Transactions. – 2025. (индексация Web of Science)— В работе предложен алгоритм диагностики и прогнозирования отказов электроприводов на основе многомасштабной сверточной нейросети, обеспечивающий надёжность работы подъёмного модуля при реабилитации пациента.

также принял участие в IX Международной научно-практической конференции «Мехатроника, автоматизация и робототехника» (г. Санкт-Петербург, Россия).

опубликовано 6 научных статей, из которых 3 индексированы в Web of Science, 1 — в Scopus, 1 — в РИНЦ . Кроме того, подано 2 заявки на патенты на изобретения, зарегистрированные в Китайской Народной Республике. Указанные результаты составляют основу ключевых положений и научной новизны данной диссертации.

11. Ключевые слова: Робот для реабилитации нижних конечностей; адмитансное управление; скользящее управление; нечеткое управление; фильтр Калмана; наносмазка; вихретоковое торможение; диагностика электродвигателя; композиционные материалы.