

Моделирование паттернов походки пациента с повреждением опорно-двигательного аппарата с помощью экзоскелета

С.Ф. Яцун¹ ✉, Х.Х.М. Аль Манджи¹, А.А. Постольный¹, А.С. Яцун¹

² ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»
ул. 50 лет Октября, 94, г. Курск, 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: teormeh@inbox.ru

Резюме

Цель исследования. В статье приведено описание реабилитационного робототехнического комплекса EXOLITE-REHAB, позволяющего осуществлять реабилитационные упражнения нижних конечностей пациентов путем выполнения подъема ноги, вертикализации, приседаний и прочих видов движения. Во многих странах ведутся работы по созданию устройств, позволяющих человеку передвигаться в пространстве при повреждении опорно-двигательного аппарата. Поэтому целью данной статьи является изучение и задание основных закономерностей и алгоритмов на основе математических моделей, описывающих управляемое движение экзоскелета нижних конечностей на примере моделирования движения голеностопного шарнира экзоскелета.

Методы. Ключевой особенностью комплекса является применение копирующей системы управления, которая позволяет обеспечить заданное движение голеностопного сустава человека с высокой степенью точности в широком диапазоне изменения параметров. Применяются методы математического моделирования движения голеностопного сустава с учетом последующего возможного их применения на моделировании движения звеньев экзоскелета.

Результаты. Для моделирования работы робототехнического комплекса применяется кинематическое задание траектории движения голеностопного шарнира. 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.

Заключение. В статье рассмотрен метод применения копирующей системы управления, обладающей достаточной степенью точности копирования траектории. Результаты моделирования копирующей системы управления реабилитационного экзоскелета EXOLITE-REHAB, работающей по разработанному алгоритму, показывают, что она в достаточной степени точности способна повторять требуемую траекторию. В будущем планируется более углубленно исследовать систему на трёхмерной модели с электроприводами.

Ключевые слова: паттерны походки; экзоскелет нижних конечностей; кинематическая модель; датчик силы; голеностопный шарнир.

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

Финансирование: Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-08-00773А.

© Яцун С.Ф., Аль Манджи Х.Х.М., Постольный А.А., Яцун А.С., 2019

Для цитирования: Моделирование паттернов походки пациента с повреждением опорно-двигательного аппарата с помощью экзоскелета / С.Ф. Яцун, Х.Х.М. Аль Манджи, А.А. Постольный, А.С. Яцун // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(6): 176-188. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-176-188>.

Поступила в редакцию 13.06.2019

Подписана в печать 22.07.2019

Опубликована 23.12.2019

Modeling Gait Patterns of a Patient with Orthopedic Injury Using an Exoskeleton

Sergey F. Yatsun ¹ ✉, Al Manji Khalil Hamed Mohammed Hamood ¹,
Alexey A. Postol'nyy ¹, Andrey S. Yatsun ¹

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

✉ e-mail: teormeh@inbox.ru

Abstract

Purpose of research. The paper describes the EXOLITE-REHAB rehabilitation robotic complex which makes it possible to do rehabilitation exercises of lower limbs of patients by performing leg lifting, verticalization, squats and other types of movement. In many countries, research work is underway to create devices that allow a person to move in space when the musculo-skeletal system is damaged. Therefore, the purpose of this article is to study and set the basic regularities and algorithms based on mathematical models describing the controlled movement of the lower limbs exoskeleton by the example of modeling the movement of the exoskeleton's ankle joint.

Methods. The key feature of the complex is the use of a follower-up control system that allows us to provide a prescribed movement of the human ankle joint with a high degree of accuracy in a wide range of parameters' changes. Methods of mathematical modeling of the ankle joint movement are applied, taking into account their subsequent possible use in modeling the movement of exoskeleton links.

Results. A kinematic setting of the ankle joint movement trajectory is used in order to simulate the operation of a robotic system. In order to find the vector of generalized coordinates, the inverse kinematics problem is solved using the vector-matrix method with the application of Jacobian matrix. The results of numerical simulation show high convergence and adequacy of the proposed method.

Conclusion. The article considers the method of using a follower-up control system that has a sufficient degree of accuracy of copying the trajectory. The results of modeling the follower-up control system of the EXOLITE-REHAB rehabilitation exoskeleton, working according to the developed algorithm, show that it is able to repeat the required trajectory with sufficient accuracy. In the future, we plan to study the system more deeply on a three-dimensional model with electric drives.

Keywords: gait patterns; lower limb exoskeleton; kinematic model; force sensor; ankle joint.

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

Funding: Research work was supported by RFBR grant 18-08-00773A.

For citation: Yatsun S. F., Al' Mandzhi K. H. M., Postol'nyy A.A., Yatsun A. S. Modeling Gait Patterns of a Patient with Orthopedic Injury Using an Exoskeleton // *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(6): 176-188 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-176-188>.

Received 13.06.2019

Accepted 22.07.2019

Published 23.12.2019

Введение

В мире сегодня насчитываются десятки миллионов больных с повреждениями опорно-двигательного аппарата. В ряде случаев применение реабилитационных мероприятий с помощью специальных тренажеров [1-7] позволяет восстановить функцию ходьбы пациента, однако так происходит далеко не всегда. Один из способов, позволяющих вернуть пациента к активной жизни, основан на применении индивидуальных экзоскелетов нижних конечностей, позволяющих пациенту осуществлять сложные виды движения, такие как подъем ноги, вертикализация, приседания, ходьба и другие [8-11].

Во многих странах ведутся работы по созданию устройств, позволяющих человеку передвигаться в пространстве при повреждении опорно-двигательного аппарата. В Юго-Западном государственном университете (г. Курск) разработан экзоскелет нижних конечностей, обеспечивающий комфортные условия передвижения пациентов с повреждением опорно-двигательного аппарата, а также позволяющий выполнять различные упражнения для реабилитации пациентов [12, 13]. Кроме того, экзоскелет для выполнения реабилитационных мероприятий позволяет контролировать силы, действующие на мышечную систему человека со стороны аппарата, чтобы исключить возможные травмы, возникающие при наличии

у пациента спастики и контрактуры. Для этого экзоскелет оснащен датчиками, измеряющими силы, возникающие при взаимодействии человека и экзоскелета.

Материалы и методы

1. Расчётная схема

Рассмотрим моделирование процесса подъема ноги, одного из важнейших упражнений, выполняемых при реабилитации нижних конечностей. Для этого предлагается использовать EXOLITE-REHAB [14-17], общий вид которого приведен на рис.1. Экзоскелет EXOLITE состоит из стоп 1,7; голеней 2,6; бедер 3,5; спины 4, которые связаны между собой активными шарнирами. Пациент закрепляется в экзоскелете с помощью манжет. На этапе подготовки к ходьбе необходимо отработать все виды движения, сопутствующие ходьбе, поэтому врач-реабилитолог выбирает один из режимов реабилитационных упражнений. Например, подъем ноги на заданную высоту, удержание на заданной высоте стопы и далее опускание ноги в исходную точку. Для описания этого упражнения рассмотрим движение точки А, принадлежащей голеностопному суставу пациента (ГСС), а точка В, задающая движение ноги, принадлежит, соответственно, голеностопному шарниру экзоскелета (ГСШ).

Расчётная схема модели ноги пациента в экзоскелете показана на рис. 2.

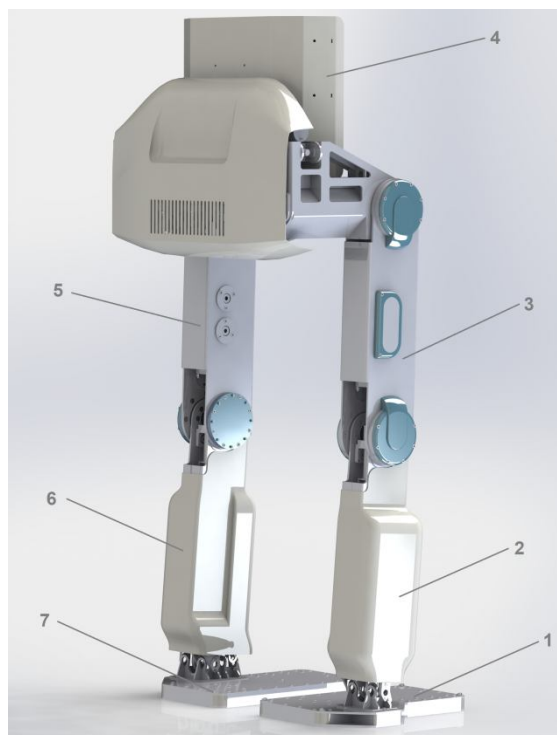


Рис.1. Общий вид реабилитационного экзоскелета EXOLITE-REHAV

Fig. 1. General view of the rehabilitation exoskeleton EXOLITE-REHAV

Здесь приняты следующие обозначения: \vec{r}_B – радиус-вектор точки В голеностопного шарнира экзоскелета; \vec{r}_A – радиус-вектор точки А, определяющий положение голеностопного сустава пациента, P – сила, возникающая между человеком и экзоскелетом в области голеностопного сустава; 1 – стопа экзоскелета; 2 – голень экзоскелета; 3 – бедро экзоскелета; 4 – тазобедренный сустав; 8 – датчик, измеряющий силу взаимодействия между пациентом и экзоскелетом в области голеностопного сустава; 9 – бедро пациента; 10 – голень пациента; 11 – стопа пациента; $q_1 >$ – абсолютный угол поворота бедра и q_2 – угол поворота голени относительно бедра. Важно, что угол $q_2 > 0$. В

случае, когда $q_2 = 0$ имеет место особое положение рассматриваемой системы, поэтому далее этот режим не рассматривается. B_1, B_2 – точки, определяющие начало и конец траектории движения точки B .

2. Кинематическая модель ноги пациента

Положение точки А в системе координат XOY положение точки А можно определить с помощью координат $\vec{r}_A = (X_A, Y_A)^T$, которые определим по формулам:

$$\begin{cases} X_A = X_0 + L_2 \cdot \sin(q_1 + q_2) + L_2 \cdot \sin q_1 \\ Y_A = Y_0 - L_1 \cdot \cos(q_1) - L_2 \cdot \cos(q_1 + q_2), \end{cases} \quad (1)$$

где X_0, Y_0 – положение тазобедренного сустава в выбранной системе координат.

3. Задание траектории движения голеностопного шарнира экзоскелета (ГШЭ)

Для задания положения точки B , определяющей положение голеностопного шарнира экзоскелета (ГШЭ), удобно использовать локальные координатные системы, соответственно, для правой стопы $B_2H_2l_2$ и для левой – $B_6H_6l_6$. Радиус-векторы, определяющие положение точек A_i в локальных координатных системах, имеют вид

$$\vec{r}_{BiAi} = [l_i, 0, h_i]^T. \quad (2)$$

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

$$l_i = \sum_{i=0}^n a_i t^i; \quad h_i = \sum_{i=0}^n b_i t^i. \quad (3)$$

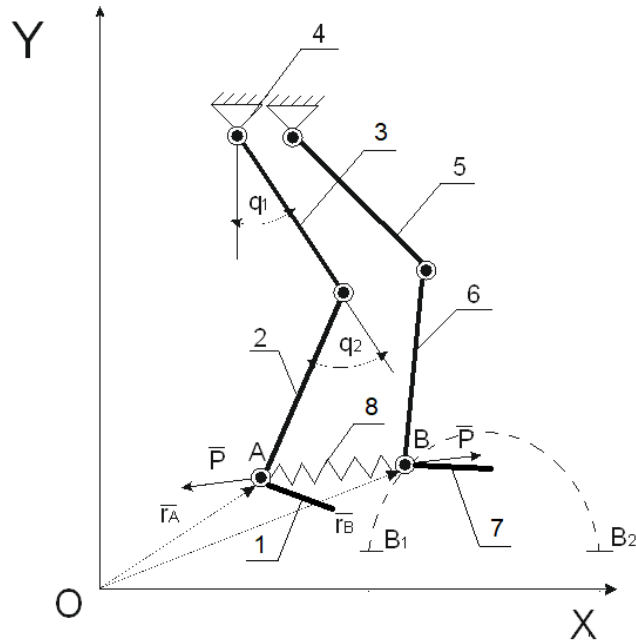


Рис. 2. Расчётная схема ноги пациента в экзоскелете

Fig. 2. The design diagram of the patient's leg in the exoskeleton

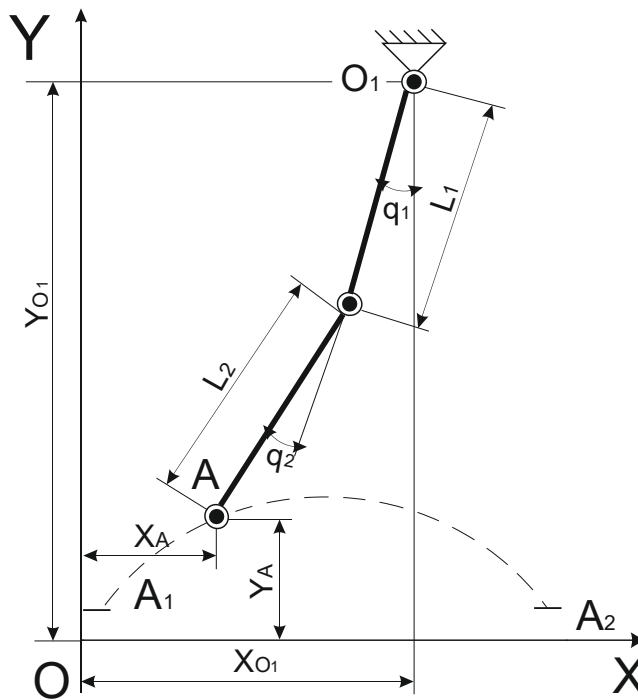


Рис. 3. Кинематическая модель ноги пациента

Fig. 3. Kinematic model of the patient's leg

Траектория движения $h_i = h_i(l_i)$ может быть определена из (4).

Радиус-векторы, определяющие положение точек B_i

$$\vec{r}_{OB_i} = [x_{B_i}, y_{B_i}, 0]^T. \quad (4)$$

На рис. 4 показан пример траектории движения точки B . Рассматриваемая траектория состоит из трех участков.

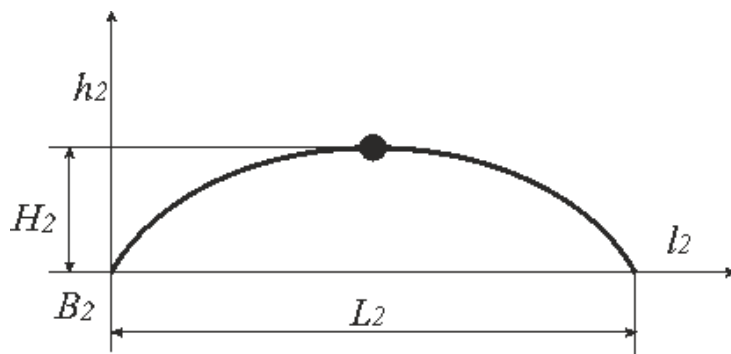


Рис. 4. Траектории движения стоп при движении с отрывом от опорной поверхности

Fig. 4. Trajectories of the feet when moving with a margin from the supporting surface

На первом происходит подъем стопы, на втором – стопа устанавливается на заданной высоте, на третьем участке происходит опускание стопы с условием, что в точке контакта с опорной поверхностью скорость будет равна нулю. Будем считать, что H_2 – высота подъема голеностопного шарнира; L_2 – длина шага. На значения этих параметров накладываются ограничения $H_2 < H_2^m$; $L_2 < L_2^m$, определяемые предельными значениями углов в соответствующих шарнирах. Уравнения движения голеностопа представим в виде:

$$l_2(t) = v_2 \cdot t, \tag{5}$$

$$h_2(t) = 4 \frac{H_2}{L_2} \cdot v_2 \cdot t - 4 \frac{H_2}{L_2^2} \cdot v_2^2 \cdot t^2, \tag{6}$$

что соответствует траектории стопы (см. рис.4).

$$h_2 = a_2 + b_2 \cdot l_2 + c_2 \cdot l_2^2. \tag{7}$$

Для нахождения постоянных в уравнении (7) запишем граничные условия в виде:

$$\text{Если } h_2 = 0, \text{ то } l_2 = 0 \tag{8}$$

$$l_2 = L_2. \tag{9}$$

$$h_2 = H, \text{ то } l_2 = \frac{L_2}{2}. \tag{10}$$

Подставляя (8), (9), (10) в (3), получим:

$$\begin{cases} H_2 = a_2 + b_2 \cdot \frac{L_2}{2} + c_2 \cdot \frac{L_2^2}{4} \\ 0 = a_2 \\ 0 = a_2 + b_2 \cdot L_2 + c_2 \cdot L_2^2. \end{cases} \tag{11}$$

$$\text{Отсюда: } c_2 = -\frac{4H}{L_2^2}; b_2 = \frac{4H}{L_2}.$$

Уравнение траектории движения стопы при отрыве от опорной поверхности имеет вид

$$h_2 = 4 \frac{H_2}{L_2} \cdot l_2 - 4 \frac{H_2}{L_2^2} \cdot l_2^2. \tag{12}$$

Предположим, что стопа (например, правая) движется равномерно, тогда $l_2 = v_2 t$, а высота подъема стопы изменяется по закону

$$h_2 = 4 \frac{H_2}{L_2} v_2 t - 4 \frac{H_2}{L_2^2} v_2^2 t^2. \tag{13}$$

Если выполняется упражнение ходьба на месте, то в этом случае $v_2 = 0$ и движение голеностопа происходит только в вертикальном направлении по координате $h_2(t)$. Для определения положения

ноги пациента, будем искать вектор обобщенных координат $\bar{q} = (q_1, q_2)^T$, задающий движение звеньев, соответствующих заданному положению центра масс экзоскелета и стоп в каждый момент времени.

4. Определение положения ноги пациента

Для нахождения $\bar{q} = (q_1, q_2)^T$ необходимо решить обратную задачу кинематики (ОЗК) [1, 18, 19, 20]. Определяем начальные условия для точек A и B .

$$J(q) = \begin{bmatrix} L_2 \cdot \cos(q_1 + q_2) + L_1 \cdot \cos(q_1) & L_2 \cdot \cos(q_1 + q_2) \\ L_2 \cdot \sin(q_1 + q_2) + L_1 \cdot \sin(q_1) & L_2 \cdot \sin(q_1 + q_2) \end{bmatrix};$$

$$J(q)^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{5 \cdot \sin(q_1 + q_2)}{(2 \cdot \sin(q_2))} & \frac{-5 \cdot \cos(q_1 + q_2)}{(2 \cdot \sin(q_2))} \\ \frac{5 \cdot \sin(q_1 + q_2) + 5 \cdot \sin(q_1)}{2 \cdot \sin(q_2)} & \frac{5 \cdot \cos(q_1 + q_2) + 5 \cdot \cos(q_1)}{2 \cdot \sin(q_2)} \end{bmatrix}.$$

Расчёт компонентов вектора силы P производится по следующим формулам:

$$P_X = C \cdot (X_B - X_A),$$

$$P_Y = C \cdot (Y_B - Y_A), \quad (15)$$

где $X_B; Y_B$ – координаты вектора r_B ; $X_A; Y_A$ – координаты вектора r_A ; C – жёсткость пружины по координатам X и Y соответственно.

Тогда вектор силы P находится следующим образом:

$$P = \sqrt{P_X^2 + P_Y^2}. \quad (16)$$

Затем происходит расчёт $\cos(\gamma)$ и $\sin(\gamma)$, где γ – угол между голенью и пружиной.

Задаем движение точки B с помощью уравнений (5), (6).

Уравнение для решения ОЗК имеет следующий вид:

$$\bar{q}^{k+1} = \bar{q}^k + \alpha_\kappa J^{-1} \Delta \bar{\Phi}(t), \quad (14)$$

где $\Delta \bar{\Phi}(t)$ – приращение функции $\bar{\Phi}(t)$

на временном шаге Δt , где $J(q) = \frac{\partial \bar{r}_A}{\partial \bar{q}}$ –

матрица Якоби, $\bar{\Phi}(t) = [l_i(t), y_i(t), h_i(t)]^T$, где $i=2$ или 6 .

Ниже представлена прямая и обратная матрицы Якоби:

Расчёт этих значений проводится по следующим формулам:

$$\cos(\gamma) = \frac{P_Y}{\sqrt{P_X^2 + P_Y^2}}, \quad \sin(\gamma) = \frac{P_X}{\sqrt{P_X^2 + P_Y^2}}, \quad (17)$$

где $\cos(\gamma)$ – косинус угла между голенью и пружиной, $\sin(\gamma)$ – синус угла между голенью и пружиной.

Расчёт компонентов вектора r_A производится следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} X_{A_i} = X_{A_{i-1}} + (k_p \cdot P) \cdot \Delta t \cdot \sin(\gamma), \\ Y_{A_i} = Y_{A_{i-1}} + (k_p \cdot P) \cdot \Delta t \cdot \cos(\gamma), \end{cases} \quad (18)$$

где X_{A_i} – координата точки A по оси X , Y_{A_i} – координата точки A по оси Y , $X_{A_{i-1}}, Y_{A_{i-1}}$ – предыдущие значения координат точки A ; k_p – регулировочный коэффициент; P – сила, Δt – временной шаг; γ – угол между пружиной и голенью.

Результаты и их обсуждение

Моделирование проводилось со следующими входными параметрами:

$C = 1000$ Н/м – коэффициент жёсткости пружины; $k_p = 0.2$ – коэффициент; Начальные и конечные скорости

прохождения траектории = 0; $\Delta t = 0.01$ с – шаг времени. В результате работы алгоритма механизм повторил заданную траекторию с достаточной точностью (рис. 5).

График изменения силы P представлен на рис. 6.

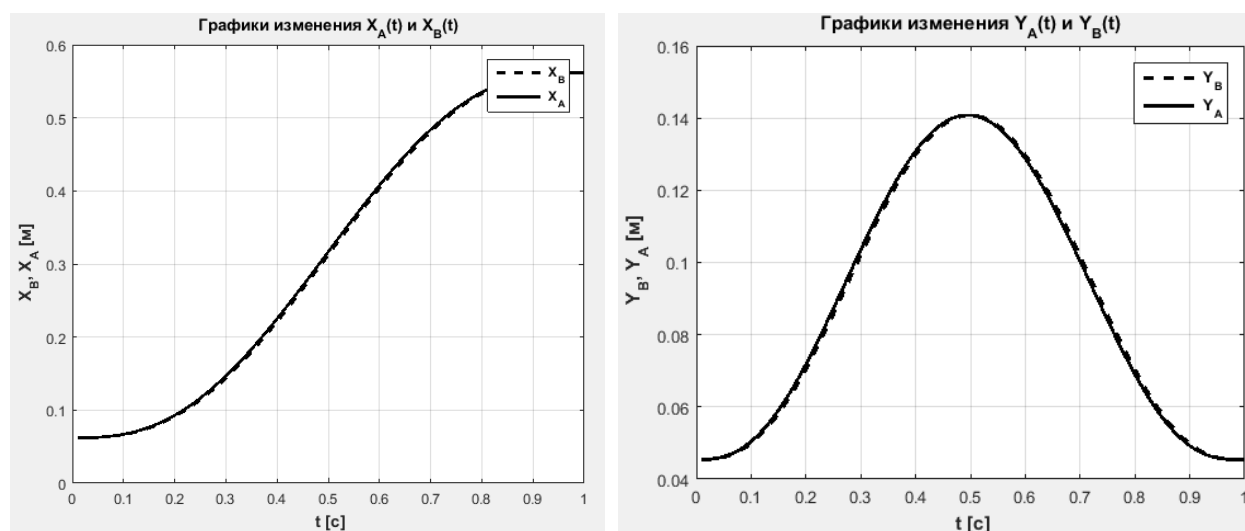


Рис. 5. Сравнение заданной траектории с полученной (x_A – заданная, x_B – полученная)

Fig. 5. Comparison of a given trajectory with the resulting one (x_A – given, x_B – received)

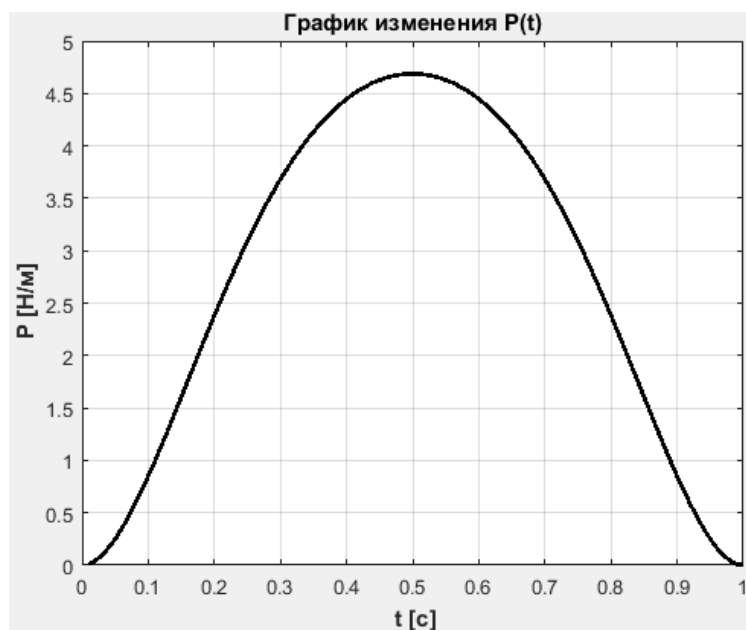


Рис. 6. График изменения силы P в зависимости от времени

Fig. 6. Chart of P force change depending on time

Выводы

Результаты моделирования копирующей системы управления реабилитационного экзоскелета EXOLITE-REHAB, работающей по разработанному алго-

ритму, показывают, что она в достаточной степени точности способна повторять требуемую траекторию. В будущем планируется более углубленно исследовать систему на трёхмерной модели с электроприводами.

Список литературы

1. 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 докладов. Казань, 2015. Р. 132-134.
2. Реабилитационный экзоскелет БиоМех: модели, управление, конструкция / 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.
3. Борисов А. В., Розенблат Г. М., Чигарев А. В. Применение матричного метода и рекуррентного алгоритма к модели плоского многозвенного механизма со звеньями переменной длины, движущегося по горизонтальной плоскости // Теоретическая и прикладная механика: международный научно-технический сборник / пред. редкол. А. В. Чигарев. Минск, 2018. Вып. 33. С. 370-380 .
4. 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.
5. Гаврилов С. В., Занг Д. Т. Компьютерное моделирование динамики движения пятистепенного шагающего робота // АЭЭ Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике. Пермь, 2016.
6. Домрачев Т.Б., Яшметков 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.
7. Лавровский Э.К. Об энергетике походки человека-оператора, осуществляемых при помощи аппарата “пассивный” экзоскелетон // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. 2015. № 1. С. 9-24.
8. Contreras-Vidal, Jose L., and Robert G. Grossman. "NeuroRex: A clinical neural interface roadmap for EEG-based brain machine interfaces to a lower body robotic exoskeleton." Engineering in medicine and biology society (EMBC), 2013 35th annual international conference of the IEEE. IEEE, 2013.

9. Kiguchi Kazuo, Takakazu Tanaka, and Toshio Fukuda. "Neuro-fuzzy control of a robotic exoskeleton with EMG signals." *Fuzzy Systems, IEEE Transactions on* 12.4, 2004. P. 481-490.

10. Kazerooni H., Steger R., Huang L. Hybrid control of the Berkeley lower extremity exoskeleton (BLEEX) // *The International Journal of Robotics Research*. 2006, May 1. no. 25. P.561-573.

11. Kazerooni H., Racine JL., Huang L., Steger R. On the control of the Berkeley lower extremity exoskeleton (BLEEX) // *In Robotics and automation, 2005. ICRA 2005. Proceedings of the 2005 IEEE international conference*. 2005. Apr 18. P. 4353-4360. IEEE.

12. Steger R, Kim SH, Kazerooni H. Control scheme and networked control architecture for the Berkeley lower extremity exoskeleton (BLEEX) // *In Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006. Proceedings 2006 IEEE International Conference*. 2006, May 15. P. 3469-3476. IEEE.

13. Study of Controlled Motion of Exoskeleton Moving from Sitting to Standing Position / S. Jatsun, S. Savin, A. Yatsun, A. Malchikov // *In Advances in Robot Design and Intelligent Control*. 2016, P. 165-172. Springer International Publishing.

14. Adaptive control system for exoskeleton performing sit-to-stand motion / S. Jatsun, S. Savin, A. Yatsun, R. Turlapov // *In Mechatronics and its Applications (ISMA), 2015 10th International Symposium*. 2015. Dec 8. P. 1-6. IEEE.

15. Vorochaeva L.Yu., Savin S.I., Yatsun A.S. An investigation of motion of a crawling robot with supports with controllable friction // *ANS Conference Series: Scientific Heritage of Sergey A. Chaplygin (Nonholonomic Mechanics, Vortex Structures and Hydrodynamics) Book of Abstracts*. 2019. P. 207-209.

16. Jatsun S.F., Yatsun A.S. Criterion of the rehabilitation process effectiveness on the basis of biomechatronic system EXOLITE REHAB // *Proceedings of IEEE Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts, ARSO Cep. 2018 IEEE Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts, ARSO 2018*". 2019. P. 105-110.

17. Structure Design and Dynamic Model Analysis of Multi-degree-of-freedom Exoskeleton / W. Yang, Y. Yang, W. Liu, R. Wang // *In 2015 International Conference on Mechatronics, Electronic, Industrial and Control Engineering (MEIC-15)*. Atlantis Press, 2015.

18. Yatsun A., Jatsun S. Modeling quasi-static gait of a person wearing lower limb exoskeleton *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2019. № 9783319956299. P. 565-575.

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

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

References

1. 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'nym problemam teoreticheskoy i prikladnoy mekhaniki. Sbornik dokladov* [XI All-Russian Congress on Fundamental Problems of Theoretical and Applied Mechanics. Collection of reports]. Kazan, 2015, pp. 132-134 (In Russ.).

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

3. 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 gorizontальной 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. Mezhdunarodnyi nauchno-tekhnicheskii sbornik* [Theoretical and applied mechanics. International scientific and technical collection]. Minsk, 2018, vol. 33, pp. 370-380 (In Russ.).

4. 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.).

5. Domrachev T.B. Yashmetkov K.S. Loskutov Yu.V. Kinematika lokomotsiy cheloveka pri vstavanii iz seda i posadke na oporu [Kinematics of human locomotion when standing up from a gray-haired vehicle and landing on a support]. *AEE Avtomatizatsiya v elektroenergetike i elektrotekhnike* [AEE Automation in the electric power industry and electrical engineering]. Perm'. Apr. 2016. (In Russ.).

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

7. 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 akade-*

mii nauk. Mekhanika tverdogo tela = News of the Russian Academy of Sciences. Solid mechanics, 2015, no. 1, pp. 9-24 (In Russ.).

8. Contreras-Vidal, Jose L., Robert G. Grossman. "NeuroRex: A clinical neural interface roadmap for EEG-based brain machine interfaces to a lower body robotic exoskeleton." *Engineering in medicine and biology society (EMBC), 2013 35th annual international conference of the IEEE. IEEE*, 2013.

9. Kiguchi Kazuo, Takakazu Tanaka, and Toshio Fukuda. "Neuro-fuzzy control of a robotic exoskeleton with EMG signals." *Fuzzy Systems, IEEE Transactions on* 12.4, 2004, pp. 481-490.

10. Kazerooni H, Steger R, Huang L. Hybrid control of the Berkeley lower extremity exoskeleton (BLEEX). *The International Journal of Robotics Research*. 2006, May 1, no. 25(5-6), pp.561-73.

11. Kazerooni H., Racine JL., Huang L., Steger R. On the control of the Berkeley lower extremity exoskeleton (BLEEX). In *Robotics and automation, 2005. ICRA 2005. Proceedings of the 2005 IEEE international conference, 2005, Apr 18*, pp. 4353-4360. IEEE.

12. Steger R., Kim SH, Kazerooni H. Control scheme and networked control architecture for the Berkeley lower extremity exoskeleton (BLEEX). In *Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006. Proceedings 2006 IEEE International Conference on 2006 May 15*, pp. 3469-3476. IEEE.

13. Jatsun S., Savin S., Yatsun A., Malchikov A. Study of Controlled Motion of Exoskeleton Moving from Sitting to Standing Position. In *Advances in Robot Design and Intelligent Control, 2016*, pp. 165-172. Springer International Publishing.

14. Jatsun S., Savin S., Yatsun A., Turlapov R. Adaptive control system for exoskeleton performing sit-to-stand motion. In *Mechatronics and its Applications (ISMA), 2015 10th International Symposium on 2015 Dec 8*, pp. 1-6. IEEE.

15. Vorochaeva L.Yu., Savin S.I., Yatsun A.S. An investigation of motion of a crawling robot with supports with controllable friction В книге: *ANS Conference Series: Scientific Heritage of Sergey A. Chaplygin (Nonholonomic Mechanics, Vortex Structures and Hydrodynamics) Book of Abstracts, 2019*, pp. 207-209.

16. Jatsun S.F., Yatsun A.S. Criterion of the rehabilitation process effectiveness on the basis of biomechatronic system EXOLITE REHAB В сборнике: *Proceedings of IEEE Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts, ARSO Сеп. 2018 IEEE Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts, ARSO 2018"*, 2019, pp. 105-110.

17. Yang W. Structure Design and Dynamic Model Analysis of Multi-degree-of-freedom Exoskeleton / W. Yang, Y. Yang, W. Liu, R. Wang. In *2015 International Conference on Mechatronics, Electronic, Industrial and Control Engineering (MEIC-15)*. Atlantis Press Publ., 2015.

18. Yatsun A., Jatsun S. Modeling quasi-static gait of a person wearing lower limb exoskeleton Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2019, № 9783319956299, pp. 565-575.

19. 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.

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

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

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, Department of Mechanics, Mechatronics and Robotics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: teormeh@inbox.ru

Постольный Алексей Александрович, аспирант, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: teormeh@inbox.ru

Alexey A. Postolny, Post-Graduate Student, Department of Mechanics, Mechatronics and Robotics, 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