



Научная статья

DOI: 10.15593/RZhBiomeh/2023.4.15

УДК 531/534: [57+61]

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ АКТИВНОГО ЭКЗОСКЕЛЕТА С ПЯТЬЮ УПРАВЛЯЕМЫМИ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ ЗВЕНЬЯМИ

А.О. Блинов, А.В. Борисов, Л.В. Кончина, М.Г. Куликова, К.С. Маслова

Филиал национального исследовательского университета «Московский энергетический институт»
в г. Смоленске, Смоленск, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 04 сентября 2023

Одобрена: 08 декабря 2023

Принята к публикации: 09 декабря 2023

Ключевые слова:

экзоскелет, антропоморф, звенья, шарниры, электроприводы, спортивная ходьба, обобщенные координаты, управляющие моменты, дифференциальные уравнения Лагранжа второго рода

АННОТАЦИЯ

Представлено моделирование движений антропоморфной модели мехатронного механизма типа экзоскелета, содержащего пять стержней, соединенных между собой цилиндрическими шарнирами. Экзоскелет представляет собой систему звеньев, которые подвергаются относительным поворотам вокруг осей координат под воздействием соответствующих звеньев опорно-двигательного аппарата пользователя, на которого надет экзоскелет, силы тяжести, реакций опоры и внутренних управляющих усилий, реализуемых электроприводами. Для описания движения каждого звена применяются углы между звеньями и вводятся локальные системы координат, которые позволяют определять их положение в пространстве. Управление изменением углов между звеньями осуществляется при помощи электрических приводов. Моделирование проводится для близкой к спортивной ходьбе человека походки, при которой происходит мгновенное чередование одноопорных фаз. Биомеханическое моделирование экзоскелета с пятью подвижными управляемыми звеньями позволяет выделить задачи, которые необходимо решить: синтез траектории движения, определение управляющих моментов, подбор электроприводов, и разработку системы импульсного управления движением. Для задания антропоморфного движения экзоскелета вводятся периодические функции, задающие изменения углов между звеньями. Составлена система дифференциальных уравнений. Численно решается задача Коши. Результаты численного решения сравниваются с исходным движением, делается вывод о неустойчивости системы и проводится обсуждение возможных путей стабилизации неустойчивого движения. Проведены оценки влияния наличия электроприводов на динамику всего экзоскелета.

© ПНИПУ

© **Блинов Александр Олегович** – старший преподаватель кафедры технологических машин и оборудования, e-mail: alex-blinov67@yandex.ru ID: 0000-0002-1883-7883

© **Борисов Андрей Валерьевич** – д.ф.-м.н., профессор кафедры высшей математики, e-mail: BorisowAndrei@yandex.ru ID 0000-0002-7004-3140

© **Кончина Лариса Владимировна** – к.ф.-м.н., доцент кафедры технологических машин и оборудования, e-mail: la_kon@mail.ru ID 0000-0001-8646-9691

© **Куликова Марина Геннадьевна** – к.т.н., доцент, кафедры Технологических машин и оборудования, e-mail: kulikova0808@rambler.ru ID 0000-0002-9993-1432

© **Маслова Ксения Сергеевна** – ассистент кафедры Технологических машин и оборудования, e-mail: maslowaksusha1@yandex.ru ID 0000-0003-2932-7202



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

Введение

Экзоскелеты – это носимые устройства, которые могут надеваться на человека с различными целями: для предотвращения травм на производстве, увеличения силы и выносливости мышц, восстановления ослабевающих или временно утраченных двигательных способностей опорно-двигательного аппарата и т.п. Возможные приложения экзоскелетов и анализ литературных источников, посвященных их созданию, описаны в работах [2–4, 26–28]. Поэтому, здесь не будем подробно останавливаться на анализе аналогов, рассмотрим только работы за последний год и остановимся на технической реализации моделей экзоскелетов – имеющих патентах и последних публикациях в научных журналах по биомеханическому моделированию и изучению движений человека, экзоскелетов, антропоморфных роботов, тренажеров и т.п.

Несмотря на значительно увеличивающееся количество публикаций и патентов по теме «экзоскелет» [2, 4], остаются актуальными проблемы их использования. Одной из причин недостаточной комфортабельности является наличие массивных абсолютно твердых звеньев, оказывающих существенное влияние на динамику человеко-машинной системы, что должно учитываться в процессе создания экзоскелетов, так как сама масса экзоскелета, сопоставимая по порядку величины с массой человека, оказывает значительное влияние на движения человека в экзоскелете [3, 26–28]. Поэтому в данный момент для выпускаемых моделей требуется обучение человека взаимодействию с экзоскелетом. Способы записи систем дифференциальных уравнений динамики на основе подвижных локальных систем координат представлены в работах [4, 24, 26, 27]. Проблемы оценивания эффекта от использования экзоскелетов, а также расхода энергии у человека и ее экономии рассматриваются в работах [5, 22, 29, 30–34, 37–43, 45]. Работа [25] описывает исследования, которые необходимо провести для создания экзоскелетов. Зарегистрированы патенты различных моделей пассивных и активных экзоскелетов и их отдельных частей для использования в промышленности, медицине и т.д. [7–20].

В последний год опубликован ряд подробных обзоров по рассматриваемой теме [1,5,21].

В результате обобщения научно-технических публикаций можно предложить следующую классификацию экзоскелетов (рис. 1).

Предложенная в данной статье математическая модель антропоморфного механизма, содержащего пять подвижных звеньев, относится к активным мобильным экзоскелетам с электромеханическим приводом для нижних конечностей и корпуса человека. Он имеет потенциально все указанные на рис. 1 области применения, в том числе для медицинских работников и в реабилитации пациентов с возможностью двойного назначения, как для усиления физических возможностей человека и предотвращения травм, так и в качестве тренажера.

В большинстве математических моделей антропоморфов используются углы, которые отсчитываются от горизонтали или вертикали, и не применяются углы, отсчитываемые от одного звена к другому. Недостаточно представлено математических моделей электромеханических антропоморфных систем и их влияния на динамику опорно-двигательного аппарата человека. Данный пробел восполняет предложенное исследование.

Биомеханическая модель активного экзоскелета с пятью подвижными управляемыми звеньями

Рассмотрим биомеханическую антропоморфную модель активного экзоскелета, содержащего пять подвижных управляемых звеньев. Так как при движениях человека при помощи мышечных усилий, системы рычагов и суставов, изменяются углы между звеньями, например, между голенью и бедром и т.д., то и в модели экзоскелета предусмотрим отсчет углов между звеньями при помощи шарниров. Для этого введем одну абсолютную систему координат xA_0y , и пять локальных $x_iA_i-1y_i$, ($i = 1,2,...5$) каждая из которых жестко связана с i -м звеном экзоскелета (рис. 2). В отличие от созданных ранее моделей [2, 3, 23, 26–28], в рассматриваемой модели антропоморфного механизма углы задаются между звеньями механизма, осуществляя-



Рис. 1. Классификация экзоскелетов, предложенная по итогам анализа научно-технических публикаций

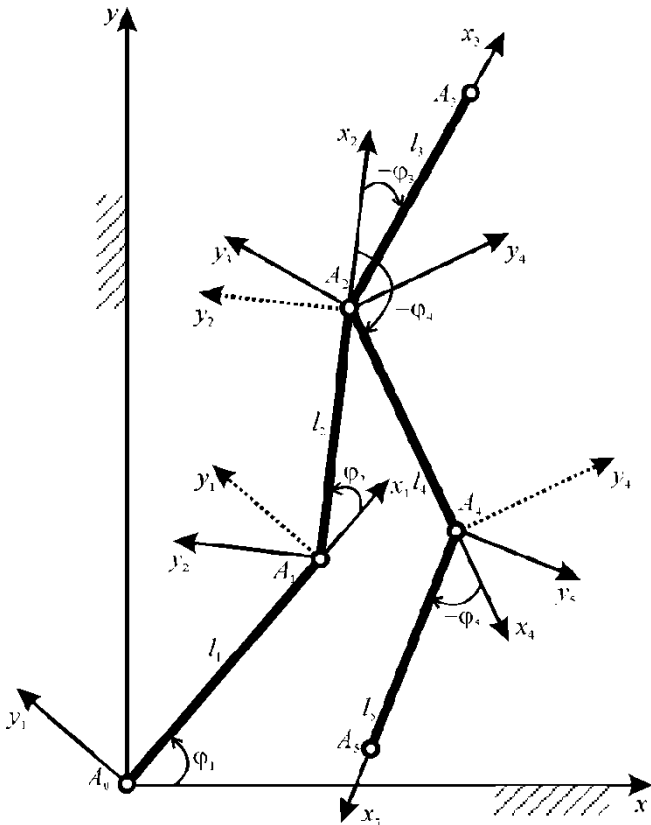


Рис. 2. Модель активного экзоскелета с пятью подвижными управляемыми звеньями и локальными системами координат

ющими движение в положительном направлении против хода часовой стрелки от предыдущего звена с меньшим номером, к следующему звену с большим номером. Для первого подвижного звена угол отсчитывается от абсолютной системы координат к локальной системе координат с номером один. Так как антропомимный механизм имеет конструктивные особенности, то углы $\varphi_i(t)$ ($i = 3, 4, 5$) (см. рис. 2) между локальными системами координат построены по ходу стрелки часов, т.е. в отрицательном направлении отсчета. Углы для звеньев с номерами один и два показаны в положительном направлении.

Модель активного экзоскелета с электроприводами имеет весомые звенья в виде прямолинейных стержней (см. рис. 2). Стержни между собой соединяются с помощью цилиндрических шарниров, находящихся в точках A_i ($i = 0, 1, 2, \dots, 5$). Шарниры в точках A_0 и A_5 соединяются с опорной поверхностью с помощью односторонней неукрепленной связи, которая в момент касания ногой опоры мгновенно накладывается, а в момент отрыва от опорной ноги – снимается. Модель походки механизма предполагается близкой к спортивной ходьбе человека, т.е. в процессе ходьбы происходит чередование ее одноопорных фаз. При этом смена опорной и переносимой ног происходит мгновенно. Вследствие действия силы тяжести, реакции опоры и соседних стержней, управляющих усилий, создаваемых электроприводами, не показанными на

рис. 2, реализуются относительные вращения звеньев. Следовательно, при правильно заданном управлении, реализуется антропомимное движение всего экзоскелета. Звенья $A_0A_1 = l_1$, $A_1A_2 = l_2$, $A_2A_3 = l_3$, $A_2A_4 = l_4$, $A_4A_5 = l_5$ являются инерционными прямолинейными абсолютно твердыми стержнями. Массы звеньев $A_{i-1}A_i$ ($i = 1, 2, \dots, 5$) равны m_i . Моменты инерции звеньев относительно оси, проходящей через точку A_{i-1} перпендикулярно плоскости движения $x_iA_{i-1}y_i$, определяются по известной формуле $I_i = m_i l_i^2 / 3$ ($i = 1, 2, \dots, 5$).

Звено A_0A_1 совершает вращательное движение относительно оси, проходящей через неподвижный цилиндрический шарнир A_0 , перпендикулярной к плоскости $x_0A_0y_0$. Положение звена однозначно определяется углом $\varphi_1(t)$ между неподвижной и первой локальной подвижной системами координат. Управляющий момент в шарнире A_0 обозначим M_1 . Точку A_1 звена A_1A_2 , совершающего плоскопараллельное движение, примем за полюс. Положение звена задано углом $\varphi_2(t)$. Управляющий момент в шарнире A_1 обозначим M_2 . Для остальных звеньев, совершающих плоскопараллельное движение, углы и управляющие моменты вводятся аналогично второму звену A_1A_2 . За обобщенные координаты, определяющие положение антропомимного механизма, примем углы между соответствующими осями систем координат (рис. 2): φ_i ($i = 1, 2, \dots, 5$). Модель экзоскелета обладает пятью степенями свободы. Для управления обобщенными координатами используется пять электродвигателей, работающих с редукторами, которые увеличивают крутящие моменты и понижают обороты.

Координаты центров масс звеньев в абсолютной неподвижной системе координат $x_0A_0y_0$ имеют вид

$$\begin{aligned}
 x_{C_1} &= 0,5l_1 \cos \varphi_1, \\
 y_{C_1} &= 0,5l_1 \sin \varphi_1, \\
 x_{C_2} &= l_1 \cos \varphi_1 + 0,5l_2 \cos \left(\sum_{i=1}^2 \varphi_i \right), \\
 y_{C_2} &= l_1 \sin \varphi_1 + 0,5l_2 \sin \left(\sum_{i=1}^2 \varphi_i \right), \\
 x_{C_3} &= l_1 \cos \varphi_1 + l_2 \cos \left(\sum_{i=1}^2 \varphi_i \right) + 0,5l_3 \cos \left(\sum_{i=1}^3 \varphi_i \right), \\
 y_{C_3} &= l_1 \sin \varphi_1 + l_2 \sin \left(\sum_{i=1}^2 \varphi_i \right) + 0,5l_3 \sin \left(\sum_{i=1}^3 \varphi_i \right), \\
 x_{C_4} &= l_1 \cos \varphi_1 + l_2 \cos \left(\sum_{i=1}^2 \varphi_i \right) + 0,5l_4 \cos \left(\sum_{i=1, i \neq 3}^4 \varphi_i \right), \\
 y_{C_4} &= l_1 \sin \varphi_1 + l_2 \sin \left(\sum_{i=1}^2 \varphi_i \right) + 0,5l_4 \sin \left(\sum_{i=1, i \neq 3}^4 \varphi_i \right), \\
 x_{C_5} &= l_1 \cos \varphi_1 + l_2 \cos \left(\sum_{i=1}^2 \varphi_i \right) + l_4 \cos \left(\sum_{i=1, i \neq 3}^4 \varphi_i \right) +
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
 & + 0,5l_5 \cos\left(\sum_{i=1, i \neq 3}^5 \varphi_i\right), \\
 y_{C_3} = & l_1 \sin \varphi_1 + l_2 \sin\left(\sum_{i=1}^2 \varphi_i\right) + l_4 \sin\left(\sum_{i=1, i \neq 3}^4 \varphi_i\right) + \\
 & + 0,5l_5 \sin\left(\sum_{i=1, i \neq 3}^5 \varphi_i\right).
 \end{aligned}$$

Энергия движения стержней $A_{i-1}A_i$ ($i = 1, 2, \dots, 5$) в сумме является кинетической энергией всего антропоидного механизма:

$$T = \sum_{i=1}^5 T_{A_{i-1}A_i}. \quad (2)$$

Так как звенья антропоидного механизма типа экзоскелета совершают плоскопараллельное движение, для контроля правильности определения кинетическая энергия вычислялась тремя способами: через скорость центра масс звена [24], через скорость полюса [23] и при помощи интегрирования [2–4, 26–28]. Все эти способы известны, поэтому не будем приводить соответствующие формулы для вычисления. Дифференциальные уравнения динамики антропоидного механизма с пятью подвижными звеньями были составлены с использованием уравнений Лагранжа второго рода в среде системы компьютерной математики Wolfram Mathematica 11.3 и имеют громоздкий вид. Уравнения проанализированы и представлены в векторной форме, аналогично работам [2–4, 23, 26–28]:

$$A(\varphi)\ddot{\varphi} + B(\varphi)\dot{\varphi} + gC(\varphi) = M(\varphi), \quad (3)$$

где: φ – обобщенные координаты $\varphi = (\varphi_1, \dots, \varphi_5)^T$ – вектор-столбец, содержащий относительные углы между звеньями; $\dot{\varphi}$ – вектор-столбец обобщенных скоростей; $\ddot{\varphi}$ – вектор-столбец обобщенных ускорений; $\dot{\Phi}$ – матрица обобщенных скоростей; $M(\varphi)$ – обобщенные силы; $A(\varphi)$ – матрица инерционных характеристик звеньев антропоидного механизма; $B(\varphi)$ – матрица с информацией о Кориолисовых и центробежных силах; $C(\varphi)$ – вектор гравитационного взаимодействия.

Полученная математическая модель антропоидного механизма в форме уравнений Лагранжа второго рода имеет единственное решение задачи Коши, что показано в работе [23].

Постановка задачи

Для модели антропоидного механизма необходимо решить следующие задачи: 1) синтезировать траекторию движения каждого звена экзоскелета, близкую к биомеханическому движению двух двухзвенных ног и корпуса человека; 2) создать анимацию движения каждого звена для экзоскелета в целом с целью наглядной визуализации его

перемещения; 3) используя результаты решения первой задачи, решить обратную задачу динамики и определить управляющие моменты; 4) зная управляющие усилия, подобрать двигатели и редукторы для реализации управляемого движения экзоскелета; 5) разработать систему управления движением электромеханической модели на основе кусочно-заданных ступенчатых функций; 6) решив задачу Коши для математической модели антропоидного механизма, провести численное моделирование движения звеньев и выполнить сравнительный анализ полученных траекторий движения звеньев с заданным исходным движением; 7) оценить энергетические затраты в приводах антропоида; 8) исследовать влияние вращающихся роторов электродвигателя на движения антропоидного механизма в виде экзоскелета.

Синтез траекторий движения звеньев экзоскелета

Чтобы определить усилия в шарнирах экзоскелета, применим программное управление движением. Определим относительные углы между звеньями с помощью периодически дифференцируемых функций, которые задают антропоморфное движение экзоскелета:

$$\begin{aligned}
 \varphi_1(t) &= \pi/2 + a_1 j_1 \sin[f_1 - (1 - \cos[2\pi t/T])\pi/2], \\
 \varphi_2(t) &= a_2(j_2 \cos[f_2 - \pi(1 - \cos[2\pi t/T])\pi/2] - \\
 & - j_1 \sin[f_1 - (1 - \cos[2\pi t/T])\pi/2]), \\
 \varphi_3(t) &= a_3(j_3 \sin[f_2 - \pi(1 + \cos[2\pi t/T])\pi/2] - \\
 & - (j_2 \cos[f_2 - \pi(1 - \cos[2\pi t/T])\pi/2] - j_1 \sin[f_1 - \\
 & - (1 - \cos[2\pi t/T])\pi/2]), \\
 \varphi_4(t) &= \pi + a_4(j_4 \cos[f_3 - \pi(1 + \cos[2\pi t/T])\pi/2] - \\
 & - (j_2 \cos[f_2 - \pi(1 - \cos[2\pi t/T])\pi/2] - j_1 \sin[f_1 - \\
 & - (1 - \cos[2\pi t/T])\pi/2]), \\
 \varphi_5(t) &= a_5(j_5 \sin[f_4 - \pi(1 + \cos[2\pi t/T])\pi/2] - \\
 & - (j_2 \cos[f_2 - \pi(1 - \cos[2\pi t/T])\pi/2] - j_1 \sin[f_1 - \\
 & - (1 - \cos[2\pi t/T])\pi/2]).
 \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь a_i , j_i и f_i – параметры ходьбы ($i = 1, \dots, 5$); T – период ходьбы. Параметры в формулах (4), обеспечивающие реализацию антропоморфной ходьбы, примем равными следующим значениям: $a_1 = 1$, $a_2 = 0,11$, $a_3 = 0,4$, $a_4 = 0,45$, $a_5 = 0,05$, $j_1 = j_2 = 0,25$, $j_3 = 0,1$, $j_4 = 0,837$, $j_5 = 13,95$, $f_1 = \pi/2$, $f_2 = \pi$, $f_3 = 0,884$, $f_4 = 0,00687$. Ускорение свободного падения $g = 9,81$ м/с². Время, в течение которого рассматривается движение, $t_k = 0,36$ с.

Значения длин, масс и моментов инерции звеньев экзоскелета, определяются эмпирически для голени, бедра и корпуса человека соответственно [4] (табл. 1). Предполагается, что переносимая и опорная ноги одинаковы.

Зависимости углов поворота, угловых скоростей и угловых ускорений звеньев экзоскелета, определяе-

Таблица 1

Значения характеристик звеньев антропоморфного механизма типа экзоскелета

	Длина, м	Масса, кг	Момент инерции, кг·м ²
Голень	0,385	2,910	0,144
Бедро	0,477	8,930	0,677
Корпус	0,771	28,930	5,732

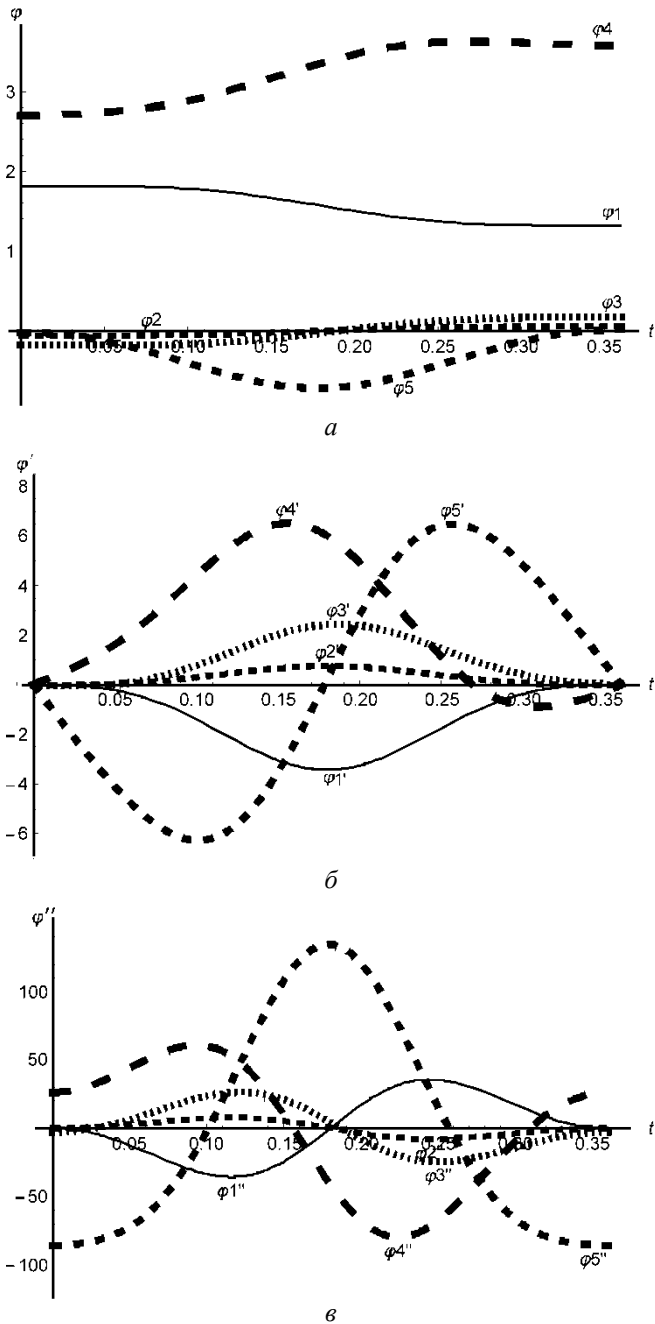


Рис. 3. Зависимости углов поворота φ_i (рад) (а); угловых скоростей $\dot{\varphi}_i$ (рад/с) (б); угловых ускорений $\ddot{\varphi}_i$ (рад/с²) (в) звеньев от времени t (с) ($i = 1, 2, \dots, 5$)

мых выражениями (4) и их производными с приведенными выше параметрами движения, представлены на (рис. 3).

Представленные на рис. 3 графики показывают, что при движении экзоскелета возникают значительные кратковременные угловые ускорения. Их можно объяснить импульсным характером ходьбы человека. Этот факт следует учитывать, выбирая приводы для активного экзоскелета.

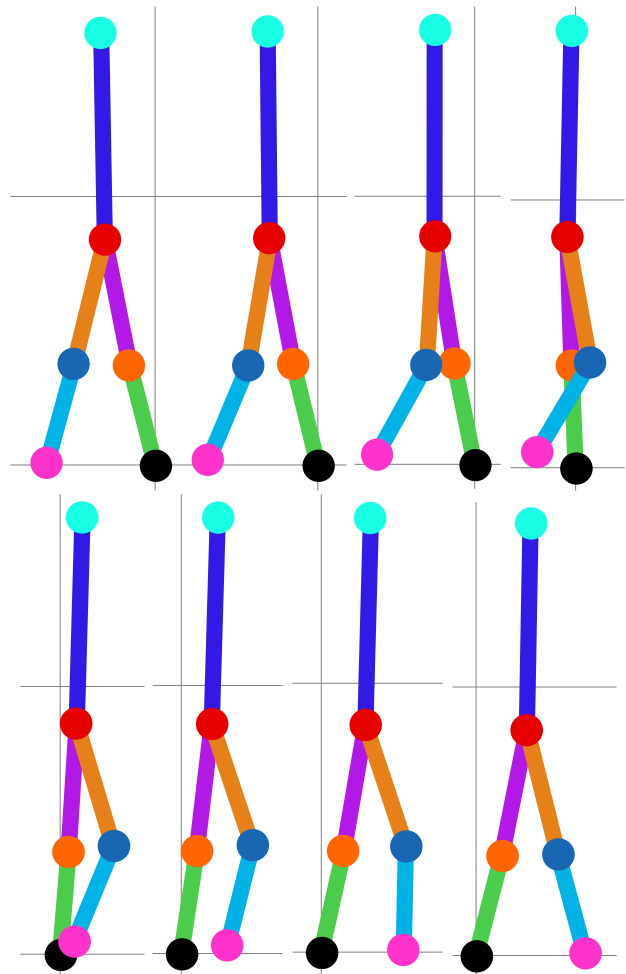


Рис. 4. Кадры анимации движения экзоскелета с пятью подвижными управляемыми звеньями при движении с заданными формулами (4) углами φ_i ($i = 1, 2, \dots, 5$)

Анимация антропоморфного движения экзоскелета

Для наглядного восприятия движения антропода создана программа построения анимации его движения. Некоторые кадры анимации движения экзоскелета с пятью подвижными управляемыми звеньями показаны на рис. 4.

Полученная визуализация движения антропода

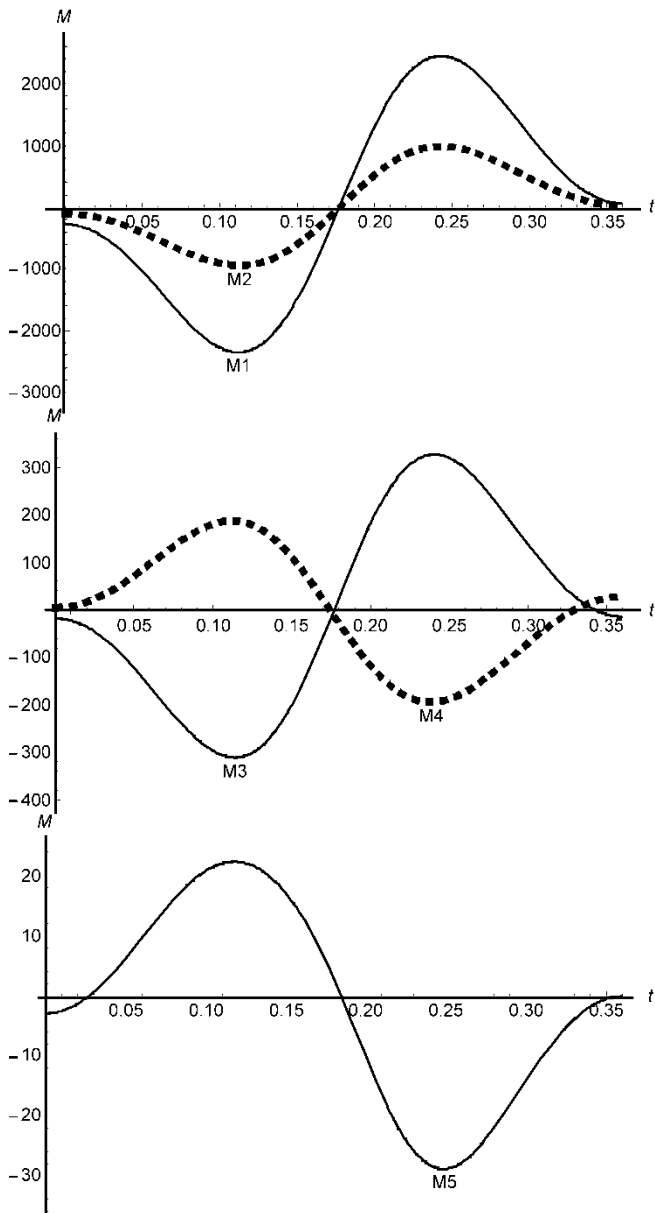


Рис. 5. Зависимости управляющих моментов M_i (Н·м) от времени t (с) ($i = 1, 2, \dots, 5$)

наглядно демонстрирует антропоморфное движение модели экзоскелета.

Решение обратной задачи динамики

Решая обратную задачу динамики, т.е. решив систему уравнений движения (3) алгебраически относительно моментов, находим $M_i(t)$ ($i = 1, 2, \dots, 5$) для приводов в шарнирах A_0, A_1, A_2, A_4 , причем, в точке A_2 имеется два цилиндрических шарнира с независимым управлением для корпуса и бедра переносимой ноги (рис. 5).

Максимальные абсолютные значения управляющих моментов $M_1 = 2449,76$ Н·м, $M_2 = 989,06$ Н·м, $M_3 = 326,70$ Н·м, $M_4 = 194,13$ Н·м и $M_5 = 28,88$ Н·м необходимы для выбора редукторов

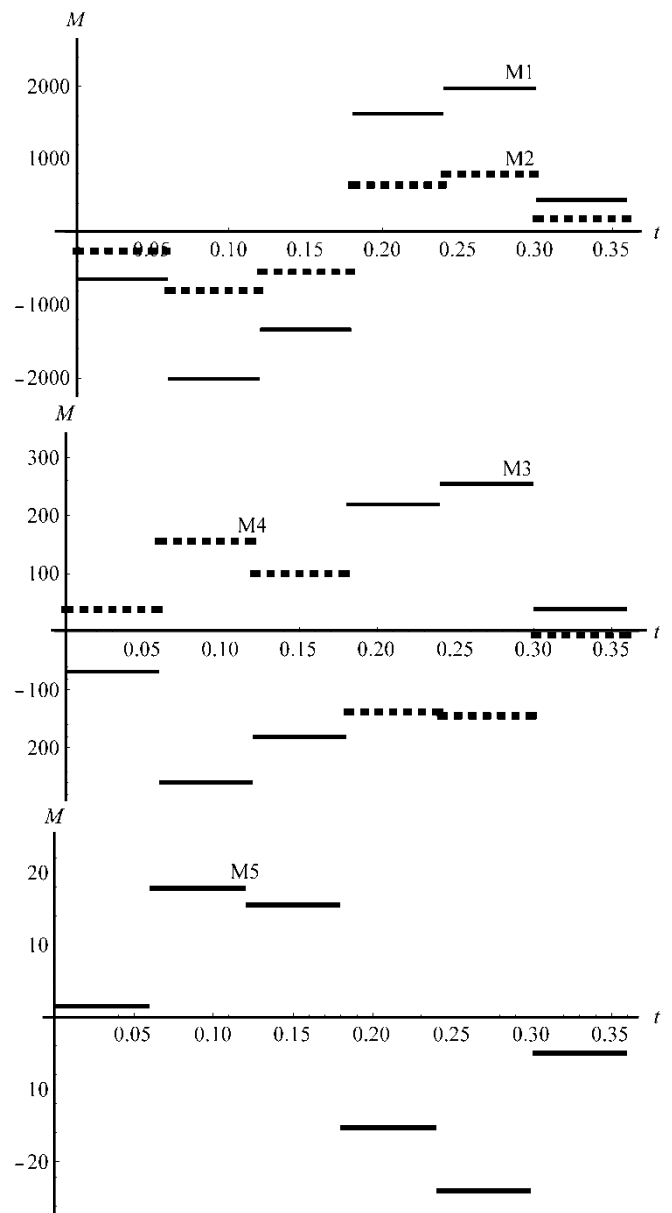


Рис. 6. Моменты $M_i(t)$ ($i = 1, 2, \dots, 5$), аппроксимированные кусочно-заданными функциями

и электродвигателей. Моменты M_i ($i = 1, 2, \dots, 5$) являются моментами на выходном валу редуктора. Следует отметить, что в сравнении с моделью с двумя звеньями, управляющие моменты в шарнирах, соответствующих голеностопному и коленному шарнирам, стали на порядок больше, что связано с появлением переносимой ноги и корпуса с массой, превышающей суммарную массу голени и бедра опорной ноги.

Подбор двигателей и редукторов для реализации управляемого движения экзоскелета

Исходя из полученных выше нагрузок подбираем приводы для управления движением звеньев экзоскелета. Так как опорная и переносимая нога

меняются, то приводы для нижних конечностей подбираем одинаковые, с нагрузками, соответствующими опорной ноге. В первом приближении подберем электроприводы для голеноостопного сустава M_1 , определяющего угол поворота голени опорной ноги, коленного сустава M_2 , управляющего движением бедра опорной ноги, комбинированного тазобедренного сустава с позвоночником: M_3 , управляющего движением корпуса и тазобедренного сустава M_4 , управляющего движением переносимой ноги, – одинаковыми. Для момента M_5 в коленном суставе переносимой ноги движением управляет тот же двигатель, что и моментом M_2 . В точке A_5 , моделирующей голеноостопный сустав переносимой ноги, имеется шестой двигатель, который в фазе переноса ноги не работает и включается в тот момент, когда переносимая нога становится опорной. Этот двигатель такой же, как и двигатель, создающий момент M_1 . В качестве электроприводов выберем комбинации двигателей марки *Tecnotio»* и редукторов *Harmonic Drive*.

Для момента M_1 подходит редуктор *CSG-2A*, размер 45: передаточное отношение 100; номинальный момент 459 Н·м; максимальный момент 2041 Н·м; масса 2,3 кг; момент инерции $8,68 \cdot 10^{-4}$ кг·м² [36]. Электродвигатель подбираем с учетом максимальной угловой скорости, передаточного числа и КПД редуктора, так, чтобы на выходе получился требуемый из расчетов управляющий момент. Этим требованиям удовлетворяет двигатель *QTR-A-160-25-N*: номинальный момент 9,4 Н·м; максимальный момент 19,6 Н·м; номинальная скорость 1042 об./мин; масса 1144 г; момент инерции $9,5 \cdot 10^{-4}$ кг·м² [44].

Для момента M_2 подходит редуктор *CSF-2A*, размер 40: передаточное отношение 100; номинальный момент 265 Н·м; максимальный момент 1080 Н·м; масса 1,7 кг; момент инерции $4,50 \cdot 10^{-4}$ кг·м² [36]. Электродвигатель *QTR-A-160-17-N*: номинальный момент 4,1 Н·м; максимальный момент 9,3 Н·м; номинальная скорость 2095 об./мин; масса 665 г; момент инерции $4,7 \cdot 10^{-4}$ кг·м² [44].

Для момента M_3 подходит редуктор *CPL-2A*, размер 32А: передаточное отношение 160; номинальный момент 137 Н·м; максимальный момент 686 Н·м; масса 0,54 кг; момент инерции $0,924 \cdot 10^{-4}$ кг·м² [35]. Электродвигатель *QTR-A-105-17-N*: номинальный момент 1,4 Н·м; максимальный момент 2,9 Н·м; номинальная скорость 6918 об./мин; масса 378 г; момент инерции $8,0 \cdot 10^{-5}$ кг·м² [44].

В результате, исходя из значений максимальных развиваемых моментов, из номенклатуры имеющихся в настоящее время в продаже электродвигателей и редукторов, подобраны близкие к возможным для использования в экзоскелете электроприводы. При этом следует отметить, что если для корпуса электропривод подобран с достаточным запасом, то для опорной ноги приводы подобраны с

незначительным недостатком, что в целом компенсирует потребность в необходимых двигательных способностях.

Синтез системы управления движением электромеханического экзоскелета с использованием кусочно-заданных ступенчатых функций

Для решения задачи подготовки ступенчатых функций для импульсного управления активным экзоскелетом разобьем время одноопорной фазы при движении экзоскелета на шесть одинаковых участков, при этом на каждом участке управляющий момент будем считать константой. Числовые значения моментов на каждом участке вычислим как среднее по формуле:

$$M_{i,\gamma} = \frac{\int_{t_{\gamma-1}}^{t_{\gamma}} M_i(t) dt}{t_{\gamma} - t_{\gamma-1}}, \quad (5)$$

где $i = 1, 2, \dots, 5$ – номер звена экзоскелета, которым управляет момент $M_i(t)$; $\gamma = 1, 2, \dots, 6$ – ранжированная переменная, которая задает номер участка разбиения всего времени движения механизма.

Графики ступенчатых функций для управляющих моментов, полученных в результате решения обратной задачи (см. рис. 5) с помощью (5), примут вид, представленный на (рис. 6).

В результате получены ступенчатые функции, которые можно применить для импульсного управления антропоморфной моделью механизма типа экзоскелета с пятью звеньями. Такой способ управления позволяет снизить требования к крутящему моменту электроприводов экзоскелета, что является важным аспектом, так как благодаря этому фактору их можно взять более легкими и с меньшим расходом энергии.

Решение задачи Коши

Результаты численного решения задачи Коши для системы (3) с управляющими моментами, аппроксимированными ступенчатыми функциями (рис. 6), определяющие углы поворота, угловые скорости и угловые ускорения звеньев, представлены на (рис. 7).

Проводя сравнение исходного движения звеньев экзоскелета с результатами численного решения системы (3) (см. рис. 7), наблюдаем удовлетворительное совпадение углов поворота звеньев, угловых скоростей и ускорений. Недостаточная величина управляющего момента для первого звена, моделирующего голень опорной ноги, приводит к некоторому его избыточному сгибанию (рис. 8, а), что объясняется несколько отдаленной аппроксимацией ступенчатыми

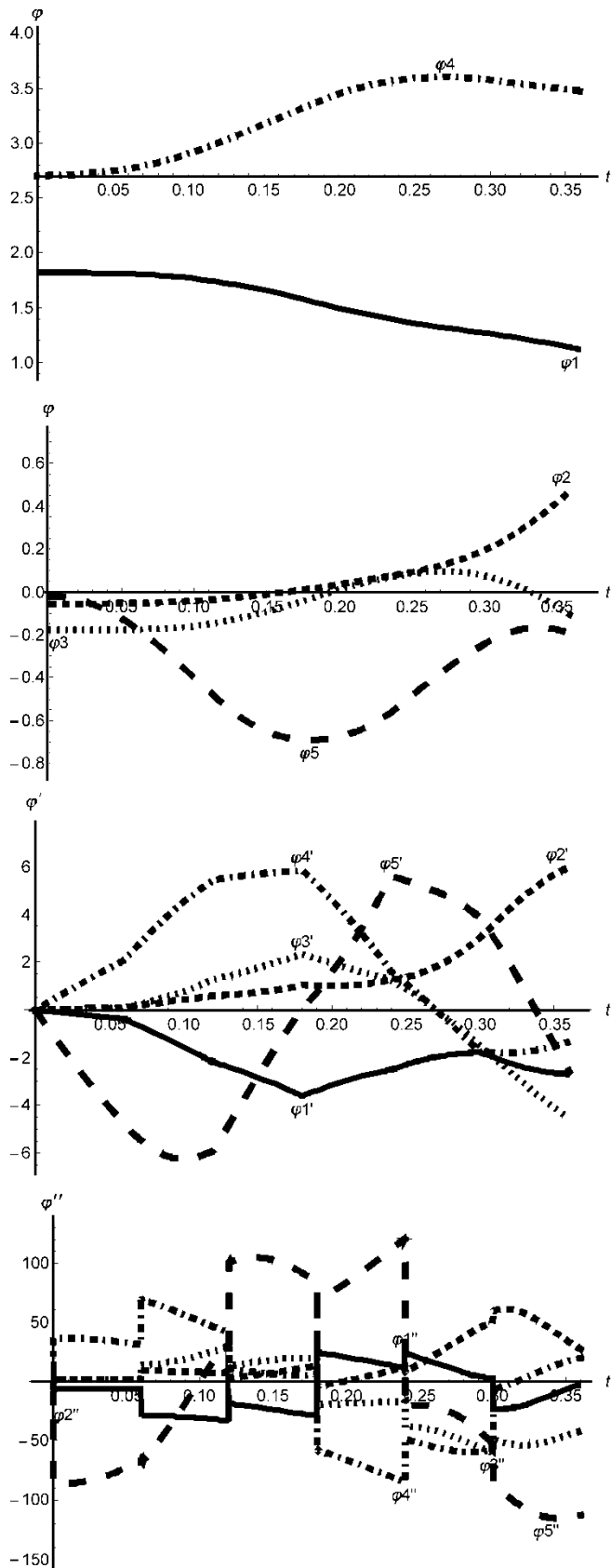


Рис. 7. Решение задачи Коши для активного экзоскелета с пятью звеньями: углы поворота φ_i (рад); угловые скорости $\dot{\varphi}_i$ (рад/с); угловые ускорения $\ddot{\varphi}_i$ (рад/с²) звеньев в зависимости от времени t (с) ($i = 1, 2, \dots, 5$)

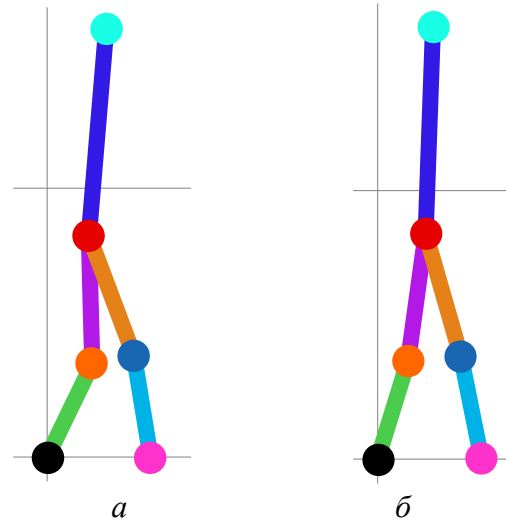


Рис. 8. Финальные кадры анимации движения механизма, реализующей решения задачи Коши для системы (3) с управляющими моментами в виде ступенчатых функций (а); с моментом $M_1(t)$ после коррекции (б)

функциями управляющего момента, а также, наиболее вероятно, погрешностями вычислений при реализации численных методов и может быть компенсирована его небольшой коррекцией (см. рис. 8 б). Коррекция для момента $M_1(t)$ произведена на третьем участке ступенчатой функции путем его масштабирования на 0,1% в сторону уменьшения. Следует отметить, что решение задачи Коши для системы (3) является неустойчивым и при изменении управляющего момента на любом участке на величину $> 1\%$ приводит либо к полному изменению движения механизма, либо к ошибкам и прерыванию процедуры численного решения. Предположительно это связано с принципиальной неустойчивостью системы, состоящей из перевернутых маятников, которой является опорно-двигательный аппарат человека. Такая система требует развитой системы управления с обратной связью и коррекцией, которую обеспечивает человеку головной и спинной мозг. Теоретические методы управления такого типа объектами методом стабилизации связей предложены Мухарлямовым Р.Г. [2–4]. Для экзоскелета и антропоморфного робота, возможно, следует использовать систему управления с использованием гироскопов для стабилизации неустойчивого вертикального положения равновесия, аналогично тому, как это реализовано в *Segway* и подобных ему самобалансирующихся транспортных средствах.

Анимационная визуализация движения необходима для того, чтобы наглядно оценить то, насколько и как полученное движение антропоморфного механизма отличается от исходного. Графики углов поворота, угловых скоростей и ускорений в случае с коррекцией управляющего момента, обеспечивающего

Таблица 2

Затраты энергии экзоскелета

Затраты энергии, Дж	Привод, расположенный в шарнире					Сумма, Дж
	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	
Непрерывные функции (рис. 5)	800.67	70.26	75.18	119.05	25.01	1090.17
Ступенчатые функции (рис. 6)	797.71	70.76	75.79	116.01	22.21	1082.49

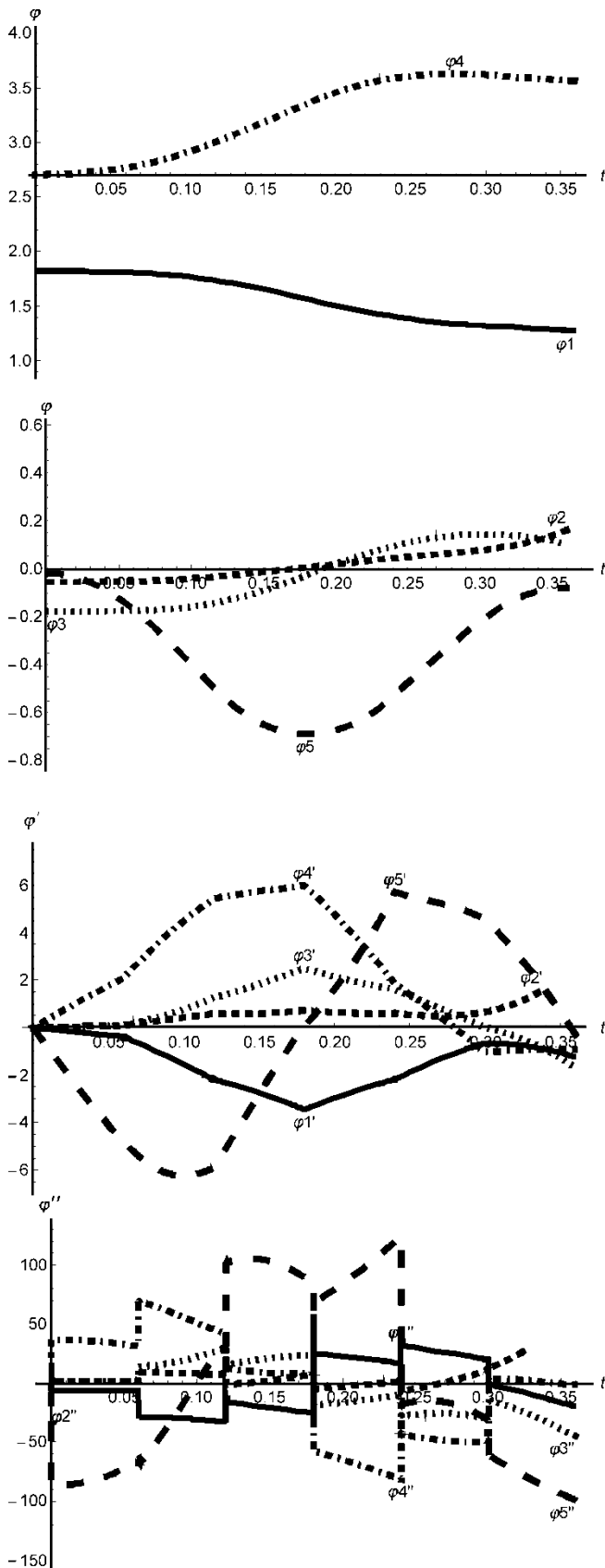


Рис. 9. Решение задачи Коши в случае коррекции управляющего момента: углы поворота φ_i (рад); угловые скорости $\dot{\varphi}_i$ (рад/с); угловые ускорения $\ddot{\varphi}_i$ (рад/с²) звеньев в зависимости от времени t (с) ($i = 1, 2, \dots, 5$)

движение, финальный кадр которого представлен на рис. 8 б, приведены на рис. 9.

Исходя из результатов проведенного исследования, можно сделать вывод, что импульсное управление с применением аппроксимации ступенчатыми функциями управляющих моментов (см. рис. 6) позволяет достаточно хорошо моделировать движения экзоскелета. Поэтому его можно использовать для управления экзоскелетом с пятью подвижными звеньями при минимальной коррекции.

Оценка энергетических затрат в приводах экзоскелета

Определим затраты энергии экзоскелета как работу управляющих моментов, пренебрегая рекуперацией энергии при торможении звена и силами сопротивления:

$$A = \int_0^{t_k} \left(\sum_{i=1}^k |M_i \dot{\varphi}_i| \right) dt, \quad (6)$$

где M_i – управляющий момент в i -м приводе экзоскелета; $k = 5$ – количество подвижных звеньев; t_k – время одноопорной фазы при движении экзоскелета.

Приведем в табл. 2 результаты вычисления энергетических затрат в приводах экзоскелета.

Приведенная таблица показывает, что значения энергетических затрат при задании управляющих моментов непрерывными аналитическими функциями практически не отличаются в сравнении с заданием ступенчатыми функциями. Небольшие различия объясняются случайными эффектами, связанными с численным моделированием, а не с реальными биомеханическими явлениями. Это подтверждает гипотезу о возможности использования импульсного управления антропоидом.

Оценки энергетических затрат также необходимы для подбора источника питания при создании активного экзоскелета.

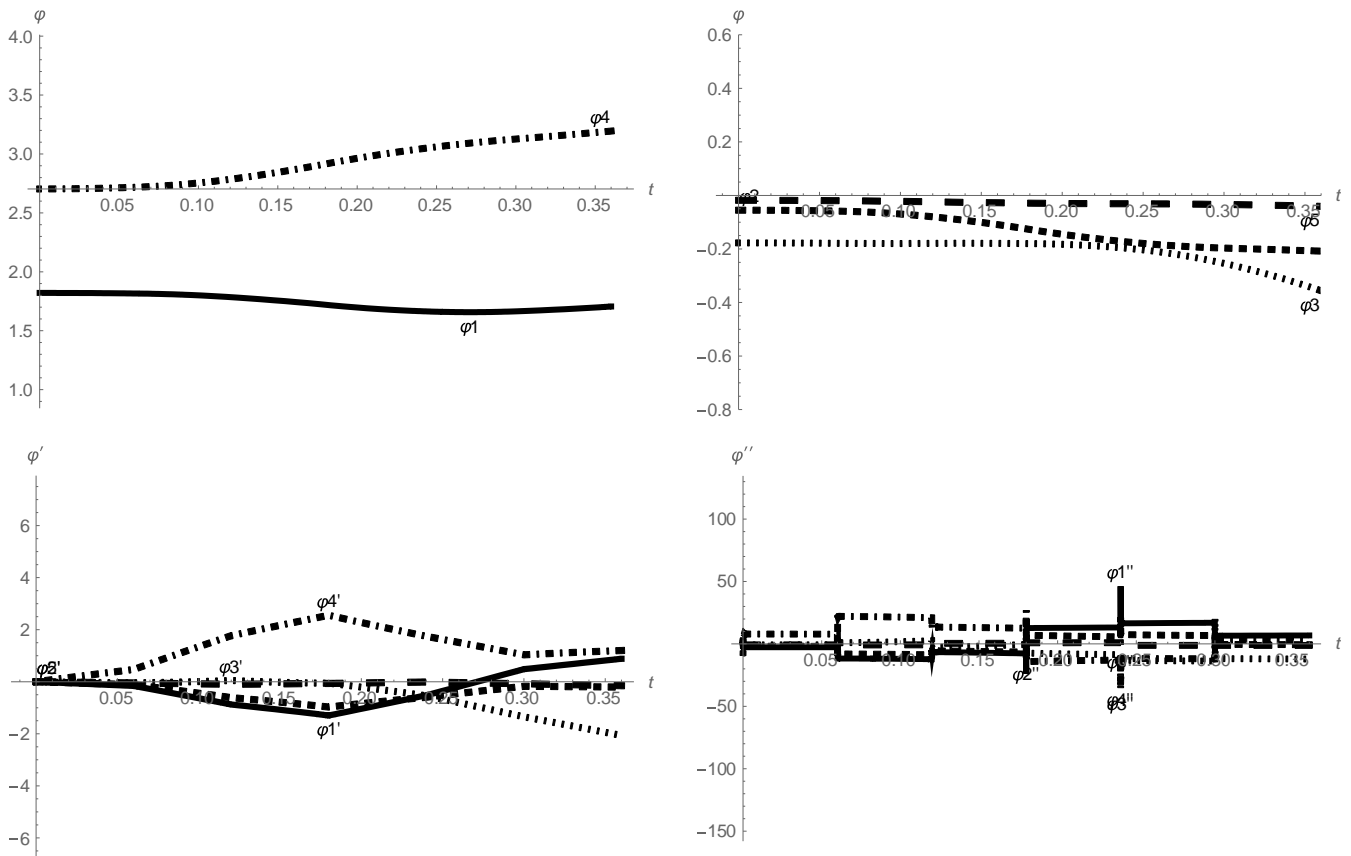


Рис. 10. Решение задачи Коши с учетом электроприводов: углы поворота φ_i (рад); угловые скорости $\dot{\varphi}_i$ (рад/с); угловые ускорения $\ddot{\varphi}_i$ (рад/с²) звеньев в зависимости от времени t (с) ($i = 1, 2, \dots, 5$)

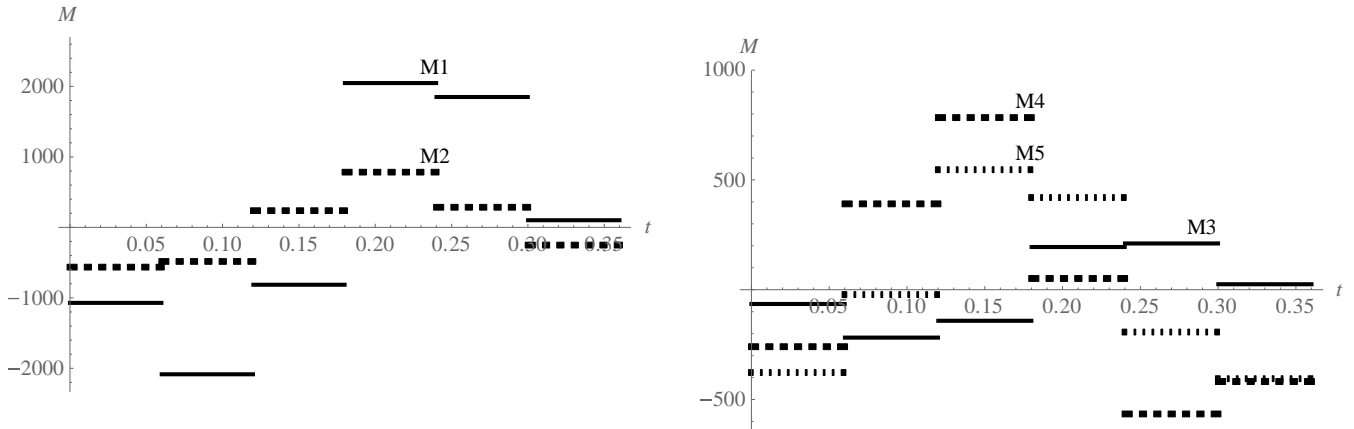


Рис. 11. Моменты $M_i(t)$ ($i = 1, 2, \dots, 5$) аппроксимированные кусочно-заданными функциями после пересчета с учетом наличия электроприводов

Исследование влияния массивных элементов электроприводов на движения экзоскелета

В работе [4] предложен метод исследования влияния вращающихся роторов электродвигателей на движения электромеханического устройства на подвижном основании, применим его к рассматриваемой модели экзоскелета с пятью звеньями. Для управления движением применим

моменты, заданные ступенчатыми функциями (см. рис. 6).

Электромеханический привод экзоскелета содержит электродвигатели и редукторы. Предполагаем, что они расположены в области цилиндрических шарниров A_i ($i = 1, 2, \dots, 5$). Оценим влияние массивных частей двигателей на динамику всего экзоскелета, математическая модель которого представлена системой дифференциальных уравнений движения (3). 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 электромеханической системы рассчитывается следующим образом [6]:

$$T_R = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^5 I_{R_i} k_{R_i}^2 \dot{\phi}_i^2, \quad (7)$$

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

В выражениях для кинетической и потенциальной энергий массы электродвигателей с редукторами будем учитывать как точечные, находящиеся на конце звена. Система дифференциальных уравнений составлена с учетом массы электродвигателя и редуктора, а также момента инерции ротора двигателя. Система уравнений движения механизма (3) изменяется аналогично системе в работе [4].

Решение задачи Коши для системы уравнений с учетом электроприводов, с исходными управляющими моментами (см. рис. 5) представлено на (рис. 10) для корректности сравнения в том же масштабе, что и на рис. 7 и 9.

Сравнение результатов, представленных на рис. 10 с графиками, показанными на рис. 9, показало, что движение звеньев экзоскелета изменилось, однако, антропоидность хорошо сохранилась только в первой половине времени движения. Далее происходит замедление движения экзоскелета, и он не возвращается в требуемую исходную конфигурацию. Учет электроприводов уменьшает значения углов поворота, угловых скоростей и ускорений из-за недостаточных управляющих моментов, определенных без учета наличия электромоторов и редукторов. Следовательно, наличие электродвигателей оказывает существенное влияние на движения экзоскелета, и их необходимо учитывать при проектировании реально работающих механизмов. Для верификации модели были пересчитаны управляющие моменты с учетом наличия электроприводов, которые изменились существенно, затем с ними (рис. 11) была решена задача Коши для

системы дифференциальных уравнений движения экзоскелета.

В результате решения получилось близкое к исходному антропоморфному движение экзоскелета. Графики решения здесь не приводятся, так как они практически идентичны результатам, представленным на рис. 9.

Заключение

В результате проведенного исследования создана математическая модель активного экзоскелета с пятью подвижными звеньями и электроприводами. Составлены дифференциальные уравнения движения для исследуемого механизма, которые представлены в компактной векторно-матричной форме записи. Синтезированы траектории движения звеньев экзоскелета близкие к движению соответствующих звеньев человека и проведено решение обратной задачи динамики. Разработан импульсный способ управления движением экзоскелета, результаты численного моделирования показывают возможность его применения. Подсчитаны затраты энергии экзоскелета, что важно при оценке его автономности. Осуществлен подбор электродвигателей и редукторов, проведен анализ наличия электроприводов на движения экзоскелета. Показано, что они оказывают существенное влияние на движения экзоскелета. Это связано со значительной массой получающихся электроприводов, близкой к массе звеньев экзоскелета и наличием вращающихся относительно звеньев роторов электродвигателей. Все это значительно увеличивает массу экзоскелета и оказывает существенное влияние на его динамику. Для корректного управления экзоскелетом необходимо пересчитывать управляющие моменты при наличии электроприводов. Решены обе задачи динамики применительно к модели экзоскелета с пятью подвижными управляемыми звеньями, представлен один из возможных вариантов управления движением. Значимость результатов состоит в широте возможных областей применения экзоскелетов и антропоидных механизмов.

Список литературы

1. Белова А.Н., Рукина Н.Н., Кузнецов А.Н., Воробьева О.В. Возможности современных технологий биомеханического анализа движений в изучении механизмов спортивных травм (обзор) // Российский журнал биомеханики. – 2022. – № 2. – С. 74–86. – DOI: 10.15593/RZhBiomeh/2022.2.07
2. Борисов А.В., Каспирович И.Е., Мухарлямов Р.Г. О математическом моделировании динамики многозвенных систем и экзоскелетов // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2021. – № 5. – С. 162–176. – DOI: 10.31857/S0002338821040028
3. Борисов А.В., Каспирович И.Е., Мухарлямов Р.Г. Управление динамикой составной конструкции со звеньями переменной длины // Известия российской академии наук. Механика твердого тела. – 2021. – №2. – С. 72–87. – DOI: 10.31857/S0572329921020057
4. Борисов А.В., Мухарлямов Р.Г., Бадяева В.К., Блинов А.О. Движение антропоида на подвижном основании // Российский журнал биомеханики – 2022. – Т. 26, № 3. – С. 87–97. – DOI 10.15593/RZhBiomeh/2022.2.07
5. Карими М.Т., Тахмасеби Р. Оценка эффективности сколиозных корсетов, разработанных на основе CAD/CAM и ручного литья. Обзор литературы //

- Российский журнал биомеханики. – 2023. – № 1. – С. 64–73. – DOI: 10.15593/RZhBiomech/2023.1.06
6. Колобун С.А. Динамика робототехнических систем. Учеб. пособ. – СПб.: Университет ИТМО. – 2017. – 117 с.
 7. Пат. на изобретение RU 2489130 C1, 10.08.2013. Простая конструкция компенсации веса человека при ходьбе и беге / Родин И.А. Заявка № 2011148041/14 от 28.11.2011, опубл. 10.08.2013.
 8. Пат. на изобретение RU 2567589 C1, 10.11.2015. Экзоскелет / Иванов В.Г., Мерзанокова Е.В., Санин Д.А. Заявка № 2014132377/14 от 05.08.2014, опубл. 10.11.2015.
 9. Пат. на изобретение RU 2644547 C2, 17.06.2016. Стопа экзоскелета / Письменная Е.В., Толстов К.М., Кузмичев А.В. Заявка № 2016123995 от 17.06.2016, опубл. 12.02.2018.
 10. Пат. на изобретение RU 2645804 C1, 07.06.2017. Бионический экзоскелет / Журавлёв Д.А. Заявка № 2017119913 от 07.06.2017, опубл. 28.02.2018.
 11. Пат. на изобретение RU 2665116 C1, 25.04.2017. Грузовой экзоскелет с настройкой под антропометрические параметры пользователя / Голицын В.М., Островский М.И., Письменная Е.В., Толстов К.М. Заявка № 2017114443 от 25.04.2017, опубл. 28.08.2018.
 12. Пат. на изобретение RU 2727231 C1, 25.12.2019. Экзоскелет нейрохирурга / Воробьёв А.А., Андрющенко Ф.А. Заявка № 2019145261 от 25.12.2019, опубл. 21.07.2020.
 13. Пат. на изобретение RU 2734565 C1, 19.06.2020. Экзоскелет / Клиндюк А.А. Заявка № 2020120519 от 19.06.2020, опубл. 20.10.2020.
 14. Пат. на полезную модель RU 190786 U1, 12.07.2019. Пассивный грузовой экзоскелетон / Яцун С.Ф., Мищенко В.Я., Яцун А.С. Заявка № 2019110529 от 09.04.2019, опубл. 12.07.2019.
 15. Пат. на полезную модель RU 198080 U1, 20.12.2019. Механический экзоскелет для нижних конечностей / Мощенко М.Г., Егоров Г.П. Заявка № 2019142687 от 20.12.2019, опубл. 17.06.2020.
 16. Пат. на полезную модель RU 202567 U1, 19.10.2020. Модульный экзоскелет / Бирюков А.С., Скоков М.С., Скоков И.С., Потанин Ю.С., Утемов И.А., Матвиенко А.И. Заявка № 2020134226 от 19.10.2020, опубл. 25.02.2021.
 17. Пат. на полезную модель RU 206503 U1, 09.04.2021. Пассивный экзоскелет для поддержки спины и рук / Ложкин И.А., Целиканов Д.Ф., Давыдов Н.Е., Трегубов П.В. Заявка № 2021109967 от 09.04.2021, опубл. 14.09.2021.
 18. Пат. на полезную модель RU 207768 U1, 26.03.2020. Промышленный экзоскелет с линейным гравитационным компенсатором / Яцун С.Ф., Яцун А.С. Заявка № 2020112307 от 26.03.2020, опубл. 16.11.2021.
 19. Пат. на полезную модель RU 210222 U1, 27.12.2021. Экзоскелет нижних конечностей / Давыдов Н.Е., Копылов Д.В., Трегубов П.В., Савчук М.Ф., Балашов Б.В. Заявка № 2021139202 от 27.12.2021, опубл. 01.04.2022.
 20. Пат. на полезную модель RU 212301 U1, 18.11.2021. Пассивный экзоскелет / Ложкин И.А., Целиканов Д.Ф., Давыдов Н.Е., Трегубов П.В. Заявка № 2021133899 от 18.11.2021, опубл. 14.07.2022.
 21. Саад С., Ибрагим Н., Осман Н.А.А. Динамическая модель верхних конечностей и ее применение: систематический обзор // Российский журнал биомеханики. – 2023. – № 1. – С. 87–97. – DOI: 10.15593/RJBiomech/2023.1.08
 22. Саттаров Р.Р., Хазиева Р.Т., Иванов М.Д. Оптимизация переноса груза при помощи колебательных систем // Российский журнал биомеханики. – 2022. – № 3. – С. 98–104. – DOI: 10.15593/RZhBiomech/2022.3.08
 23. Формальский А.М. Перемещение антропоморфных механизмов. – М.: Наука. – 1982. – 368 с.
 24. Черноусько Ф.Л., Ананьевский И.М., Решмин С.А. Методы управления нелинейными механическими системами. М.: Физматлит. – 2006. – 328 с.
 25. Bengler K., Harbauer C.M., Fleischer M. Exoskeletons: A challenge for development // Wearable Technologies. – 2023. – Vol. 4. DOI: 10.1017/wtc.2022.28
 26. Blinov A., Borisov A., Filippenkov K., Konchina L., Maslova K. 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. 99. – No. 3. – P. 117–130. DOI: 10.37791/2687-0649-2022-17-3-117-130
 27. Blinov A., Borisov A., Konchina L., Kulikova M., Maslova K. 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. – No. 4. – P. 122–134. DOI: 10.37791/2687-0649-2021-16-4-122-134
 28. Borisov A.V., Chigarev A.V. Mathematical Models of Exoskeleton. Dynamics, Strength, Control. Monograph. Springer. – 2022. – 232 p. DOI: 10.1007/978-3-030-97733-7
 29. Bryan G.M., Franks P.W., Klein S.C., Peuchen R.J., Collins S.H. A hip–knee–ankle exoskeleton emulator for studying gait assistance // The International Journal of Robotics Research. – 2020. – Vol. 40. – P. 722–746. – DOI: 10.1177/0278364920961452
 30. Cao W., Chen C., Hu H., Fang K., Wu X. Effect of hip assistance modes on metabolic cost of walking with a soft exoskeleton // IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. – 2020. – Vol. 18. – P. 426–436. – DOI: 10.1109/TASE.2020.3027748
 31. Das Gupta S., Bobbert M.F. and Kistemaker D.A. The metabolic cost of walking in healthy young and older adults – A systematic review and meta analysis // Scientific Reports. – 2019. – Vol. 9, No. 1. – P. 9956. – DOI: 10.1038/s41598-019-45602-4
 32. Ding Y., Kim M., Kuindersma S., Walsh C.J. Human-in-the-loop optimization of hip assistance with a soft exosuit during walking // Science Robotics. – 2018. Vol. – 3, No. 15. DOI: 10.1126/scirobotics.aar5438
 33. Franks P.W., Bianco N.A., Bryan G.M., Hicks J.L., Delp S.L., Collins S.H. Testing simulated assistance strategies on a hipknee-ankle exoskeleton: A case study // 2020 8th IEEE RAS/EMBS International Conference for Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob). New York: IEEE. – P. 700–707. – DOI: 10.1109/BioRob49111.2020.9224345
 34. Franks P.W., Bryan G.M., Martin R.M., Reyes R., Lakmazaheri A.C., Collins S.H. Comparing optimized exoskeleton assistance of the hip, knee, and ankle in single and multi-joint configurations // Wearable Technologies. – 2021. – Vol. 2, No. 16. DOI: 10.1017/wtc.2021.14
 35. HarmonicDrive. Engineering Data CPL-2A Component Sets [Электронный ресурс]. – URL: https://harmonicdrive.de/fileadmin/user_upload/2014_12_E_D_1019655_CPL_2A.pdf (дата обращения: 01.09.2023).
 36. HarmonicDrive. Reducer Catalog [Электронный ресурс]. – URL:

- https://www.harmonicdrive.net/hd/content/documents1/CSG-CSF_Component.pdf (дата обращения: 01.09.2023).
37. Lee S., Kim J., Baker L., Long A., Karavas N., Menard N., Galiana I., Walsh C.J. Autonomous multi-joint soft exosuit with augmentation-power-based control parameter tuning reduces energy cost of loaded walking // *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*. – 2018. – Vol. 15, No. 1. – P. 66. – DOI: 10.1186/s12984-018-0410-y
 38. Lim B., Lee J., Jang J., Kim K., Park Y.J., Seo K., Shim Y. Delayed output feedback control for gait assistance with a robotic hip exoskeleton // *IEEE Transactions on Robotics*. – 2019. – Vol. 35, No. 4. – P. 1055–1062. – DOI: 10.1109/TRO.2019.2913318
 39. MacLean M.K., Ferris D.P. Energetics of walking with a robotic knee exoskeleton // *Journal of Applied Biomechanics*. – 2019. – Vol. 35, No. 5. – P. 320–326. DOI: 10.1123/jab.2018-0384
 40. Malcolm P., Galle S., Derave Wand De Clercq D. Bi-articular knee-ankle-foot exoskeleton produces higher metabolic cost reduction than weight-matched mono-articular exoskeleton // *Frontiers in Neuroscience*. – 2018. – Vol. 12. – P. 69. – DOI: 10.3389/fnins.2018.00069
 41. Medrano R.L., Thomas G.C., Rouse E.J. Methods for measuring the just noticeable difference for variable stimuli: Implications for perception of metabolic rate with exoskeleton assistance // 2020 8th IEEE RAS/EMBS International Conference for Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob). New York: IEEE. – P. 483–490. – DOI: 10.1109/BioRob49111.2020.9224374
 42. Sanchez N., Simha S.N., Donelan J.M. and Finley J.M. Using asymmetry to your advantage: Learning to acquire and accept external assistance during prolonged split-belt walking // *Journal of Neurophysiology*. – 2020. – Vol. 125. – P. 344–357. – DOI: 10.1152/jn.00416.2020
 43. Sawicki G.S., Beck O.N., Kang I. and Young A.J. The exoskeleton expansion: Improving walking and running economy // *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*. – 2020. – Vol. 17, No. 1. – P. 25. – DOI: 10.1186/s12984-020-00663-9
 44. Tecnotion [Электронный ресурс]. – URL: <https://avi-solutions.com/upload/NEWS/catalogue-torque.pdf> (дата обращения: 01.09.2023).
 45. Young A.J., Ferris D.P. State of the art and future directions for lower limb robotic exoskeletons // *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. – 2017. – Vol. 25, No. 2. – P. 171–182. – DOI: 10.1109/TNSRE.2016.2521160

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке за счет гранта Российского научного фонда и Смоленской области № 22-29-20308, <https://rscf.ru/project/22-29-20308>

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

SIMULATION OF MOVEMENT OF AN ACTIVE EXOSKELETON WITH FIVE ELECTRIC CONTROLLED LINKS

A.O. Blinov, A.V. Borisov, L.V. Konchina, M.G. Kulikova, K.S. Maslova

Branch of the National Research University Moscow Power Engineering Institute in Smolensk, Smolensk, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 04 September 2023
Approved: 08 December 2023
Accepted for publication: 09 December 2023

Key words:

exoskeleton, anthropoid, links, joints, electric drives, race walking, generalized coordinates, control moments, Lagrange differential equations of the second kind

ABSTRACT

The article simulates the movements of an anthropoid model of a mechatronic mechanism such as an exoskeleton containing five rods interconnected by cylindrical hinges. The exoskeleton is a system of links that undergo relative rotations around the coordinate axes under the influence of the corresponding links of the user's musculoskeletal system, on which the exoskeleton is put on, gravity, support reactions and internal control forces implemented by electric drives. To describe the movement of each link, the angles between the links are used and local coordinate systems are introduced, which allow determining their position in space. The control of the change in the angles between the links is carried out using electric drives. Modeling is carried out for a gait close to human race walking, in which there is an instantaneous alternation of single-support phases. Biomechanical modeling of an exoskeleton with five movable controlled links allows us to identify the tasks that need to be solved: the synthesis of the motion trajectory, the determination of control moments, the selection of electric drives, and the development of a system for impulse motion control. To set the anthropomorphic movement of the exoskeleton, periodic functions are introduced that specify changes in the angles between the links. Compiled a system of differential equations. The Cauchy problem is solved numerically. The results of the numerical solution are compared with the initial motion, a conclusion is made that the system is unstable, and possible ways of stabilizing the unstable motion are discussed. The impact of the presence of electric drives on the dynamics of the entire exoskeleton has been estimated.

© PNRPU