

На правах рукописи

Блинов Александр Олегович

**Управляемые системы твердых тел с изменяемой геометрией
в антропоморфных устройствах**

Специальность 1.1.7.

Теоретическая механика, динамика машин

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва 2025

Работа выполнена на кафедре высшей математики филиала федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» в г. Смоленске.

Научный руководитель: **Борисов Андрей Валерьевич**,
доктор физико-математических наук, доцент, профессор
кафедры высшей математики филиала федерального
государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования «Национальный
исследовательский университет «МЭИ» в г. Смоленске.

Официальные оппоненты: **Холостова Ольга Владимировна**,
доктор физико-математических наук, доцент, профессор
кафедры мехатроники и теоретической механики
Московского авиационного института.

Степанов Сергей Яковлевич,
доктор физико-математических наук, профессор,
старший научный сотрудник Федерального
исследовательского центра «Информатика и
управление» Российской академии наук.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение
науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова
Российской академии наук.

Защита состоится «22» мая 2025 г. в 15 часов 30 минут на заседании
диссертационного совета ПДС 0200.007 при ФГАОУ ВО «Российский университет
дружбы народов имени Патриса Лумумбы» по адресу: 117198, г. Москва, ул.
Миклухо-Маклая, д. 6.

С диссертацией можно ознакомиться в Учебно-научном информационном
библиотечном центре (Научной библиотеке) ФГАОУ ВО «Российский университет
дружбы народов имени Патриса Лумумбы» по адресу: 117198, г. Москва, ул.
Миклухо-Маклая, д. 6.

Объявление о защите размещено на сайтах ВАК и РУДН:
<https://vak.minobrnauki.gov.ru>, <https://www.rudn.ru/science/dissovet>

Автореферат разослан «___» _____ 20__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета ПДС 0200.007
доктор физико-математических наук, доцент

Будочкина С.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Общая характеристика проблемы. Проблемы разработки механических управляемых систем твердых тел с изменяемой геометрией и связями становятся востребованными для реализации движения антропоидных устройств. Для этого необходимы исследования кинематических цепей с шарнирами и связями, так как они обеспечивают преобразование внутренней энергии в целенаправленное движение, аналогично тому, как это происходит в биологических телах. Такими механическими системами является широкий и практически важных класс новых машин: антропоморфные роботы, экзоскелеты, манипуляторы. Для их моделирования и практического создания требуется использование многих достижений научно-технического прогресса.

Актуальность темы исследования определяется тем, что возможные области применения систем антропоидного типа с большим количеством степеней свободы, вследствие изменяемой геометрии, весьма широки и все время увеличиваются. Так как вся инфраструктура сделана под антропоморфную двуногую ходьбу, необходимы соответствующие роботы с конечностями с целью использования в помещениях для помощи человеку. Механические управляемые системы с изменяемой геометрией под действием внутренних усилий и связей являются базовыми для создания разнообразных робототехнических систем: роботов-манипуляторов, антропоморфных роботов, экзоскелетов и т.д. В природе антропоморфные биомеханические системы изменяют свою геометрию во время передвижения и имеют большое количество степеней свободы. Разработка робототехнических механизмов, близких к реальным биомеханическим системам, сталкивается трудностями, связанными с тем, что составленные системы дифференциальных уравнений, описывающие поведение модели с большим количеством степеней свободы, являются громоздкими. Такие модели требуют большого количества независимых приводов, что увеличивает массу конструкции и приводит к увеличению энергозатрат. Разработка автономных или частично автономных механических систем с возможностью изменения геометрии и структуры связей представляет собой сложную междисциплинарную проблему, затрагивающую механику и теорию управления. Это обуславливает необходимость создания новых подходов к анализу и моделированию подобных устройств. Теоретически актуальность диссертационной работы обосновывается тем, что впервые реализовано комплексное исследование антропоидных механических систем с динамически изменяемой конфигурацией, включающее различные варианты стержневых конструкций, где звенья могут быть как абсолютно жесткими, так и с переменной длиной. Практическая значимость работы связана с растущей потребностью в методах, позволяющих исследовать биомеханические процессы и разрабатывать на их основе роботизированные устройства. Полученные результаты будут способствовать созданию востребованных механических систем антропоморфного типа, что подчеркивает значимость данного исследования.

Цель диссертационной работы – 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.

Задачи исследования:

- анализ имеющихся моделей эндо-, экзоскелетов и антропоморфных роботов, конструкций звеньев переменной длины, магнитно-реологических сред;
- выявление проблем, возникающих при моделировании опорно-двигательного аппарата человека стержневыми системами, оценка их влияния на точность модели;
- построение аналитических моделей управляемых антропоидных механизмов, изменяющих свою геометрию под действием приводов в плоском и пространственном случаях в виде дифференциальных уравнений для моделирования динамики экзоскелетов и антропоморфных роботов;
- создание модели звена переменной длины с регулируемой жесткостью для более комфортабельного движения человека в экзоскелете, исследование ее поведения;
- численный анализ разработанных антропоидных моделей: решение обратной и прямой задач динамики, аппроксимация управляющих усилий, исследование влияния электроприводов на динамику моделей;

— оценка энергетических затрат при реализации управляемого движения в предложенных антропоидных механических системах.

Объектом исследования являются антропоидные многозвенные механические управляемые системы твердых тел с изменяемой геометрией и различными конструкциями звеньев переменной длины под действием внутренних управляющих усилий и внешних связей.

Предметом исследования являются методы управления антропоидными механическими системами типа экзоскелета с заданными исполнительными механизмами с фиксированным количеством звеньев, приближенные к реальным.

Методы исследования. Для решения вышеуказанных задач и достижения цели использовались методы теоретической механики, численно-аналитические методы, теории дифференциальных уравнений, теории управления и устойчивости, математического моделирования, эмпирические данные о двуногой ходьбе и об элементах механизмов.

Достоверность полученных в работе результатов, научных положений, выводов и рекомендаций обоснована:

- строгим применением классических положений теоретической механики, современных реализаций численных методов и методов математического моделирования;
- отсутствием противоречий данным других ученых.

Научная новизна исследования заключается в том, что предложена новая отрасль в механике моделирования управляемых антропоморфных систем, заключающаяся в применении звеньев с изменяемой длиной разных конструкций, в том числе на основе магнитно-реологической жидкости.

Выявлены проблемы, возникающие при моделировании опорно-двигательного аппарата человека стержневыми механическими системами, заключающиеся в том, что: 1) в суставах оси вращения изменяют свое положение, не оставаясь на одном месте, происходит изменение расстояния между точками, определяющими положение мгновенных осей вращения в суставах, поэтому, изменяется длина звена опорно-двигательного аппарата пользователя, поэтому необходимы звенья переменной длины в экзоскелетах; 2) в имеющихся математических моделях антропоидных механизмов углы отсчитываются от фиксированных направлений – вертикали или горизонтали, тогда как в экзоскелете при работе электроприводов с редукторами изменяются относительные углы между звеньями, использование которых требует новых математических моделей и методов управления ими; 3) значительные затраты энергии в существующих экзоскелетах требуют новых моделей звеньев переменной длины, например, с использованием магнитно-реологических сред.

Впервые разработаны математические модели антропоморфных устройств, позволяющие учитывать влияние приводов, реализующих управляемое изменение геометрии звеньев, на динамику антропоидного механизма.

Впервые разработаны в виде математических моделей для использования в экзоскелетах звенья, изменяющие свою длину, с регулируемой жесткостью с применением магнитно-реологической жидкости, что определяет новизну в разработке антропоидных моделей и отличает данную диссертационную работу.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Оценки погрешности, возникающие при моделировании биомеханических систем механическими системами.
2. Модели управляемых механизмов с изменяемой геометрией под действием внутренних усилий и внешних связей, сопоставление моделей с учетом реальных приводов и с теоретически заданными управляющими моментами, значимость учета влияния вращающихся частей в электроприводе и его массы на динамику всего механизма.
3. Модели звеньев переменной длины с регулируемой жесткостью с использованием магнитно-реологической жидкости, разработанные для применения при создании более комфортных экзоскелетов, в сравнении с имеющимися моделями.
4. Модели управляемого движения антропоидных механических систем с изменяемой геометрией под действием внутренних управляющих усилий и внешних связей применительно к экзоскелетам, сравнительный анализ динамики моделей с различными параметрами.
5. Количественные характеристики моделей для создания более комфортабельных экзоскелетов, близких по своей динамике к опорно-двигательному аппарату человека.

Личный вклад соискателя. Постановка задач разработана автором совместно с научным руководителем, проведение расчетов проводилось автором лично, анализ результатов осуществлялся при непосредственном участии автора в творческих коллективах, сформированных для работы над проектами РНФ.

Теоретическая значимость полученных результатов. Теоретическая значимость заключается в создании новых моделей механических управляемых систем твердых тел с реконфигурируемой геометрией звеньев и внешними связями под действием управляющих сил и моментов, создаваемых приводами, новых математических моделей звеньев изменяющих свою длину с переменной жесткостью. Осуществлено исследование математических моделей антропоморфных механических систем твердых тел с активным управлением, намечены пути их применения для разработки экзоскелетов. Проведен численный анализ разработанных моделей со звеньями переменной длины, решены задачи управления движением антропоморфных механизмов, решались прямая и обратная задачи динамики, сформулированы рекомендации для разработки комфортабельных экзоскелетов.

Практическая значимость полученных результатов. Результаты диссертационного исследования практически позволят создавать управляемые экзоскелеты нового поколения со звеньями переменной длины с регулируемой жесткостью. Большое значение имеют широкие перспективы внедрения экзоскелетов в промышленности, сельском хозяйстве, в аэрокосмической отрасли, медицине, в быту.

Апробация результатов диссертации. Результаты диссертационного исследования использованы в учебном процессе филиала ФГБОУ ВО "НИУ "МЭИ" в г. Смоленске.

Основные положения, выводы и результаты научного исследования докладывались и обсуждались на международных научных конференциях в Москве, Санкт-Петербурге, Курске, Смоленске в 2021-2024 годах. На научном семинаре «Математическое моделирование процессов динамики» (2024, Москва, РУДН).

Программы, созданные для реализации механических моделей, разработанных в диссертации, зарегистрированы в государственном Реестре программ для ЭВМ. На модели с электроприводами и магнитно-реологической жидкостью получены патенты.

Работа выполнялась при поддержке грантов Российского научного фонда: 1) № 22-29-20308, <https://rscf.ru/en/project/22-29-20308/> «Разработка электромеханической модели экзоскелета со звеньями переменной длины»; 2) № 22-21-00491, <https://rscf.ru/project/22-21-00491/> «Разработка экзоскелета с регулируемой жесткостью звеньев». Поддержке Фонда содействия инновациям в рамках программы «Умник» в 2021-2023 годах, проект № 0074423 «Разработка звена экзоскелета переменной длины с управляемой жесткостью на основе магнитореологической среды».

Опубликованность результатов. По теме диссертации опубликовано 38 научных работ, среди которых 16 статей в научных журналах и материалах конференций, индексируемых в международных базах научного цитирования, 4 статьи в журнале, индексируемом в RSCI, 5 статей в других научных журналах, 1 глава в книге, 2 патента, 5 программ для ЭВМ, 2 монографии, 3 статьи сборниках и материалах конференций. Общий объем опубликованных материалов составляет около 600 страниц.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Объем диссертации составляет 174 страницы. Список литературы содержит 195 наименований работ отечественных и зарубежных авторов, а также интернет-ресурсов.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи, охарактеризованы научная новизна результатов, их теоретическая и практическая значимость, описаны методы исследования. Сформулированы положения, выносимые на защиту. Обоснована достоверность результатов. Приведена информация о публикации результатов и их апробации.

В **первой главе «Анализ научных работ, моделей и проблем при создании антропоморфных механизмов»** исследован вопрос количественной оценки публикаций по темам: антропоморфные роботы, экзоскелеты и активные управляемые протезы. Установлено,

что практические применения моделей антропоморфных механизмов в виде экзоскелетов стало актуальным и в настоящее время опережает создание антропоморфных роботов.

Вопросы моделирования антропоидов и различных процессов в динамических системах исследованы Галиуллиным А.С. [1], Корневым Г.В. [2], Черноусько Ф.Л. и Решмина С.А. [3, 4], Ивлева Г.И. [5], Ганиева Р.Ф., Глазунова В.А. Филиппова Г.С. [6,7], Холостовой О.В. [8], Степанова С.Я. [9], Яцуна С.Ф. с соавторами [10] и многих других авторов.

В главе описаны современные модели экзоскелетов. Проведенный анализ научных публикаций и патентов имеющихся моделей показал, что надо создавать модели экзоскелетов, более близкие к биомеханике опорно-двигательного аппарата человека. Направление, связанное с моделированием антропоидных систем звеньями переменной длины, предложено в работах Мухарлямова Р.Г., Каспировича И.Е., Борисова А.В. и соавторов [11,12].

Из анализа публикаций следует, что учет изменения длин звеньев в многосвязных механизмах с учетом динамики электроприводов или применения магнитно-реологической жидкости для управления жесткостью звена практически не проводился и требует исследования.

Так как звенья опорно-двигательного аппарата человека имеют сложную геометрическую форму, проведен анализ точности аппроксимации биологических прототипов стержневыми системами. Установлено, что погрешности аппроксимации являются существенными.

Во второй главе «Математические модели антропоидных механизмов с углами, отсчитываемыми между абсолютно твердыми звеньями» исследованы модели антропоидов с пятью абсолютно твердыми звеньями на плоскости и в пространстве. Предложенные модели экзоскелетов отличаются от ранее созданных тем, что используются углы между звеньями, которые соответствуют реальной работе электроприводов с редукторами.

Плоская модель экзоскелета, состоит из пяти подвижных управляемых звеньев, с углами, отсчитываемыми между звеньями и шестью системами координат – абсолютной и локальными (рис. 1 а). Введена неподвижная правая декартова система координат A_0xyz , с плоскостью xA_0y , в которой происходит движение антропоида. Для описания движения первого звена A_0A_1 введена подвижная локальная система координат $A_0x_1y_1$, жестко связанная со звеном. Аналогично локальные системы координат введены для всех пяти звеньев.

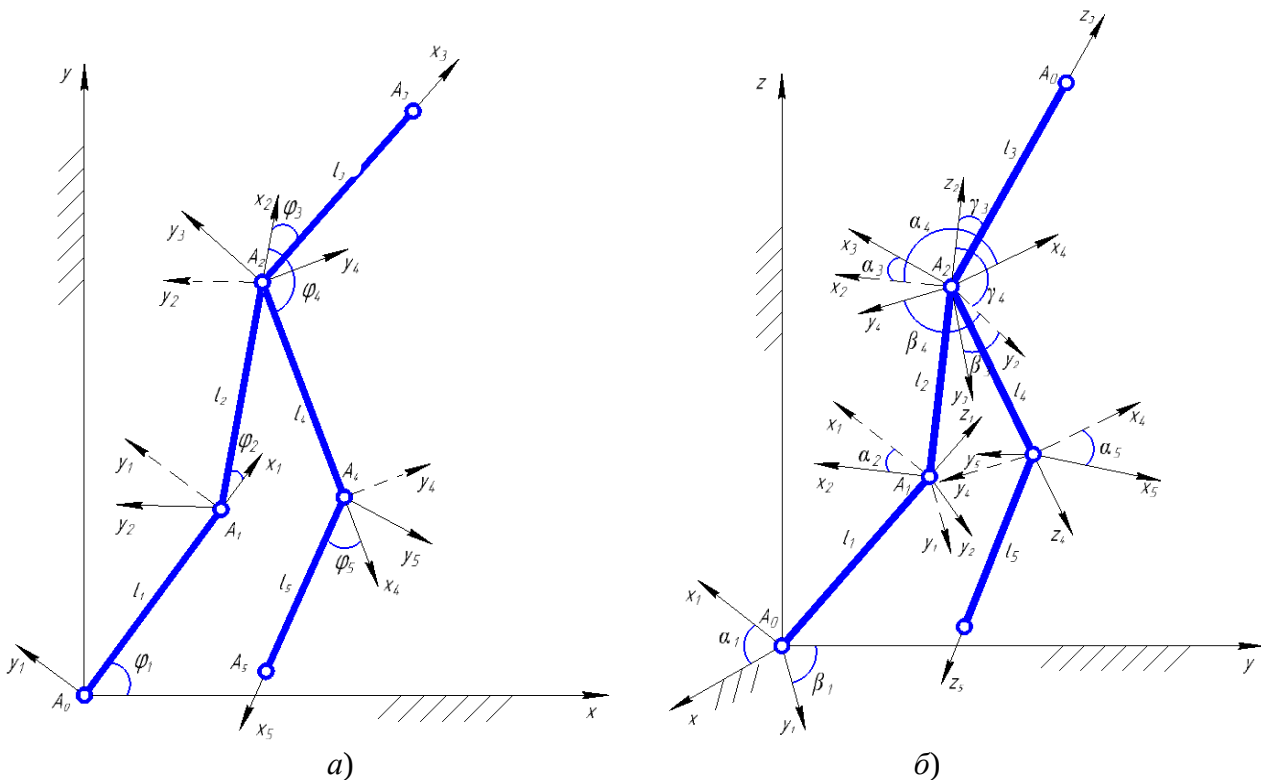


Рис. 1. Модель механизма с пятью подвижными звеньями и локальными системами координат на плоскости а) и в пространстве б)

Форма и длины звеньев: $A_0A_1 = l_1$, $A_1A_2 = l_2$, $A_2A_3 = l_3$, $A_2A_4 = l_4$, $A_4A_5 = l_5$ – прямолинейные абсолютно твердые стержни, масса первого звена A_0A_1 равна m_1 , второго A_1A_2 равна m_2 и т.д. Первое звено A_0A_1 совершает вращательное движение в цилиндрическом

шарнире A_0 . Положение звена зависит от одного параметра и однозначно определяется углом $\varphi_1(t)$, M_1 – управляющий момент, развиваемый в шарнире A_0 . Положение второго звена A_1A_2 , совершающего плоскопараллельное движение, зависит от движения полюса A_1 и от угла $\varphi_2(t)$. Управляющий момент, развиваемый в шарнире A_1 , обозначен M_2 . Для остальных звеньев, совершающих плоскопараллельное движение, углы и управляющие моменты вводятся аналогично второму звену. Обобщенными координатами являются углы между соответствующими осями координат (рис. 1 а): φ_i , ($i = 1, 2, \dots, 5$). Для реализации управляемого движения необходимо пять независимых электроприводов.

При определении кинетической энергии учтено, что звенья $A_{i-1}A_i$ ($i = 2, 3, \dots, 5$), совершают плоскопараллельное движение с полюсами A_{i-1} :

$$T_{A_{i-1}A_i} = \frac{1}{2} \left[m_i (\dot{x}_{A_{i-1}}^2 + \dot{y}_{A_{i-1}}^2) + 2m_i \begin{vmatrix} \dot{x}_{A_{i-1}} & \dot{y}_{A_{i-1}} & 0 \\ 0 & 0 & \sum_{j=1}^i \dot{\varphi}_j \\ r_x & r_y & 0 \end{vmatrix} + I_i \left(\sum_{j=1}^i \dot{\varphi}_j \right)^2 \right], \quad (1)$$

где x_{A_i} , y_{A_i} – координаты точки A_i , являющейся полюсом для рассматриваемого звена $A_{i-1}A_i$; r_x , r_y – координаты проекции радиус-вектора центра масс звена $A_{i-1}A_i$ относительно полюса A_i ; I_i – момент инерции звена относительно полюса ($i = 1, 2, \dots, n$).

Кинетическая энергия звеньев, совершающих плоскопараллельное движение, вычислялась для контроля правильности двумя способами. Использован метод суммирования кинетических энергий бесконечно малых участков стержня:

$$T_{A_{i-1}A_i} = \frac{1}{2} \int_0^{l_i} V_\chi^2 \rho_i d\chi, \quad (2)$$

где χ – координата бесконечно малой частицы звена $A_{i-1}A_i$; ρ_i – плотность материала звена $A_{i-1}A_i$; V_χ^2 – квадрат скорости бесконечно малой частицы звена $A_{i-1}A_i$, вычисляемый относительно начала координат – точки A_0 .

Оба описанных метода подсчета кинетической энергии были реализованы и получено совпадение результатов.

Составлена система уравнений Лагранжа второго рода с использованием локальных систем координат и матриц поворота. Для модели антропоидного механизма необходимо решить следующие задачи: 1) синтезировать траекторию движения каждого звена экзоскелета, близкую к биомеханическому движению ног и корпуса человека; 2) используя результаты решения первой задачи, решить обратную задачу динамики и определить управляющие моменты; 3) зная управляющие усилия, подобрать двигатели и редукторы для реализации управляемого движения экзоскелета; 4) разработать систему управления движением на основе кусочно-заданных ступенчатых функций, интерполяции, аппроксимации; 5) решив задачу Коши для математической модели антропоидного механизма, провести численное моделирование движения звеньев и выполнить сравнительный анализ полученных траекторий движения звеньев с исходным движением; 6) оценить энергетические затраты в приводах антропоида; 7) исследовать влияние вращающихся роторов электродвигателя на движения экзоскелета. Все поставленные задачи были решены в диссертации. Установлено, что наилучшие результаты получаются при использовании интерполяции, применение ступенчатых функций приводит к достаточно хорошему совпадению зависимостей углов поворота от времени, лучшему в сравнении с применением аппроксимации полиномом.

В главе исследовано влияние массивных элементов электроприводов на модель управления движением экзоскелета. Электромеханический привод экзоскелета содержит электродвигатели и редукторы, расположенные в областях цилиндрических шарниров A_i ($i = 1, 2, \dots, 5$). Роторы электродвигателей, совершающие вращательное движение относительно осей, находящихся в шарнирах A_i ($i = 1, 2, \dots, 5$), являются подвижными относительно движущихся звеньев. Кинетическая энергия вращающихся роторов равна:

$$T_R = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^5 I_{R_i} k_{R_i}^2 \dot{\varphi}_i^2, \quad (3)$$

где k_{R_i} – передаточное число редуктора; I_{R_i} – момент инерции ротора электродвигателя относительно оси вращения.

Решение задачи Коши для системы уравнений без учета электроприводов представлено на рис. 2 а) с учетом электроприводов, с исходными моментами – на рис. 2 б).

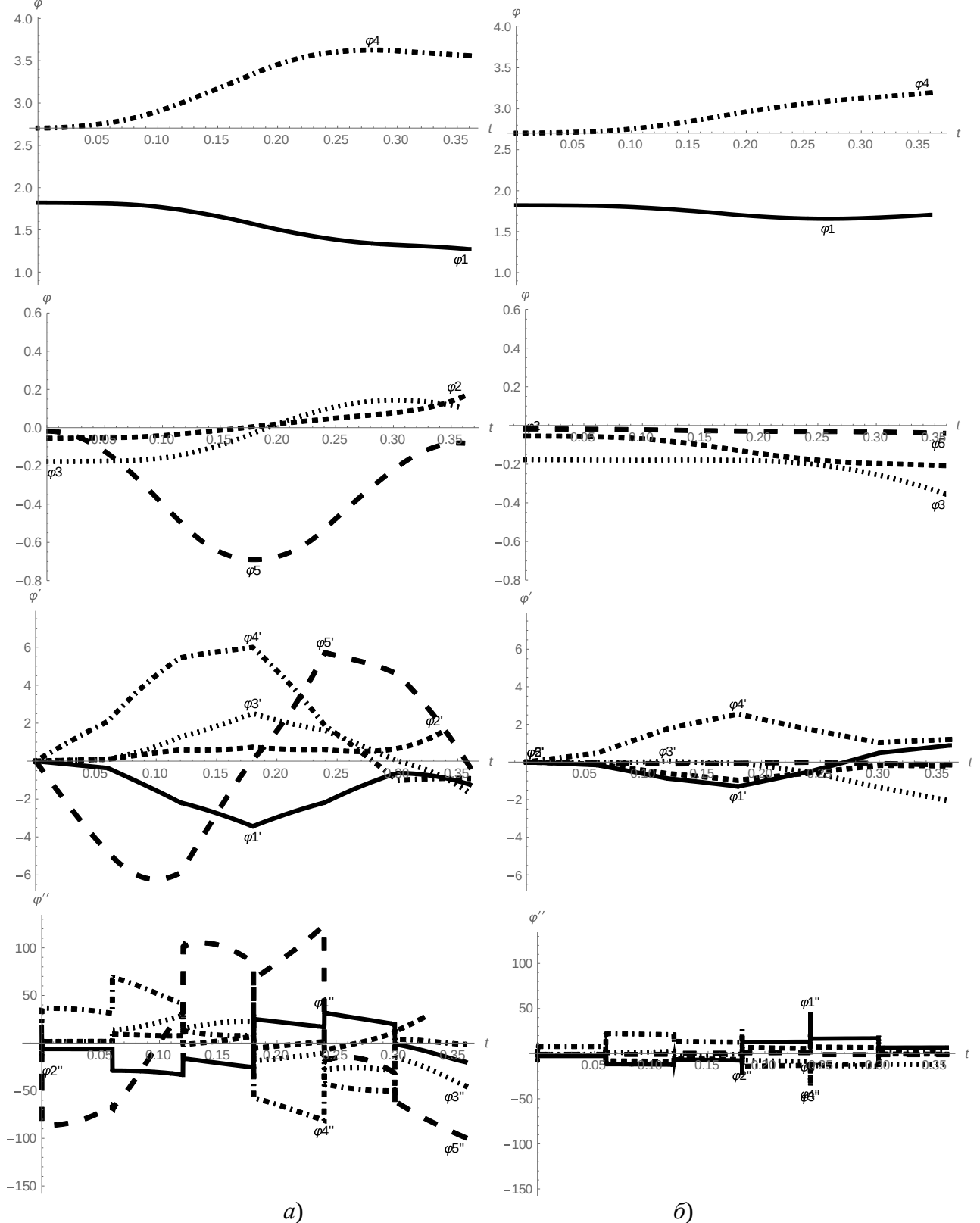


Рис. 2. Решение задачи Коши без учета а) и с учетом электроприводов б): углы поворота φ_i (рад), угловые скорости $\dot{\varphi}_i$ (рад/с), угловые ускорения $\ddot{\varphi}_i$ (рад/с²) звеньев в зависимости от времени t (с) ($i = 1, 2, \dots, 5$)

Сравнение результатов, представленных на рис. 2, показало, что движение экзоскелета изменилось, антропоидность хорошо сохранилась только в первой половине движения. Для верификации модели были пересчитаны управляющие моменты с учетом наличия электроприводов, затем с ними была решена задача Коши. В результате решения графики получились практически идентичными рисунку 2 а.

Для приближения к реальности рассмотрена 3D модель антропоидного механизма, состоящая из пяти подвижных звеньев, реализуемых стержнями. Введены шесть декартовых систем координат, определяющих положения звеньев: неподвижная система $Oxyz$ и пять локальных систем (рис. 1 б), связанных с подвижными звеньями. Оси A_i-1z_i направлены вдоль звеньев. Отсчет углов производится между соответствующими осями координат против стрелки часов от звена с меньшим номером. Модель голеностопного сустава представляет комбинацию двух цилиндрических шарниров, реализующих два движения (рис. 1 б). Коленный сустав моделируется цилиндрическим шарниром, реализующим вращательное движение. Тазобедренный сустав моделируется сферическим шарниром, реализующим три вращательных движения. Такой набор шарниров реализует все соответствующие биомеханике опорно-двигательного аппарата человека движения. Положение звеньев модели определяется десятью параметрами – углами $\alpha_1(t)$, $\alpha_2(t)$, $\alpha_3(t)$, $\alpha_4(t)$, $\alpha_5(t)$, $\beta_1(t)$, $\beta_3(t)$, $\beta_4(t)$, $\gamma_3(t)$, $\gamma_4(t)$, которые примем за обобщенные координаты.

Подсчитана кинетическая энергия для рассматриваемой модели. Выражения кинетической энергии первого и второго звеньев имеют вид:

$$T_1 = 0.5[m_1 l_1^2 n_1^2 (\dot{\alpha}_1^2 \cos^2(\beta_1) + \dot{\beta}_1^2) + I_1 (\dot{\alpha}_1^2 + \dot{\beta}_1^2)], \quad (4)$$

$$\begin{aligned} T_2 = & 0.5[m_2 (0.5 l_1^2 (1 + \cos(2\beta_1)) + l_2^2 n_2^2 (0.75 - 0.25 \cos(2\alpha_2)) + \\ & + 0,125 (\cos(2(\alpha_2 - \beta_1)) + \cos(2(\alpha_2 + \beta_1))) + 0.25 \cos(2\beta_1)) + \\ & + l_1 l_2 n_2 (\cos(\alpha_2) + 0.5(\cos(\alpha_2 - 2\beta_1) + \cos(\alpha_2 - 2\beta_1))) \dot{\alpha}_1^2 + \\ & + 0.5 m_2 l_2^2 n_2^2 \dot{\alpha}_2^2 + 0.5 m_2 (l_1 + l_2 n_2 \cos(\alpha_2))^2 \dot{\beta}_1^2 + m_2 \cos(\beta_1) (l_2^2 n_2^2 + l_1 l_2 n_2 \cos(\alpha_2)) \dot{\alpha}_1 \dot{\alpha}_2 + \\ & + m_2 \sin(\beta_1) \sin(\alpha_2) (l_2^2 n_2^2 \cos(\alpha_2) + l_1 l_2 n_2) \dot{\alpha}_1 \dot{\beta}_1 + I_2 (\dot{\alpha}_1^2 + \dot{\beta}_1^2 + \dot{\alpha}_2^2 + 2\dot{\alpha}_1 \dot{\alpha}_2 \cos(\beta_1))]. \end{aligned} \quad (5)$$

Динамика системы описывается уравнениями Лагранжа, составленными с использованием локальных систем координат и матриц поворота. Найдено решение обратной задачи динамики (рис. 3).

Максимальные значения моментов не превышают 800 Н·м. Исходя из этого, формулируются требования к приводам звеньев по максимальному значению. Сравнение механизмов показывает, что при переходе к трехмерной модели управляющие моменты для каждой обобщенной координаты стали меньше. Затраты энергии при движении механизма с пятью подвижными звеньями на плоскости $A = 1090.17$ Дж, в пространстве $A = 440.61$ Дж. Сравнивая затраты энергии в пространственном случае с плоской моделью, установлено, что ее расход в 3D случае снизился.

В третьей главе «Моделирование антропоида звеньями с невесомым участком переменной длины между двумя абсолютно твердыми частями» разработаны модели экзоскелета с пятью звеньями переменной длины на плоскости (рис. 4 а) и в пространстве (рис. 4 б). Модель экзоскелета содержит пять звеньев с изменяемой длиной (рис. 4 а). Звено включает в себя невесомый участок $B_i C_i = \xi_i(t)$ ($i = 1, 2, \dots, 5$) с изменяемой длиной и два весовых участка с постоянной длиной l_{ij} ($i = 1, 2, \dots, 5; j = 1, 2$). Первый индекс i определяет номер звена, второй j – задает номер участка с постоянной длиной на звене. Весомые части совершают на невесомом участке $B_i C_i$ прямолинейное движение относительно друг друга вдоль прямой, соединяющей начало и конец звена. Для управления изменением длины звена, в каждой точке C_i ($i = 1, 2, \dots, 5$) устанавливаются электрические двигатели с реечными или винтовыми передачами, учитываем их наличие сосредоточенными массами m_{Ci} . В области каждого цилиндрического шарнира A_i ($i = 0, 1, 2, \dots, 5$) устанавливаются электродвигатели и редукторы, изменяющие углы между звеньями с массами m_{A_i} . Положение экзоскелета на плоскости задается углами, отсчитываемыми между звеньями $\varphi_i(t)$ и изменяемыми длинами участков $\xi_i(t)$ ($i = 1, 2, \dots, 5$).

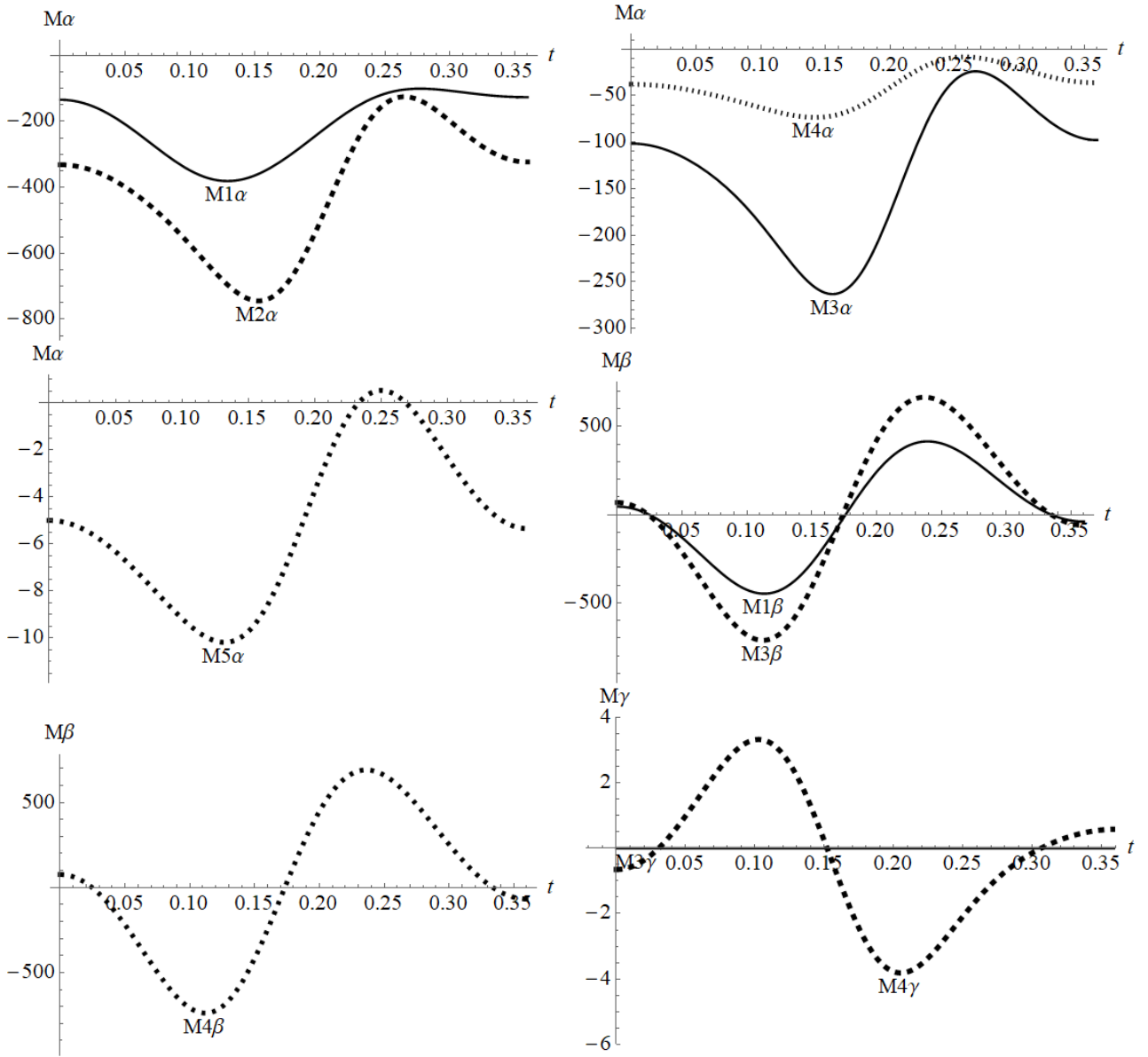


Рис. 3. Изменение управляющих моментов во времени 3D модели экзоскелета

Кинетическая энергия экзоскелета есть сумма энергий всех инерционных участков звеньев с неизменяемой длиной $A_i B_i$ и $C_i A_i$, а также точечных масс, моделирующих электроприводы:

$$2T = \sum_{i=0}^5 m_{A_i} V_{A_i}^2 + \sum_{i=1}^5 m_{C_i} V_{C_i}^2 + \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^5 \int_0^{l_{ij}} \rho_{ij} V_{ij}^2 d\zeta_{ij} + \sum_{i=0}^5 I_{R_i} k_{R_i}^2 \dot{\phi}_i^2, \quad (6)$$

где ζ_{ij} – координата бесконечно малой частицы j -того весомого участка i -того звена; ρ_{ij} – плотность материала j -того весомого участка i -того звена; V_{ij}^2 – квадрат скорости бесконечно малой частицы j -того весомого участка i -того звена, вычисляемый относительно начала координат – точки A_0 ; I_{R_i} – момент инерции ротора i -того электродвигателя относительно оси вращения, k_{R_i} – передаточное число редуктора ($i = 1, 2, \dots, 5$; $j = 1, 2$).

Составлена система дифференциальных уравнений движения экзоскелета с пятью звеньями переменной длины, состоящая из десяти дифференциальных уравнений второго порядка и проведен ее анализ. Используя программный метод управления движением экзоскелета решена обратная задача динамики, найдены $M_i(t)$, $F_i(t)$ ($i = 1, 2, \dots, 5$) (рис. 5 а, б).

Проведен сравнительный анализ моделей экзоскелетов со звеньями переменной длины и с абсолютно твердыми звеньями (таблица 1).

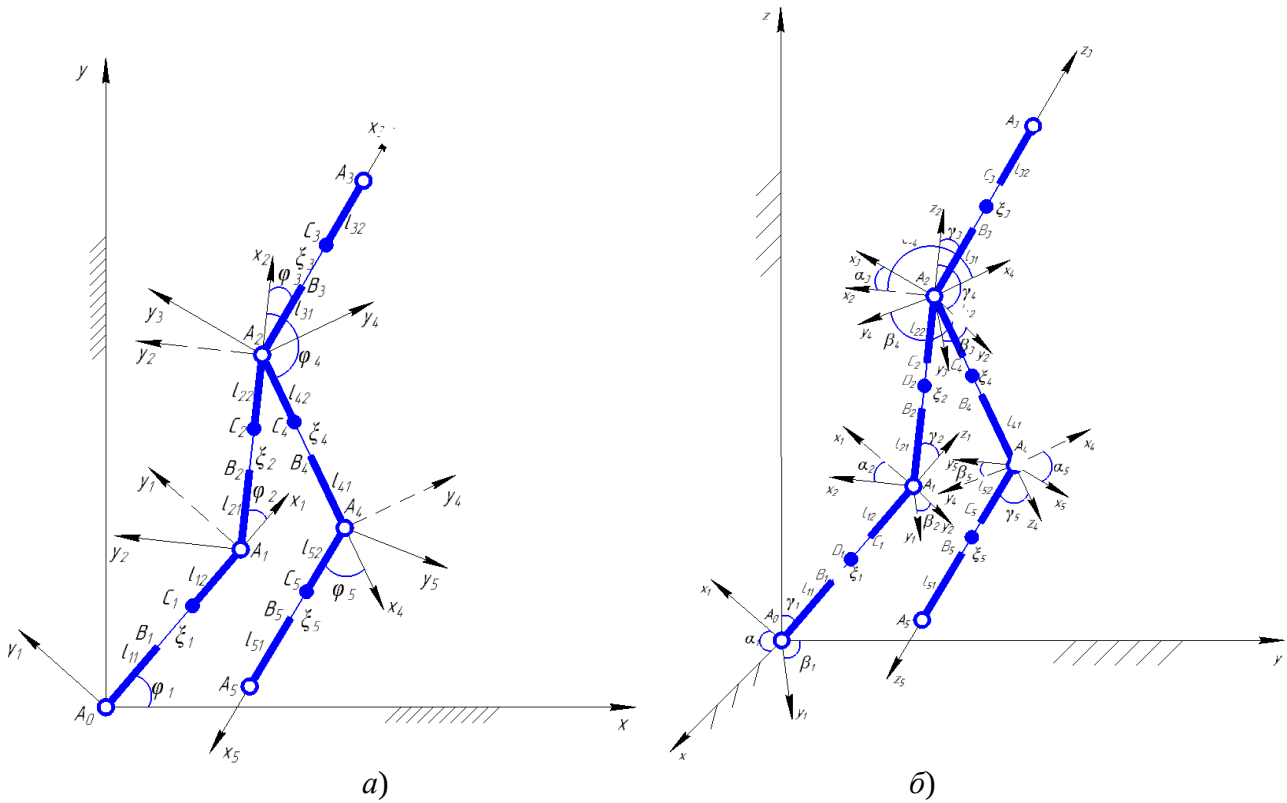


Рис. 4. Экзоскелет с пятью управляемыми звеньями с изменяющейся длиной в 2D а) и в 3D б)

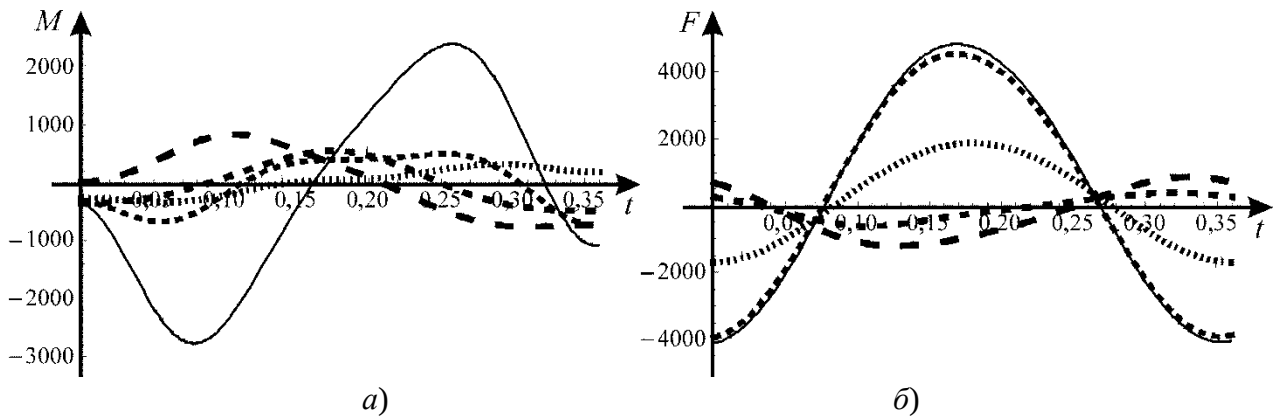


Рис. 5. Изменение управляющих моментов M_i (Н·м) а) в шарнирах экзоскелета и управляющих сил F_i (Н), изменяющих длину звена б) с течением времени t (с) ($i = 1, 2, \dots, 5$)
 — M_1, F_1 , — — — — M_2, F_2 , M_3, F_3 , — — — — M_4, F_4 , — — — — M_5, F_5

Таблица 1 – Наибольшие значения моментов сил в приводах экзоскелетов со звеньями с постоянной длиной и с изменяемой

Модель	Привод, управляющий изменением углов между звеньями, Н·м				
	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5
Модель со звеньями с постоянной длиной	2449.76	989.06	326.70	194.13	28.88
Модель со звеньями, изменяющими свою длину	2774.36	742.90	343.09	831.06	543.41
	Привод, управляющий изменением длин звеньев и расположенный на звене, соответствующий продольной силе, Н				
	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5
Модель со звеньями, изменяющими свою длину	4828.75	4534.26	1871.19	1199.48	612.489

В сравнении с моделью с пятью абсолютно твердыми звеньями, управляющие моменты в шарнирах опорной ноги и корпуса изменились незначительно. Рост моментов наблюдается для шарниров, соответствующих голеностопному и коленному суставам переносимой ноги. Это объясняется добавлением приводов, изменяющих длину звена, которые увеличивают общую массу звена и тем самым влияют на его динамику.

В таблице 2 приведены результаты вычисления энергетических затрат в приводах экзоскелета.

Таблица 2 – Расход энергии шарнирах и звеньях переменной длины экзоскелета

Затраты энергии, Дж	Привод, управляющий изменением углов между звеньями, соответствующий моменту					Сумма, Дж
	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	
Модель со звеньями с постоянной длиной	800.67	70.26	75.18	119.05	25.01	1090.17
Модель со звеньями, изменяющими свою длину	675.82	39.96	41.54	471.11	371.35	1599.78
	Привод, управляющий изменением длин звеньев, соответствующий продольной силе					
	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	
Модель со звеньями, изменяющими свою длину	880.80	1042.38	687.05	327.54	102.89	3040.66

Из таблицы 2 видно, что значения энергетических затрат для опорной ноги при использовании звеньев переменной длины ниже, чем для модели со звеньями с постоянной длиной. Значительный расход энергии возникает для реализации продольных сил, управляющих изменением длины звена. Следовательно, электромеханическое управление изменением длины звена энергетически неэффективно и следует искать альтернативы, например, управление длиной звена при помощи магнитно-реологических актуаторов.

В главе рассмотрена 3D-модель экзоскелета, состоящая из пяти звеньев переменной длины (рис. 4 б). Для нее решена обратная задача динамики.

В четвертой главе «Модели звеньев переменной длины с регулируемой жесткостью на основе магнитно-реологических сред» предложены две модели звена переменной длины с регулируемой жесткостью в пространстве: приближенная (рис. 7 а) и уточненная (рис. 10 а). Рассмотрена 3D-модель звена экзоскелета переменной длины с регулируемой жесткостью, состоящая из трех частей. Звено A_0A_1 моделирует голень опорной ноги. В точке A_1 имеется сосредоточенная масса m_{A_1} , моделирующая элементы конструкции, расположенные выше первого звена.

Звено A_0A_1 состоит из абсолютно твердого штока A_1D_1 , с бесконечно тонким поршнем D_1E_1 , находящимся внутри корпуса B_1C_1 . Корпус является тонкостенным цилиндром с намотанными на нем электромагнитными катушками. Цилиндр внутри заполнен магнитно-реологической жидкостью. Снизу к цилиндру жестко прикреплен абсолютно твердый стержень A_0B_1 , на конце которого расположен сферический шарнир. В шарнире предполагается возможность создания необходимых управляющих моментов.

Звено имеет по два весомых абсолютно жестких стержня: $A_0B_1 = l_{11}$, $D_1A_1 = l_{12}$, где первый индекс равен номеру звена, второй – номеру участка на звене. Длина цилиндра с магнитно-реологической жидкостью: $B_1C_1 = l_{13}$. Его диаметр считаем пренебрежимо малыми в сравнении с длиной. Длина звена изменяется вследствие движения поршня со штоком D_1A_1 внутри цилиндра с магнитно-реологической жидкостью B_1C_1 вдоль направления звена A_0A_1 , которая реализует силу сопротивления F_1 , действующую вдоль штока с поршнем.

Положение звена экзоскелета определяется углами $\eta_1(t)$, $\theta_1(t)$, $\psi_1(t)$ и переменной длиной участка звена между поршнем и дном цилиндра $B_1D_1 = \xi_1(t)$ (рис. 7 а). Управляющие моменты в шарнире A_0 : $M_{1\eta}$, $M_{1\theta}$, $M_{1\psi}$.

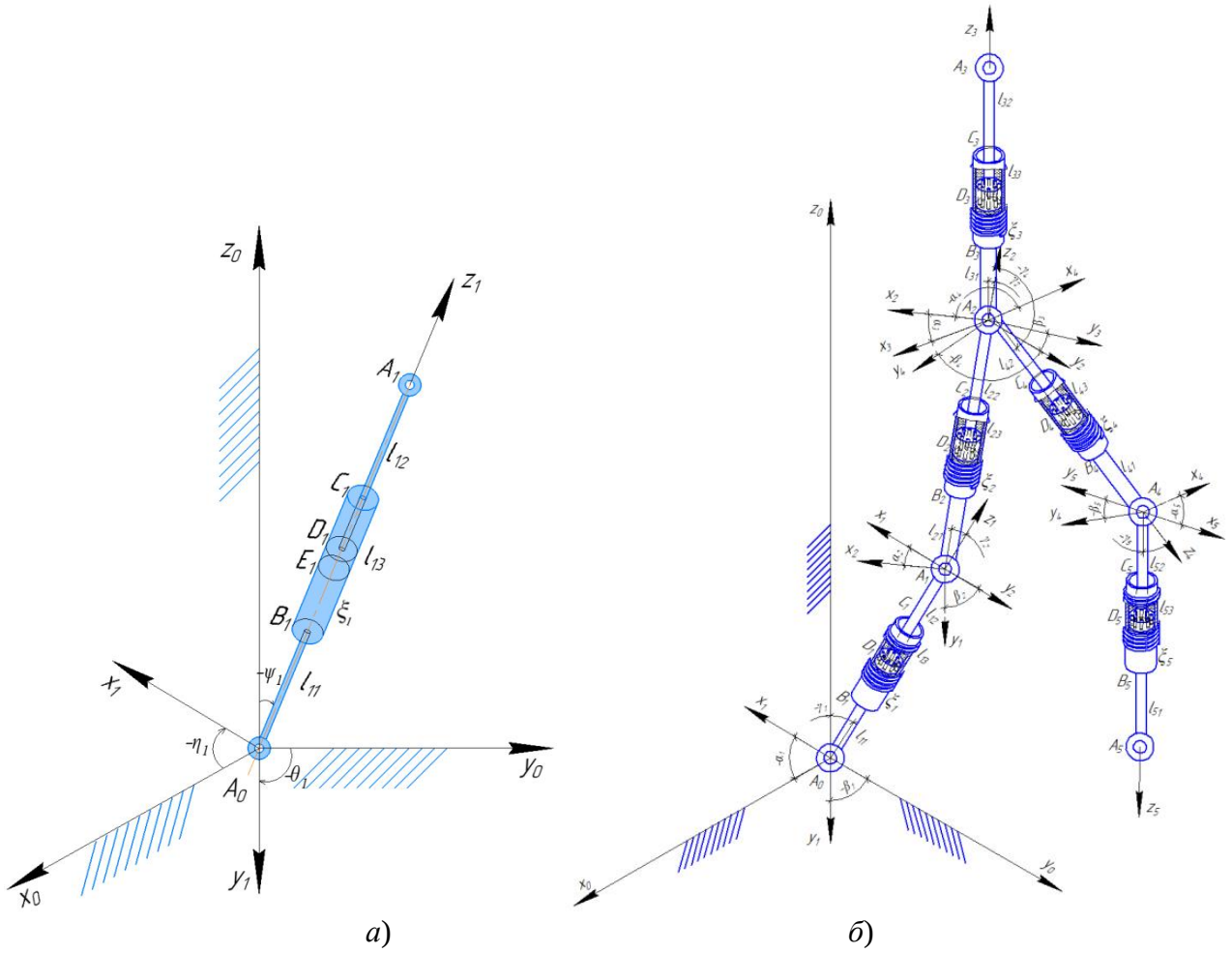


Рис. 7. Модель одного звена переменной длины с управляемой жесткостью и полезной нагрузкой в пространстве *а)* и модель с пятью звеньями *б)*

Кинетическая энергия звена вычисляется путем интегрирования по всем весовым участкам A_0B_1, B_1C_1, D_1A_1 :

$$T = \frac{1}{2} \left(m_{A_1} V_{A_1}^2 + \sum_{j=1}^3 \int_0^{l_{1j}} \rho_{1j} V_{1j}^2 d\zeta_{1j} \right), \quad (7)$$

здесь: j – номер участка на звене, причем $j = 1$ соответствует нижнему участку A_0B_1 , $j = 2$ соответствует штоку с поршнем D_1A_1 , $j = 3$ соответствует цилиндру B_1C_1 ; ζ_{1j} – координата бесконечно малой частицы j -того инерционного участка звена, ρ_{1j} – плотность j -того участка звена, при этом $m_{1j} = \rho_{1j} l_{1j}$, $I_{1j} = \rho_{1j} l_{1j}^3 / 3$, l_{1j} , m_{1j} , I_{1j} – длина, масса, момент инерции j -того участка звена, m_{A_1} – масса расположенная в точке A_1 , $V_{A_1}^2$ – квадрат скорости точки A_1 , V_{1j}^2 – квадрат скорости бесконечно малой частицы j -того участка звена.

Управление изменением вязкости магнитно-реологической жидкости реализуется внешним магнитным полем, приводящим к изменению силы сопротивления движению поршня внутри цилиндра. Получена зависимость силы сопротивления, реализуемой магнитно-реологической жидкостью от напряженности магнитного поля и зависимость напряженности внешнего магнитного поля от времени, проведены оценки затрат энергии при движении звена.

Рассмотрена 3D-модель экзоскелета из пяти звеньев (рис. 7 б). Системы отсчета и комбинации шарниров, аналогичны моделям, рассмотренным в предыдущих главах. Конструкции звеньев с магнитно-реологической жидкостью аналогичны модели одного звена. Решена обратная задача динамики, получены зависимости управляющих моментов (рис. 8) и продольных сил (рис. 9) от времени.

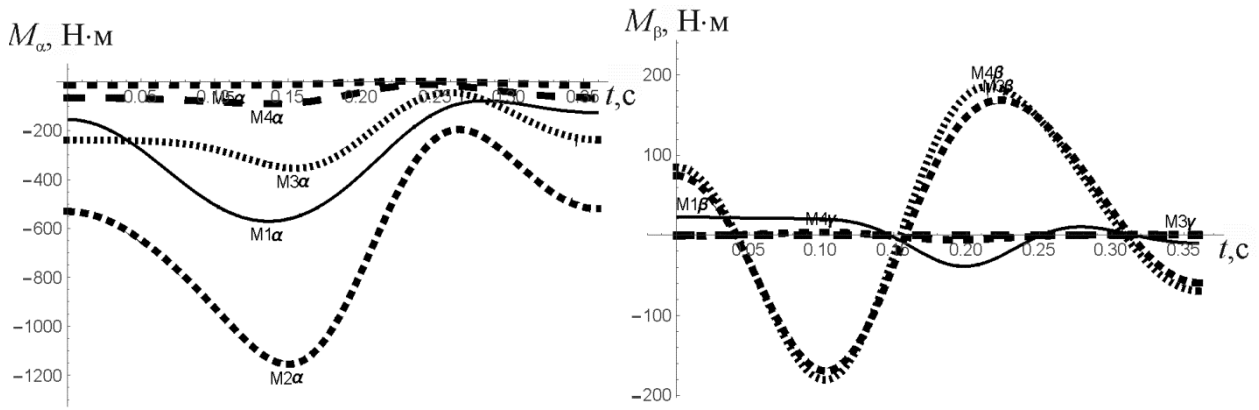


Рис. 8. Зависимости управляющих моментов в шарнирах экзоскелета от времени

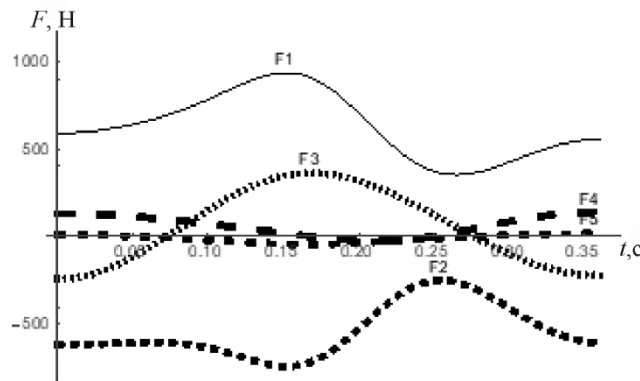


Рис. 9. Зависимости управляющих продольных сил в звеньях переменной длины экзоскелета от времени

На основании зависимостей управляющих продольных сил, получены значения напряженности прилагаемого внешнего магнитного поля от времени. Их можно развивать при помощи катушек, намотанных на цилиндр с магнитно-реологической жидкостью либо на дроссель внутри поршня.

Разработана уточненная модель звена экзоскелета с регулируемой жесткостью в пространстве (рис. 10 а).

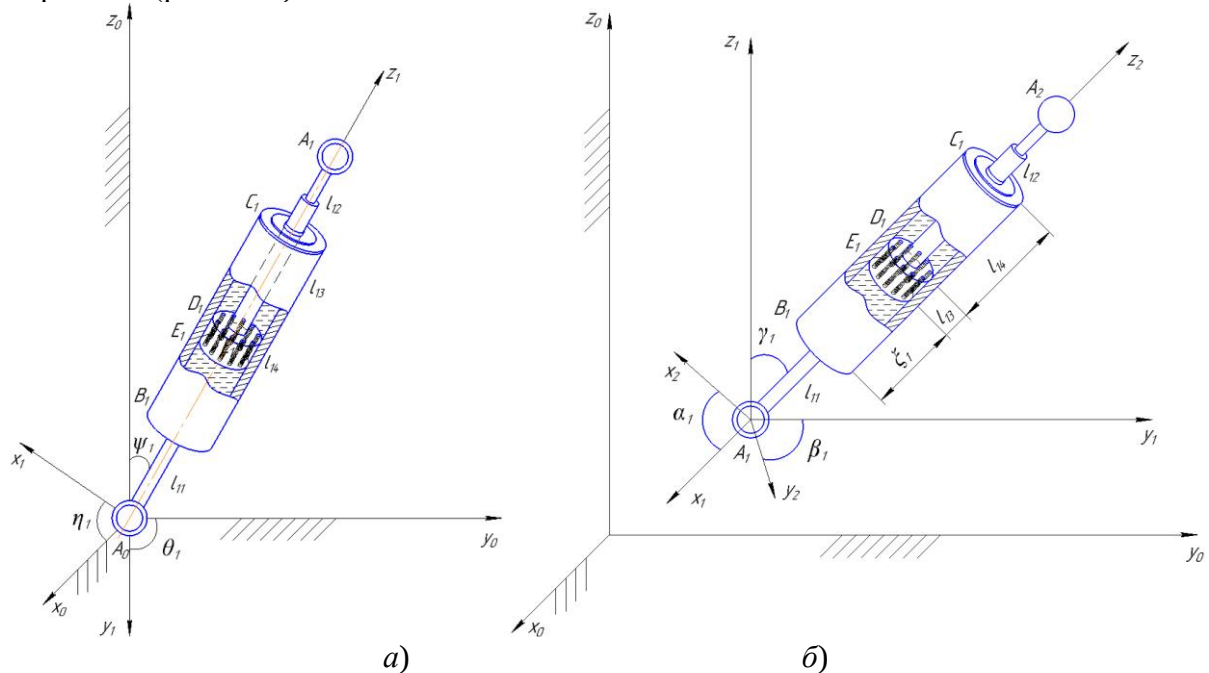


Рис. 10. Уточненная модель звена экзоскелета переменной длины с управляемой жесткостью и полезной нагрузкой в пространстве а) и подвижным полюсом б)

Учтены геометрические размеры верхнего и нижнего стержней, цилиндра, крышек цилиндра, поршня, движущегося внутри цилиндра с магнитно-реологической жидкостью, их

массы и осевые моменты инерции. В уточненной модели все элементы являются цилиндрическими с заданными радиусами, а у приближенной – тонкими стержнями. Масса соответствующих элементов звеньев считается равной. Моменты инерции – разными, в зависимости от формы элемента.

Масса верхней части D_1A_1 равна m_{12} , момент инерции относительно оси z_1 константа. Моменты инерции относительно осей x_1 и y_1 , проведенных из точки A_0 , являются переменными и определяются в соответствии с теоремой Штейнера. В итоге, получен тензор инерции рассматриваемой части звена.

$$I_{12} = \begin{pmatrix} m_{12} \left(\frac{r_{12}^2}{4} + \frac{l_{12}^2}{3} + (l_{11} + \xi_1 + l_{14})^2 \right) & 0 & 0 \\ 0 & m_{12} \left(\frac{r_{12}^2}{4} + \frac{l_{12}^2}{3} + (l_{11} + \xi_1 + l_{14})^2 \right) & 0 \\ 0 & 0 & m_{12} \frac{r_{12}^2}{2} \end{pmatrix} \quad (8)$$

Аналогично вычислены моменты инерции всех элементов звена.

Сравнивая полученные значения моментов и продольной силы, полученные для уточненной модели, с результатами, для приближенной модели, установлено, что их значения стали незначительно больше при сохранении вида зависимостей. Это подтверждает преемственность и корректность уточненной модели.

Использование цилиндрической формы элементов звена повышает точность модели на 15-20% в зависимости от отношения радиуса звена к его длине. Однако, при этом значительно увеличивается количество операций и трудоемкость реализации уточненной модели звена экзоскелета.

В главе разработано развитие уточненной модели звена переменной длины с управляемой жесткостью на случай подвижного полюса (рис. 10 б). Движение полюса моделирует в многозвенном экзоскелете движение предыдущего звена.

В заключении сформулированы основные результаты исследования, которые состоят в следующем:

В результате анализа научных публикаций, установлено, что имеющиеся модели далеки от биологического прототипа, а экзоскелеты не обладают достаточным уровнем комфортабельности вследствие жесткости звеньев. В рассмотренных моделях используются углы, отсчитываемые от фиксированных направлений, а не между звеньями, как в реальных биомеханических и механических системах. Отсутствует учет работы приводов в механизмах и оценки его влияния на динамику устройства. Исходя из этого предложено новое направление в механике – использование углов между звеньями переменной длины с учетом динамики приводов.

Исследована точность аппроксимации биологических прототипов стержневыми механическими системами. Установлено, что погрешность аппроксимации отдельных звеньев опорно-двигательного аппарата человека стержнями является значимой величиной.

Изучаемые управляемые системы твердых тел с шарнирами, изменяемой геометрией в антропоморфных экзоскелетных устройствах реализованы в работе системами с учетом динамики электроприводов и моделями с магнитно-реологической жидкостью. Эти модели отличаются от ранее созданных использованием углов между звеньями. Данные модели можно использовать при создании прототипов экзоскелетов, что имеет важное практическое значение.

Оценка влияния динамики вращающихся роторов электродвигателей на кинематические характеристики движения звеньев механизма, показала, что их вклад в динамику звеньев является существенным.

В связи с тем, что экзоскелетах время автономной работы не велико, проводился подсчет затрат энергии во время движения моделей. Установлен значительный расход энергии, что важно при выборе источников питания для экзоскелетов.

Разработаны приближенная и уточненная трехмерные модели звеньев переменной длины с регулируемой жесткостью. Разработана модель экзоскелета, состоящая из пяти

звеньев переменной длины с регулируемой жесткостью. Получены зависимости управляющих моментов, продольных сил, напряженностей внешних магнитных полей, управляющих движением предложенной модели.

Проведены оценки погрешности точности моделирования при использовании тонких стержней и цилиндров, установлено, что погрешность при этом является достаточно существенной, поэтому применение цилиндров в модели повышает ее точность.

Реализация уточненной математической модели экзоскелета со звеньями переменной длины с регулируемой жесткостью поможет создать новые, более комфортабельные для пользователя энергоэффективные модели экзоскелетов нового поколения.

Список цитируемой литературы

1. Галиуллин А.С. Обратные задачи динамики и задачи управления движениями материальных систем // Дифференц. уравнения. – 1972. – Т. 8. – № 9. – С. 1535–1541
2. Корнев Г.В. Введение в механику человека. – М.: Наука, 1977. – 264 с.
3. Васенин С.А., Решмин С.А. Оптимальное подавление колебаний в задаче раскручивания двухмассовой системы // Изв. РАН. ТиСУ. 2023. № 6. С. 67-80. DOI 10.31857/S0002338823060112
4. Черноусько Ф. Л., Ананьевский И. М., Решмин С. А. Методы управления нелинейными механическими системами. – М.: Физматлит, 2006. – 328 с.
5. Ivlev V.I., Misyurin S. Yu. Parameter identification for mathematical model of vane air motor // Procedia Computer Science. – 2022. – Vol. 213. – P. 240-249. – DOI 10.1016/j.procs.2022.11.062.
6. Assisting Robotic Surgical Complexes for Minimally Invasive Operations / E. I. Veliev, R. F. Ganiev, V. A. Glazunov [et al.] // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2022. – Vol. 51, No. 3. – P. 261-270. – DOI 10.3103/S1052618822030128.
7. Analysis of Mechanisms with Parallel-Serial Structure 5-DOF and Extended Working Area / V. Glazunov, G. Filippov, G. Rashoyan [et al.] // Smart Innovation, Systems and Technologies. – 2022. – Vol. 232. – P. 3-12. – DOI 10.1007/978-981-16-2814-6_1.
8. Kholostova O.V. On Nonlinear Oscillations of a Near-Autonomous Hamiltonian System in One Case of Integer Nonequal Frequencies // Russian Journal of Nonlinear Dynamics. – 2023. – Vol. 19, No. 4. – P. 447-471. DOI 10.20537/nd231103
9. Salnikova T.V., Kugushev E.I., Stepanov S.Y. Jacobi Stability of a Many-Body System with Modified Potential // Doklady Mathematics. – 2020. – Vol. 101, No. 2. – P. 154-157. DOI 10.1134/S1064562420020222
10. Yatsun A., Shcherbakova M., Malchikov A. Experimental studies of a soft industrial exoskeleton in work-related activity for the evaluation of its operational efficiency // E3S Web Conf., 474 (2024) 01031 DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202447401031>
11. Mukharlyamov R.G., Kaspirovich I.E. Analysis of possible solutions of some inverse dynamical problem with regard for constraint stabilization // Lobachevskii Journal of Mathematics. – 2024, Vol. 45, No 1. – pp. 472-477. DOI: 10.1134/S1995080224010384
12. Borisov A.V., Kaspirovich I.E., Mukharlyamov R.G. On Mathematical Modeling of the Dynamics of Multilink Systems and Exoskeletons // Journal of Computer and Systems Sciences International. – 2021, Vol. 60 (5). – pp. 827-841. DOI: 10.1134/S106423072104002X

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Статьи, индексируемые в международных базах научного цитирования

1. Badyaeva V.K., Blinov A.O., Borisov A.V., Mukharlyamov R.G. Simulation of Exoskeleton Motion during a Flight on a Movable Base Taking into Consideration the Electric Drive Dynamics // Russian Aeronautics. – 2022. – Vol. 65. – No. 4. – P. 685-696. DOI: 10.3103/S1068799822040080
2. Badyaeva V.K., Blinov A.O., Borisov A.V., Mukharlyamov R.G. Anthropoid motion on a movable base // Russian Journal of Biomechanics. – 2022. – No. 3. – P. 74-84. DOI: 10.15593/RJBiomech/2022.3.07

3. Blinov A.O., Borisov A.V., Konchina L.V., Kulikova M.G., Maslova K.S. Simulation of movement of an active exoskeleton with five electric controlled links // Russian Journal of Biomechanics. – 2023. – Vol. 27. – No. 4. – P. 153-164. DOI: 10.15593/RJBiomech/2023.4.15
4. Blinov A.O., Konchina L.V. Selection of electric drives for exoskeleton model with five variable-length links // Proc. SPIE 12986, Third International Scientific and Practical Symposium on Materials Science and Technology (MST-III 2023). – 19 January 2024 – 1298602 (1). <https://doi.org/10.1117/12.3016468>
5. Blinov A.O., Blinov V.O., Kulikova M.G., Maslova K.S. Using neural-fuzzy inference to control the functioning of a human-machine system in the form of an exoskeleton with links of variable length, taking into account the effects of lag and synchronization of electric drives // Proc. SPIE 12986, Third International Scientific and Practical Symposium on Materials Science and Technology (MST-III 2023). – 19 January 2024. – 129860Y. <https://doi.org/10.1117/12.3017812>
6. Blinov A.O., Borisov A.V., Konchina L.V., Kulikova M.G., Novikova M.A. 3D refined model of exoskeleton link with adjustable stiffness and actuator capabilities and accuracy estimation of its performance in comparison with the previously created models // Proc. SPIE 13065, Third International Conference on Optics, Computer Applications, and Materials Science (CMSD-III 2023). – 20 February 2024. – 130651L. <https://doi.org/10.1117/12.3025084>
7. Blinov A.O., Borisov A.V., Kaspirovich I.E., Mukharlyamov R.G., Filippenkov K.D. Electromechanical Model of Variable-Length Link for Exoskeleton or Prosthesis // INTERAGROMASH 2022: XV International Scientific Conference “INTERAGROMASH 2022”. – 25 February 2023. – Vol. 575. https://doi.org/10.1007/978-3-031-21219-2_150
8. Blinov A.O., Borisov A.V., Mukharlyamov R.G. Mathematical Simulation of Dynamics for Exoskeleton Including Variable-Length Links with Adjustable Stiffness // Proceedings of the IUTAM Symposium on Optimal Guidance and Control for Autonomous Systems 2023. IUTAM 2023. – IUTAM Bookseries, 2023. – 06 January 2024. – Vol. 40. https://doi.org/10.1007/978-3-031-39303-7_8
9. Borisov A.V., Blinov A.O., Konchina L.V., Novikova M.A. 3D model of two links of the supporting leg of the exoskeleton with variable length and adjustable stiffness // AIP Conference Proceedings. – 21 August 2023. – 2911(1). – 020035. <https://doi.org/10.1063/5.0163380>
10. Blinov A.O., Borisov A.V., Konchina L.V., Kulikova M.G., Maslova K.S. Creation of an electromechanical model of an exoskeleton link in the form of Lagrange-Maxwell equations for agricultural mechanization // E3S Web of Conferences 463. – 2023. – 01027. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202346301027>
11. Borisov A.V., Blinov A.O., Konchina L.V., Novikova M.A. Modeling an Exoskeleton with Hydraulic Sections of Links with Adjustable Rigidity for Carrying Heavy Loads on Construction Sites // Hydraulic and Civil Engineering Technology VIII. Series Advances in Transdisciplinary Engineering. – 2023. – Vol. 43. doi:10.3233/ATDE230749
12. Blinov A.O., Borisov A.V., Borisova V.L., Mukharlyamov R.G. Models of magneto-rheological fluids to be used in design of 3D exoskeleton model with four variable-length links of adjustable stiffness // AIP Conf. Proc. 24 April 2024; 3154 (1): 020020. <https://doi.org/10.1063/5.0201340>
13. Blinov A.O., Borisov A.V., Mukharlyamov R.G., Novikova M.A. Exoskeleton Dynamics Simulation with the System of Three Variable-Length Links of Adjustable Stiffness // Mechanics of Solids. – 2024. – Vol. 59. – No. 1. – P. 156-166. DOI: 10.1134/S0025654423600770
14. Blinov A.O., Borisov A.V., Konchina L.V., Kulikova M.G., Maslova K.S. Comparative analysis of an electromechanical model of an exoskeleton with links of variable length and a model containing absolutely solid links // Russian Journal of Biomechanics. – 2024. – Vol. 28. – № 2. – P. 105-113. DOI: 10.15593/RZhBiomeh/2024.2.11
15. Blinov A.O., Borisov A.V., Kaspirovich I.E., Kirgizbaev Zh.K., Mukharlyamov R.G. Dynamics control of an anthropoid exo-device with five links // Russian Journal of Biomechanics. – 2024. Vol. 28. – № 4. P. 154-163. DOI: 10.15593/RJBiomech/2024.4.16

16. Blinov A.O., Borisov A.V., Kaspirovich I.E., Mukharlyamov R.G., Borisova V.L. Mechanical Model of an Anthropoid on a Plane // AIP Conf. Proc. 3244, 020062 (2024). <https://doi.org/10.1063/5.0243185>

Статьи, индексируемые в RSCI

17. Blinov A.O., Borisov A.V., Konchina L.V., Kulikova M.G., Maslova K.S. Simulation of the movement of the supporting leg of an exoskeleton with two links of variable length in 3D // Journal of Applied Informatics, 2021. – Vol.16. – № 4. – P. 122-134. DOI: 10.37791/2687-0649-2021-16-4-122-134
18. Blinov A.O., Borisov A.V., Filippenkov K.D., Konchina L.V., Maslova K.S. Modeling the dynamics of an exoskeleton link of variable length using the Lagrange – Maxwell system of differential equations of motion // Journal of Applied Informatics. – 2022. – Vol.17. – № 3. – P. 117-130. DOI: 10.37791/2687-0649-2022-17-3-117-130
19. Blinov A.O., Borisov A.V., Konchina L.V., Novikova M.G. Applying the models of magneto- rheological substances in the study of exoskeleton variable-length link with adjustable stiffness // Journal of Applied Informatics. – 2022. – Vol.17. – № 2. – P. 133-142. DOI: 10.37791/2687-0649-2022-17-2-133-142
20. Блинов А.О., Борисов А.В., Кончина Л.В., Маслова К.С. Математическое моделирование электромеханической модели экзоскелета с тремя активными управляемыми звеньями // Прикладная информатика. – 2023. – Т. 18. – № 5. – С. 120-132. DOI: 10.37791/2687-0649-2023-18-5-120-132

Журналы

21. Блинов А.О., Борисов А.В., Кончина Л.В., Новикова М.А., Чигарев А.В. Разработка методов управления свойствами магнитно-реологической среды с целью регулирования жесткости звена переменной длины экзоскелета // Advanced Engineering Research. – 2022. – Т. 22. – № 4. – С. 296-305. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-4-296-305>
22. Блинов А.О., Борисов А.В., Кончина Л.В., Куликова М.Г., Маслова К.С. Проблемы, возникающие при моделировании опорно-двигательного аппарата человека стрессовыми механическими и электромеханическими системами // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2022. – Т. 24. – № 5. – С. 147-165. DOI: 10.30724/1998-9903-2022-24-5-147-165
23. Блинов А.О. Исследование звена переменной длины с управляемой жесткостью с использованием магнитно-реологической среды методом математического моделирования // Естественные и технические науки. – 2022. – Т. 173. – № 10. – С. 15-17.
24. Блинов А.О. Создание алгоритма управления жесткостью магнитно-реологической среды звена переменной длины и моделирование его движений для использования в комфортабельных защитных экзоскелетах человека // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. – 2023. – № 1-2 (175-176). – С. 11-19. DOI: 10.53816/23061456_2023_1–2_11
25. Блинов А.О., Борисов А.В., Мухарлямов Р.Г., Гончарова И.А., Борисова В.Л. Модель звена переменной длины с управляемой жесткостью и подвижным полюсом для экзоскелета аэрокосмического назначения // Труды МАИ. 2024. № 136. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=180665>

Книги

26. Borisov A.V., Arshinenko I.A., Blinov A.O., Konchina L.V., Novikova M.A., Borisova V.L. A Patent Analysis of Exoskeleton Mechanisms and Ways to Improve Their Comfort // In Book: Advances in Engineering Research. Volume 58. Victoria M. Petrova (Editor). Nova Science Publishers, Inc. 2025. – P. 1-58. BISAC: TEC066000. DOI: <https://doi.org/10.52305/LTKP6704>

Патенты

27. Экзоскелет: Патент на изобретение «Экзоскелет». Дата подачи заявки 19.12.2023, регистрационный № 2023133982. Свидетельство о государственной регистрации № 2823489 от 23.07.2024. Блинов А.О., Борисов А.В., Кончина Л.В., Куликова М.Г., Маслова К.С.

28. Экзоскелет: Патент на изобретение «Экзоскелет». Дата подачи заявки 19.12.2023, регистрационный № 2023133974. Свидетельство о государственной регистрации № 2830368 от 18.11.2024. Блинов А.О., Борисов А.В., Кончина Л.В., Куликова М.Г., Новикова М.А.

29. Блинов А.О., Борисов А.В., Кончина Л.В., Новикова М.А. Программа для исследования свойств магнитно-реологической жидкости. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022684362 от 13 декабря 2022 г.

30. Блинов А.О. Программа для моделирования динамики звена экзоскелета переменной длины с управляемой жесткостью на основе магнитореологической среды. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022669611 от 21 октября 2022 г.

31. Блинов А.О., Борисов А.В., Кончина Л.В., Новикова М.А. Программа для 3D моделирования динамики экзоскелета с пятью звеньями переменной длины с управляемой жесткостью и сосредоточенной массой. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023682834 от 01 ноября 2023 г.

32. Блинов А.О., Борисов А.В., Кончина Л.В., Куликова М.Г., Маслова К.С. Программа для моделирования динамики экзоскелета с пятью звеньями переменной длины и электроприводами. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023683731 от 09 ноября 2023 г.

33. Блинов А.О., Борисов А.В., Кончина Л.В., Куликова М.Г., Новикова М.А. Программа для моделирования уточненной 3D модели звена экзоскелета с регулируемой жесткостью. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023689043 от 26 декабря 2023 г.

Монографии

34. Блинов А.О., Борисов А.В., Кончина Л.В., Куликова М.Г., Новикова М.А. Моделирование экзоскелета с регулируемой жесткостью звеньев. Монография. – Смоленск: Универсум, 2023. – 224 с.

35. Блинов А.О., Борисов А.В., Кончина Л.В., Куликова М.Г., Маслова К.С. Исследование движений электромеханической модели экзоскелета со звеньями переменной длины. Монография. – Смоленск: Универсум, 2023. – 224 с.

Статьи в сборниках и материалах конференций

36. Блинов А.О., Борисов А.В., Маслова К.С., Мухарлямов Р.Г. Моделирование управляемого движения электромеханической модели экзоскелета с тремя подвижными звеньями переменной длины // Всероссийская конференция по проблемам динамики, физики частиц, физики плазмы и оптоэлектроники. Материалы конференции. – Москва: РУДН, 2023. – 22–26 мая 2023 г. – С. 174-180.

37. Блинов А.О., Борисов А.В., Мухарлямов Р.Г., Новикова М.А. Модель экзоскелета для опорной ноги и корпуса со звеньями переменной длины и регулируемой жесткостью // XIII Всероссийский Съезд по теоретической и прикладной механике : сборник тезисов докладов в 4 томах, 21–25 августа, 2023 г. В 4 т. Т. 1. Общая и прикладная механика. – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2023. – С. 476-478. <https://ruscongrmech2023.ru/>

38. Блинов А.О., Борисов А.В., Каспирович И.Е., Мухарлямов Р.Г. Решение обратной задачи динамики экзоустройства с пятью звеньями // Международная конференция "Дифференциальные уравнения и их приложения", Сборник трудов. – Казань: КФУ, 2024. – С. 32-33.

Блинов Александр Олегович

Управляемые системы твердых тел с изменяемой геометрией в антропоморфных устройствах

В диссертации изложены результаты исследований по решению задачи управления программным движением робототехнических систем, содержащих звенья переменной длины. Проводится анализ и классификация систем, используемых для моделирования экзоскелетов, оценка их актуальности в контексте современных технологических и медицинских требований. Предлагается оценка точности аппроксимации биологических прототипов. Рассматриваются плоские и пространственные робототехнические системы с абсолютно твердыми звеньями и звеньями переменной длины с применением электроприводов или магнитно-реологической жидкости для управления жесткостью. Решение задачи осуществляется с использованием интегрированного подхода, включающего построение уравнений Лагранжа и решение обратной задачи динамики, состоящей в построении траекторий движения звеньев, определении управляющих моментов и их интерполяции, аппроксимации ступенчатыми функциями и полиномами. Исследовано влияние электроприводов на динамику антропоморфной системы, проведена оценка энергетических затрат.

Blinov Alexander Olegovich

Controlled Rigid-Body Systems with Variable Geometry in Anthropoid Devices

The dissertation presents the results of research aimed at solving the problem of controlling the programmed motion of robotic systems with variable-length links. An analysis and classification of systems used for modeling exoskeletons are conducted, along with an assessment of their relevance in the context of modern technological and medical requirements. The accuracy of approximating biological prototypes is evaluated. The study examines both planar and spatial robotic systems with rigid and variable-length links, employing either electric drives or magnetorheological fluids to control stiffness. The problem is addressed using an integrated approach that includes the formulation of Lagrange equations and the solution of the inverse dynamics problem. This involves constructing link trajectories, determining control torques, and interpolating them using stepwise functions and polynomials. The impact of electric drives on the dynamics of an anthropomorphic system is investigated, and an assessment of energy consumption is provided.

Подписано в печать __.__.2025 г. Формат 60×84¹/₁₆. Тираж 100 экз. Печ. л. 1,0.
Отпечатано в издательском секторе филиала ФГБОУ ВО "НИУ "МЭИ" в г. Смоленске
214018, г.Смоленск, проспект Гагарина, дом 58