

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-133-147>

Моделирование управляемого движения человека при ходьбе в экзоскелете

С.Ф. Яцун¹, О.Г. Локтионова¹, Х.Х.М. Аль Манджи¹,
А.С. Яцун¹ ✉, А.Е. Карлов¹

¹ ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»
ул. 50 лет Октября, 94, г. Курск, 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: teormeh@inbox.ru

Резюме

Цель исследования. Появление экзоскелетов – роботов открывает новые возможности в реабилитации пациентов, имеющих повреждение нижних конечностей. Несмотря на рост публикаций по этой тематике, многие вопросы, связанные с разработкой инструментальных средств проектирования на основе моделирования движения человека в экзоскелете с использованием теоретических основ устойчивого движения в вертикальном положении, изучены недостаточно. Поэтому целью данной статьи является разработка методов повышения эффективности системы управления экзоскелетом нижних конечностей при двуногой ходьбе.

Методы. Ключевой особенностью статьи является применение методов моделирования задающих законов движения экзоскелета. Применяются методы математического моделирования движения звеньев с учетом последующего возможного их применения на моделировании движения звеньев экзоскелета, составляются уравнения траекторий с применением векторно-матричного метода. Исследуются траектории движения стопы, голени и бедра экзоскелета при устойчивой ходьбе.

Результаты. Для моделирования работы робототехнического комплекса (прототипа экзоскелета нижних конечностей с десятью активными степенями свободы) применяется кинематическое задание траектории движения звеньев. Для нахождения вектора обобщенных координат решается обратная задача кинематики с применением векторно-матричного метода с применением матрицы Якоби. Результаты численного моделирования показывают высокую сходимость и адекватность предложенного метода. Методика позволяет задавать траектории движения оператора в экзоскелете на реальных аппаратах.

Заключение. В статье исследование ходьбы выполнено с позиций моделирования квазистатической походки с помощью кинематических подходов. Разработанный метод определения задающих углов поворота звеньев экзоскелета для различных положений стопы с учетом положения проекций центра масс используется при разработке алгоритмов управления движением человека в экзоскелете.

Ключевые слова: паттерны походки; экзоскелет нижних конечностей; кинематическая модель; реабилитация; задающие траектории; устойчивая ходьба.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Финансирование: Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 19-08-00440.

© Яцун С.Ф., Локтионова О.Г., Аль Манджи Х.Х.М., Яцун А.С., Карлов А.Е., 2019

Для цитирования: Моделирование управляемого движения человека при ходьбе в экзоскелете / С.Ф. Яцун, О.Г. Локтионова, Х.Х.М. Аль Манджи, А.С. Яцун, А.Е. Карлов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(6): 133-147. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-133-147>.

Поступила в редакцию 14.10.2019

Подписана в печать 22.07.2019

Опубликована 23.12.2019

Simulation of Controlled Motion of a Person When Walking in an Exoskeleton

Sergei F. Yatsun¹, Oksana G. Loktionova¹,
Al Manji Khalil Hamed Mohammed Hamood¹,
Andrey S. Yatsun¹ ✉, Andrey E. Karlov¹

¹ Southwest State University
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: teormeh@inbox.ru

Abstract

Purpose of research. Robot exoskeletons open up new possibilities in the rehabilitation of patients with lower limb injuries. Despite the growing number of publications on this topic, many issues related to the development of design tools based on the simulation of human movement in an exoskeleton using the theoretical basis of stable movement in the upright position have not been studied well enough. Therefore, the purpose of this paper is to develop methods for improving the efficiency of the lower extremity exoskeleton control system for biped gait.

Methods. The key feature of the paper is the application of modeling techniques determining the laws of the exoskeleton motion. Methods of mathematical modeling of the motion of sections are used, taking into account their subsequent possible use in modeling the motion of exoskeleton sections; trajectory equations are composed using the vector-matrix method. The trajectories of the exoskeleton's foot, lower leg, and hip movement during steady walking are studied.

Results. To simulate the operation of a robotic complex - a prototype of an exoskeleton of the lower extremities with ten active degrees of freedom, kinematic definition the trajectory of the sections is used. To find the vector of generalized coordinates, the inverse kinematics problem is solved applying the vector-matrix method using the Jacobian matrix. The results of numerical simulation show high convergence and efficacy of the proposed method. The proposed method allows defining the trajectory of the operator in the exoskeleton in real devices.

Conclusion. In the paper, the study of walking is performed from the standpoint of modeling a quasi-static gait using kinematic approaches. The developed method for determining the defining angles of rotation of the exoskeleton sections for different foot positions taking into account the position of the mass center projections, is used in the development of algorithms for controlling human motion in the exoskeleton.

Keywords: gait patterns; low-extremity exoskeleton; kinematic model; rehabilitation; defining trajectories; stable walking.

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Funding: The research was carried out with the support of RFBR grant 19-08-00440.

For citation: Yatsun S. F., Loktionova O. G., Postol'nyy A.A., Al' Mandzhi K. H. M., Yatsun A.S., Karlov A. E. / Simulation of Controlled Motion of a Person When Walking in an Exoskeleton // *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(6): 133-147 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-133-147>.

Received 13.06.2019

Accepted 22.07.2019

Published 25.10.2019

Введение

Появление экзоскелетов - роботов открывает новые возможности в реабилитации пациентов, имеющих повреждение нижних конечностей, что позволяет адаптировать их к условиям реальной жизни. Несмотря на рост публикаций по этой тематике, многие вопросы, связанные с разработкой инструментальных средств проектирования на основе моделирования движения человека в экзоскелете с использованием теоретических основ устойчивого движения в вертикальном положении, изучены недостаточно. Во многих странах, в том числе таких, как Япония, США, Южная Корея, Германия, Россия, ведутся работы по созданию устройств, позволяющих человеку передвигаться в пространстве при повреждении нижних конечностей. Изучаются вопросы поведения человека в экзоскелете при выполнении различных упражнений. Достаточно подробно изучается вопрос вертикализации человека, причем решение базируется на обратной задаче кинематики и динамических уравнениях, условием устойчивого процесса является обеспечение положения центра масс экзоскелета в опорной плоскости [1-6]. Наиболее сложным движением, с точки зрения моделирования, является ходьба человека в экзоскелете. Поэтому интерес к этой проблеме значителен [7-11]. Существует большое число публикаций по двуногой ходьбе [11, 12-15].

Однако в большинстве случаев ходьба рассматривается только в одной сагиттальной плоскости [16, 12, 17-19], что ограничивает область применения полученных результатов для экзоскелетных приложений. Дело в том, что ходьба в экзоскелете близка к квазистатической походке. Поэтому моделирование ходьбы необходимо рассматривать с позиций пространственной кинематики, так как движение происходит как в сагиттальной, так и во фронтальной плоскостях. Такой подход к моделированию движения можно встретить только в некоторых работах, например [20, 21].

Материалы и методы

1. Описание экзоскелета

Человека в экзоскелете можно рассматривать как некоторую человеко-машинную систему (ЧМС). На рис.1 представлен общий вид экзоскелета нижних конечностей, приводимый в движение только приводами экзоскелета. Он состоит из следующих основных элементов: 1 — корсет, 2 — бедра, 3 — голени, 4 — стопы. Для описания ходьбы ЧМС важно выбрать характерные точки, принадлежащие ЧМС, положение которых изменяется во времени и определяет устойчивую походку. При квазистатической ходьбе, когда ускорения незначительны, к этим точкам относятся центр масс C (ЦМЭ) и, точки, принадлежащие левой или правой стопам,

если считать, что стопы при ходьбе двигаются поступательно.

2. Кинематика движения центра масс человека в экзоскелете

Для кинематического анализа движения рассматриваемой ЧМС необходимо выбрать закон движения проекций ЦМЭ вдоль опорной плоскости: $\bar{r}_C = \bar{r}_C(t)$. Законы изменения координат центра масс от времени на каждом участке траектории представим в виде:

$$\begin{aligned} x_C(t) &= \sum_{i=0}^s c_i t^i; \quad y_C(t) = \sum_{i=0}^u d_i t^i; \\ z_C(t) &= \sum_{i=0}^p e_i t^i, \end{aligned} \quad (1)$$

где c_i , d_i , e_i – постоянные, определяемые из начальных условий; s , u , p – порядок полиномов.

Рассмотрим траекторию движения проекции ЦМЭ C по горизонтальной плоскости xOy . Траектория движения ЦМЭ приведена на рис. 2. Здесь показано положение стоп 1, 2 и центра масс 3 в различные моменты времени. Параметры, задающие движение центра масс: y_1, y_2 – координаты стопы; $2L$ – длина шага; y_m – максимальное отклонение центра масс от продольной оси симметрии Ox ; T – время выполнения одного шага.

Движение ЦМЭ начинается во фронтальной плоскости из двухопорной фазы из точки O и направлено на перенос ЦМЭ во фронтальной плоскости на левую стопу на расстояние Oy_m . После этого, правая стопа отрывается от опор-

ной поверхности и начинает перемещение в сагиттальной плоскости вдоль Ox , одновременно с этим ЦМЭ движется вдоль левой стопы параллельно Ox .

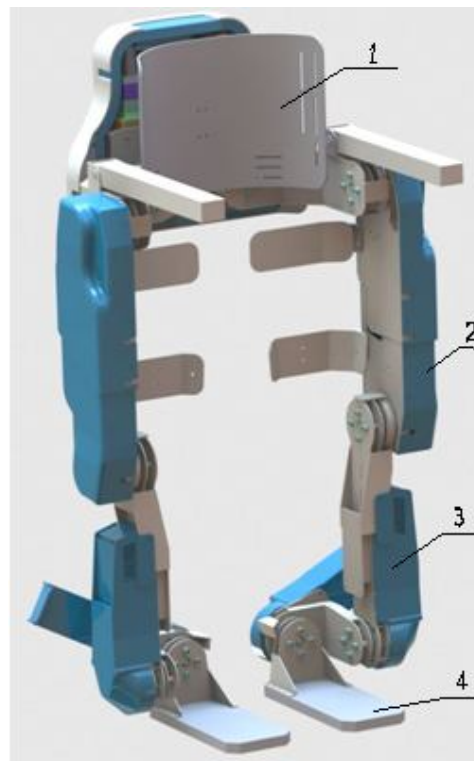


Рис. 1. Общий вид прототипа экзоскелета:
1 – корсет; 2 – бедра; 3 – голени; 4 – стопы

Fig. 1. General view of the prototype exoskeleton:
1 – brace, 2 – hips, 3 – legs, 4 – feet

Условием устойчивого положения ЧМС является нахождение ЦМЭ внутри опорной, в данной случае, левой стопы, поэтому ЦМЭ перемещается на расстояние $L/2$, которое меньше L_2 . После приземления правой стопы на опорную поверхность ЧМС переходит в двухопорную фазу, в которой происходит перенос центра масс во фронтальной плоскости с левой стопы на правую. Далее движения повторяются. Таким образом, в установившемся режиме длина полшага должна быть меньше длины стопы: $L < L_1 + L_2$.

Преимуществом рассматриваемой походки является то, что движение звеньев ЧМС происходит в сагиттальной и фронтальной плоскостях независимо

друг от друга, что значительно упрощает алгоритм управления движением. Недостатком же является невысокая скорость движения.

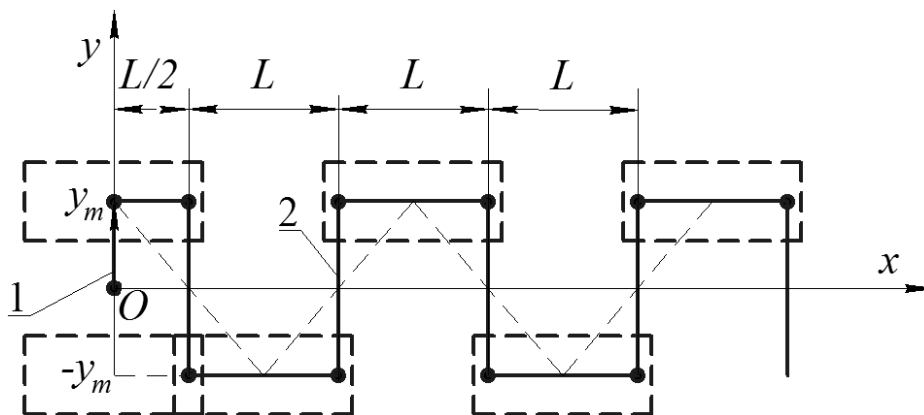


Рис.2. Схема движения центра масс и стоп человеко-машинной системы

Fig. 2. The scheme of the center of mass motion and feet of a man-machine system

Шаг разобьем на четыре участка и положим, что сшивка участков происходит при условии равенства соответствующих координат и скоростей, что отражается в граничных условиях. Время движения по участку составит $T/4$. Время прохождения k -го участка определяется из условия

$$(k-1)T/4 < t < kT/4, \quad (2)$$

где $k=1,2,3,4,\dots$ — номер участка траектории.

Таким образом, уравнения движения центра масс на первом участке имеют вид: $y_C = v_y t$, $x_C = 0$, ($v_x = 0$). На втором участке $y_C = y_m$, $x_C = v_x t$, $x_C < L/2$. На третьем участке $y_C = y_m - v_y t$, $x_C = L/2$. На четвертом участке $y_C = -y_m$, $x_C = v_x t$, $L/2 < x_C < 3L/2$. Здесь v_y , v_x — проекции скорости ЦМЭ на координатные оси.

3. Кинематика движения стоп экзоскелета

Рассмотрим движение стоп, которые должны двигаться синхронно с центром масс, обеспечивая его положение в опорном полигоне. Схема движения стоп экзоскелета в пространстве $Oxyz$ приведена на рис. 3. Будем считать, что походка ЧМС определена уравнениями, задающими движение точек A_2, A_6 , принадлежащих стопам в виде векторных соотношений, для правой стопы: $\vec{r}_{A_2} = \vec{r}_{A_2}(t)$; для левой стопы: $\vec{r}_{A_6} = \vec{r}_{A_6}(t)$. Точки A_i (центры голеностопного сустава) ($i=2$ или 6), принадлежащие стопам, совершают движение по некоторым пространственным траекториям.

Для описания движения стоп удобно применить локальные координатные системы, соответственно, для правой стопы $B_2 h_2 l_2$ и для левой — $B_6 h_6 l_6$.

Точки B_i ($i=2$ или 6) принадлежат опорной поверхности и определяют начало локальных координатных систем $B_i h_i l_i$.

Радиус-векторы, определяющие положение точек A_i в локальных координатных системах, имеют вид:

$$\bar{r}_{BiAi} = [l_i, 0, h_i]^T. \quad (3)$$

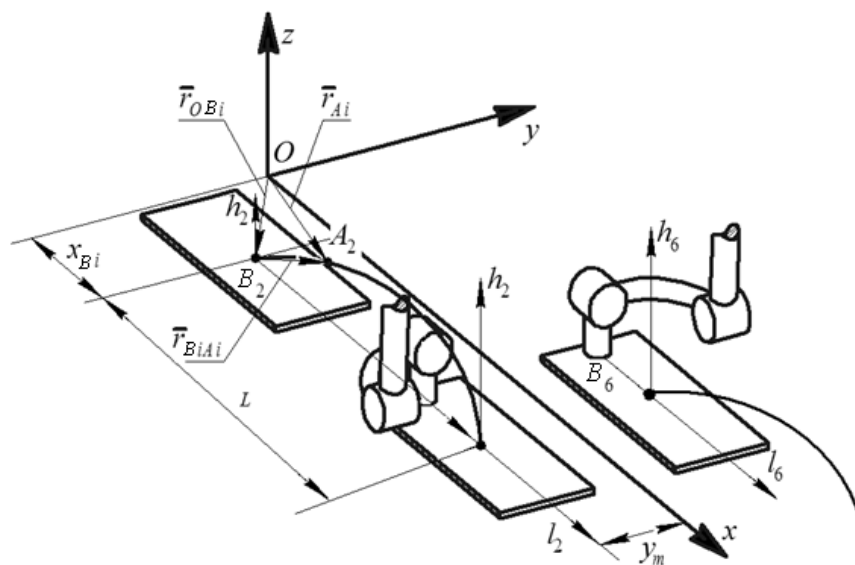


Рис. 3. Схема движения стоп экзоскелета в пространстве Oxyz

Fig. 3. Exoskeleton foot motion pattern in space Oxyz

Радиус – векторы, определяющие положение точек B_i

$$\bar{r}_{OBi} = [x_{Bi}, y_{Bi}, 0]^T, \quad (5)$$

где $x_{B_i} = x_{B_i}^0 + L_{ik}$, $y_{B_i} = y_m$, L_{ik} – длина k -го шага i -той стопы.

При симметричной ходьбе по прямой длины шага левой и правой стоп равны, то есть $L_2 = L_6$. Соответственно высоты подъема стоп также равны $H_2 = H_6$. На значения этих параметров накладываются ограничения $H_2 < H_2^m$; $L_2 < L_2^m$, определяемые предельными значениями углов в соответствующих шарнирах экзоскелета. Радиус-векторы,

Функции $l_i = l_i(t)$, $h_i = h_i(t)$ можно представить в следующем виде:

$$l_i = \sum_{i=0}^n a_i t^i; \quad h_i = \sum_{i=0}^m b_i t^i, \quad (4)$$

где a_i, b_i – постоянные, определяемые из начальных условий; n, m – порядок полиномов.

описывающие положение этих точек в пространстве Oxyz, имеют вид

$$\bar{r}_{Ai} = \bar{r}_{OBi} + \bar{r}_{BiAi}. \quad (6)$$

Если правая стопа лежит на опорной поверхности, то точка A_6 , принадлежащая левой стопе, будет двигаться по некоторой траектории, а ее положение на этой траектории определяется радиус-вектором \bar{r}_{A_6} . Аналогично, при опоре на левую стопу $h_6 = 0$, а положение точки A_2 определяется радиус-вектором \bar{r}_{A_2} . Определим радиус-векторы \bar{r}_{BiAi} :

$$\bar{r}_{B_2A_2} = (x_{B_2A_2}, y_{B_2A_2}, z_{B_2A_2})^T,$$

$$\bar{r}_{B_6A_6} = (x_{B_6A_6}, y_{B_6A_6}, z_{B_6A_6})^T.$$

Рассмотрим уравнения (7), задающие движение правой стопы для случая $n=1, m=2$, что соответствует траектории стопы:

$$h_2 = a_2 + b_2 \cdot l_2 + C_2 \cdot l_2^2. \quad (7)$$

Для нахождения постоянных в уравнении (5.30) запишем граничные условия в виде:

$$1) h_2 = 0, l_2 = L_2; \quad (8)$$

$$2) h_2 = 0, \text{ то } l_2 = 0; \quad (9)$$

$$3) h_2 = H_2, l_2 = \frac{L_2}{2}. \quad (10)$$

Подставляя (8), (9), (10) в (7) получим:

$$\begin{cases} H_2 = a_2 + b_2 \cdot \frac{L_2}{2} + C_2 \cdot \frac{L_2^2}{4} \\ 0 = a_2 \\ 0 = a_2 + b_2 \cdot L_2 + C_2 \cdot L_2^2 \end{cases} \quad (11)$$

Из первого уравнения:

$$b_2 = \left(H_2 - C_2 \cdot \frac{L_2^2}{4} \right) \cdot \frac{2}{L_2},$$

из второго:

$$b_2 = -\frac{C_2 \cdot L_2^2}{L_2} = -C_2 \cdot L_2.$$

Приравнявая получим:

$$-C_2 \cdot L_2 = \frac{2 \cdot H_2}{L_2} - C_2 \cdot \frac{L_2}{2}.$$

Отсюда:

$$C_2 = -\frac{4H_2}{L_2^2},$$

$$b_2 = \frac{4H_2}{L_2}.$$

Параметрические уравнения принимают вид:

$$l_2(t) = v_2 \cdot t, \quad (12)$$

$$h_2(t) = 4 \frac{H_2}{L_2} \cdot v_2 \cdot t - 4 \frac{H_2}{L_2^2} \cdot v_2^2 \cdot t^2. \quad (13)$$

Аналогично определяются параметрические уравнения движения левой стопы. На рис. 4 показана траектория движения точки A_2 для $n=1, m=2$.

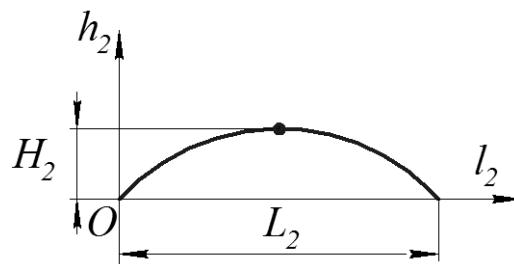


Рис. 4. Траектории движения стоп при движении с отрывом от опорной поверхности

Fig. 4. Trajectories of feet motion when moving with getting off the supporting surface

Таким образом, задавая движение центра масс по определенной траектории, например, по формулам (11) и пересчитывая синхронное положение стоп по формулам (12), (13), можно синтезировать движение экзоскелета при различных походках человека в экзоскелете. Проведенный анализ позволяет сформулировать требования к внешним параметрам, определяющим походку. Для ее реализации необходимо установить кинематическую связь между этими параметрами и обобщенными координатами, определяющими положение звеньев механизма силового каркаса экзоскелета. Для этого можно использовать расчетные схемы, приведенные на рис. 3. По этим схемам получены формулы, устанавливающие связь между вектором обобщенных координат $q(t)$ и векторами, задающими положение

центра масс $\bar{r}_c = \bar{r}_c(\bar{q})$ и синхронного положения стоп $r_{Ai} = \bar{r}_{Ai}(\bar{q})$.

4. Моделирование задающих законов движения экзоскелета

Примем, что нижние конечности человека двигаются вместе с элементами экзоскелета, будучи жестко связанными с ними, поэтому задающие законы, определяющие положение звеньев ЧМС, удобно представить вектором обобщенных координат $\bar{q}(t)$, определяющим положение звеньев экзоскелета в любой момент времени, причем $\bar{q} \in R^\xi$, где ξ – число обобщенных координат, подлежащих определению. На вектор $\bar{q}(t)$ наложены ограничения, определяемые физиологическими особенностями человека. $\bar{q}^- \leq \bar{q} \leq \bar{q}^+$, где \bar{q}^-, \bar{q}^+ – предельные значения обобщенных координат.

Синтез задающих законов осуществляется путем решения обратной задачи кинематики, которую сформулируем следующим образом. Пусть заданы внешние параметры ходьбы: L – длина шага; T – время выполнения одного шага; $2y_m$ – расстояние между стопами во фронтальной плоскости, геометрические размеры стоп, а также желаемые законы движения центра масс $\bar{r}_c(t)$ и закон движения стоп $\bar{r}_{Ai}(t)$; $i=2$ – для правой стопы, $i=6$ – для левой. Вектор обобщенных координат $\bar{q}(t)$, подлежащих определению, имеет вид:

$$\bar{q} = (\varphi_2, \varphi_3, \varphi_5, \varphi_6, \theta_2, \theta_6)^T. \quad (14)$$

Пусть дана вектор-функция \bar{F} , которая определяет значения, соответствующие проекциям центра масс и стопы в зависимости от обобщенных координат \bar{q} . Вектор-функцию $\bar{F}(\bar{q})$, удобно рассматривать в локальной координатной системе, тогда она примет вид:

$$\bar{F}(\bar{q}) = [\bar{r}_{BiAi}(\bar{q}), \bar{r}_c(\bar{q})]^T, \quad (15)$$

где $i=2$ или 6 .

Введем также вектор-функцию:

$$\bar{\Phi}(t) = [\bar{r}_{BiAi}(t), \bar{r}_c(t)]^T \text{ или}$$

$$\bar{\Phi}(t) = [l_i(t), y_i(t), h_i(t), x_c(t), y_c(t), z_c(t)]^T, \quad (16)$$

где $i=2$ или 6 ,

которая задает положение точек C и A_i во времени на соответствующих заданных траекториях.

Так как

$$\bar{F}(\bar{q}) = \bar{\Phi}(t), \quad (17)$$

то уравнение (17) позволяет определить значения вектора \bar{q} по заданной функции $\bar{\Phi}(t)$. Для получения решения этого уравнения продифференцируем полученное выражение по времени

$$\frac{\partial \bar{F}}{\partial \bar{q}} \dot{\bar{q}} = \dot{\bar{\Phi}}(t). \quad (18)$$

Отсюда,

$$\dot{\bar{q}} = \left(\frac{\partial \bar{F}}{\partial \bar{q}} \right)^{-1} \dot{\bar{\Phi}}(t). \quad (19)$$

Обозначим обратную матрицу Якоби:

$$J^{-1} = \left(\frac{\partial \bar{F}}{\partial \bar{q}} \right)^{-1}. \quad (20)$$

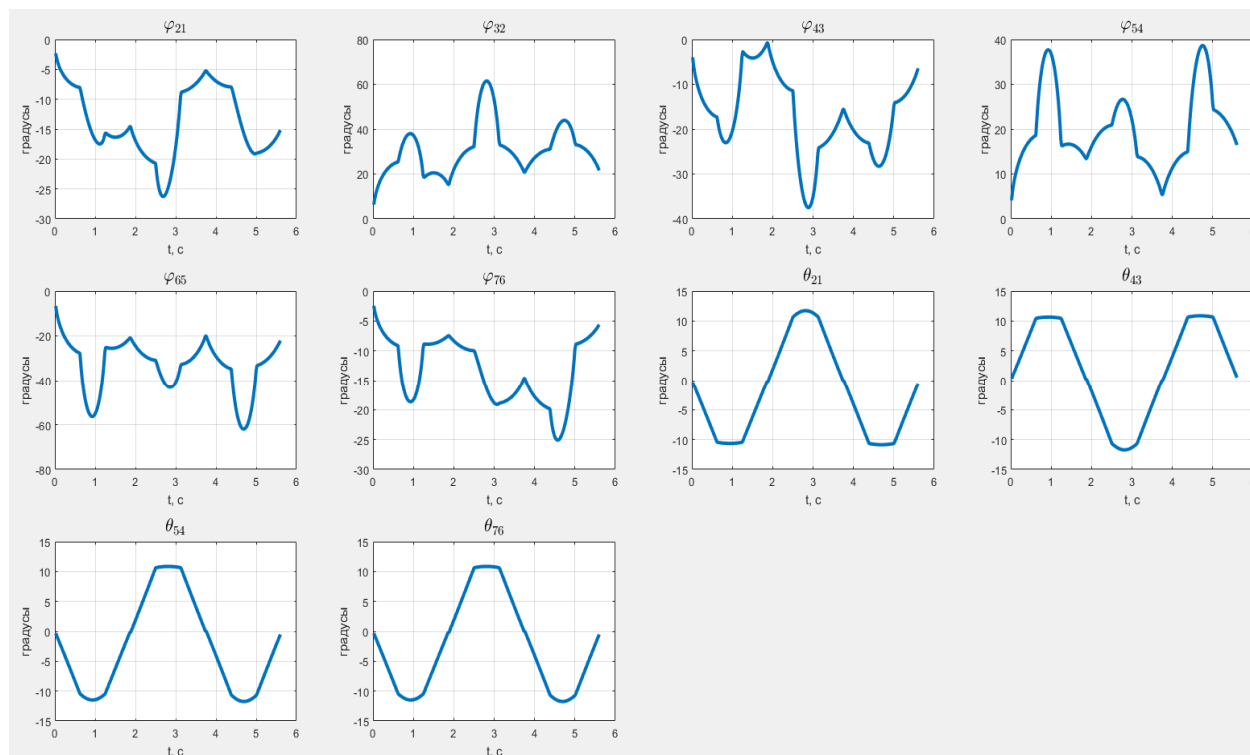


Рис. 5. Графики зависимости относительных углов от времени

Fig. 5. Graphs of dependency of relative angles on time

Тогда, в дискретной форме выражение (3.16) перепишем в виде:

$$\bar{q}^{k+1} = \bar{q}^k + \alpha_k J^{-1} \Delta \bar{\Phi}(t), \quad (21)$$

где $\Delta \bar{\Phi}(t)$ – приращение функции $\bar{\Phi}(t)$ на временном шаге Δt .

Результаты и их обсуждение

Полученное соотношение позволяет находить вектор обобщенных координат \bar{q} на $k+1$ -м временном шаге по известному значению \bar{q} на k -м шаге. Здесь $\alpha_k \leq 1$ – скалярная величина постоянного или переменного шага.

Применяя полученный алгоритм, определим желаемые абсолютные углы, входящие в вектор

$$\bar{q} = (\varphi_2, \varphi_3, \varphi_5, \varphi_6, \theta_2, \theta_6)^T.$$

Отсюда, из абсолютных углов, получим относительные углы, которые определяют работу электроприводов, установленных в шарнирах экзоскелета, воспользовавшись формулами:

$$\varphi_{i,i-1} = \varphi_i - \varphi_{i-1},$$

(22)

$$\theta_{i,i-1} = \theta_i - \theta_{i-1}. \quad (23)$$

Определим вектор относительных углов:

$$\bar{q}_r = (\varphi_{i,i-1}, \theta_{i,i-1})^T. \quad (24)$$

Результаты моделирования представлены в виде графиков, отражающих зависимость относительных углов от времени (рис. 5).

Выводы

В статье исследование ходьбы выполнено с позиций моделирования квазистатической походки с помощью кинематических подходов. Разработанный метод определения задающих углов по-

ворота звеньев экзоскелета для различных положений стопы с учетом положения проекций центра масс используется при разработке алгоритмов управления движением человека в экзоскелете.

Список источников

1. Ergasheva B.I. Lower Limb Exoskeletons: Brief Review // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 6. С. 1153-1158.
2. December. Adaptive control system for exoskeleton performing sit-to-stand motion. S. Jatsun, S. Savin, A. Yatsun, R. Turlapov // In Mechatronics and its Applications (ISMA), 10th International Symposium. 2015. P. 1-6. IEEE.
3. Jatsun S., Savin S., Yatsun A. Improvement of energy consumption for a lower limb exoskeleton through verticalization time optimization // In Control and Automation (MED), 24th Mediterranean Conference. 2016. P. 322-326. IEEE.
4. Jatsun S., Savin S., Yatsun A. Motion Control Algorithm for a Lower Limb Exoskeleton Based on Iterative LQR and ZMP method for trajectory generation.
5. Jatsun S., Savin S., Yatsun A. Study of controlled motion of an exoskeleton performing obstacle avoidance during a single support walking phase // In System Theory, Control and Computing (ICSTCC), 20th International Conference, 2016. P. 113-118. IEEE.
6. Jatsun S., Savin S., Yatsun A. Comparative analysis of global optimization-based controller tuning methods for an exoskeleton performing push recovery // In System Theory, Control and Computing (ICSTCC), 20th International Conference, 2016, P. 107-112. IEEE.
7. Гаврилов С. В., До Т. З. Компьютерное моделирование динамики движения пятистепенного шагающего робота // *Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике*. 2016. №1. С.72-76.
8. Домрачев Т. Б., Яшметов К. С., Лоскутов Ю. В. Кинематика локомоций человека при вставании из седа и посадке на опору // Инженерные кадры – будущее инновационной экономики России. 2017. №. 1. С. 40-42.
9. Лавровский Э. К. Об энергетике походок человека-оператора, осуществляемых при помощи аппарата “пассивный” экзоскелетон // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. 2015. №. 1. С. 9-24.
10. Лушников Б. В., Скрыльников Н. Е. Имитационная модель процесса вертикализации экзоскелета нижних конечностей в среде Simmechanics/MATLAB с учетом

сухого трения в кинематических парах // Вибрационные технологии, мехатроника и управляемые машины: сборник научных статей по материалам XI Международной научно-технической конференции: в 2 ч. / отв. ред. С.Ф. Яцун. Курск, 2014. С. 261-271.

11. Павловский В. Е. [и др.]. Биомехатронный комплекс нейрореабилитации— концепция, конструкция, модели и управление // Препринты Института прикладной математики им. МВ Келдыша РАН. 2014. № 10. С. 111-19.

12. NEUROExos: A powered elbow exoskeleton for physical rehabilitation / N. Vitiello, T. Lenzi, S. Roccella, S. M.M. De Rossi, E. Cattin, F. Giovacchini, F. Vecchi, M. Carrozza. // Robotics, IEEE Transactions on 29, 2013. No. 1. P.220-235.

13. Нейрореабилитационный комплекс: структура, управление движением экзоскелетных модулей / В.Е. Павловский, А.К. Платонов, А.П. Алисейчик, И.А. Орлов, В.В., Павловский А.А. Птахин // Вибрационные технологии, мехатроника и управляемые машины: сборник научных статей по материалам XI Международной научно-технической конференции: в 2 ч. / отв. ред. С.Ф. Яцун. Курск, 2014. С. 312-322.

14. Разработка и имплементация сплайн-алгоритма планирования пути в среде ROS/GAZEBO / Р.О. Лавренов, Е.А. Магид, Ф. Мацуно, М.М. Свинин, Д. Сутагорн // Труды СПИИРАН. 2019. Т. 18. № 1. С. 57-84.

15. Хусаинов Р.Р., Климчик А.С., Магид Е.А. Оптимизация параметров движения двуногого шагающего робота // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2018. № 13 (223). С. 119-125.

16. Zoss A.B., Kazerooni H., Chu A. Biomechanical design of the Berkeley lower extremity exoskeleton (BLEEX) // IEEE/ASME Transactions On Mechatronics. 2006. №11(2). P.128-138.

17. Алисейчик А. П. [и др.] Механика и управление экзоскелетами нижних конечностей для нейрореабилитации спинальных больных // XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики: сборник. Казань, 2015. С. 132-134.

18. Борисов А. В., Розенблат Г. М., Чигарев А. В. Применение матричного метода и рекуррентного алгоритма к модели плоского многосвязного механизма со звеньями переменной длины, движущегося по горизонтальной плоскости // Теоретическая и прикладная механика: научно-техн. сборник. Минск, 2018, С.370-380.

19. Борисов А. В. Механика пространственной модели экзоскелета и антропоморфного робота //Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2018. № 3-4. С. 46-55.

20. Реабилитационный экзоскелет БиоМех: модели, управление, конструкция, эксперименты / А. П. Алисейчик, И. А. Орлов, Е. Ю. Колесниченко, В. Е. Павловский, В. В. Павловский., А. К. Платонов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. №17(10). С. 670-677.

21. Основные клинико-анатомические критерии для разработки экзоскелета верхней конечности / А.А. Воробьев, А.В. Петрухин, О.А. Засыпкина, П.С. Кривоножкина // Журнал анатомии и гистопатологии. 2014. Т. 3. № 1. С. 20-26.

References

1. Ergasheva B.I. Lower Limb Exoskeletons: Brief Review. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki*, 2017, vol. 17, no. 6, pp. 1153-1158.

2. Jatsun S., Savin S., Yatsun A., Turlapov R., Adaptive control system for exoskeleton performing sit-to-stand motion. In *Mechatronics and its Applications (ISMA)*, 10th International Symposium. 2015, pp. 1-6. IEEE.

3. Jatsun S., Savin S., Yatsun A. Improvement of energy consumption for a lower limb exoskeleton through verticalization time optimization. In *Control and Automation (MED)*, 2016 24th Mediterranean Conference 2016, pp. 322-326. IEEE.

4. Jatsun S., Savin S., Yatsun A. Motion Control Algorithm for a Lower Limb Exoskeleton Based on Iterative LQR and ZMP method for trajectory generation.

5. Jatsun S., Savin S., Yatsun A. Study of controlled motion of an exoskeleton performing obstacle avoidance during a single support walking phase. In *System Theory, Control and Computing (ICSTCC)*, 2016 20th International Conference 2016, pp. 113-118. IEEE.

6. Jatsun S., Savin S., Yatsun A., Comparative analysis of global optimization-based controller tuning methods for an exoskeleton performing push recovery. In *System Theory, Control and Computing (ICSTCC)*, 2016, 20th International Conference, pp. 107-112. IEEE.

7. Gavrilov S. V., Zang D. T. Komp'yuternoye modelirovaniye dinamiki dvizheniya pyatistepennogo shagayushchego robota [Computer simulation of the dynamics of motion of a five-step walking robot]. *AEE Avtomatizatsiya v elektroenergetike i elektrotekhnike = AEE Automation in the electric power industry and electrical engineering*, 2016, no. 1, pp. 72-76. (In Russ.).

8. Domrachev T.B., Yashmetkov K.S., Loskutov Yu.V. Kinematika lokomotsiy cheloveka pri vstavaniy iz seda i posadke na oporu [Kinematics of human locomotion when standing up from a gray-haired vehicle and landing on a support]. *Inzhenernye kadry-*

budushchee innovatsionnoi ekonomiki Rossii = Engineering staff – the future of Russia's innovative economy, 2017, no. 1, pp. 40-42 (In Russ.).

9. Lavrovskiy E.K. Ob energetike pokhodki cheloveka-operatora, osushchestvlyayemoy pri pomoshchi apparata “passivnyy” ekzoskeleton [On the energy of the gait of a human operator, carried out using the apparatus “passive” exoskeleton]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Mekhanika tverdogo tela = News of the Russian Academy of Sciences. Solid mechanics*, 2015, no. 1, pp. 9-24 (In Russ.).

10. Lushnikov B.V, Skrylnikov N. Ye. Imitatsionnaya model' protsessa vertika-lizatsii ekzoskeleta nizhnikh konechnostei v srede Simmechanics / MATLAB s uchetom sukhogo treniya v kinemacheskikh parakh [Simulation model of the process of verticalization of the exoskeleton of the lower extremities in Simmechanics / MATLAB medium taking into account dry friction in kinematic pairs]. *Vibratsionnye tekhnologii, mekhatronika i upravlyaemye mashiny. Sbornik nauchnykh statei po materialam XI Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Vibration technologies, mechatronics and controlled machines. Collection of scientific articles based on the Materials of the XI International scientific and technical conference], Kursk, 2016, pp. 261-271 (In Russ.).

11. Pavlovsky V.E. et al. Biomekhatronnyy kompleks neyrorabilitatsii—kontseptsiya, konstruktsiya, modeli i upravleniye [Biomechatronic neurorehabilitation complex — concept, construction, models and control]. *Preprinty Instituta prikladnoy matematiki im. MV Keldysha RAN = Preprints of the Institute of Applied Mathematics named after MV Keldysh RAS*, 2014, no. 10, pp. 111-19 (In Russ.).

12. Vitiello N., Lenzi T., Roccella S., De Rossi S. M.M., Cattin E., Giovacchini F., Vecchi F. Moscow, Carrozza NEUROExos: A powered elbow exoskeleton for physical rehabilitation. *Robotics, IEEE Transactions on* 29, no. 1 (2013), pp.220-235.

13. Pavlovskiy V.Ye., Platonov A.K., Aliseychik A.P., Orlov I.A., Pavlovskiy V.V., Ptakhin A.A. Neyrorabilitatsionnyy kompleks: struktura, upravleniye dvizheniyem ekzoskeletnykh moduley [Neurorehabilitation complex: structure, motion control of exoskeletal modules]. *Vibratsionnye tekhnologii, mekhatronika i upravlyaemye mashiny. Sbornik nauchnykh statei po materialam XI Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Vibration technologies, mechatronics and controlled machines. Collection of scientific articles based on the Materials of the XI International scientific and technical conference]. Kursk, 2014, pp. 312-322 (In Russ.).

14. Lavrenov R.O., Magid Ye.A., Matsuno F., Svinin M.M., Sutakorn D. Razrabotka i implementatsiya splayn-algoritma planirovaniya puti v srede ROS/GAZEBO [Development

and implementation of the spline-path planning algorithm in the ROS / GAZEBO environment].

Trudy SPIIRAN = SPIIRAS Proceedings, 2019, vol. 18, no. 1, pp. 57-84 (In Russ.).

15. Khusainov R.R., Klimchik A.S., Magid Ye.A. Optimizatsiya parametrov dvizheniya dvunogogo shagayushchego robota [Optimization of motion parameters of a biped walking robot]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of the Volgograd State Technical University*, 2018, no. 13 (223), pp. 119-125 (In Russ.).

16. Zoss A.B., Kazerooni H., Chu A., Biomechanical design of the Berkeley lower extremity exoskeleton (BLEEX). *IEEE/ASME Transactions On Mechatronics*, 2006, no. 11(2), pp.128-138.

17. Aliseychik A.P. i dr. Mekhanika i upravleniye ekzoskeletami nizhnikh konechnostey dlya neyroreabilitatsii spinal'nykh bol'nykh [Mechanics and control of exoskeletons of the lower extremities for neurorehabilitation of spinal patients]. *XI Vserossiyskiy s"yezd po fundamental'nykh problemam teoreticheskoy i prikladnoy mekhaniki. Sbornik* [XI All-Russian Congress on Fundamental Problems of Theoretical and Applied Mechanics. Collection]. Kazan, 2015, pp. 132-134 (In Russ.).

18. Borisov A. V., Rozenblat G. M., Chigarev A. V. Primeneniye matrichnogo metoda i rekurrentnogo algoritma k modeli ploskogo mnogozvennogo mekhanizma so zven'yami peremennoy dliny, dvizhushchegosya po gorizontally ploskosti [Application of the matrix method and the recurrent algorithm to the model of a plane-multipurpose mechanism with lines of variable length moving on a horizontal plane]. *Teoreticheskaya i prikladnaya mekhanika. Nauchno-tekhn. sbornik* [Theoretical and applied mechanics. International scientific and technical collection]. Minsk, 2018, pp. 370-380 (In Russ.).

19. Borisov A.V. Mekhanika prostranstvennoy modeli ekzoskeleta i antropomorfnoy robota [The mechanics of the spatial model of the exoskeleton and anthropomorphic robot]. *Voprosy oboronnoy tekhniki. Seriya 16: Tekhnicheskiye sredstva protivodeystviya terrorizmu = Questions of defense technology. Series 16: Technological Tools for Combating Terrorism*, 2018, no. 3-4, pp. 46-55 (In Russ.).

20. Aliseychik A.P. Orlov I.A. Kolesnichenko Ye.Yu. Pavlovskiy V.Ye. Pavlovskiy V.V. Platonov A.K. Reabilitatsionnyy ekzoskelet BioMekh: modeli, upravleniye, konstruktziya, eksperiment [Rehabilitation exoskeleton BioMech: models, management, design, experiments]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravleniye = Mechatronics, automation, control*, 2016, no.17(10), pp. 670-677 (In Russ.).

21. Vorob'yev A.A., Petrukhin A.V., Zasyapkina O.A., Krivonozhkina P.S. Osnovnyye kliniko-anatomicheskiye kriterii dlya razrabotki ekzoskeleta verkhney konechnosti [The

main clinical and anatomical criteria for the development of the exoskeleton of the upper limb]. *Zhurnal anatomii i gistopatologii = Journal of anatomy and histopathology*, 2014, vol. 3, no. 1, pp. 20-26 (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Яцун Сергей Федорович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: teormeh@inbox.ru

Sergei F. Yatsun, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Head of the Department of Mechanics, Mechatronics and Robotics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: teormeh@inbox.ru

Локтионова Оксана Геннадиевна, доктор технических наук, профессор, проректор, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: log@swsu.ru

Oksana G. Loktionova, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Vice-rector, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: log@swsu.ru

Аль Манджи Халиль Хамед Мохаммед, аспирант, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: teormeh@inbox.ru

Al Manji Khalil Hamed Mohammed Hamood, Post-Graduate Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: teormeh@inbox.ru

Яцун Андрей Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: teormeh@inbox.ru

Andrey S. Yatsun, Cand. of Sci. (Engineering), Department of Mechanics, Mechatronics and Robotics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: teormeh@inbox.ru

Карлов Андрей Евгеньевич, аспирант, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: teormeh@inbox.ru

Andrey E. Karlov, Post-Graduate Student, Department of Mechanics, Mechatronics and Robotics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: teormeh@inbox.ru