

УДК 531.01

На правах рукописи

БОРИСОВ АНДРЕЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ



**ДИНАМИКА МЕХАНИЧЕСКИХ СТЕРЖНЕВЫХ СИСТЕМ
СО ЗВЕНЬЯМИ ПЕРЕМЕННОЙ ДЛИНЫ
ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЭНДО- И ЭКЗОСКЕЛЕТАМ**

01.02.01 — теоретическая механика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора физико-математических наук

Москва – 2018

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

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук **Малолетов Александр Васильевич**, старший научный сотрудник Автономной некоммерческой организации высшего образования «Университет Иннополис».

доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН **Решмин Сергей Александрович**, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук (ИПМех РАН).

доктор физико-математических наук, профессор **Степанов Сергей Яковлевич**, заведующий отделом механики и сектором теории устойчивости и механики управляемых систем Вычислительного центра им. А.А. Дородницына Российской академии наук 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 «13» декабря 2018 г. в 15 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.203.34 в ФГАОУ ВО Российском университете дружбы народов (РУДН) по адресу: 115419, г. Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3, зал № 1.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Российского университета дружбы народов (РУДН) по адресу: 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6.

Автореферат разослан «_____» _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.203.34
кандидат физико-математических наук, доцент



В.А. Попова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования обусловлена тем, что в мире существует стабильный интерес к созданию экзоскелетов. Они могут быть использованы в военных целях, производственных, бытовых, медицинских приложениях, для разработки антропоморфных роботов, близких к локомоциям человека. Механические системы, состоящие из стержней с шарнирами, позволяющими изменять геометрию под действием внутренних управляющих усилий и наложенных внешних связей, служат основой для моделирования и практической реализации робототехнических систем – от манипуляторов до экзоскелетов и антропоморфных роботов. Используемые при создании антропоморфных механизмов абсолютно жесткие звенья приводят к модели, далекой от свойств опорно-двигательного аппарата человека. В реальных антропоморфных системах звенья кинематических цепей в процессе функционирования меняют свою длину, что вызывает необходимость исследования механических моделей со звеньями переменной длины. При этом увеличивается число степеней свободы механизма, и возникают трудности с составлением систем дифференциальных уравнений движения. Создание моделей механизмов, близких к реальным биологическим системам, происходит также за счет увеличения количества звеньев. Эти два фактора создают необходимость разработки новых методов, автоматизирующих составление уравнений движения рассматриваемых систем. В теоретическом аспекте актуальность темы диссертационной работы обусловлена тем, что впервые проводится моделирование антропоморфных механизмов на базе стержневых систем со звеньями переменной длины. Практическая значимость темы исследования вызвана возрастающим интересом к динамическим возможностям человеко-машинных механических систем. Вышеперечисленные факторы позволят создать экзоскелеты и антропоморфные механизмы, близкие к движениям человека, что обеспечивает актуальность данного исследования.

Цель диссертационной работы – создание моделей звеньев переменной длины применительно к динамике стержневых механических систем с шарнирами с изменяемой геометрией под действием внутренних управляющих усилий и наложенных внешних связей, создание матричного метода и рекуррент-

ного алгоритма получения дифференциальных уравнений движения усложненных систем, что составляет новое направление в динамике стержневых систем, применительно к движению эндо-, экзоскелетов и антропоморфных роботов.

Задачи исследования:

- провести анализ существующих подходов к созданию моделей эндо-, экзоскелетов и антропоморфных роботов с целью выявления актуальных проблем в данной области, установить причины, приводящие к изменению длины звена в опорно-двигательном аппарате человека, разработать для исследования изменения геометрии шарниров приближенную модель шарнира-сустава в виде многослойной системы сфер;
- разработать модели звеньев переменной длины для исследования опорно-двигательного аппарата человека, моделирования экзоскелета и антропоморфного робота, составить для них дифференциальные уравнения движения с учетом ветвления звеньев в плоском и пространственном случаях для одноопорной, безопорной и двухопорной фазах движения;
- разработать матричный метод и рекуррентный алгоритм составления дифференциальных уравнений движения антропоморфных систем со звеньями переменной длины и изменяемой геометрией под действием внутренних управляющих усилий и наложенных внешних связей;
- исследовать явление синхронизации звеньев кинематической цепи при установившемся движении для комфортабельного движения человека в экзоскелете;
- численно решить системы дифференциальных уравнений движения механических стержневых систем с разработанными моделями звеньев переменной длины, провести сравнительный анализ движения моделей механизмов с различными конструкциями звеньев; разными алгоритмами управления движениями экзоскелета: теоретическим и на основе эмпирической информации о движениях человека; различным расположением масс на звене; моделей со звеньями постоянной и переменной длины.
- применить разработанные методы создания многозвенных стержневых механических систем к модели плоского змееподобного робота со звеньями переменной длины.

Объектом исследования являются многозвенные антропоморфные механические стержневые системы со звеньями переменной длины.

Предметом исследования являются методы построения усложненных антропоморфных систем типа эндо-, экзоскелета с произвольным конечным количеством звеньев переменной длины и изменяемой геометрией под действием внутренних управляющих усилий и наложенных внешних связей, приближенных к реальным.

Методы исследования. Для решения вышеуказанных задач и достижения цели использовались методы теоретической механики, численно-аналитические методы, теории дифференциальных уравнений, теории устойчивости, математического моделирования, нелинейной динамики, эмпирические данные о человеке при анализе механики движения.

Техническое обеспечение: использовалась система компьютерной математики «Mathematica 6.0.3», номер лицензии: L3259-1206, приобретенная за счет средств Гранта Президента Российской Федерации, номер МК-2524.2008.1.

Достоверность полученных результатов, научных положений, выводов и рекомендаций математически строго обоснована:

- использованием классических положений теоретической механики и современных методов математического моделирования;
- соответствием полученных результатов численных расчетов экспериментальным данным и результатам, полученным другими авторами.

Научная новизна исследования заключается в том, что оно является первым комплексным исследованием механики опорно-двигательного аппарата человека, экзоскелета предназначенного для создания человеко-машинной системы совместно функционирующей и моделирующего человека антропоморфного робота. На основе имеющихся моделей экзоскелетов и изучения свойств эндоскелета были впервые выявлены проблемы, препятствующие комфортабельной эксплуатации экзоскелетов: отсутствие изменения длины звеньев при ходьбе и отсутствие синхронизации при движении человека в экзоскелете.

В диссертации впервые было введено понятие звена переменной длины в рамках теоретической механики, что отличает его от моделей теории упруго-

сти. Предложен комплекс моделей звеньев переменной длины применительно к моделированию механических свойств опорно-двигательного аппарата человека и созданию экзоскелета или антропоморфного робота. В предложенной модели изменение длины звена является дополнительным управлением в механизме наряду с изменением углов между звеньями, что является новым в моделировании антропоморфных систем и отличает данную работу от имеющихся. Для реализации рассматриваемых моделей с большим количеством звеньев разработаны эффективные скоростные методы составления дифференциальных уравнений движения, что особенно востребовано для трехмерных моделей.

Проведен численный анализ разработанных моделей со звеньями переменной длины в разных режимах функционирования, управления и с различными параметрами системы, получены практические рекомендации к созданию экзоскелетов.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Модели управляемых звеньев переменной длины, разработанные для моделирования опорно-двигательного аппарата человека, создания экзоскелета и антропоморфного робота.
2. Общие закономерности в структуре матриц, входящие в матричную форму записи дифференциальных уравнений движения в двухмерном и трехмерном случаях, их обобщения для стержневых механических систем со звеньями переменной длины и изменяемой геометрией под действием внутренних управляющих усилий и наложенных внешних связей типа эндо-, экзоскелета и антропоморфного робота.
3. Эффективные матричный метод и рекуррентный алгоритм записи дифференциальных уравнений движения двухмерных и трехмерных моделей типа эндо- и экзоскелета, новый способ перехода от уравнений плоской модели к уравнениям пространственной модели такой же конструкции.
4. Расширение класса рассматриваемых систем, к которым применимы разработанные модели звеньев переменной длины для исследования модели плоского механизма движущегося по горизонтальной плоскости и новый способ

его перемещения плоских змееподобных механизмов, основанный на продольных и поперечных волнообразных движениях тела плоского робота.

5. Явление синхронизации звеньев кинематической цепи стержневой механической системы при колебаниях в процессе движения.
6. Модели управляемого движения экзоскелета со звеньями переменной длины, сравнительный анализ динамики моделей с различными параметрами.
7. Качественные и количественные характеристики модели и рекомендации для создания теоретико-механической модели экзоскелета в виде робототехнической мехатронной системы, близкой по своим локомоциям к движениям человека.

Личный вклад соискателя. Основные результаты и выводы диссертации получены автором самостоятельно. Некоторые публикации осуществлены в соавторстве при непосредственном участии автора.

Теоретическая значимость полученных результатов. Работа носит теоретический характер. Её значимость заключается в разработке новых моделей звеньев переменной длины и нового способа записи систем дифференциальных уравнений движения стержневых механических систем, на основе матричного метода и рекуррентных алгоритмов усложнения модели вследствие увеличения количества подвижных звеньев с учетом изменения их длины.

Практическая значимость полученных результатов. Результаты диссертационного исследования позволят разрабатывать, учитывающие антропометрические особенности человека, экзоскелеты различного назначения, протезы в медицине, антропоморфные роботы, скафандры, внедрение которых внесет значительный вклад в развитие различных отраслей промышленности, медицины, спорта страны и повышение ее обороноспособности.

Апробация результатов диссертации. Результаты диссертационного исследования использованы в учебном процессе филиала ФГБОУ ВПО "НИУ "МЭИ" в г. Смоленске, в работе предприятия ООО «СВ-ГРУПП» г. Смоленск, в «Центральном институте травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова», г. Москва.

Основные положения, выводы и результаты научного исследования докладывались и обсуждались на международных научных конференциях в Москве, Новосибирске, Новокузнецке, Смоленске, Сочи, Туле в 2006-2017 годах, на международной конференции «Mechanika 2009. 14th international conference. April 2-3, 2009 Kaunas University of Technology, Lithuania», на Международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника» в 2010 и 2017 гг., на Российской конференции по Wolfram технологиям, Санкт-Петербург в 2015 году (<http://www.wolfram.com/events/technology-conference-ru/2015/>), на заседаниях научного семинара кафедры теоретической механики БНТУ (Минск, 2009-2018 годах), научном семинаре «Математическое моделирование процессов динамики» (2014, 2017 г., Москва, РУДН), научном семинаре имени академика А.Ю. Ишлинского по прикладной механике и управлению (2014 год, Москва, МГУ), научном семинаре «Теория управления и динамика систем» (2015 год, Москва, ИПМех РАН), научном семинаре «Динамика относительного движения» на механико-математическом факультете МГУ (2016 год, Москва, МГУ), научном международном семинаре по ТММ имени И.И. Артоболевского (2017 год, Москва, ИМАШ РАН им. А.А. Благонравова).

На конкурсах молодых ученых Смоленской области автор занял 2-е место в 2009 г., 1-е место в 2010 г. и 1-е место в 2012 г. Монография автора [24] стала лауреатом Всероссийского конкурса на лучшую научную книгу 2012 года.

«Программа, для реализации матричного и рекуррентного алгоритмов составления систем дифференциальных уравнений движения стержневых механических робототехнических систем», разработанная в диссертации, зарегистрирована в государственном Реестре программ для ЭВМ (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018617640).

Работа выполнялась при поддержке Гранта Президента Российской Федерации для молодых ученых – кандидатов наук (номер МК-2524.2008.1), Грантов Российского фонда фундаментальных исследований (номера 13-01-97512, 15-41-03224 p_центр_А, 16-41-670740 p_а, 18-01-00139 А).

Опубликованность результатов. По теме диссертации опубликовано 36 научных работ, среди которых 2 монографии, 1 учебник с грифом Министер-

ства образования Республики Беларусь [17], 14 статей в научных журналах из списка ВАК, 19 статей в других научных журналах, сборниках и материалах конференций. Общий объем опубликованных материалов составляет около 700 страниц.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и шести приложений. Объем диссертации составляет 257 страниц. Список литературы содержит 344 наименования отечественных, зарубежных авторов и интернет-ресурсов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

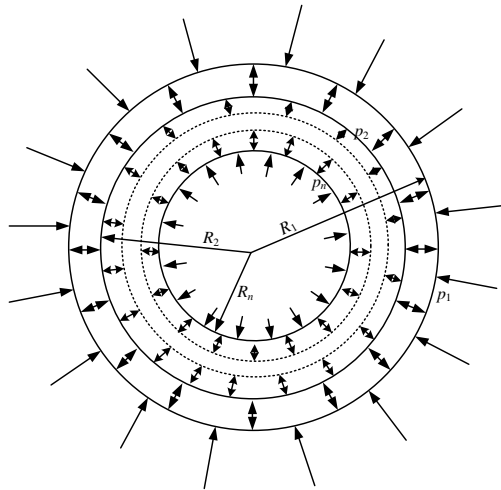
Во введении дана общая характеристика работы, обосновывается актуальность выбранной темы, сформулированы цели и задачи исследования, научная новизна работы и практическая значимость, перечислены основные результаты и положения, выносимые на защиту, дана информация о публикации результатов.

В первой главе «**Глава 1. Описание имеющихся моделей экзоскелетов, антропоморфных роботов и причин, вызывающих изменение длины звена**» проведен анализ имеющихся теоретических и технических разработок экзоскелетов в мире.

Модели многозвенных антропоморфных устройств и их отдельных компонентов в рамках теоретической механики рассматриваются в работах Белецкого В.В. [1], Бербюка В.Е. [2], Вукобратовича М. [8], Формальского А.М. [3]. Более общие проблемы создания мобильных роботов, экзоскелетов, различных процессов в динамических системах и управления ими рассматриваются в работах Ананьевского И.М. [5, 22], Болотина В.В. [6], Болотника Н.Н. [7], Брискина Е.С. [8], Ганиева Р.Ф. [9], Глазунова В.А. [9, 10], Голубева Ю.Ф. [11], Малолетова А.В. [8, 12], Маркеева А.П. [13], Мухарлямова Р.Г. [14, 15], Новожилова И.В. [16], Охоцимского Д.Е. [17], Павловского В.Е. [18], Погорелова Д.Ю. [11], Решмина С.А. [5, 19, 22], Степанова С.Я. [20], Холостовой О.В. [21], Черноусько Ф.Л. [19, 22] и многих других авторов.

В главе получено обобщение решения задачи об изменении радиуса сфер в шарнирах стержневой системы применительно к опорно-двигательному аппа-

рату человека. В качестве примера взята головка тазобедренного сустава, которая является практически идеальной сферой (рис. 1). В результате определены давления сфер друг на друга (1) и получены оценки изменения радиуса шарнира-сустава для конечного количества оболочек, находящихся под внешним давлением.



$$p_k = \frac{\begin{vmatrix} e_2 & f_3 & \dots & -p_1 g_1 & \dots & 0 & 0 \\ g_2 & e_3 & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & g_3 & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & g_{n-1} & h_n \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} e_2 & f_3 & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 \\ g_2 & e_3 & \dots & \dots & \dots & 0 & 0 \\ 0 & g_3 & \dots & f_k & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & g_{n-1} & h_n \end{vmatrix}}, \quad (1)$$

Рис. 1. Модель $n - 1$ сфер и шара внутри них, находящихся под действием внешнего давления

где: $k = 2, \dots, n$,

$$\frac{1 - 2\nu_i}{E_i} = a_i, \quad \frac{1 + \nu_i}{E_i} = b_i, \quad R_i^3 = d_i, \quad \frac{1}{R_{i+1}^3 - R_i^3} = c_i,$$

$$e_i = d_{i-1} c_{i-1} b_{i-1} + d_{i+1} c_i b_i - d_i c_{i-1} a_{i-1} - d_i c_i a_i, \quad f_i = d_i c_{i-1} a_{i-1} - d_i c_{i-1} b_{i-1},$$

$$g_i = d_i c_i a_i - d_i c_i b_i, \quad h_i = d_{i-1} c_{i-1} b_{i-1} - d_i c_{i-1} a_{i-1} + a_i, \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

Описываются факторы, влияющие на изменение длины звена в опорно-двигательном аппарате человека. Сформулировано определение звена переменной длины в рамках теоретической механики применительно к задачам моделирования стержневыми системами опорно-двигательного аппарата человека, экзоскелета или антропоморфного робота. Под звеном переменной длины понимается часть механизма между шарнирами-суставами в виде прямолинейной, быть может достаточно сложной механической управляемой конструкции, способной изменять свою длину вдоль направления между шарнирами-суставами, т.е. реализовывать растяжение-сжатие, но не подверженное деформациям изгиба и кручения, при этом представляющее единую динамическую систему в механизме.

Таким образом, в первой главе обозначены нерешенные теоретические и технические проблемы в сфере создания экзоскелетов и антропоморфных роботов и определено место диссертационной работы в исследуемой области.

Во второй главе «**Моделирование опорно-двигательного аппарата человека стержнями переменной длины с сосредоточенными массами**» анализируется динамика стержневых механических систем с подвижными звеньями, изменяющими свою длину в плоском и пространственном случаях применительно к моделированию опорно-двигательного аппарата человека.

Разработаны две модели звена переменной длины (рис. 2 а и б). Модель состоит из одного подвижного звена длиной $AB = l_1(t)$ в виде одного невесомого стержня переменной длины и трех точечных масс, две из которых размещены на стержне в шарнирах-суставах A и B на концах стержня, третья масса C расположена между точками A и B (рис. 2 а). Массами в шарнирах-суставах, кроме самих подвижных соединений, может моделироваться сустав или электродвигатель, установленный на оси шарнира, имеющий значительную массу и создающий управляющий момент.

Введены двухиндексные обозначения, первый индекс обозначает номер звена, второй – номер точечной массы на этом звене. В точке A есть масса m_{10} , в точке C масса m_{11} , в точке B масса m_{12} . Положение массы в точке C , находящейся на стержне между его концами и не совпадающей с ними, задается постоянным множителем n_{11} ($0 < n_{11} < 1$). Длина $AC = n_{11}l_1(t)$ является переменной величиной – функцией времени. Точечная масса C , находящаяся на стержне, совершает сложное движение: вращательное около полюса – нижней точки звена A и поступательное вдоль AB . Такое же движение совершает и точечная масса, расположенная в точке B . Так учитывается изменение положения массы во время движения звена при изменении его длины. На рис. 2 б, представлена модель с тремя массами на стержне. Их положение задается множителями n_{ij} , где первый индекс относится к номеру звена, второй к номеру массы на звене. Массы сосредоточены в точках C_{10} масса m_{10} , C_{11} масса m_{11} , C_{12} масса m_{12} . Положение однозначно определяется углом $\varphi_1(t)$ и переменной длиной всего стержня $l_1(t)$ рис. 2 а,б, следовательно модели имеют две степени свободы. M_1 – управляющий момент, развиваемый в шарнире A . F_1 – продольная сила, действующая вдоль стержня. Теоретическая модель невесомого стержня перемен-

ной длины с сосредоточенными массами на нем при создании экзоскелета может быть реализована в виде телескопического звена (рис. 2 д). Тогда продольные силы $F_i(t)$ – это двигатели, реализующие поступательное движение одной части звена относительно другой. Управляющие моменты $M_i(t)$ можно реализовать в виде двигателей, осуществляющих вращательное движение звена.

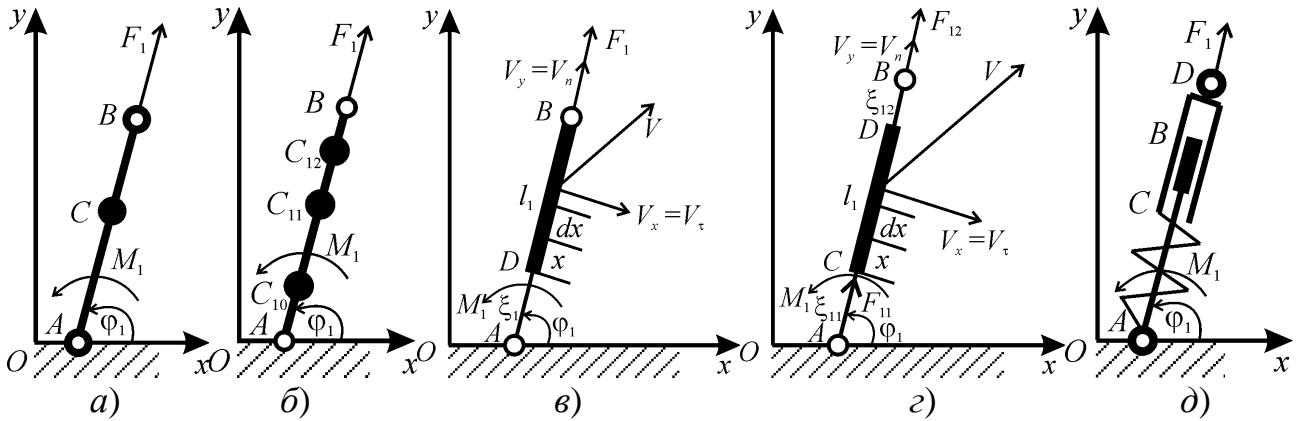


Рис. 2. Модели звеньев переменной длины опорно-двигательного аппарата человека, экзоскелета и антропоморфного робота

Требуется получить дифференциальные уравнения движения для однозвенной и многозвенных систем, выявить их структуру, представить в матричном виде, установить закономерности построения матриц и получить обобщения выражений элементов матриц для создания эффективного матричного и рекуррентного алгоритмов записи дифференциальных уравнений движения для многозвенных систем. Учитывая выражение для кинетической энергии звена (сумма кинетических энергий каждой сосредоточенной на звене массы на рис. 2 а) [11] и для потенциальной энергии

$$T = \zeta_1(\dot{l}_1^2 + l_1^2 \dot{\phi}_1^2)/2, \quad \Pi = \eta_1 g l_1 S_1, \quad \zeta_1 = m_{12} + m_{11} n_{11}^2, \quad \eta_1 = m_{12} + m_{11} n_{11}, \quad (2)$$

запишем, используя уравнения Лагранжа второго рода, систему дифференциальных уравнений движения рассматриваемой стержневой модели:

$$l_1^2 \zeta_1 \ddot{\phi}_1 + g l_1 \eta_1 C_1 + 2 l_1 \zeta_1 \dot{l}_1 \dot{\phi}_1 = M_1, \quad - l_1 \zeta_1 \dot{\phi}_1^2 + g \eta_1 S_1 + \zeta_1 \ddot{l}_1 = F_1 \quad (3)$$

$$\text{и начальные условия } t = 0: \quad \phi_1 = \phi_{10}, \quad \dot{\phi}_1 = \omega_{10}, \quad l_1 = l_{10}, \quad \dot{l}_1 = \dot{l}_{10}, \quad (4)$$

где: $C_1 = \cos \phi_1$, $S_1 = \sin \phi_1$.

Для звена на рис. 2 б обобщение дифференциальных уравнений движения (3), если имеется произвольное количество α масс на стержне, имеет вид:

$$\begin{aligned}
l_1^2 \left(\sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{1\beta} n_{1\beta}^2 \right) \ddot{\phi}_1 + g l_1 \left(\sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{1\beta} n_{1\beta} \right) C_1 + 2l_1 \left(\sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{1\beta} n_{1\beta}^2 \right) \dot{l}_1 \dot{\phi}_1 &= M_1, \\
-l_1 \left(\sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{1\beta} n_{1\beta}^2 \right) \dot{\phi}_1^2 + g \left(\sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{1\beta} n_{1\beta} \right) S_1 + \left(\sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{1\beta} n_{1\beta}^2 \right) \dot{l}_1 &= F_1.
\end{aligned}
\tag{5}$$

Данная модель позволяет приблизить модель звена с дискретными массами к модели с распределенными параметрами, используя большое количество масс. Появляется возможность моделировать неравномерность распределения масс и смещения мышц звена человека при движении. Моделирование опорно-двигательного аппарата человека имеет особенность, отличающую его от других механизмов: звенья соединяются не только последовательно, но и с ветвлением. Точкой ветвления называется точка механизма в виде шарнира, из которой выходит более одного звена и после нее изменяется способ отсчета угла. Например, опорная нога и переносимая, корпус и руки. Проведен анализ влияния ветвления звеньев на дифференциальные уравнения движения.

Обобщения дифференциальных уравнений движения на случай модели с n подвижными звеньями. Рассматривая модели с тремя и более подвижными звеньями, получаем обобщения для механизма с n подвижными звеньями переменной длины (рис. 3).

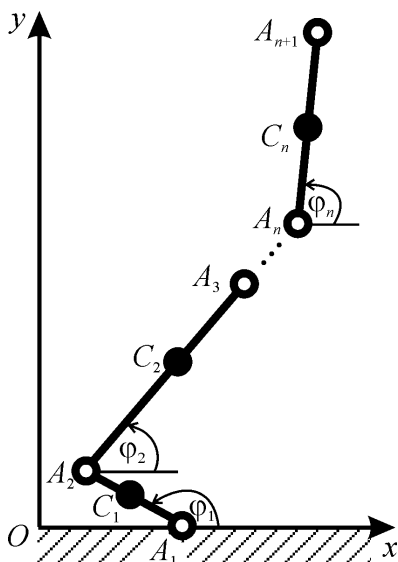


Рис. 3. Модель экзоскелета с n подвижными звеньями переменной длины

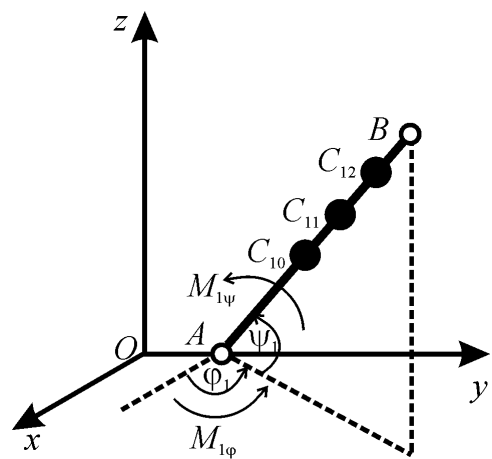


Рис. 4. Модель трехмерной механической системы с одним подвижным звеном переменной длины

Уравнения движения элементов n -звенной механической системы в опорной фазе являются системой нелинейных дифференциальных уравнений,

которые можно записать в векторно-матричной форме. Нижние индексы у матриц указывают на описание соответствующей обобщенной координаты: $\kappa = 1, 2$, где 1 соответствует обобщенной координате φ , 2 – обобщенной координате l .

$$A_{\kappa}(\varphi, l) \ddot{\varphi} + \Lambda_{\kappa}(\varphi, l) \ddot{l} + D_{\kappa}(\varphi, l) \dot{\Phi} \dot{\varphi} + 2H_{\kappa}(\varphi, l)(\dot{\Phi} \dot{l}) + gP_{\kappa}(\varphi) = M_{\kappa}(\varphi, l), \quad (6)$$

где: $\varphi = (\varphi_1, \dots, \varphi_n)^T$ – вектор угловых обобщенных координат; $l = (l_1, \dots, l_n)^T$ – вектор обобщенных координат, описывающих изменения длин звеньев; $\dot{\varphi}$ – вектор угловых скоростей; $\ddot{\varphi}$ – вектор угловых ускорений; $\dot{\Phi} = \text{diag}(\dot{\varphi}_1, \dots, \dot{\varphi}_n)$ – диагональная матрица; A_{κ}, D_{κ} – матрицы, учитывающие инерционные свойства; P_{κ} – матрицы, определяемые моментами силы тяжести; $H_{\kappa}, \Lambda_{\kappa}$ – матрицы, учитывающие переменную длину звеньев; M_{κ} – векторы обобщенных сил. Эти матрицы определены в диссертации.

Матричная форма записи уравнений движения (5) является универсальной и может быть применена к описанию движения экзоскелета с любым количеством звеньев. Приведем обобщения по индукции полученных матриц для произвольной n -звенной системы (рис. 3). Элементы для симметрической матрицы A_{φ} при $j \geq i$ имеют вид:

$$a_{ij}^{\varphi} = (\delta_{ij}\zeta_i + (1 - \delta_{ij})\eta_j + \sum_{k=j+1}^n \theta_k) l_i l_j \cos(\varphi_i - \varphi_j), \quad (7)$$

где: δ_{ij} – символ Кронекера: $\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j, \\ 0, & i \neq j. \end{cases}$

Остальные элементы: $a_{ji}^{\varphi} = a_{ij}^{\varphi}$. В диссертации определены все матрицы, входящие в систему (6).

Примечания: 1) во всех случаях, когда значение индекса k превышает n , необходимо значение соответствующей величины положить равным нулю. 2) В данных формулах не используется суммирование по повторяющимся индексам. 3) Матрицы для стержневой системы с ветвлением, подчиняются обобщениям (7), полученным для неразветвленных систем типа модели с n подвижными звеньями (рис. 3), но при этом необходимо изменить знаки на противоположные после перехода через точку ветвления перед соответствующими элементами

ми матрицы. Необходимо остановить суммирование при достижении последнего звена присоединенной части конструкции. При этом для основной конструкции следует пропустить номера, соответствующие присоединенной части конструкции, и продолжить суммирование, начиная с номера звена, следующего за последним номером звена присоединенной части конструкции.

Таким образом, впервые получены обобщения элементов матриц, входящих в дифференциальные уравнения движения стержневой механической системы со звеньями переменной длины.

В диссертации рассмотрены антропоморфные системы в безопорной и двухопорной фазах составленные из звеньев, показанных на рис. 2 б. Получены дифференциальные уравнения движения и их обобщения в матричной форме.

Далее рассматриваются трехмерные модели, так как для создания, реально работающего экзоскелета, необходимы пространственные модели (рис. 4). Пусть стержень переменной длины имеет конструкцию, показанную на рис. 1 б.

Положение центра масс звена определяется двумя углами: φ_1 – углом между осью OX и проекцией звена AB на плоскость XOY , отсчитываемым от оси OX против часовой стрелки; ψ_1 – углом между звеном AB и его проекцией на плоскость XOY , отсчитываемым от проекции звена AB на плоскость XOY против часовой стрелки и изменением его длины l_1 . Рассматриваемые углы и длину звена считаем функциями времени: $\varphi_1 = \varphi_1(t)$, $\psi_1 = \psi_1(t)$, $l_1 = l_1(t)$. Модель имеет три параметра, однозначно определяющих ее положение. Вращение происходит в жестко закрепленном шарнире O . Массы считаем сосредоточенными: в точке C_{10} масса m_{10} , в точке C_{11} масса m_{11} , в точке C_{12} масса m_{12} . Их положение на стержне задается постоянными множителями n_{10} , n_{11} и n_{12} соответственно. Первый индекс обозначает номер звена, второй – номер массы на звене.

Матричная форма записи дифференциальных уравнений движения.

Система нелинейных дифференциальных уравнений движения стержневых механических систем в пространстве записана в векторно-матричной форме. Нижние индексы у матриц указывают на соответствующую обобщенную координату: $k = 1, 2, 3$, где 1 соответствует обобщенной координате φ , 2 – ψ , 3 – l .

$$A_k(\varphi, \psi, l) \ddot{\varphi} + B_k(\varphi, \psi, l) \ddot{\psi} + \Lambda_k(\varphi, \psi, l) \dot{l} + D_k(\varphi, \psi, l) \dot{\Phi} \dot{\varphi} + E_k(\varphi, \psi, l) \dot{\Psi} \dot{\psi} + 2G_k(\varphi, \psi, l) \dot{\Phi} \dot{\psi} + 2H_k(\varphi, \psi, l) \dot{\Phi} \dot{l} + 2K_k(\varphi, \psi, l) \dot{\Psi} \dot{l} + gP_k(\psi) = M_k(\varphi, \psi, l), \quad (8)$$

где: φ, ψ – угловые обобщенные координаты сосредоточенных масс $\varphi = (\varphi_1, \dots, \varphi_n)^T$ и $\psi = (\psi_1, \dots, \psi_n)^T$ – векторы углов; l – обобщенные координаты, связанные с изменениями длин звеньев $l = (l_1, \dots, l_n)^T$ – вектор длин звеньев переменной длины; $\dot{\varphi}, \dot{\psi}$ – векторы угловых скоростей; $\ddot{\varphi}, \ddot{\psi}$ – векторы угловых ускорений; $\dot{\Phi} = \text{diag}(\dot{\varphi}_1, \dots, \dot{\varphi}_n), \dot{\Psi} = \text{diag}(\dot{\psi}_1, \dots, \dot{\psi}_n)$ – диагональные матрицы; M_k – векторы обобщенных сил; $A_k(\varphi, \psi, l), B_k(\varphi, \psi, l), D_k(\varphi, \psi, l), E_k(\varphi, \psi, l), G_k(\varphi, \psi, l)$ – матрицы, учитывающие инерционные свойства; $\Lambda_k(\varphi, \psi, l), H_k(\varphi, \psi, l), K_k(\varphi, \psi, l)$ – матрицы, учитывающие переменность длины звеньев; $P_k(\psi)$ – матрицы, определяемые моментами силы тяжести.

Обобщения матриц уравнений для трехмерных моделей стержневых систем типа эндо- и экзоскелета со звеньями переменной длины. В диссертации получены обобщения матриц для произвольной n -звенной трехмерной системы с α массами на стержне. Приведем в качестве примера матрицу $A_\varphi(\varphi, \psi, l)$. Элементы для симметрической матрицы A_φ при $j \geq i$ имеют вид:

$$a_{ij}^\varphi = (\delta_{ij}\zeta_i + (1 - \delta_{ij})\eta_j + \sum_{k=j+1}^n \theta_k) l_i l_j \cos(\varphi_i - \varphi_j) \cos\psi_i \cos\psi_j, \quad (9)$$

$$\text{где: } \delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j, \\ 0, & i \neq j, \end{cases} \quad \zeta_i = \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{i\beta} n_{i\beta}^2, \quad \eta_i = \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{i\beta} n_{i\beta}, \quad \theta_i = \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{i\beta}, \quad (i = 1, 2, \dots, n).$$

Остальные элементы: $a_{ji}^\varphi = a_{ij}^\varphi$.

Построение матриц уравнений для трехмерных моделей стержневых систем по соответствующим матрицам для плоских моделей. Впервые получена закономерность записи уравнений трехмерного движения по соответствующему дифференциальному уравнению для двумерной модели. Для того, чтобы отличать элементы матриц пространственной и плоской моделей наведем их верхними индексами «3D» и «2D» соответственно. Плоская и пространственная модели должны быть одинаковой структуры, т.е. иметь одинаковое количество звеньев, расположение точек ветвления, распределение масс на звене. Формулы для перехода матриц A имеют следующий вид.

$${}^{3D}a_{ij}^{\varphi} = {}^{2D}a_{ij}^{\varphi} \cos\psi_i \cos\psi_j, \quad {}^{3D}a_{ij}^{\psi} = - {}^{2D}a_{ij}^l l_i \cos\psi_j \sin\psi_i, \quad {}^{3D}a_{ij}^l = {}^{2D}a_{ij}^l \cos\psi_i \cos\psi_j. \quad (10)$$

Таким образом, впервые предложен метод записи дифференциальных уравнений движения для пространственного механизма со звеньями переменной длины по уравнениям движения плоского механизма.

Матричный метод составления дифференциальных уравнений движения модели экзоскелета со звеньями переменной длины. Предложенный новый матричный метод построения уравнений сводится к записи матриц по имеющимся формулам, а затем умножению матриц на соответствующие векторы из системы (6). Это существенно упрощает получение дифференциальных уравнений движения экзоскелета. Покажем, как составляются уравнения движения, используя полученные обобщения. Для модели, состоящей из четырех звеньев переменной длины, т.е. $n = 4$, представленной на рис. 5.

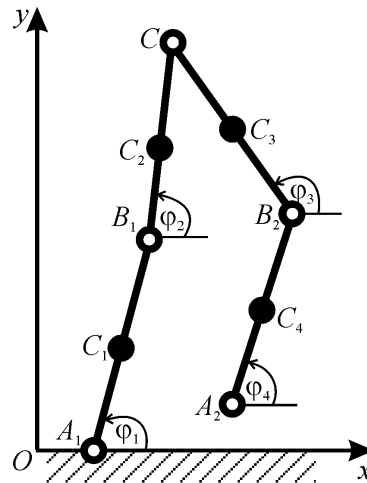


Рис. 5. Модель экзоскелета с четырьмя подвижными звеньями переменной длины с массами в шарнирах и одной массой между ними

Матрицы, входящие в уравнения движения, имеют размер 4×4 . Построим матрицу A по предложенной формуле нахождения отдельных ее элементов (7), учитывая свойства матрицы. Выпишем для нее отдельно каждый элемент.

$$a_{11} = l_1^2 (m_{11} n_{11}^2 + m_{12} + \sum_{\beta=0}^2 \sum_{k=2}^4 m_{k\beta}),$$

$$a_{12} = a_{21} = l_1 l_2 (m_{21} n_{21} + m_{22} + \sum_{\beta=0}^2 \sum_{k=3}^4 m_{k\beta}) \cos(\varphi_1 - \varphi_2), \quad (11)$$

$$a_{j3} = a_{3j} = l_j l_3 (m_{31} n_{31} + m_{32} + \sum_{\beta=0}^2 m_{4\beta}) \cos(\varphi_j - \varphi_3), \quad j = 1, 2,$$

$$a_{j4} = a_{4j} = l_j l_4 (m_{41} n_{41} + m_{42}) \cos(\varphi_j - \varphi_4), \quad j = 1, 2,$$

$$a_{22} = l_2^2 (m_{21} n_{21}^2 + m_{22} + \sum_{\beta=0}^2 \sum_{k=3}^4 m_{k\beta}), \quad a_{33} = l_3^2 (m_{31} n_{31}^2 + m_{32} + \sum_{\beta=0}^2 m_{4\beta}),$$

$$a_{34} = a_{43} = l_3 l_4 (m_{41} n_{41} + m_{42}) \cos(\varphi_3 - \varphi_4), \quad a_{44} = l_4^2 (m_{41} n_{41}^2 + m_{42}).$$

Аналогично определяются элементы для всех остальных матриц, входящих в (6), по предложенным формулам. После этого умножаем каждую записанную матрицу на соответствующий ей вектор в уравнениях (6). Матрица A умножается на вектор $\dot{\varphi}$. В результате записаны дифференциальные уравнения движения экзоскелета с четырьмя подвижными звеньями переменной длины.

Чтобы перейти от плоской к пространственной модели, необходимо каждый элемент матрицы домножить в соответствии с формулами (10).

$${}^{3D}a_{11}^{\varphi} = l_1^2 (m_{11} n_{11}^2 + m_{12} + \sum_{\beta=0}^2 \sum_{k=2}^4 m_{k\beta}) \cos^2 \psi_1. \quad (12)$$

Далее построение аналогично выражениям (11). Таким образом, предложен новый метод построения дифференциальных уравнений движения для пространственной стержневой модели со звеньями переменной длины.

Рекуррентный алгоритм составления дифференциальных уравнений движения. В диссертации были получены обобщающие формулы вида (7) для матриц, входящих в систему дифференциальных уравнений движения, позволяющие ее записать для экзоскелета с n подвижными звеньями переменной длины. Построим на их основе рекуррентный алгоритм, позволяющий по матрице для n -звенной механической системы строить матрицу для $(n + 1)$ -звенной механической системы. Матрица n -звенной механической системы имеет вид:

$$A_n = \begin{pmatrix} \left(\zeta_1 + \sum_{k=2}^n \theta_k \right) l_1 l_1 C_{11} & \dots & \left(\eta_j + \sum_{k=j+1}^n \theta_k \right) l_1 l_j C_{1j} & \dots & \eta_n l_1 l_n C_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \left(\eta_i + \sum_{k=i+1}^n \theta_k \right) l_i l_1 C_{i1} & \dots & \left(\zeta_i + \sum_{k=j+1}^n \theta_k \right) l_i l_j C_{ij}, (i = j) & \dots & \eta_n l_i l_n C_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \eta_n l_n l_1 C_{n1} & \dots & \eta_n l_n l_j C_{nj} & \dots & \zeta_n l_n l_n C_{nn} \end{pmatrix}. \quad (13)$$

Тогда, матрица для $n + 1$ -звенной механической системы строится так:

$$A_{n+1} = A_n + \delta A_n, \quad (14)$$

причем матрица A_n должна иметь размер $(n+1) \times (n+1)$, поэтому она записывается с дополнительными $(n+1)$ -й нулевой строкой и $(n+1)$ -м нулевым столбцом.

Матрица δA_n строится так:

$$\delta A_n = \begin{pmatrix} \theta_{n+1} l_1 l_1 C_{11} & \dots & \theta_{n+1} l_1 l_j C_{1j} & \dots & \theta_{n+1} l_1 l_n C_{1n} & \eta_{n+1} l_1 l_{n+1} C_{1,n+1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \theta_{n+1} l_i l_1 C_{i1} & \dots & \theta_{n+1} l_i l_j C_{ij}, (i=j) & \dots & \theta_{n+1} l_i l_n C_{in} & \eta_{n+1} l_i l_{n+1} C_{i,n+1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \theta_{n+1} l_n l_1 C_{n1} & \dots & \theta_{n+1} l_n l_j C_{nj} & \dots & \theta_{n+1} l_n l_n C_{nn} & \eta_{n+1} l_n l_{n+1} C_{n,n+1} \\ \eta_{n+1} l_{n+1} l_1 C_{n+1,1} & \dots & \eta_{n+1} l_{n+1} l_j C_{n+1,j} & \dots & \eta_{n+1} l_{n+1} l_n C_{n+1,n} & \zeta_{n+1} l_{n+1} l_{n+1} C_{n+1,n+1} \end{pmatrix}, \quad (15)$$

где: $C_{ij} = \cos(\varphi_i - \varphi_j)$, $\theta_{n+1} = \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{n+1,\beta}$, $\eta_{n+1} = \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{n+1,\beta} n_{n+1,\beta}$, $\zeta_{n+1} = \sum_{\beta=0}^{\alpha-1} m_{n+1,\beta} n_{n+1,\beta}^2$.

Аналогично можно построить остальные матрицы, входящие в систему дифференциальных уравнений движения.

Алгоритм построения матрицы трехмерной модели с $n+1$ звеном по матрице двумерной модели с n звеньями имеет последовательность действий:

$${}^{2D}A_n \rightarrow {}^{2D}A_{n+1} \rightarrow {}^{3D}A_{n+1}. \quad (16)$$

Таким образом, получен рекуррентный алгоритм составления уравнений движения двумерной стержневой механической системы с $n+1$ звеном по известному уравнению для n -звенной механической системы и дальнейшего перехода к трехмерной модели соответствующей структуры. Он позволяет автоматизировать составление системы дифференциальных уравнений движения стержневой механической системы со звеньями переменной длины. Появляется возможность синтеза большого количества моделей с разным количеством звеньев.

Описанные матричный метод и рекуррентный алгоритмы были реализованы в среде системы компьютерной математики Mathematica. При составлении уравнений Лагранжа второго рода для модели звена (рис. 2 а) было затрачено время в секундах для модели с одним подвижным звеном – 0.59, с двумя подвижными звеньями – 5.3, с тремя подвижными звеньями – 37, при использовании матричного метода 0.46, 0.55 и 0.79 соответственно. Рекуррентный алго-

ритм при составлении дифференциальных уравнений движения для модели с двумя и тремя подвижными звеньями затратил 0.59 и 0.86 секунды соответственно. Для трехмерной модели с двумя подвижными звеньями (рис. 4), время, затраченное на составление дифференциальных уравнений движения с помощью уравнений Лагранжа второго рода равно 113.69 секунды, с помощью матричного метода 1.30 секунды. Таким образом, видно, что различия в скорости составления системы дифференциальных уравнений движения нарастают с увеличением количества звеньев и перехода к трехмерной модели.

В третьей главе «**Моделирование экзоскелета и антропоморфного робота многозвенными стержневыми механическими системами со звеньями переменной длины**» разработаны модели звеньев переменной длины для непосредственной практической реализации в экзоскелете, либо антропоморфном роботе, они показаны на рис. 2 в-д.

Представленная на рис. 2 в система имеет одно звено AB , состоящее из невесомой части изменяющей свою длину AD и весомой абсолютно твердой части DB . Положение однозначно определяется углом $\varphi_1(t)$ и переменной длиной участка стержня $\xi_1(t)$. Рассматриваемая система имеет две степени свободы. M_1 – момент, развиваемый в шарнире A , F_1 – продольная сила, действующая вдоль стержня. Они являются управлением и определяют движение звена.

Модель на рис. 2 г отличается от предыдущей наличием двух невесомых участков переменной длины $\xi_{11}(t)$ и $\xi_{12}(t)$.

Телескопическая модель звена (рис. 2 д), состоит из двух весомых абсолютно жестких частей – штока $AB = l_1$ и корпуса $CD = l_2$, совершающих движение относительно друг друга вдоль прямой, проходящей через его начало и конец. Один из шарниров жестко соединен со штоком, второй с корпусом. Под действием реакций со стороны опоры и соседних стержней происходит движение штока внутри корпуса. Переменность длины звена реализуется за счет относительного движения вдоль направления AD звена CD относительно закрепленного в неподвижном шарнире A звена AB . Пружинный элемент на участке AC моделирует восстанавливающую силу. Пружина считается невесомой. По-

ложение однозначно определяется углом φ_1 и переменной длиной участка стержня $\xi_1(t) = AC$. Рассматриваемая система имеет две степени свободы. В диссертации записаны системы дифференциальных уравнений движения для моделей, представленных на рис. 2 в-д, а также для моделей с двумя подвижными звеньями переменной длины.

Алгоритм составления дифференциальных уравнений движения с использованием локальной системы координат. В работе [22] представлен алгоритм составления дифференциальных уравнений движения робототехнических систем. Используем его для рассматриваемых стержневых механических систем со звеньями переменной длины (рис. 2 г). В алгоритме используются главные локальные системы координат. Рассмотрим n -звенный стержневой механизм со звеньями переменной длины, схематично представленный на рис. 6.

С каждым i -м звеном свяжем подвижную локальную систему координат $A_i x_i y_i$ ($i = 1, 2, \dots, n$). Неподвижную абсолютную систему координат обозначим Oxy (рис. 6). Начало каждой подвижной системы координат совместим с полюсом соответствующего звена, то есть с его точкой прикрепления к предыдущему звену, а для первого звена – в точке прикрепления к опоре. Движение полюса можно определить, исходя из движения предыдущего звена. Ось $A_i x_i$ направим вдоль звена, ось $A_i y_i$ направим перпендикулярно звену. Угол φ_i определяет поворот осей i -й системы координат $A_i x_i y_i$ относительно неподвижной Oxy . Углы φ_i являются первым набором обобщенных координат, так как определяют положение звеньев механизма на плоскости. Вторым набором обобщенных координат являются участки переменной длины звеньев механизма $\xi_{i\alpha}$ ($\alpha = 1, 2$). Обобщенные координаты считаем функциями времени: $\varphi_i = \varphi_i(t)$, $\xi_{i\alpha} = \xi_{i\alpha}(t)$.

В диссертации описан данный алгоритм. В итоге получаются дифференциальные уравнения движения механизма, совпадающие с соответствующими уравнениями, рассмотренными ранее в данной главе.

Обобщения дифференциальных уравнений движения на случай модели с n подвижными звеньями. Рассмотрим многозвенную стержневую модель с n звеньями (рис. 7). Все длины стержней складываются из участка посто-

янной длины l_i ($i = 1, \dots, n$) и переменной длины $\xi_{i\alpha} = \xi_{i\alpha}(t)$ ($\alpha = 1, 2$ – номер невесомого участка переменной длины на звене). Длины звеньев являются функциями времени за счет наличия двух участков переменной длины.

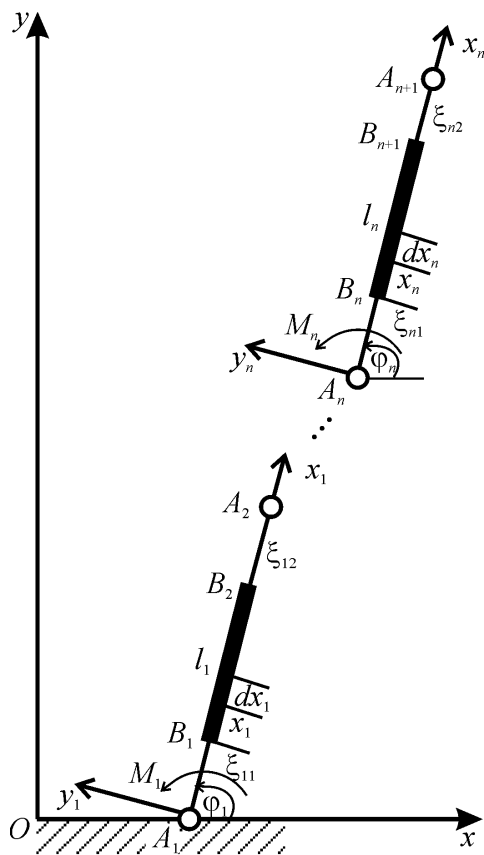


Рис. 6. Схематическая модель экзоскелета с локальными системами координат

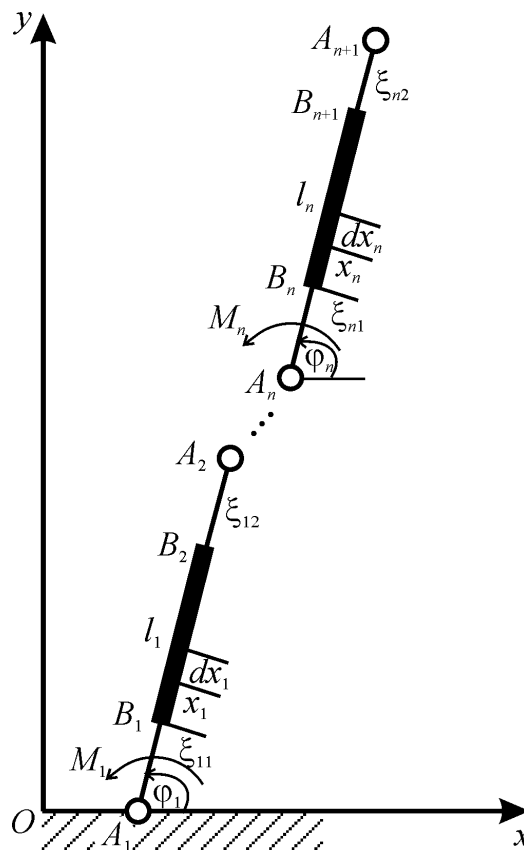


Рис. 7. Модель n звеньев экзоскелета переменной длины, шарнирно соединенных между собой

Положение однозначно определяется углами φ_i и участками переменной длины стержней $\xi_{i\alpha}$. Система имеет $3n - 1$ степеней свободы. Массы звеньев обозначим m_i , моменты инерции звеньев относительно осей, проходящих через один из концов весомого стержня, перпендикулярно плоскости движения – I_i . Обозначим: M_i – моменты, развиваемые в i -м шарнире; $F_{i\alpha}$ – продольные силы, действующие вдоль i -го стержня. Моменты и продольные силы являются управлением в данной механической системе. Дифференциальные уравнения движения n -звенной модели в одноопорной фазе в матричной форме записи имеют вид:

$$A(\varphi, \xi) \ddot{\varphi} + B(\varphi, \xi) \dot{\Phi} \dot{\varphi} + gC(\varphi) + \quad (17)$$

$$+ 2D_1(\varphi, \xi) \dot{\Phi} \dot{\xi}_1 + 2D_2(\varphi, \xi) \dot{\Phi} \dot{\xi}_2 + E_1(\varphi, \xi) \ddot{\xi}_1 + E_2(\varphi, \xi) \ddot{\xi}_2 = M(\varphi, \xi),$$

$$G_\alpha(\varphi, \xi) \ddot{\varphi} + H_\alpha(\varphi, \xi) \dot{\Phi} \dot{\varphi} + gK_\alpha(\varphi) +$$

$$+ 2L_{\alpha 1}(\varphi, \xi) \dot{\Phi} \dot{\xi}_1 + 2L_{\alpha 2}(\varphi, \xi) \dot{\Phi} \dot{\xi}_2 + P_{\alpha 1}(\varphi, \xi) \ddot{\xi}_1 + P_{\alpha 2}(\varphi, \xi) \ddot{\xi}_2 = F_\alpha(\varphi, \xi), \quad (18)$$

где: $\varphi = (\varphi_1, \dots, \varphi_n)^T$ – вектор углов; $\xi_\alpha = (\xi_{1\alpha}, \dots, \xi_{n\alpha})^T$ – вектор участков звеньев переменной длины; $l = (l_1, \dots, l_n)^T$ – вектор участков звеньев постоянной длины; $\dot{\varphi}$ – вектор угловых скоростей; $\ddot{\varphi}$ – вектор угловых ускорений; $\dot{\Phi} = \text{diag}(\dot{\varphi}_1, \dots, \dot{\varphi}_n)$ – диагональная матрица; M, F_α – векторы сил; A, B, G_α, H_α – матрицы, учитывающие инерционные свойства; C, K_α – матрицы, определяемые моментами силы тяжести; $D_1, D_2, E_1, E_2, L_{\alpha 1}, L_{\alpha 2}, P_{\alpha 1}, P_{\alpha 2}$ – матрицы, учитывающие переменную длину звеньев.

Приведем обобщающую формулу для симметрической матрицы A , элементы которой при $j \geq i$ имеют вид:

$$a_{ij} = \delta_{ij} l_i + (l_i + \xi_{i1} + (1 - \delta_{ij}) \xi_{i2}) \times \left(m_j (l_j \tilde{\delta}_{ij} + \xi_{j1}) + (l_j + \xi_{j1} + \xi_{j2}) (l_j \delta_{ij} + \xi_{j1} \delta_{ij} + \xi_{j2} \delta_{ij}) \sum_{k=j+1}^n m_k \right) \cos(\varphi_i - \varphi_j), \quad (19)$$

где: δ_{ij} – символ Кронекера, тогда $\tilde{\delta}_{ij}$ – половинный антикронекер:

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j, \\ 0, & i \neq j, \end{cases} \quad \tilde{\delta}_{ij} = \begin{cases} 0, & i = j, \\ 1/2, & i \neq j. \end{cases}$$

Остальные элементы: $a_{ji} = a_{ij}$.

Примечания 1-3 к формуле (7) для модели с точечными массами, остаются справедливыми и в данном случае.

Таким образом, впервые получены обобщения дифференциальных уравнений движения стержневой системы со звеньями переменной длины.

В главе проведено аналитическое исследование модели. Показано, что для механизма с n подвижными звеньями решение задачи Коши для системы дифференциальных уравнений движения (17)-(18) при любых начальных условиях существует, единственно и неограниченно продолжаемо.

В диссертации составлены дифференциальные уравнения движения элементов плоских стержневых систем в безопорной и двухопорной фазах. Установлено, что в матричной форме записи они имеют вид (17)-(18).

В работе предложена трехмерная математическая модель звена, аналогичная рис. 2 в и составленных из него механических систем.

Рекуррентный метод построения уравнений стержневой механической системы со звеньями переменной длины. Получив выше обобщения для матриц, построим рекуррентный алгоритм, который бы позволял по матрице для n -звенной механической системы строить матрицу для $n + 1$ -звенной механической системы.

Рассмотрим на примере матрицы A для плоского случая модели представленной на рис. 2 з. Для остальных моделей и матриц метод построения будет аналогичным. Матрица для системы с n подвижными звеньями имеет вид:

$$A_n = \begin{pmatrix} I_1 + m_1 \xi_{11} \lambda_1 + \sum_{k=2}^n m_k \lambda_{12}^2 & \dots & \lambda_{12} \left(m_j \lambda_{j1} + \sum_{k=j+1}^n m_k \lambda_{j2} \right) C_{1j} & \dots & m_n \lambda_{12} \lambda_{n1} C_{1n} \\ \lambda_{12} \left(m_i \lambda_{i1} + \sum_{k=i+1}^n m_k \lambda_{i2} \right) C_{1i} & \dots & I_i + m_j \xi_{j1} \lambda_j + \sum_{k=j+1}^n m_k \lambda_{j2}, (i=j) & \dots & m_n \lambda_{i2} \lambda_{n1} C_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ m_n \lambda_{12} \lambda_{n1} C_{1n} & \dots & m_n \lambda_{j2} \lambda_{n1} C_{jn} & \dots & I_n + m_n \xi_{n1} \lambda_n \end{pmatrix}, \quad (20)$$

где: $\lambda_{i1} = \xi_{i1} + l_i/2$, $\lambda_{i2} = \xi_{i1} + l_i + \xi_{i2}$, $\lambda_i = \xi_{i1} + l_i$, $C_{ij} = \cos(\varphi_i - \varphi_j)$.

Матрица для механической системы с $n + 1$ подвижным звеном строится так:

$$A_{n+1} = A_n + \delta A_n, \quad (21)$$

где матрица A_n записывается с дополнительными $(n + 1)$ -й нулевой строкой и $(n + 1)$ -м нулевым столбцом. Матрица δA_n имеет вид:

$$\delta A_n = \begin{pmatrix} m_{n+1} \lambda_{12}^2 & \dots & m_{n+1} \lambda_{12} \lambda_{j2} C_{1j} & \dots & m_{n+1} \lambda_{12} \lambda_{n2} C_{1n} & m_{n+1} \lambda_{12} \lambda_{n+1,1} C_{1,n+1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ m_{n+1} \lambda_{12} \lambda_{i2} C_{1j} & \dots & m_{n+1} \lambda_{j2}^2, (i=j) & \dots & m_{n+1} \lambda_{i2} \lambda_{n2} C_{in} & m_{n+1} \lambda_{i2} \lambda_{n+1,1} C_{i,n+1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ m_{n+1} \lambda_{12} \lambda_{n1} C_{1n} & \dots & m_{n+1} \lambda_{j2} \lambda_{n2} C_{jn} & \dots & m_{n+1} \lambda_{n2}^2 & m_{n+1} \lambda_n \lambda_{n+1,1} C_{n,n+1} \\ m_{n+1} \lambda_{12} \lambda_{n+1,1} C_{1,n+1} & \dots & m_{n+1} \lambda_{j2} \lambda_{n+1,1} C_{j,n+1} & \dots & m_{n+1} \lambda_{n2} \lambda_{n+1,1} C_{n,n+1} & I_{n+1} + m_{n+1} \xi_{n+1,1} \lambda_{n+1} \end{pmatrix}. \quad (22)$$

Аналогично строятся остальные матрицы, входящие в уравнения движения. Таким образом, получен рекуррентный алгоритм составления уравнений

движения стержневой механической системы с $n + 1$ звеном по известному уравнению для n -звенной модели со звеньями переменной длины.

Сравнительный анализ методов получения дифференциальных уравнений движения. В данном исследовании реализованы в виде программ в системе компьютерной математики «Mathematica» четыре метода, описанных выше. В таблице 1 представлены оценки времени для модели экзоскелета, составленной из звеньев, предложенных на рис. 2 г.

Таблица 1 – Сравнение времени составления дифференциальных уравнений движения для модели экзоскелета различными методами с помощью системы компьютерной математики «Mathematica»

Метод	Время, с.		
	одно звено	два звена	три звена
Уравнения Лагранжа второго рода	0.99	7.27	26.81
Алгоритм, использующий локальные системы координат	0.86	6.87	25.08
Матричный метод	0.74	0.82	0.89
Рекуррентный метод	—	0.88	0.98

Из таблицы следует, что для составления дифференциальных уравнений движения наиболее эффективными являются специально разработанные в диссертации рекуррентный и матричный методы. Различия в скорости составления уравнений нарастают с увеличением количества звеньев, эффективность предложенных в диссертации методов становится явно видимой. Открывается возможность автоматизированного проектирования двумерных и трехмерных моделей экзоскелетов и антропоморфных роботов с большим количеством звеньев, совершенствуя их и приближая их движения к движениям человека.

Продемонстрирована универсальность разработанных методов составления дифференциальных уравнений на примере плоского змееподобного робота.

Таким образом, в третьей главе предложены двумерные и трехмерные модели различных конструкций звеньев экзоскелета и антропоморфного робота и разработаны алгоритмы получения дифференциальных уравнений движения.

В четвертой главе «Численное исследование моделей эндо- и экзоскелета» проведен анализ синхронизации кинематических цепей опорно-двигательного аппарата человека и экзоскелета. Установлено, что колебания

практически сразу синхронизируются и далее происходят согласованно. Это можно реализовать при ходьбе человека в экзоскелете, для одной ноги с наложенными на неё звеньями экзоскелета.

Проведено численно-аналитическое исследование динамики экзоскелета с пятью подвижными звеньями переменной длины в виде абсолютно твердого весомого стержня и невесомого пружинного элемента и сопоставление с абсолютно твердым звеном. Показана необходимость учета изменения длины звена.

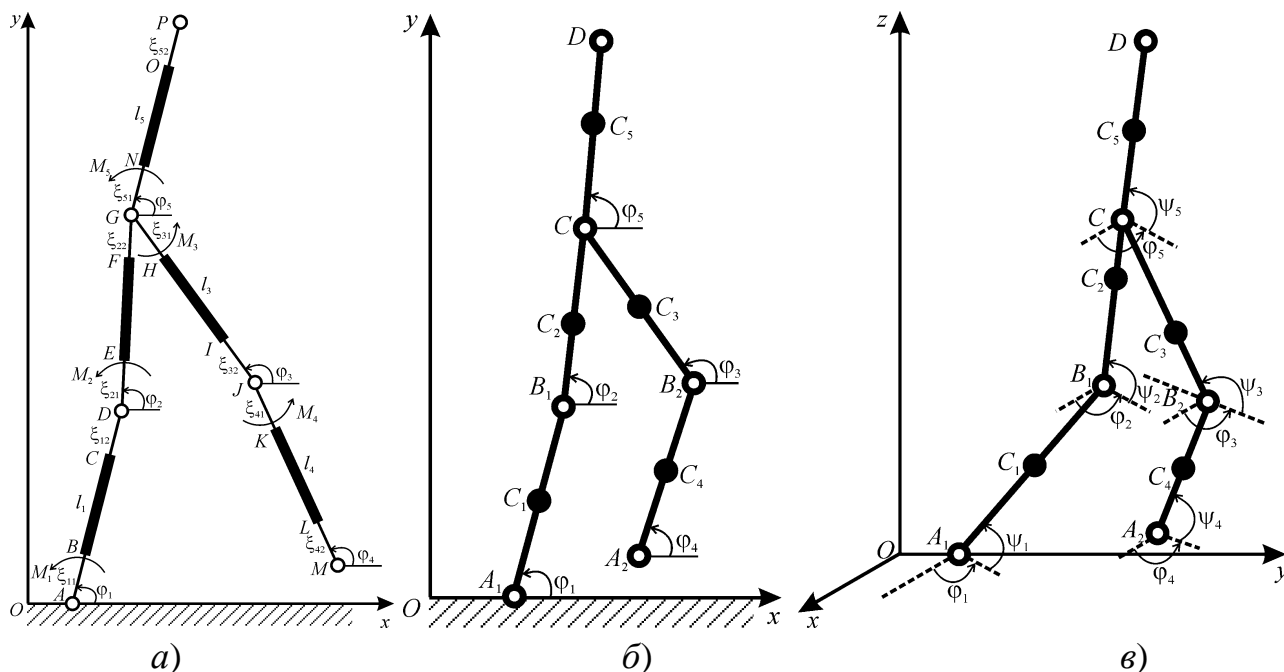


Рис. 8. Модели экзоскелетов с пятью подвижными звеньями переменной длины с ветвлением, шарнирно соединенных между собой (а – с абсолютно твердым звеном; б – с сосредоточенными массами; в – пространственная модель с сосредоточенными массами)

Численное решение проведено для моделей с пятью подвижными звеньями переменной длины (рис. 8 а и б), звенья экзоскелетов соответствуют рис. 2 а и рис. 2 в. Сопоставим влияние конструкции звена на поведение модели при одном и том же управлении, эмпирически определенным ранее [15]. Значения параметров модели для рис. 2 в: $m_1 = m_4 = 2.91$ кг, $m_2 = m_3 = 8.93$ кг, $m_5 = 28.93$ кг, длины весомой абсолютно твердой части звена $l_1 = l_4 = 0.385$ м, $l_2 = l_3 = 0.477$ м, $l_5 = 0.771$ м [15]. На рис. 2 а значения масс звеньев брались такими же, но распределялись они в виде точечных масс – в шарнирах $\frac{1}{4}$ и на стержне $\frac{1}{2}$ от массы звена. Множители, задающие положение сосредоточенной массы на стержне

равны: $n_{11} = n_{41} = 0.595$, $n_{21} = n_{31} = 0.545$, $n_{51} = 0.500$. Длины звеньев задавались в виде интерполяционных функций времени по эмпирическим данным [15]. Начальные условия для обеих моделей: $\varphi_1(0) = 1.68$ рад, $\varphi_2(0) = 1.70$ рад, $\varphi_3(0) = 1.21$ рад, $\varphi_4(0) = 0.39$ рад, $\varphi_5(0) = 1.57$ рад, $\dot{\varphi}_1(0) = -1.57$ рад/с, $\dot{\varphi}_2(0) = -2.92$ рад/с, $\dot{\varphi}_3(0) = -0.19$ рад/с, $\dot{\varphi}_4(0) = -2.83$ рад/с, $\dot{\varphi}_5(0) = -0.07$ рад/с.

Численное решение полученных систем дифференциальных уравнений движения с описанными выше данными о моделях, представлено на (рис. 9).

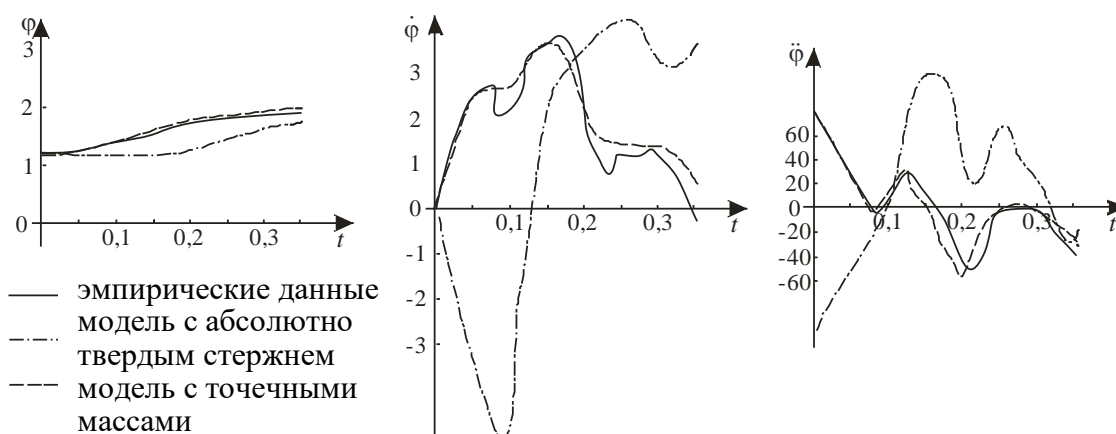


Рис. 9. Численное интегрирование системы дифференциальных уравнений движения для моделей на рис. 1 а и рис. 1 в и эмпирические данные

По графикам видно, что для модели с сосредоточенными массами получается хорошее совпадение с исходным движением, а для модели с абсолютно твердым звеном совпадение отдаленное. Следовательно, распределив точечные массы так, чтобы они соответствовали звену опорно-двигательного аппарата человека, получается движение механизма близкое исходному. Однородный абсолютно твердый стержень отдаленно моделирует звено опорно-двигательного аппарата человека. Этим объясняется некомфортабельность моделей экзоскелетов, которые делаются из абсолютно твердых звеньев.

Решена задача управления движением экзоскелета с человеком внутри путем усиления эмпирически определенных управляющих моментов. Проведено численное решение системы дифференциальных уравнений движения с увеличенными управляющими моментами. На (рис. 10) представлены зависимости от времени угла поворота, угловой скорости и углового ускорения для бедра опорной и переносимой ног с учетом массы экзоскелета.

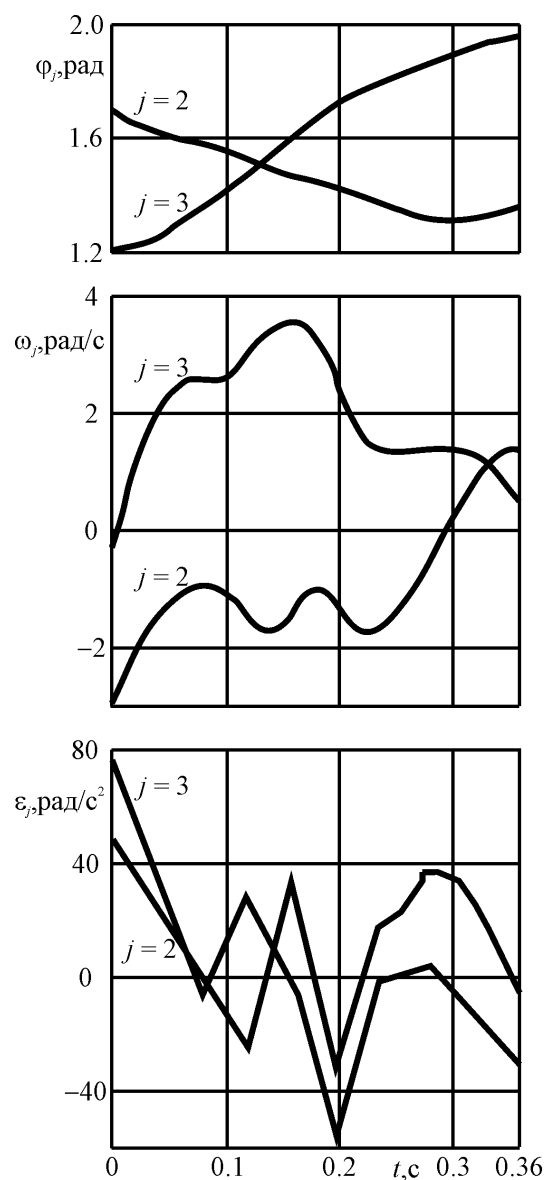


Рис. 10. Решение системы дифференциальных уравнений движения с увеличенным управлением для бедра опорной ($j = 2$) и переносимой ($j = 3$) ног

По полученным графикам видно совпадение исходного движения человека и движений экзоскелета с человеком внутри. Полученный результат показывает путь к решению задачи управлением экзоскелета – считывание управляющих импульсов для соответствующих суставов, их усиление, масштабирование и реализация приводами в шарнирах экзоскелета.

Проведен сравнительный анализ эмпирического способа управления движением экзоскелета (рис. 8 б) и аналитического алгоритма управления движением экзоскелета на основе использования периодических функций.

Осуществлен сравнительный анализ управления движением экзоскелета при различном распределении масс на звене. Установлена важность адекватного распределения масс на звене при проектировании экзоскелета, так как звенья

опорно-двигательного аппарата человека обладают несимметричностью в распределении массы. Рассмотрен вопрос управления трехмерной моделью экзоскелета с пятью подвижными звеньями (рис. 8 в).

Используя результаты второй главы, составлены уравнения движения для системы, приближенной к опорно-двигательному аппарату человека, содержащему 11 подвижных звеньев переменной длины (рис. 11).

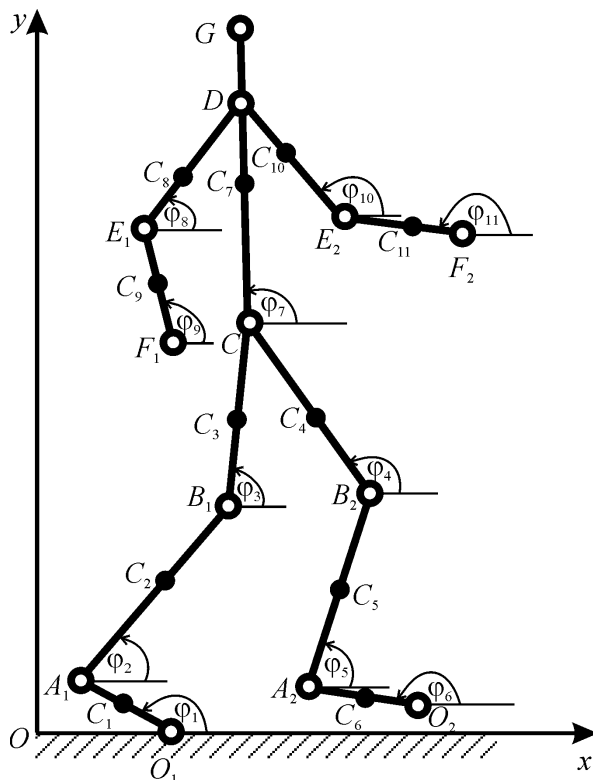


Рис. 11. Схема стержневой механической системы типа эндо- и экзоскелета с одиннадцатью подвижными звеньями переменной длины в одноопорной фазе

Решена прямая задача динамики: по известным усилиям определены кинематические характеристики движения звеньев экзоскелета. Параметры системы выбирались равными соответствующим параметрам моделируемого человека. Расчеты проводились для модели с абсолютно жесткими звеньями и со звеньями переменной длины. В таблице 2 приведены результаты расчетов отношения максимального значения кинематических и динамических характеристик модели со звеньями переменной длины к этим же характеристикам модели с абсолютно твердыми звеньями. Учет изменения длины звеньев позволяет в несколько раз снизить требования к управляющим моментам опорной ноги и корпуса в шарнирах-суставах и ударные нагрузки на опорно-двигательный аппарат человека.

Таблица 2 – Результаты расчетов отношения максимального значения кинематических и динамических характеристик движения модели со звеньями переменной длины и абсолютно твердыми

Отношение величин	φ_1	φ_2	φ_3	φ_4	φ_5	φ_6	φ_7	φ_8	φ_9	φ_{10}	φ_{11}
ω_{II}/ω_T	0.79	0.81	0.88	0.97	1.00	0.72	0.30	0.43	0.47	0.32	0.83
$\varepsilon_{II}/\varepsilon_T$	0.52	0.43	0.71	0.53	0.54	0.80	0.20	0.56	0.92	0.56	0.80
M_{II}/M_T	0.29	0.46	0.86	0.93	1.00	0.89	0.40	0.92	1.00	1.00	1.00

В результате исследования была создана теоретико-механическая модель экзоскелета. При предложенных значениях параметров модели должны быть обеспечены следующие характеристики для значений моментов сил, развиваемых в шарнирах-суставах экзоскелета (табл. 3).

Таблица 3 – Максимальные абсолютные значения моментов силы, развиваемые в шарнирах-суставах экзоскелета

Величина	Шарнир-сустав									
	O_1	A_1	B_1	C	B_2	A_2	D_1	E_1	D_2	E_2
M , Н·м	600	600	500	250	60	20	60	20	90	20

Исходя из максимальной нагрузки в стопе опорной ноги, возникающей при постановке на опору и последующем толчке, полагаем, что необходимы двигатели с высоким импульсным крутящим моментом. Приводы должны подбираться индивидуально для каждого сустава и, в случае с нижними конечностями, обеспечивать широкий диапазон рабочих значений.

Таким образом, в главе проведены численные расчеты и получены практические рекомендации по созданию экзоскелета. Дальнейшее применение результатов диссертационного исследования возможно при изготовлении физической модели опытного образца экзоскелета.

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

1. Обосновано наличие изменения длины звена при ходьбе в опорно-двигательном аппарате человека и показана значимость этого фактора на дви-

жение модели. Используя разработанную модель многослойного шарнира-сустава, состоящего из произвольного конечного количества слоев, получены выражения для изменения диаметра шарнира-сустава при нагружении.

2. Сформулировано определение звена переменной длины и созданы модели таких звеньев для разработки и теоретического исследования экзоскелета, антропоморфного робота и опорно-двигательного аппарата человека.

3. Предложены модели, описывающие реальные условия функционирования экзоскелета и антропоморфного робота в одноопорной, безопорной, двухопорной фазах движения на плоскости и в пространстве. Получены дифференциальные уравнения движения и обобщения для матричной формы записи.

4. Разработаны новые методы записи дифференциальных уравнений движения для механической стержневой системы, выразившиеся в создании рекуррентного алгоритма и матричного метода. Эти методы позволяют автоматизировать получение усложненных систем за счет увеличения количества звеньев. Вместе с моделью звена переменной длины, перечисленные методы составили новое направление в динамике нелинейных стержневых механических систем применительно к эндо-, экзоскелетам и антропоморфным роботам.

5. Впервые проведено исследование явления синхронизации движений в механической системе при колебаниях звеньев применительно к двуногой антропоморфной ходьбе, так как комфортабельная эксплуатация человеком экзоскелета возможна при синхронизации колебаний всех элементов эндо- и экзоскелета.

6. Составлена система нелинейных дифференциальных уравнений для исследования динамики многозвенной стержневой механической системы со звеньями переменной длины. Ее можно применить к описанию движения человека, экзоскелета или антропоморфного робота. Проведено решение прямой задачи динамики для модели экзоскелета с изменяющимися длину звеньями при экспериментально найденных управляющих усилиях. В дальнейшем можно будет измерять управляющие импульсы на человеке, и после преобразования и усиления использовать их в качестве управляющих движением экзоскелета.

7. Исследованы параметры, влияющие на поведение экзоскелета: учет собственной массы экзоскелета с человеком внутри, различные алгоритмы управления движением, распределение масс звена. Установлены факторы, значительно влияющие на движения экзоскелета.

8. В результате проведенного сопоставления моделей звеньев, изменяющих свою длину с абсолютно твердыми звеньями, установлена важность учета изменения длин звеньев. Результаты использованы для создания теоретико-механической модели экзоскелета, свойства которого близки к эндоскелету человека. Определены требования к управляющим приводам экзоскелета. Проведенное исследование дает возможность более глубокого понимания механизмов функционирования эндоскелета человека.

9. Разработанные методы составления дифференциальных уравнений движения и модели звеньев переменной длины применены к созданию плоского змееподобного робота. Разработана модель перемещения плоских змееподобных механизмов с помощью продольных и поперечных волнообразных движений плоского механизма.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых журналах из перечня ВАК РФ

1. Борисов А. В. Методика автоматизированного составления дифференциальных уравнений движения антропоморфного робота / А. В. Борисов // Известия Смоленского государственного университета. – 2010. – № 2. – С. 82-89.
2. Борисов А. В. Численное решение системы дифференциальных уравнений движения антропоморфного робота и анимационная визуализация его ходьбы / А. В. Борисов // Известия Смоленского государственного университета. – 2010. – № 4. – С. 69-76.
3. Чигарев А. В. Моделирование управляемого движения двуногого антропоморфного механизма / А. В. Чигарев, А. В. Борисов // Российский журнал биомеханики. – 2011. – Т. 15, № 1(51). – С. 74-88.
4. Борисов А. В. Распределение деформаций и напряжений в системе, состоящей из произвольного количества толстостенных сфер, под действием внешней нагрузки / А. В. Борисов // Известия Тульского государственного университета. Серия : Естественные науки. – 2011. – Вып. 1. – С. 94-102.
5. Борисов А. В. Управление движением одиннадцатизвенного антропоморфного робота на основе информации экспериментально полученной на биологических объектах / А. В. Борисов // Вестник Воронежской государственной технологической академии. Серия : Информационные технологии, моделирование и управление. – 2011. – № 2. – С. 68-71.
6. Борисов А. В. Расчет деформаций, возникающих при нагрузках в опорно-двигательном аппарате человека / А. В. Борисов // Известия Смоленского государственного университета. – 2011. – № 4. – С. 114-118.
7. Борисов А. В. Автоматизация проектирования стержневых экзоскелетов / А. В. Борисов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2014. – № 10. – С. 29-33.

8. Борисов А. В. Автоматизация разработки трехмерных моделей экзоскелетов со звеньями переменной длины / А. В. Борисов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. – Т.16, №12. – С. 828-835.

9. Борисов А. В. Новые алгоритмы составления дифференциальных уравнений движения экзоскелета с переменной длиной звеньев и управлением в шарнирах-суставах / А. В. Борисов, Г. М. Розенблат // Компьютерные исследования и моделирование. – 2017. – Т. 9, № 2. – С. 201-210.

10. Борисов А. В. Синтез экзоскелета со звеньями переменной длины для опорно-двигательного аппарата человека / А. В. Борисов // Вопросы оборонной техники. Научно-технический журнал. Технические средства противодействия терроризму. Серия 16. Вып. 5-6. – 2017. – С. 59-67.

11. Борисов А. В. Матричный метод составления дифференциальных уравнений движения экзоскелета и управление им / А. В. Борисов, Г. М. Розенблат // Прикладная математика и механика. – 2017. – Т. 81. – № 5. – С. 511-522.

12. Борисов А. В. Автоматизация разработки экзоскелетов и антропоморфных роботов с использованием рекуррентного метода составления дифференциальных уравнений движения / А. В. Борисов, Г. М. Розенблат // Справочник. Инженерный журнал. – 2018. № 1. – С. 25-31.

13. Борисов А. В. Моделирование динамики экзоскелета с управляемыми моментами в суставах и переменной длиной звеньев с использованием рекуррентного метода составления дифференциальных уравнений движения / А. В. Борисов, Г. М. Розенблат // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2018. № 2. – С. 148-174.

14. Борисов А. В. Механика пространственной модели экзоскелета и антропоморфного робота / А. В. Борисов // Вопросы оборонной техники. Научно-технический журнал. Технические средства противодействия терроризму. Серия 16. Вып. 3-4. – 2018. – С. 46-55.

Монографии, учебник

15. Борисов А. В. Моделирование опорно-двигательного аппарата человека и применение полученных результатов для разработки модели антропоморфного робота : монография / А. В. Борисов. – М. : Спутник +, 2009. – 212 с.

16. Борисов А. В. Динамика эндо- и экзоскелета : монография / А. В. Борисов. – Смоленск : Смоленская городская типография, 2012. – 296 с.

17. Чигарев А. В. Биомеханика : учебник / А. В. Чигарев, Г. И. Михасев, А. В. Борисов. – Минск : Изд-во Гревцова, 2010. – 284 с.

Статьи в журналах не входящих в список ВАК, сборниках, материалах конференций

18. Chigarev A. V. Problems of strength at loading multilayer bones of the person / A. V. Chigarev, A. V. Borisov // Mechanika 2009 : proceedings of the 14th international conference (April 2-3, 2009) / Kaunas University of Technology, Lithuania. – Kaunas : Technologija. – 2009. – P. 76-79.

19. Борисов А. В. Математическая модель распространения ударного импульса в нижней конечности человека при постановке ноги на опору с учетом деформируемости элементов / А. В. Борисов // Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии : тезисы докладов VII Всерос. конф. молодых ученых (25-28 мая 2009 г.). – Новосибирск : Сибирское научное издательство. – 2009. – С. 25-27.

20. Борисов А. В. Проверка возможности использования экспериментально определенных на людях управляющих моментов для управления движением антропоморфного робота / А. В. Борисов // Экстремальная робототехника : труды XXI Междунар. науч.-техн. конф. – СПб. : Политехника-сервис. – 2010. – С. 327-337.

21. Borisov A. V. Elastic analysis of multilayered thick-walled spheres under external load / A. V. Borisov // Mechanika. Kaunas University Of Technology. – 2010. – Nr. 4(84). – P. 28-32.

22. Чигарев А. В. Применение модели многослойных сфер к численным расчетам деформаций и напряжений в тазобедренном суставе человека / А. В. Чигарев, А. В. Борисов // Теоретическая и прикладная механика. Международный научно-технический журнал. Выпуск 26. Минск, БНТУ, 2011. С. 233-247.

23. Борисов А. В. Механизм рекуперации энергии в опорно-двигательном аппарате человека / А. В. Борисов // Системы компьютерной математики и их приложения : материалы XI междунар. науч. конф. – Смоленск : Изд-во СмолГУ. – 2011. – Вып. 12. – С. 7-9.
24. Чигарев А. В. Синхронизация колебаний стержневых механических систем / А. В. Чигарев, А. В. Борисов // Механика машин, механизмов и материалов. – 2013. – № 1 (22). – С. 82-86.
25. Чигарев А. В. Моделирование движения антропоморфного робота на плоскости с использованием пакета Mathematica / А. В. Чигарев, А. В. Борисов // Информатика. – 2013. – № 2. – С. 5-10.
26. Борисов А. В. Модель телескопического звена экзоскелета / А. В. Борисов // Энергетика, информатика, инновации – 2016. – ЭИИ-2016. Т. 1. – Смоленск : Универсум, 2016. – С. 235-238.
27. Borisov A. V. Synchronization of Kinematic Chains of Human's Musculoskeletal System and the Exoskeleton During Movement / A. V. Borisov // Journal of Machinery Manufacturing and Automation. – 2016. – Vol. 5, Iss. 1. – P. 50-59. Режим доступа: <http://www.academicpub.org/jmma/paperInfo.aspx?PaperID=17003>
28. Борисов А. В. Сравнительный анализ поведения экзоскелетов с различными моделями звеньев переменной длины / А. В. Борисов // Мехатроника, автоматика и робототехника: материалы междунар. науч.-практ. конф. – Новокузнецк: НИЦ МС, 2017. – №1. – С. 59-63.
29. Борисов А. В. Модель экзоскелета и антропоморфного робота с многозвеньевыми стопами / А. В. Борисов // Технология машиностроения и материаловедение: материалы междунар. науч.-практ. конф. – Новокузнецк: НИЦ МС, 2017. – №1. – С. 21-23.
30. Борисов А. В. Дифференциальные уравнения движения плоских стержневых систем со звеньями переменной длины в безопорной и двухопорной фазах движения для моделирования опорно-двигательного аппарата человека, экзоскелета и антропоморфного робота / А. В. Борисов // Международный научный теоретико-практический альманах. Смоленск, 2017. – Вып. 2. – С. 153-165.
31. Борисов А. В. Трехмерные модели стержневых систем со звеньями переменной длины с сосредоточенными массами и с абсолютно твердым весомым стержнем и невесомым участком изменяющим длину / А. В. Борисов // Международный научный теоретико-практический альманах. Смоленск, 2017. – Вып. 2. – С. 186-211.
32. Борисов А. В. Сравнительный анализ алгоритмов управления экзоскелетом со звеньями переменной длины / А. В. Борисов, Л. В. Кончина // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2017. – Т.18, №4. – С. 238-245.
33. Борисов А. В. Эмпирический и теоретический подходы к управлению движением экзоскелета / А. В. Борисов // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Физико-математические и технические науки. – 2017. – № 3. – С. 33-47.
34. Борисов А. В. Модель экзоскелета со звеньями переменной длины с произвольным количеством сосредоточенных масс на звене: исследование влияния расположения масс на его динамику / А. В. Борисов // Экстремальная робототехника. Сб. тез. Международной научно-технической конференции. – СПб: Издательско-полиграфический комплекс «Гангут», 2017. – С. 128.
35. Борисов А. В. Исследование влияния расположения сосредоточенных масс на звене на динамику экзоскелета / А. В. Борисов // Энергетика, информатика, инновации – 2017. – ЭИИ-2017. Т. 1. – Смоленск: Универсум, 2017. – С. 235-240.
36. Борисов А. В. Применение матричного метода и рекуррентного алгоритма к модели плоского многозвонного механизма со звеньями переменной длины, движущегося по горизонтальной плоскости / А. В. Борисов, Г. М. Розенблат, А. В. Чигарев // Теоретическая и прикладная механика : международный научно-технический сборник – Минск, БНТУ. – 2018. – Вып. 33. – С. 370-380.

Список цитируемой литературы

1. Белецкий В. В. Двухногая ходьба: модельные задачи динамики и управления / В. В. Белецкий. – М. : Наука, 1984. – 288 с.
2. Бербюк В. Е. Динамика и оптимизация робототехнических систем / В. Е. Бербюк. – Киев : Наукова Думка, 1989. – 192 с.
3. Вукобратович М. Шагающие антропоморфные механизмы / М. Вукобратович. – М. : Мир, 1976. – 541 с.
4. Формальский А. М. Перемещение антропоморфных механизмов / А. М. Формальский. – М. : Наука, 1982. – 368 с.
5. Ананьевский И. М. Непрерывное управление механической системой на основе метода декомпозиции / И. М. Ананьевский, С. А. Решмин // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2014. – № 4. – С. 3-17.
6. Болотин В. В. Управление походкой двуного шагающего аппарата / В. В. Болотин, И. В. Новожилов // Известия АН СССР. МТТ. – 1977. – №3. – С. 47-52.
7. Болотник Н. Н. Оптимизация параметров и управляемых движений вибросистем и роботов : дис. ... д-ра физ. мат наук : 01.02.01. / Н. Н. Болотник. – М., 1991. – 396 с.
8. Малолетов А. В. Оптимизация структуры, параметров и режимов движения шагающих машин со сдвоенными движителями. Монография. / А. В. Малолетов, Е. С. Брискин. – Изд-во ВолгГТУ, 2015. – 175 с.
9. Ганиев Р. Ф. Манипуляционные механизмы параллельной структуры и их приложения в современной технике / Р. Ф. Ганиев, В. А. Глазунов // ДАН. – 2014. – Т. 459. – № 4. – С. 428-431.
10. Анализ элементарных перемещений манипулятора параллельной структуры с круговой направляющей на основе дифференцирования уравнений связей / А. К. Алешин, В. А. Глазунов, Ш. Оффер, Г. В. Рашоян, С. А. Скворцов, А. Б. Ласточкин // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2016. – № 5. – С. 17-21.
11. Голубев Ю. Ф. Компьютерное моделирование шагающих роботов / Ю. Ф. Голубев, Д. Ю. Погорелов // Фундаментальная и прикладная математика. – 1998. – Т. 4, № 2. – С. 525 – 534.
12. Колесов А. М. Применение прямого метода задания программных движений в задаче навигации шагающего аппарата / А. М. Колесов, А. В. Малолетов, К. Б. Мироненко // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2015. – №14. – С. 134-139.
13. Маркеев А. П. О движении связанных маятников / А. П. Маркеев // Нелинейная динамика. – 2013. – № 9:1. – С. 27-38.
14. Мухарлямов Р. Г. Моделирование процессов управления, устойчивость и стабилизация систем с программными связями / Р. Г. Мухарлямов // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2015. – № 1. – С. 15-28.
15. Мухарлямов Р. Г. Приведение к заданной структуре уравнений динамики систем со связями / Р. Г. Мухарлямов // ПММ. – 2007. – Т. 71. – №. 3. – С. 401-410.
16. Новожилов И. В. Управление пространственным движением двуного шагающего аппарата / И. В. Новожилов // Известия АН СССР. МТТ. – 1984. – №4. – С. 47-53.
17. Опыт проектирования многоцелевого гидравлического шагающего шасси / Д. Е. Охочимский [и др.] // Механика и управление движением шагающих машин. – 1995. – № 2. – С. 103-111.
18. Павловский В. Е. О разработках шагающих машин / В. Е. Павловский // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. – 2013. – № 101. – 32 с. URL: http://keldysh.ru/papers/2013/prep2013_101.pdf
19. Reshmin S. A. Properties of the time-optimal feedback control for a pendulum-like system / S. A. Reshmin, F. L. Chernousko // Journal of Optimization Theory and Applications. – 2014. – Vol. 163, №. 1. – P. 230-252.
20. Паскаль М. Периодические движения двойного осциллятора, возбуждаемые сухим трением и гармонической силой / М. Паскаль, С. Я. Степанов // XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики: аннотации докладов. (Казань, 20 – 24 августа 2015 г.). – Казань: Издательство Академии наук РТ, 2015. – С. 2940–2941.
21. Холостова О. В. Об устойчивости равновесий твердого тела с вибрирующей точкой подвеса / О. В. Холостова // Вестник РУДН. Математика. Информатика. Физика. – 2011. – № 2. – С. 111-122.
22. Черноусько Ф. Л. Методы управления нелинейными механическими системами. / Ф. Л. Черноусько, И. М. Ананьевский, С. А. Решмин. – М.: Физматлит, 2006. – 328 с.

АННОТАЦИЯ

Борисов А.В.

Динамика механических стержневых систем со звеньями переменной длины применительно к эндо- и экзоскелетам

В рамках нового направления в динамике нелинейных стержневых систем с переменной длиной звеньев и изменяемой геометрией под действием внутренних усилий и наложенных внешних связей разработаны новые модели звеньев переменной длины, матричный метод и рекуррентный алгоритм составления дифференциальных уравнений движения. Полученные аналитические результаты применены к моделированию эндо- и экзоскелета. Установлена необходимость учета изменения длины звеньев при движениях человека и предложены рекомендации для разработки теоретико-механической модели экзоскелета в виде робототехнической мехатронной системы с перспективой применения в медицине, робототехнике.

ABSTRACT

Borisov A.V.

Dynamics of mechanical rod systems with links of variable length with respect to endo - and exoskeletons

In the new direction in the dynamics of nonlinear rod systems with variable link lengths and variable geometry under the influence of internal forces and imposed external constraints, new models of links of variable length, a matrix method and a recurrent algorithm for the construction of differential equations of motion are developed. The obtained analytical results are applied to the modeling of the endo- and exoskeleton. It was established that it is necessary to take into account the change in the length of links during human movements and suggested recommendations for the development of a theoretical-mechanical model of the exoskeleton in the form of a robotic mechatronic system with a perspective in medicine and robotics.

Подписано в печать __. __. 2018 г. Формат 60×84¹/₁₆. Тираж 100 экз. Печ. л. 2,0.
Отпечатано в издательском секторе филиала ФГБОУ ВО "НИУ "МЭИ" в г. Смоленске
214013 г. Смоленск, Энергетический проезд, 1