В диссертационный совет ПДС 0200.007
при Федеральном государственном
автономном образовательном
учреждении высшего образования
«Российский университет дружбы народов
имени Патриса Лумумбы» (РУДН)
Адрес: 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д.6

Отзыв официального оппонента
доктора физико-математических наук, доцента
Холостовой Ольги Владимировны
на диссертационную работу
Блинова Александра Олеговича
«УПРАВЛЯЕМЫЕ СИСТЕМЫ ТВЕРДЫХ ТЕЛ С ИЗМЕНЯЕМОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ В АНТРОПОИДНЫХ УСТРОЙСТВАХ»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности
1.1.7. – Теоретическая механика, динамика машин

Актуальность темы диссертационной работы.

Антропоморфные роботы, экзоскелеты, манипуляторы представляют собой механические системы, практическое создание которых и моделирование требуют разработки новых методов исследования. Возникающие при этом трудности связаны с решением громоздких систем дифференциальных уравнений, описывающих поведение моделей с достаточно большим количеством степеней свободы. Актуальность исследования обусловлена моделированием механических систем с изменяемой геометрией и связями с использованием стержневых систем с абсолютно твёрдыми звеньями и звеньями переменной длины, что позволит создавать новые многозвенные механизмы антропоидной структуры, применяемые для создания комфортабельных экзоскелетов.

Основной целью диссертации является разработка моделей механических управляемых систем твердых тел с шарнирами и изменяемой геометрией под действием внутренних управляющих усилий и наложенных внешних связей применительно к динамике антропоидных структур типа экзоскелетов.

Характеристика содержания диссертационной работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 195 наименований, приложения и изложена на 174 страницах.

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи, охарактеризованы научная новизна результатов, их теоретическая и практическая значимость, приведены

методы исследования поставленных задач. Перечислены основные результаты, выносимые на защиту, обоснована их достоверность.

Глава 1 посвящена подробному научному анализу имеющихся моделей экзоскелетов, актуальности вопросов практического применения моделей антропоморфных механизмов в виде экзоскелетов, исследованию точности аппроксимации биологических прототипов стержневыми системами, учёта изменения длин звеньев в многозвенных механизмах с учётом динамики электроприводов или применения магнитно-реологической жидкости для управления жёсткостью звена.

В **главе 2** рассматривается модель антропоида с пятью абсолютно твердыми подвижными управляемыми звеньями на плоскости и в пространстве с углами, отсчитываемыми между звеньями. Предложен новый класс управляющих моментов в виде ступенчатых кусочно-заданных функций, интерполяционных многочленов и полиномов пятой степени. Получено решение задачи Коши системы дифференциальных уравнений. Оценкой энергетических затрат для моделей активных экзоскелетов показана необходимость их учета при выборе автономных источников энергии. При этом предпочтение при проектировании антропоидных систем следует отдавать трёхмерной модели.

Глава 3 посвящена моделированию антропоида звеньями с невесомым участком переменной длины между абсолютно твёрдыми участками, находящимися на концах звена. Получены системы дифференциальных уравнений движения моделей с пятью звеньями переменной длины на плоскости и в пространстве. Решены прямая и обратная задачи динамики для плоской модели с помощью методики задания программного движения экзоскелета. Сравнительный анализ оценки энергетических затрат моделей с абсолютно твёрдыми звеньями и звеньями переменной длины показал их существенное увеличение для механизма со звеньями, изменяющими длину.

В **главе 4** рассмотрены приближённая и уточнённая модели звеньев переменной длины с регулируемой жёсткостью на основе магнитно-реологических сред, использование которых позволит создавать комфортабельные экзоскелеты нового поколения, моделирующие движения опорно-двигательного аппарата человека. Представлена конструкция звена экзоскелета переменной длины с регулируемой жесткостью. Получена формула, связывающая силу сопротивления, реализуемая магнитно-реологической жидкостью, с напряжённостью внешнего магнитного поля. Предложены метод управления свойствами магнитно-реологической жидкости внешним магнитным полем, способы управления изменением длин и углов между звеньями, реализующие требуемое движение. Реализация численных расчётов математических моделей в виде систем обыкновенных дифференциальных уравнений визуализирована графиками и анимационными роликами, что позволяет дать оценку движений моделей.

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Достоверность и новизна результатов диссертации.

В работе получены следующие основные результаты:

1. Определены основные проблемы моделирования опорно-двигательного аппарата человека стержневыми механическими системами.

2. Исследовано применение механических управляемых систем твёрдых тел антропоидного типа с изменяемой геометрией под действием внутренних усилий и внешних связей для создания комфортабельных экзоскелетов.

3. На основе магнитно-реологической жидкости разработаны звенья переменной длины с регулируемой жесткостью.

4. На основании численного анализа разработанных моделей со звеньями переменной длины и решения задачи управления движениями антропоидных механизмов даны практические рекомендации к созданию экзоскелетов.

Достоверность полученных в диссертации результатов обоснована корректностью математических преобразований, основанных на классических положениях теоретической механики, использованием современных методов математического моделирования, соответствием полученных результатов экспериментальным данным и результатам других авторов. Достоверность полученных результатов также подтверждена их обсуждениями на научных конференциях.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Основные выводы, положения и рекомендации, сделанные в работе, строго математически обоснованы использованием классических положений теоретической механики, теории дифференциальных уравнений, теории управления, математического моделирования. Результаты численных расчётов соответствуют экспериментальным данным и результатам, полученным другими авторами.

Результаты, полученные в диссертационной работе, выполнялись при поддержке грантов Российского научного фонда (№ 22-29-20308, https://rscf.ru/en/project/22-29-20308/ «Разработка электромеханической модели экзоскелета со звеньями переменной длины»; № 22-21-00491, https://rscf.ru/project/22-21-00491/ «Разработка экзоскелета с регулируемой жесткостью звеньев»), Фонда содействия инновациям в рамках программы «Умник» в 2021-2023 годах, проект № 0074423 «Разработка звена экзоскелета переменной длины с управляемой жесткостью на основе магнитно-реологической среды», опубликованы в рецензируемых журналах, что вполне подтверждает их обоснованность.

Ценность для науки и практики результатов работы.

Полученные в работе результаты представляют, как теоретический, так практический интерес, обусловленный применением экзоскелетов нового

поколения со звеньями переменной длины с регулируемой жёсткостью в различных отраслях промышленности, медицине, сельском хозяйстве, а также перспективами коммерциализации подобных проектов по их разработке.

Подтверждение опубликования основных результатов диссертации в научной печати.

Основные результаты диссертации опубликованы в научных журналах и материалах конференций, среди которых 16 статей в изданиях, индексируемых в международных базах научного цитирования, 4 статьи в журнале, индексируемом в RSCI, 2 патента, 5 программ для ЭВМ, 2 монографии.

Соответствие содержания автореферата основным положениям диссертации.

Автореферат полностью и корректно отражает основные положения диссертационной работы.

Замечания по диссертационной работе.

1. В работе не описана электрическая подсистема функционирования и управления электроприводами экзоскелета. В частности, не проведены расчеты потерь энергии в электродвигателях, которые тоже могут быть значимыми.
2. При оценках погрешности следовало бы провести оценку погрешности, связанную с тем, что центр масс реального звена человека располагается не в его геометрическом центре, а смещен к вышерасположенному суставу. Эта погрешность представляется важной при оценке точности моделирования опорно-двигательного аппарата человека абсолютно твердыми инерционными однородными стержнями.
3. В главе 4 при оценках энергетических затрат следовало бы указать, что приводимые формулы являются оценками энергетических затрат механизма, полученными без учета электрической энергии, подаваемой на катушки управления свойствами магнитно-реологической жидкости. Если она не очень велика, следовало бы написать о том, что ею пренебрегаем.
4. В главе 4 имеется упоминание о трудоемкости компьютерной реализации уточненной модели звена переменной длины с магнитно-реологической жидкостью, однако далее тема автоматизированных преобразований и вычислений не раскрыта. Следовало бы добавить в текст диссертации подробные оценки трудоемкости, количества операций, времени вычислений при

численных решениях, алгоритмов работы программ. Это улучшило бы работу, тем более, что созданные в диссертации механические модели реализованы также в виде компьютерных программ, которые зарегистрированы как РИД.

Отмеченные недостатки не снижают общей положительной оценки работы.

Заключение

Диссертационное исследование Блинова Александра Олеговича «Управляемые системы твердых тел с изменяемой геометрией в антропоидных устройствах» является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится новое решение научной задачи моделирования антропоидных систем с учетом динамики приводов и переменности длин звеньев, имеющей важное значение для создания роботизированных экзоскелетов, максимально повторяющих движения человека. Работа соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, согласно п. 2.2 раздела II Положения о присуждении ученых степеней в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет дружбы народов», утвержденного ученым советом РУДН протокол № УС-1 от 22.01.2024 г., а её автор, Блинов Александр Олегович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.7. – Теоретическая механика, динамика машин.

Официальный оппонент:
профессор кафедры мехатроники
и теоретической механики
Федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Московский
авиационный институт (национальный
исследовательский университет)»,
доктор физико-математических наук
(специальность 01.02.01 - Теоретическая механика),
доцент
28.04.2025. Холостова Ольга Владимировна

Подпись Холостовой О.В. заверяю.

125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, Московский авиационный институт, Тел. +7 499 158-13-73, e-mail: kholostova_o@mail.ru