



Научная статья

DOI: 10.15593/RZhBiomeh/2024.2.11

УДК 531/534: [57+61]

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭКЗОСКЕЛЕТА С ЗВЕНЬЯМИ ПЕРЕМЕННОЙ ДЛИНЫ И МОДЕЛИ, СОДЕРЖАЩЕЙ АБСОЛЮТНО ТВЕРДЫЕ ЗВЕНЬЯ

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

Филиал национального исследовательского университета «Московский энергетический институт»,
Смоленск, Российская Федерация

О СТАТЬЕ


Получена: 28 октября 2023
Одобрена: 26 марта 2024
Принята к публикации: 14 июня 2024

Ключевые слова:


экзоскелет, электромеханическая модель, электропривод, биомехатронная система, звено переменной длины, программное движение, продольные силы, управляющие моменты, сравнительный анализ

АННОТАЦИЯ


Рассматривается плоское движение экзоскелета с пятью звеньями переменной длины. Предполагается, что внутри экзоскелета находится человек, при этом экзоскелет оснащен сенсорами, которые считывают показатели мышечной активности человека, преобразуют их в управляющие сигналы для электрических приводов и мгновенно реализуют их в экзоскелете. Новизна исследования обусловлена моделью изменения длин участков звеньев экзоскелета. Актуальность исследования состоит в возможности восстановления и усиления при помощи экзоскелета двигательных функций организма человека и замене людей антропоморфными механизмами на вредном и опасном для здоровья производстве, не имеющем возможности использования колесных, гусеничных и других типов роботов. В модели конкретизирована конструкция звеньев переменной длины. Каждое звено включает в себя невесомый участок с изменяющейся длиной, находящийся между двумя абсолютно твердыми весомыми участками. Проведено численно-аналитическое моделирование на основе решения обратной задачи динамики для рассматриваемого механизма. Разработан способ управления предложенной мехатронной робототехнической системой в виде человека в экзоскелете на основе задания программного движения и определения управляющих моментов, локализованных в крупных шарнирах-суставах и продольных сил, определяющих изменения длин звеньев механизма. Проведено сравнение с моделью, содержащей абсолютно твердые звенья, рассмотренной ранее. Установлены проблемы, возникающие при учете изменения длин звеньев. Предложена модель функционирования биомехатронной системы «человек – экзоскелет».

© Блинов Александр Олегович – старший преподаватель, e-mail: alex-blinov67@yandex.ru  0000-0002-1883-7883

© Борисов Андрей Валерьевич – д.ф.-м.н., профессор кафедры, e-mail: BorisowAndrei@yandex.ru

 0000-0002-7004-3140

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

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

© Маслова Ксения Сергеевна – ассистент кафедры, e-mail: maslowaksusha1@yandex.ru  0000-0003-2932-7202



Введение

Задачей создания модели механизма со звеньями, изменяющими свою длину, является улучшение комфортабельности экзоскелета, частичная или полная разгрузка опорно-двигательного аппарата человека, восстановление двигательных способностей человека, в случае промышленного использования экзоскелета – усиление эндоскелета и мышц человека, повышение качества и эффективности труда работников.

Решение задачи достигается тем, что активный экзоскелет с электроприводами содержит стержневую конструкцию с шарнирами, которая фиксируется вдоль звеньев эндоскелета человека. В данном исследовании предполагается, что управляющие мышечные импульсы мгновенно реализуются в электроприводах экзоскелета, т.е. отсутствует запаздывание экзоскелета при движении.

Предлагаемая модель экзоскелета отличается от имеющихся моделей [1–16] использованием звеньев переменной длины с активным управлением изменением длины звена, реализуемым с помощью электропривода и реечной либо винтовой передач. Аналогичные модели экзоскелетов имеют абсолютно твердые звенья, которые не могут реализовать синхронную работу экзоскелета совместно с эндоскелетом человека. Углы между звеньями экзоскелета изменяются управляемым образом при помощи электроприводов.

К условно гибким экзоскелетам и биомеханическим моделям живых тканей можно отнести следующие работы [17–41], в которых используются различные конструкции: тросовые, гидравлические, пневматические, искусственные мышцы, пружинные, способствующие повышению их комфортабельности при ношении человеком. Так как данные публикации достаточно новые по дате, то можно сделать вывод, что разработка математических биомеханических моделей экзоскелетов со звеньями переменной длины является актуальной.

Модель экзоскелета с пятью звеньями переменной длины с электроприводами

Модель экзоскелета содержит пять одинаковых по конструкции звеньев с изменяемой длиной (рис. 1). Звенья соединяются между собой шарнирами. Звено включает в себя один невесомый участок $B_iC_i = \xi_i(t)$ ($i = 1, 2, \dots, 5$) с изменяемой длиной и два весоных участка с постоянной длиной l_{ij} ($i = 1, 2, \dots, 5; j = 1, 2$). Здесь и далее, первый индекс i определяет номер звена, второй j – задает номер участка с постоянной длиной на звене. Весомые части совершают на невесомом участке B_iC_i прямолинейное движение относительно друг друга вдоль прямой, соединяющей начало и конец звена. Для управления изменением длины звена устанавливаются электрические двигатели с реечными или винтовыми

передачами. В области каждого шарнира устанавливаются электродвигатели и редукторы. Предполагается, что стопы в данной модели отсутствуют. В точке касания ногой экзоскелета опорной поверхности обеспечивается необходимая и достаточная связь с поверхностью для того, чтобы движение происходило без проскальзывания.

Положение экзоскелета на плоскости задается углами, отсчитываемыми между звеньями $\varphi_i(t)$, а также изменяемыми длинами участков $\xi_i(t)$ ($i = 1, 2, \dots, 5$). Модель экзоскелета имеет десять степеней свободы.

Инерционные характеристики весоных участков звеньев с постоянной длиной A_iB_i равны m_{i1} , моменты инерции относительно оси, проходящей через центр масс участка по нормали к плоскости движения механизма, I_{i1} . Массы весоных участков с постоянной длиной C_iA_i считаем равными m_{i2} , моменты инерции относительно оси, проходящей через его конец по нормали к плоскости движения механизма, I_{i2} . Плотность вещества j -го весоного участка i -го звена, ρ_{ij} ($i = 1, 2, \dots, 5; j = 1, 2$). Полагаем, что в каждой точке C_i ($i = 1, 2, \dots, 5$) располагается электропривод, управляющий изменением длины звена, учитываем его наличие сосредоточенной массой m_{C_i} .

В каждом шарнире A_i ($i = 0, 1, 2, \dots, 5$) имеется электропривод, изменяющий углы между звеньями с массой m_{A_i} . При этом следует учитывать, что в шарнирах A_0 и A_5 располагаются электроприводы, интегрированные с идеальными экзоподошвами, обеспечивающими развитие любых требуемых усилий для отсутствия проскальзывания. Привод, управляющий движением корпуса, расположен в шарнире A_2 , а не A_3 . Таким образом, шарнир A_2 имеет более сложную конструкцию, нежели остальные шарниры, так как в нем располагаются одновременно два независимых электропривода – для управления движением корпуса и бедром переносимой ноги. В шарнире A_3 предполагается размещение электроприводов для поддержания шеи и головы, рук, выполнения иной полезной работы. В рассматриваемой модели экзоскелета вследствие отсутствия указанных объектов считаем, что данные электроприводы не работают во все время движения, а зарезервированы для будущей модели. Все электроприводы будем моделировать сосредоточенными массами. При этом из-за специфики модели будем считать, что масса электропривода в тазобедренном суставе равна сумме масс двух электроприводов для корпуса и бедра переносимой ноги. Таким образом, если предполагать, что моделируется спортивная ходьба, при которой имеются только одноопорные фазы движения, а смена опорной и переносимой ног происходит мгновенно, то из всех перечисленных электроприводов, изменяющих углы между звеньями, в каждый момент времени работают только пять. Не работает электропривод, расположенный на конце переносимой ноги. Считаем, что все пять электроприводов, изменяющих длину звеньев, работают все время.

Координаты шарниров, в которых размещаются электроприводы, управляющие изменением углов между звеньями, в абсолютной неподвижной системе координат xA_0y имеют вид (аргумент t для сокращения записей у функций $\varphi_i(t)$ и $\xi_i(t)$ ($i = 1, 2, \dots, 5$) опущен):

$$\begin{aligned} x_{A_1} &= (l_{11} + l_{12} + \xi_1)\cos\varphi_1, \\ y_{A_1} &= (l_{11} + l_{12} + \xi_1)\sin\varphi_1, \end{aligned}$$

$$x_{A_2} = (l_{11} + l_{12} + \xi_1)\cos\varphi_1 + (l_{21} + l_{22} + \xi_2)\cos\left(\sum_{i=1}^2 \varphi_i\right),$$

$$y_{A_2} = (l_{11} + l_{12} + \xi_1)\sin\varphi_1 + (l_{21} + l_{22} + \xi_2)\sin\left(\sum_{i=1}^2 \varphi_i\right),$$

$$\begin{aligned} x_{A_3} &= (l_{11} + l_{12} + \xi_1)\cos\varphi_1 + (l_{21} + l_{22} + \xi_2)\cos\left(\sum_{i=1}^2 \varphi_i\right) + \\ &+ (l_{31} + l_{32} + \xi_3)\cos\left(\sum_{i=1}^3 \varphi_i\right), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} y_{A_3} &= (l_{11} + l_{12} + \xi_1)\sin\varphi_1 + (l_{21} + l_{22} + \xi_2)\sin\left(\sum_{i=1}^2 \varphi_i\right) + \\ &+ (l_{31} + l_{32} + \xi_3)\sin\left(\sum_{i=1}^3 \varphi_i\right), \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} x_{A_4} &= (l_{11} + l_{12} + \xi_1)\cos\varphi_1 + (l_{21} + l_{22} + \xi_2)\cos\left(\sum_{i=1}^2 \varphi_i\right) + \\ &+ (l_{41} + l_{42} + \xi_4)\cos\left(\sum_{i=1, i \neq 3}^4 \varphi_i\right), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} y_{A_4} &= (l_{11} + l_{12} + \xi_1)\sin\varphi_1 + (l_{21} + l_{22} + \xi_2)\sin\left(\sum_{i=1}^2 \varphi_i\right) + \\ &+ (l_{41} + l_{42} + \xi_4)\sin\left(\sum_{i=1, i \neq 3}^4 \varphi_i\right), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x_{A_5} &= (l_{11} + l_{12} + \xi_1)\cos\varphi_1 + (l_{21} + l_{22} + \xi_2)\cos\left(\sum_{i=1}^2 \varphi_i\right) + \\ &+ (l_{41} + l_{42} + \xi_4)\cos\left(\sum_{i=1, i \neq 3}^4 \varphi_i\right) + (l_{51} + l_{52} + \xi_5)\cos\left(\sum_{i=1, i \neq 3}^5 \varphi_i\right), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} y_{A_5} &= (l_{11} + l_{12} + \xi_1)\sin\varphi_1 + (l_{21} + l_{22} + \xi_2)\sin\left(\sum_{i=1}^2 \varphi_i\right) + \\ &+ (l_{41} + l_{42} + \xi_4)\sin\left(\sum_{i=1, i \neq 3}^4 \varphi_i\right) + (l_{51} + l_{52} + \xi_5)\sin\left(\sum_{i=1, i \neq 3}^5 \varphi_i\right). \end{aligned}$$

При введенных предположениях о структуре модели кинетическая энергия механического движения экзоскелета есть сумма энергий всех инерционных участков звеньев с неизменяемой длиной A_iB_i и CA_i , совершающих сложное движение: вращательное вокруг полюса, который находится в шарнире, скрепляющем предыдущее звено, и поступательное прямолинейное вдоль прямой, соединяющей концы звена, а также точечных масс, моделирующих электроприводы:

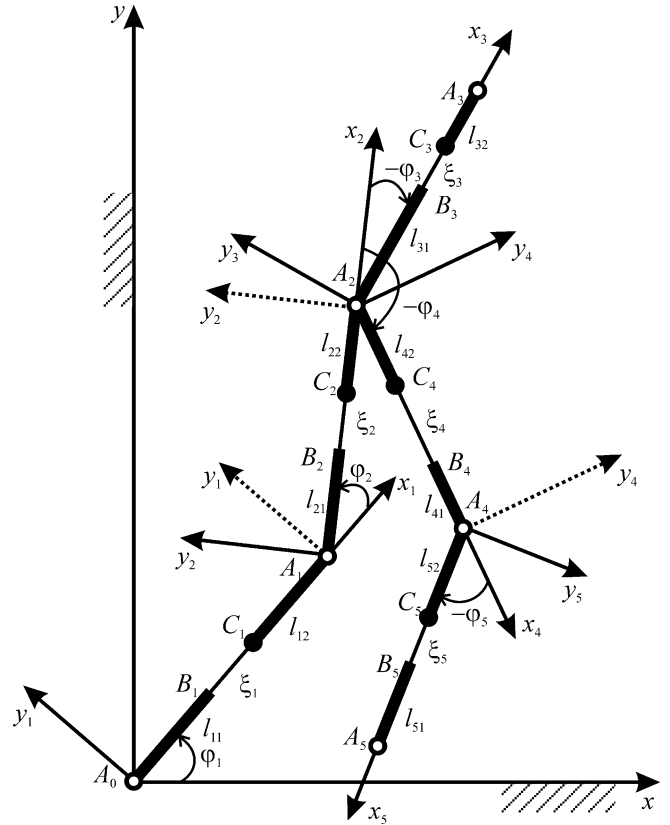


Рис. 1. Активный экзоскелет с пятью управляемыми звеньями с изменяющейся длиной в двумерном измерении

$$2T = \sum_{i=0}^5 m_{A_i} V_{A_i}^2 + \sum_{i=1}^5 m_{C_i} V_{C_i}^2 + \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^5 \int_0^{l_{ij}} \rho_{ij} V_{ij}^2 d\zeta_{ij}. \quad (3)$$

Составляя систему дифференциальных уравнений движения экзоскелета с пятью активными управляемыми звеньями переменной длины, и проводя ее анализ, представим их в матричном виде. Нижние индексы у матриц указывают на обобщенную координату: $k = 1, 2$, где 1 соответствует координате φ , 2 – координате ξ .

$$A_k \ddot{\varphi} + \Lambda_k \ddot{\xi} + D_k \dot{\varphi} \dot{\varphi} + 2H_k(\dot{\varphi} \dot{\xi}) + gP_k(\varphi) = M_k(\varphi, \xi), \quad (4)$$

где $\varphi = (\varphi_1, \dots, \varphi_n)^T$ – вектор-столбец обобщенных угловых координат; $\xi = (\xi_1, \dots, \xi_n)^T$ – вектор-столбец обобщенных линейных координат, определяющих изменения длин звеньев во времени; $\dot{\varphi}$ – вектор-столбец угловых скоростей; $\ddot{\varphi}$ – вектор-столбец угловых ускорений; $\dot{\Phi} = \text{diag}(\dot{\varphi}_1, \dots, \dot{\varphi}_n)$ – диагональная матрица; P_k – матрицы, определяемые моментами силы тяжести; A_k, D_k – матрицы, учитывающие инерционные свойства; H_k, Λ_k – матрицы, учитывающие переменную длину звеньев; M_k – обобщенные силы.

Матрицы, используемые в уравнении (4) для модели экзоскелета с пятью звеньями с изменяемой длиной громоздки, поэтому не приводятся.

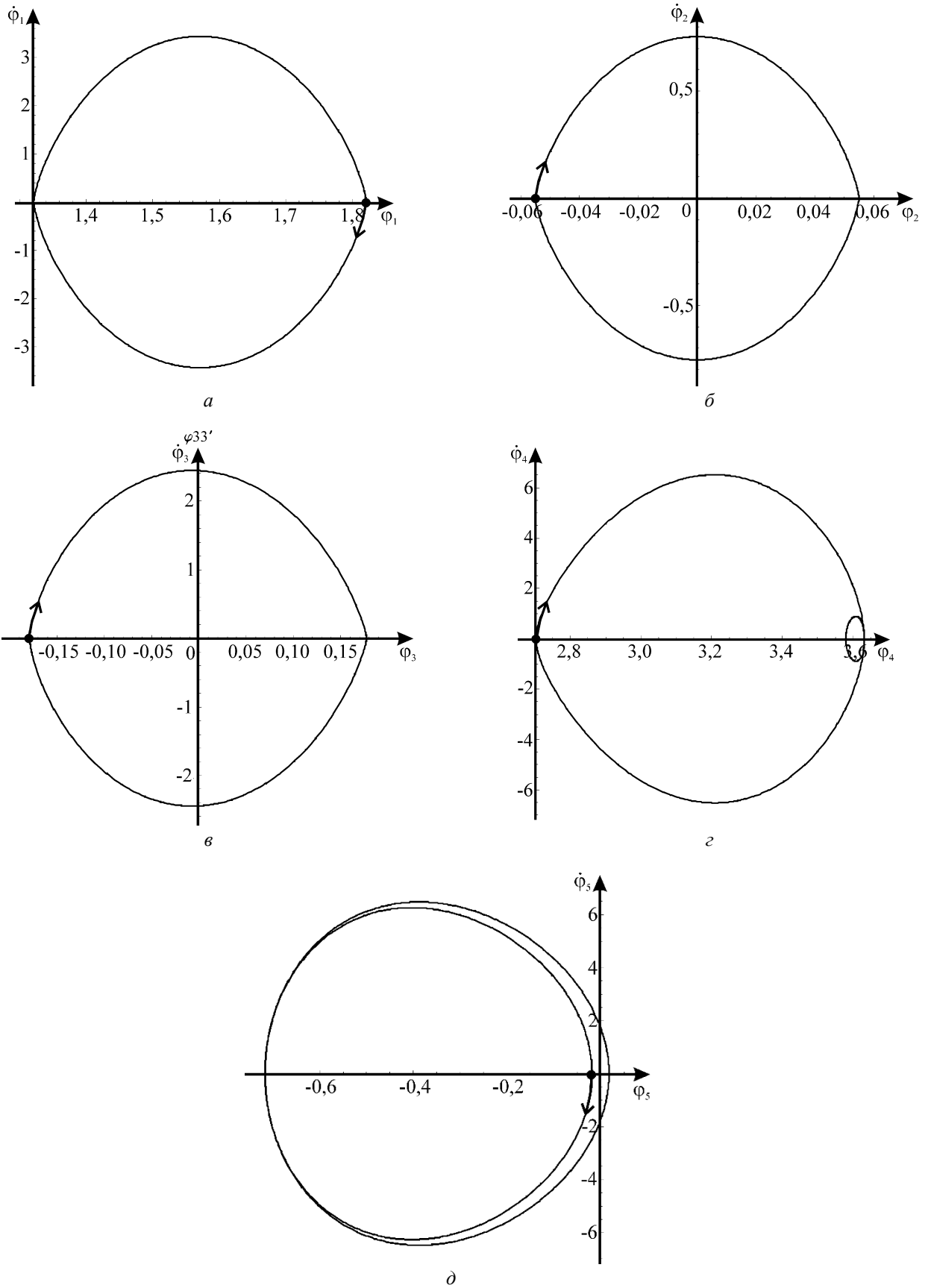


Рис. 2. Фазовые траектории углов поворота звеньев экзоскелета на периоде $2t_k$ полного цикла шага:
 а – угол φ_1 ; б – угол φ_2 ; в – угол φ_3 ; г – угол φ_4 ; д – угол φ_5

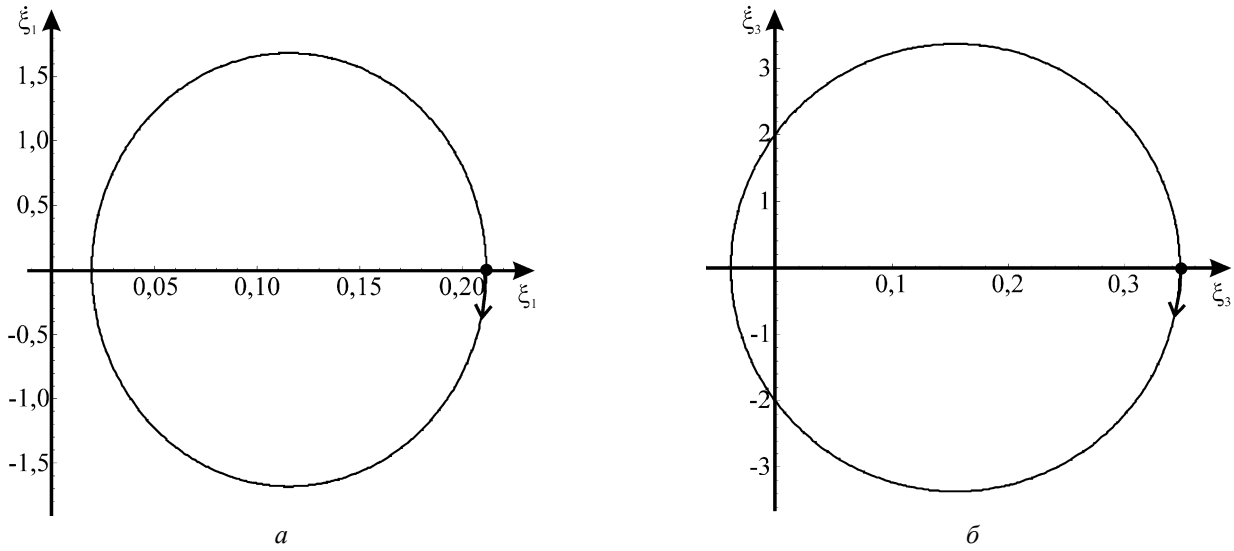


Рис. 3. Фазовые траектории линейных координат экзоскелета на периоде t_k половины полного цикла шага: а – ξ_1 ; б – ξ_3 ;

Управление движением экзоскелета с электромеханическими приводами

Используем программный метод управления движением экзоскелета [16,27]. Чтобы была возможность сравнивать с экзоскелетом с абсолютно твердыми звеньями, функции, задающие изменения углов между звеньями, оставим прежними [16,27]. Приведем только функции изменения длин звеньев механизма:

$$\begin{aligned}
 \xi_1(t) &= k_1l_1 - l_{11} - l_{12} + l_1ll\cos[2\omega t], \\
 \xi_2(t) &= k_2l_2 - l_{21} - l_{22} + l_2ll\cos[2\omega t], \\
 \xi_3(t) &= k_3l_3 - l_{31} - l_{32} + l_3ll\cos[2\omega t], \\
 \xi_4(t) &= k_4l_4 - l_{41} - l_{42} + l_4ll\sin[2\omega t], \\
 \xi_5(t) &= k_5l_5 - l_{51} - l_{52} + l_5ll\sin[2\omega t].
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

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: $a_1 = 1$, $a_2 = 0,11$, $a_3 = 0,4$, $a_4 = 0,45$, $a_5 = 0,05$, $j_1 = j_2 = 0,25$, $j_3 = 0,1$, $j_4 = 0,837$, $j_5 = 13,95$, $f_1 = \pi/2$, $f_2 = \pi$, $f_3 = 0,884$, $f_4 = 0,00687$. Начальные длины звеньев: $l_1 = l_5 = 0,385$ м, $l_2 = l_4 = 0,477$ м, $l_3 = 0,771$ м. Данные длины поделены на два весовых участка поровну: $l_{11} = l_{12} = l_1/2$, $l_{21} = l_{22} = l_2/2$, $l_{31} = l_{32} = l_3/2$, $l_{41} = l_{42} = l_4/2$, $l_{51} = l_{52} = l_5/2$. $k_1 = k_2 = k_4 = k_5 = 1,3$, $k_3 = 1$, $ll = 0,25$ – коэффициенты, определяющие изменения длины звена. Время движения $t_k = 0,36$ с.

Фазовые траектории, представленные на рис. 2, построены за удвоенное время движения $2t_k$. Дело в том, что при рассмотрении не полного цикла шага, а только одной одноопорной фазы ходьбы за время t_k , отсутствует периодическое движение и фазовые траектории не являются замкнутыми. Для углов поворота звеньев периодичность появляется только за полный период ходьбы, т.е. для двух одноопорных фаз для смены ног.

Ввиду идентичности на рис. 3 представлены фазовые траектории для длины первого звена – голени опорной ноги и длины третьего звена – корпуса. Все остальные фазовые портреты имеют аналогичную форму и отличаются только значениями величин длин и скоростей звеньев. Замкнутость фазовых траекторий свидетельствует о периодическом изменении длин звеньев в одноопорной фазе движения на половине периода движений, без смены ног.

Движение первого звена, соответствующего голени опорной ноги, начинается из положения $\varphi_1(0) = 1,820$ рад, $\xi_1(0) = 0,212$ м. Начальное положение второго звена, моделирующего бедро, равно $\varphi_2(0) = -0,055$ рад, $\xi_2(0) = 0,262$ м. Движение третьего звена соответствующего корпусу, начинаются от величин $\varphi_3(0) = -0,177$ рад, $\xi_3(0) = 0,347$ м. Четвертое звено, соответствующее бедру и пятое звено, соответствующее голени переносимой ноги, начинают движение из положений $\varphi_4(0) = 2,703$ рад, $\xi_4(0) = 0,143$ м и $\varphi_5(0) = -0,018$ рад, $\xi_5(0) = 0,115$ м. Практически все звенья экзоскелета в начальный момент времени находились в покое, т.е. начальные угловые скорости были равны нулю: $\dot{\varphi}_i(0) = 0$ рад/с ($i = 1, 2, 3, 4, 5$),

$= 0$ м/с ($i = 1, 2, 3$), $\dot{\xi}_4(0) = 2,081$ м/с, $\dot{\xi}_5(0) = 1,680$ м/с. На рис. 2 и 3 начальные положения на фазовой траектории выделены жирной точкой, а направления движения по траектории показаны стрелками. Некоторые траектории имеют петли в фазовой плоскости, что свидетельствует о важности выбора при синтезе антропоморфной ходьбы адекватных траекторий.

Кадры анимации для рассматриваемой модели экзоскелета со звеньями, изменяющими свою длину, идентичны анимации движения для модели экзоскелета с абсолютно твердыми звеньями вследствие использования одинаковых функций, управляющих

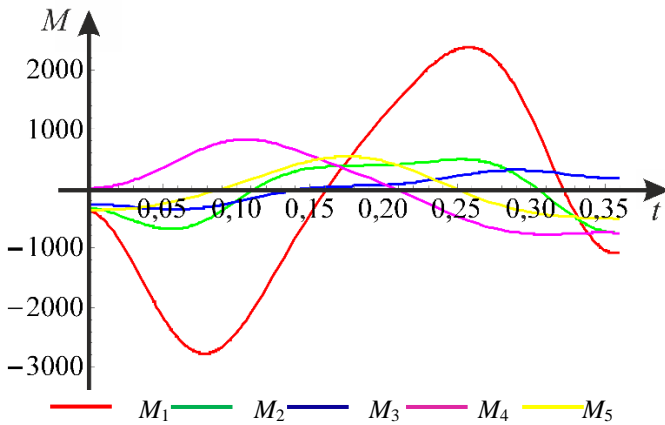


Рис. 4. Изменение управляющих моментов M_i (Н·м) в шарнирах экзоскелета с течением времени t (с) ($i = 1, 2, \dots, 5$)

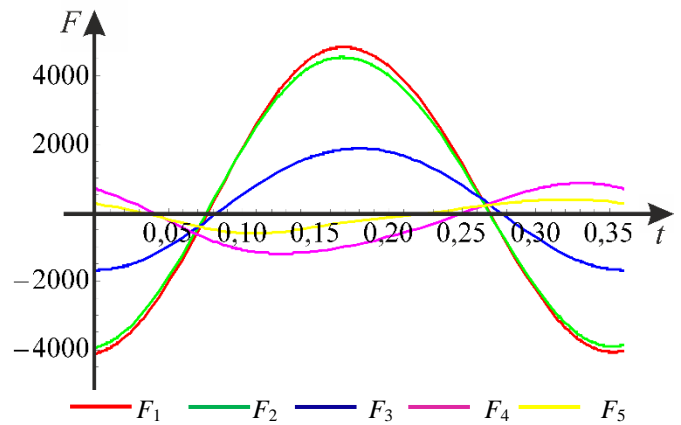


Рис. 5. Изменение управляющих сил F_i (Н), изменяющих длину звена с течением времени t (с) ($i = 1, 2, \dots, 5$)

изменением углов между звеньями, поэтому здесь не приводятся.

Решение обратной задачи динамики

Решая обратную задачу динамики, т.е. решив систему уравнений движения (3) алгебраически относительно моментов и продольных сил, находим $M_i(t)$, $F_i(t)$ ($i = 1, 2, \dots, 5$) 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. 4) и винтовой передачи с двигателем, управляющим изменением длины звена (рис. 5).

Для наглядного сопоставления результатов, полученных в двух моделях – с абсолютно твердыми звеньями [16] и звеньями, изменяющими свою длину, сведем полученные максимальные абсолютные значения управляющих моментов в табл. 1. Максимальные абсолютные значения продольных сил для рассматриваемой модели представлены в табл. 2. Они необходимы для подбора редукторов, в том числе винтовой передачи и электродвигателей.

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

В результате, исходя из значений максимальных развиваемых моментов, электродвигатели и редукторы можно оставить такими же, какие были подобраны для использования в экзоскелете со звеньями с постоянной длиной. Управление изменением длины звена, можно реализовать при использовании электродвигателя с винтовой передачей.

Приведем в табл. 3 результаты вычисления энергетических затрат в приводах экзоскелета.

Из данных табл. 3 видно, что значения энергетических затрат управляющих моментов для опорной ноги при использовании звеньев переменной длины ниже, чем для модели со звеньями с постоянной длиной. Это объясняет энергетическую эффективность ходьбы человека. Для переносимой ноги энергозатраты значительно выше для модели со звеньями, изменяющими свою длину, что объясняется дополнительными массами электроприводов. Кроме того, значительный расход энергии возникает для реализации продольных сил, управляющих изменением длины звена. Следовательно, электромеханическое управление изменением длины звена энергетически неэффективно и следует искать альтернативы, например, управление длиной звена при помощи магнитно-реологических актуаторов.

Модель функционирования биомехатронной системы «человек – экзоскелет»

Исходя из опыта моделирования динамики экзоскелета, можно предложить следующую биомеханическую модель функционирования и взаимодействия человеко-машинной системы в виде человека в экзоскелете (рис. 6).

Следует отметить, что на этапе управления нижнего уровня, т.е. реализации экзоскелетом движений человека, при следовании за опорно-двигательным аппаратом человека возникает эффект запаздывания исполнительных механизмов экзоскелета за мышцами опорно-двигательного аппарата человека. Это приводит к разрушению эффекта синхронизации в согласованной работе человека в экзоскелете. Данная проблема совместно с дискомфортом, вызываемым абсолютно твердыми звеньями, приводит к ограниченности использования экзоскелетов на данном этапе и препятствует их повсеместному распространению. Использование звеньев переменной длины частично

Таблица 1

Наибольшие значения моментов в приводах экзоскелетов со звеньями с постоянной длиной и изменяющими свою длину

Параметр	Модель со звеньями с постоянной длиной	Модель со звеньями, изменяющими свою длину
$M_1, \text{Н}\cdot\text{м}$	2449,76	2774,36
$M_2, \text{Н}\cdot\text{м}$	989,06	742,90
$M_3, \text{Н}\cdot\text{м}$	326,70	343,09
$M_4, \text{Н}\cdot\text{м}$	194,13	831,06
$M_5, \text{Н}\cdot\text{м}$	28,88	543,41

Таблица 2

Максимальные значения управляющих продольных сил, действующих вдоль звеньев экзоскелета, со звеньями, изменяющими свою длину

Параметр	$F_1, \text{Н}$	$F_2, \text{Н}$	$F_3, \text{Н}$	$F_4, \text{Н}$	$F_5, \text{Н}$
Значение	4828,75	4534,26	1871,19	1199,48	612,489

Таблица 3

Расход энергии в шарнирах и звеньях переменной длины экзоскелета

Привод, управляющий изменением углов между звеньями, соответствующий моменту						
Затраты энергии, Дж	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	Сумма, Дж
Модель со звеньями с постоянной длиной	800,67	70,26	75,18	119,05	25,01	1090,17
Модель со звеньями, изменяющими свою длину	675,82	39,96	41,54	471,11	371,35	1599,78
Привод, управляющий изменением длин звеньев и расположенный на звене, соответствующий продольной силе						
Продольная сила, Н	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	Сумма, Н
Модель со звеньями, изменяющими свою длину	880,80	1042,38	687,05	327,54	102,89	3040,66

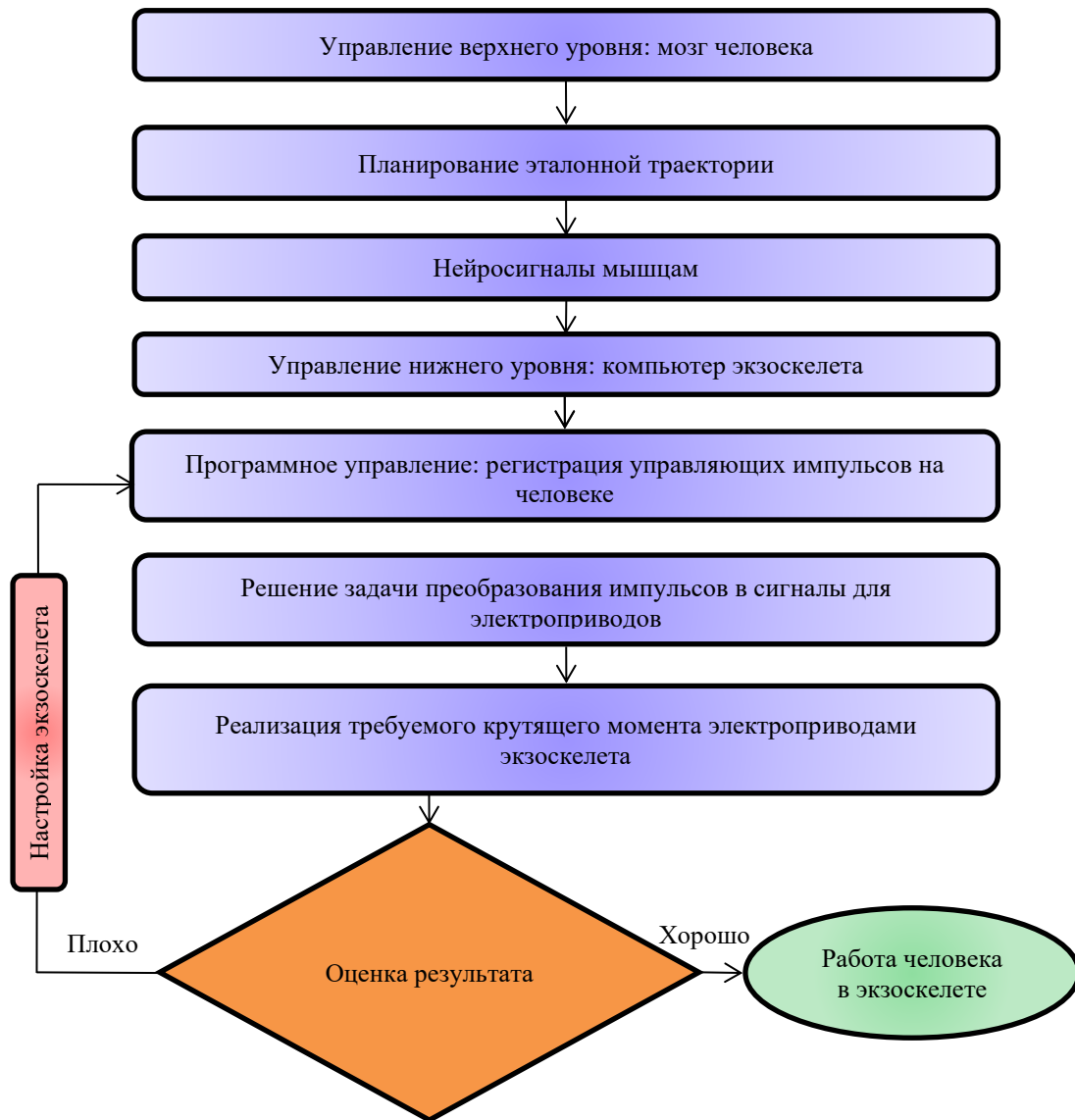


Рис. 6. Модель управления и функционирования биомеханической системы «человек – экзоскелет»

может решить проблему дискомфорта экзоскелета, однако использование электроприводов является весьма энергозатратным и требует поиска альтернативных двигателей.

Заключение

В результате проведенного исследования создана электромеханическая модель экзоскелета с пятью звеньями переменной длины. С использованием метода программного управления движением и численно-аналитического моделирования решена обратная задача динамики и определены управляющие моменты, которые должен развивать электропривод для реализации антропоморфного движения экзоскелета. Данная модель отличается от созданных ранее наличием активно управляемых звеньев

переменной длины. Для управления изменением длины звена требуемым образом предложено использовать электродвигатель с винтовой передачей.

Проведен сравнительный анализ с моделью, содержащей абсолютно твердые звенья. Использование звеньев переменной длины повышает комфортность использования экзоскелета, однако увеличивает затраты энергии, что является важным фактором в обеспечении автономности экзоскелета.

На основании имеющегося опыта работы с экзоскелетами разработана модель функционирования человека в виде единой биомехатронной системы «человек – экзоскелет». Описаны проблемы запаздывания исполнительных механизмов экзоскелета от звеньев человека и отсутствие синхронизации при совместной работе эндо- и экзоскелета.

Список литературы

- Electromechanical model of exoskeleton with three mobile links / A. Blinov, A. Borisov, L. Konchina, K. Maslova, M. Kulikova // *International Journal of Biosensors Bioelectronics*. – 2023. – Vol. 8, no. 1. – P. 32–37. DOI: 10.15406/ijbsbe.2023.08.00229
- Simulation of exoskeleton motion during a flight on a movable base taking into consideration the electric drive dynamics / V.K. Badyaeva, A.O. Blinov, A.V. Borisov, R.G. Mukharlyamov // *Russian Aeronautics*. – 2022. – Vol. 65, no. 4. – P. 685–696. DOI: 10.3103/S1068799822040080
- Движение антропода на подвижном основании / В.К. Бадяева, А.О. Блинов, А.В. Борисов, Р.Г. Мухарлямов // *Российский журнал биомеханики*. – 2022. № 3. – С. 87–97.
- Bao, W. Vision-based autonomous walking in a lower-limb powered exoskeleton / W. Bao, D. Villarreal, J.-C. Chiao // *2020 IEEE 20th International Conference on Bioinformatics and Bioengineering*. – 2020. – P. 830–834. DOI: 10.1109/BIBE50027.2020.00141
- Яцун, С.Ф. Подъем груза в экзоскелете с гравитационной компенсацией / С.Ф. Яцун, В.М. Антипов А.Е. Карлов, М.Х. Мохаммед // *Известия Юго-Западного Государственного Университета*. – 2019. – Т. 23, № 2. – С. 8–17.
- Яцун С.Ф. Моделирование подъема груза с помощью промышленного экзоскелета / С.Ф. Яцун, В.М. Антипов А.Е. Карлов // *Известия Юго-Западного Государственного Университета*. – 2018. – Т. 22, № 6. – С. 14–20.
- Белов, М.П. Разработка математической модели и управление методом разделения закона управления для экзоскелета / М.П. Белов, Д.Д. Чыонг, Н.В. Лань // *Известия СПбГЭТУ* – 2020. – № 1. – С. 71–77.
- Головин, В.Ф. Особенности проектирования робототехнических систем для восстановительной медицины / В.Ф. Головин, М.В. Архипов, В.Е. Павловский // *Мехатроника, Автоматизация, Управление*. – 2015. – Т. 16, № 10. – С. 664–671.
- Патент № 2665116 Грузовой экзоскелет с настройкой под антропометрические параметры пользователя: № 2017114443: заявл. 25.04.2017: опубл. 28.08.2018 / В.М. Голицын, М.И. Островский, Е.В. Письменная, К.М. Толстов.
- Патент на полезную модель № 190786 Пассивный грузовой экзоскелет: № 2019110529: заявл. 09.04.2019: опубл. 12.07.2019 / С.Ф. Яцун, В.Я. Мищенко, А.С. Яцун
- Патент № 2681115. экзоскелет: № 2017100635: заявл. 12.01.2017: опубл. 04.03.2019 / А. Н. Гуськов.
- Патент на изобретение № 2665386 Пассивный реабилитационный экзоскелет: № 2017141119 заявл. 27.11.2017: опубл. 29.08.2018. / Г.С. Шишков.
- Патент на полезную модель № 189468 Экзоскелет пассивный: № 2018108788 заявл. 13.03.2018: опубл. 23.05.2019. / И.В. Шкарбан, А.А. Кагарлыцкий, Э.А. Фельд, С.В. Смаглюк, Э.А. Сычѳв, С.В. Злыдарь.
- Патент на полезную модель № 212301 Пассивный экзоскелет: № 2021133899: заявл. 18.11.2021: опубл. 14.07.2022 / И.А. Ложкин, Д.Ф. Целиканов, Н.Е. Давыдов, П.В. Трегубов.
- Патент на полезную модель № 202205 Экзоскелет для облегчения перемещения человеком груза: № 2020128138: заявл. 24.08.2020: опубл. 05.02.2021 / М.С. Скоков, И.С. Скоков, Ю.С. Потанин, А.И. Матвиенко, А.С. Бирюков, И.А. Утемов, А.М. Ледюков.
- Моделирование движения активного экзоскелета с пятью управляемыми электроприводами звеньями / А.О. Блинов, А.В. Борисов, Л.В. Кончина, М.Г. Куликова, К.С. Маслова // *Российский журнал биомеханики*. – 2023. – Т. 27, № 4. – С. 186–199.
- Gordon, K.E. Mechanical performance of artificial pneumatic muscles to power an ankle-foot orthosis / K.E. Gordon, G.S. Sawicki, D.P. Ferris // *Journal of Biomechanics*. – 2006. – Vol. 39, no. 10. – P. 1832–1841. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2005.05.018
- Bougrinat, Y. Design and development of a lightweight ankle exoskeleton for human walking augmentation / Y. Bougrinat, S. Achiche, M. Raison // *Mechatronics*. – 2019. – Vol. 64. – P. 102297. DOI: 10.1016/j.mechatronics.2019.102297
- Khomami, A.M. A survey on soft lower limb cable-driven wearable robots without rigid links and joints / A.M. Khomami, F. Najafi // *Robotics and Autonomous Systems*. – 2021. – Vol. 144. – P. 103846. DOI: 10.1016/j.robot.2021.103846
- Li, Y. Design and prototyping of a novel lightweight walking assist wear using PVC gel soft actuators / Y. Li, M. Hashimoto. // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 2016. – Vol. 239. – P. 26–44. DOI: 10.1016/j.sna.2016.01.017
- Oguntosin, V. Design and characterization of artificial muscles from wedge-like pneumatic soft modules / V. Oguntosin, A. Akindele // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 2019. – Vol. 297. – P. 111523. DOI: 10.1016/j.sna.2019.07.047
- Oguntosin, V. Design of a pneumatic soft actuator controlled via eye tracking and detection / V. Oguntosin, A. Abdulkareem // *Heliyon*. – 2020. – Vol. 6, no. 7. DOI: 10.1016/j.heliyon.2020.e04388
- Banerjee, H. Hydrogel actuators and sensors for biomedical soft robots: Brief overview with impending challenges / H. Banerjee, M. Suhail, H. Ren // *Biomimetics*. – 2018. – Vol. 3, no. 3. DOI: 10.3390/biomimetics3030015
- Autonomous multi-joint soft exosuit with augmentation-power-based control parameter tuning reduces energy cost of loaded walking / S. Lee, J. Kim, L. Baker, A. Long, N. Karavas, N. Menard, I. Galiana C.J. Walsh // *J. NeuroEngineering Rehabil*. – 2018. – Vol. 15, no. 66. DOI: 10.1186/s12984-018-0410-y
- A lightweight soft exoskeleton in lower limb assistance / Y. Zhang, Z. Wang, C. Chen, T. Fang, R. Sun, Y. Li // *2020 Chinese Automation Congress, Shanghai, China*. – 2020. – P. 2173–2178. DOI: 10.1109/CAC51589.2020.9327551
- Брацун, Д.А. Биомеханические модели живой ткани / Д.А. Брацун, И.В. Красняков, А.Д. Брацун // *Российский журнал биомеханики*. – 2023. – Т. 27, № 4. – С. 50–71.
- Оразов, А.Т. Разработка и исследование гидропневматического привода экзоскелетного устройства. Дисс. канд. техн. наук. / А.Т. Оразов Уфа, 2018. – 140 с.
- Borisov, A.V. Mathematical models of exoskeleton / A.V. Borisov, A.V. Chigarev // *Dynamics, Strength, Control*. – 2022. – P. 1–232.

29. Simulation of the movement of the supporting leg of an exoskeleton with two links of variable length in 3D / A. Blinov, A. Borisov, L. Konchina, M. Kulikova, K. Maslova // *Journal of Applied Informatics*. – 2021. Vol. 16, no. 4. – P. 122–134. DOI: 10.37791/2687-0649-2021-16-4-122-134
30. Modeling the dynamics of an exoskeleton link of variable length using the Lagrange – Maxwell system of differential equations of motion / A. Blinov, A. Borisov, K. Filippenkov, L. Konchina, K. Maslova // *Journal of Applied Informatics*. – 2022. – Vol. 99, no. 3. – P. 117–130. DOI: 10.37791/2687-0649-2022-17-3-117-130
31. Electromechanical model of variable-length link for exoskeleton or prosthesis / A. Blinov, A. Borisov, I. Kaspirovich, R. Mukharlyamov, K. Filippenkov // *Lecture Notes in Networks and Systems*. – Vol. 575. – P. 1344–1353. DOI: 10.1007/978-3-031-21219-2_150
32. 3D model of two links of the supporting leg of the exoskeleton with variable length and adjustable stiffness / A. Borisov, A. Blinov, L. Konchina, M. Novikova // *AIP Conference Proceedings*. – 2023. – Vol. 2911, no. 1. DOI: 10.1063/5.0163380
33. Applying the models of magneto-rheological substances in the study of exoskeleton variable-length link with adjustable stiffness / A. Blinov, A. Borisov, L. Konchina, M. Novikova // *Journal of Applied Informatics*. – 2022. – Vol. 98, no. 2. – P. 133–142. DOI: 10.37791/2687-0649-2022-17-2-133-142
34. Exoskeleton dynamics simulation with the system of three variable-length links of adjustable stiffness / A.O. Blinov, A.V. Borisov, R.G. Mukharlyamov, M.A. Novikova // *Mechanics of Solids*. – 2024. – Vol. 59, no. 1. – P. 156–166. DOI: 10.1134/S0025654423600770
35. Саад, С. Динамическая модель верхних конечностей и ее применение: систематический обзор / С. Саад, Н. Ибрагим, Н.А.А. Осман // *Российский журнал биомеханики*. – 2023. – Т. 27, № 1. – С. 87–97.
36. Определение механических свойств костной ткани численно-цифровым методом на основе данных компьютерной томографии / О.В. Герасимов, Р.Р. Рахматулин, Т.В. Балтина, О.А. Саченков // *Российский журнал биомеханики*. – 2023. – Т. 27, № 3. – С. 53–66.
37. Нургалиев, А.М. Комплексное исследование кинематики движений суставов лыжника-гонщика при движении способом дабл-полинг: эксперимент, обработка и моделирования / А.М. Нургалиев, Д.В. Паршин // *Российский журнал биомеханики*. – 2023. – Т. 27, № 4. – С. 114–126.
38. Численное моделирование полного протеза коленного сустава с силиконовой прослойкой / А. Мааче, М. Амаджи, Х. Амеддах, Х. Мазуз // *Российский журнал биомеханики*. – 2024. – Т. 28, № 1. – С. 77–87.
39. Черноусько, Ф.Л. Методы управления нелинейными динамическими системами / Ф.Л. Черноусько, И.М. Ананьевский, С.А. Решмин // *Актуальные проблемы механики*. – 2015. – С. 16–33.
40. Розенблат, Г.М. О равновесии твердого тела, опирающегося одной точкой на шероховатую плоскость / Г.М. Розенблат // *Изв. РАН. МТТ*. – 2023. – № 6. – С. 3–22. DOI: 10.31857/S0572329922600748
41. Климина, Л.А. Трехзвенный механизм как модель человека на качелях / Л.А. Климина, А.М. Формальский // *Известия Российской академии наук. Теория и системы управления*. – 2020. – № 5. – С. 89–105. DOI 10.31857/S000233882005008X

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.

COMPARATIVE ANALYSIS OF AN ELECTROMECHANICAL MODEL OF AN EXOSKELETON WITH LINKS OF VARIABLE LENGTH AND A MODEL CONTAINING ABSOLUTELY SOLID 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: 28 October 2023
Approved: 26 March 2024
Accepted for publication: 14 June 2024

Key words:

exoskeleton, electromechanical model, electric drive, biomechatronic system, variable-length link, programmed motion, longitudinal forces, control moments, comparative analysis

ABSTRACT

The plane motion of an exoskeleton with five links of variable length is considered. It is assumed that there is a person inside the exoskeleton, and the exoskeleton is equipped with sensors that read indicators of a person's muscle activity, convert them into control signals for electric drives and instantly implement them in the exoskeleton. The novelty of the study is due to the model of changes in the lengths of sections of exoskeleton links. The relevance of the research lies in the possibility of restoring and enhancing the motor functions of the human body with the help of an exoskeleton and replacing people with anthropomorphic mechanisms in harmful and hazardous production that does not have the ability to use wheeled, tracked and other types of robots. The model specifies the design of links of variable length. Each link includes a weightless section with varying length, located between two absolutely solid weighty sections. Numerical and analytical modeling was carried out based on solving the inverse problem of dynamics for the mechanism under consideration. A method has been developed for controlling the proposed mechatronic robotic system in the form of a person in an exoskeleton based on specifying programmed movement and determining control moments localized in large hinge joints and longitudinal forces that determine changes in the lengths of the mechanism links. A comparison is made with the model containing absolutely rigid links, considered earlier. The problems that arise when taking into account changes in the lengths of links are identified. A model of the functioning of the human-exoskeleton biomechatronic system is proposed.
