
МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

**MECHANICAL ENGINEERING
AND ENGINEERING SCIENCE**

УДК 62-52

DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-2-8-17

Подъем груза в экзоскелете с гравитационной компенсацией**С.Ф. Яцун ✉, В.М. Антипов, А. Е. Карлов,
Аль Манджи Хамиль Хамед Мохаммед**

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», Россия, 305040, Курск, ул. 50 лет Октября, 94

✉ e-mail: teormeh@inbox.ru

Резюме

Цель исследования. В настоящее время широкое распространение получают экзоскелеты, существенно повышающие возможности человека в части облегчения движения, переноса тяжестей и различных видов деятельности, требующих значительных усилий. Особенно эффективными оказываются экзоскелеты, позволяющие осуществлять сложные виды движения как нижних, так и верхних конечностей, что существенно расширяет возможности человека при выполнении разгрузочно-погрузочных работ. Сравнительно недавно начались разработки экзоскелетов, в которых находят применение элементы гравитационной компенсации, поэтому проведение исследований энергетических затрат в процессе подъема груза и изучение влияния гравитационных компенсаторов на величину моментов, создаваемых электроприводами бедренного и коленного шарниров, являются актуальными и определяются из данной работы.

Методы. Для решения поставленных задач использовались методы системного анализа, проектирования биотехнических систем, теории управления, теории механизмов и машин, методы математического моделирования динамических систем, методы оптимального планирования и проектирования. При создании программных продуктов использованы математические пакеты Matlab/Simulink.

Результаты. Показано, что применение гравитационных компенсаторов позволяет значительно снизить нагрузку на электроприводы. Движение груза происходит за счет работы двигателей, расположенных в зоне голеностопного, коленного и бедренного суставов. Так как при подъеме груза движение экзоскелета происходит в сагиттальной плоскости, то положение звеньев экзоскелета в пространстве определяется четырьмя независимыми параметрами.

Заключение. Разработана математическая модель подъема груза человеком в экзоскелете. Выполнено математическое моделирование процесса подъема груза с помощью электроприводов экзоскелета. Особое внимание уделено изучению влияния гравитационных компенсаторов на величину моментов, создаваемых электроприводами бедренного и коленного шарниров. Показано, что применение гравитационных компенсаторов позволяет значительно снизить нагрузку на электроприводы. Также проведено исследование энергетических затрат в процессе подъема груза.

Ключевые слова: экзоскелет; гравитационная компенсация; подъем груза; математическая модель.

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

© Яцун С.Ф., Антипов В.М., Карлов А. Е., Аль Манджи Хамиль Хамед Мохаммед, 2019

Для цитирования: Подъем груза в экзоскелете с гравитационной компенсацией / С.Ф. Яцун, В.М. Антипов, А. Е. Карлов, Аль Манджи Хамиль Хамед Мохаммед // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019. Т. 23, № 2. С. 8-17. DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-2-8-17.

UDC 62-52

DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-2-8-17

Load Lifting in the Exoskeleton with Gravity Compensation

Sergey F. Yatsun ✉, Vladimir M. Antipov, Andrey Ye. Karlov,
Al Manji Hamil Hamed Mohammed

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

✉ e-mail: teormeh@inbox.ru

Abstract

Purpose of research. Currently, exoskeletons are getting widespread use. They enhance human capabilities in terms of ease of movement, carrying loads and different types of activities that require considerable effort. Especially effective are those exoskeletons that make it possible to make complex types of movement of both for the lower and upper limbs, which significantly expands the capabilities of a person when performing loading and unloading operations. Relatively recently, they have started the development of exoskeletons which use the elements of gravity compensation. Therefore, the study of energy costs in the process of load lifting and the study of gravitational compensators influence on the magnitude of moments made by the electric drives of the femoral and knee joints, is relevant and is revealed in this paper.

Methods. Methods of system analysis, design of biotechnical systems, control theory, theory of mechanisms and machines, methods of mathematical modeling of dynamic systems, methods of optimal planning and design were used to solve the problems. Mathematical packages Matlab/Simulink were used to make software products.

Results. The study shows that the use of gravity compensators can significantly reduce the load on electrodrives. The movement of load is due to the operation of engines located in the area of ankle, knee and thigh joints. Since the movement of the exoskeleton occurs in the sagittal plane during load lifting, the position of the exoskeleton links in space is determined by four independent parameters.

Conclusion. The mathematical model of load lifting by a man in an exoskeleton has been developed. Mathematical modeling of the process of load lifting with the help of exoskeleton electric drives has been made. A special attention is paid to the study of gravitational compensators influence on the magnitude of moments created by the electric drives of femoral and knee joints. It shows that the use of gravity compensators can significantly reduce the load on electric drives. Also, the study of energy costs in the process of load lifting has been conducted.

Keywords: exoskeleton; gravity compensation; load lifting; mathematical model.

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

For citation: Yatsun S. F., Antipov V. M., Karlov A. Ye., Al Manji Hamil Hamed Mohammed. Load Lifting in the Exoskeleton with Gravity Compensation. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(2): 8-17 (In Russ.). DOI: 10.21869/2223-1560-2019-23-2-8-17.

Введение

В настоящее время широкое распространение получают экзоскелеты Fortis,

HULC, HAL, Panasonic и другие, существенно повышающие возможности человека в части облегчения движения, пе-

реноса тяжестей и различных видов деятельности, требующих значительных усилий. Особенно эффективными оказываются экзоскелеты, позволяющие осуществлять сложные виды движения как нижних, так и верхних конечностей [1-3], что существенно расширяет возможности человека при выполнении разгрузочно-погрузочных работ.

Сравнительно недавно начались разработки экзоскелетов, в которых находят применение элементы гравитационной компенсации. Термин «гравитационная компенсация» и его английский аналог «gravity compensation» используются для обозначения свойства отдельных звеньев механизма иметь статически устойчивые положения, не зависящие от вертикального перемещения звеньев. Для внешнего наблюдателя движение этих звеньев механизма выглядит так, как если бы на них не действовало гравитационное поле.

В таких экзоскелетах одно или несколько его звеньев имеют статически устойчивые положения, не зависящие от их вертикального перемещения (под вертикальным перемещением здесь и далее подразумевается движение вдоль линий гравитационного поля). При этом подразумевается, что для сохранения указанного свойства механизму не требуется работа приводов.

Материалы и методы решения задачи

Механизмы с гравитационной компенсацией делятся на три типа:

1. Механизм экзоскелета с дополнительными массами для изменения положения центра масс.

2. Механизм экзоскелета с упругими элементами для создания сил, компенсирующих силу тяжести.

3. Механизмы, использующие трение в шарнирных соединениях и приводах.

Механизмы, относящиеся к первому типу [1], проектируются таким образом, чтобы сила тяжести, действующая на звено, для которого проводится гравитационная компенсация, проходила через ось вращения, например через шарнирное соединение со стойкой. Для подобных механизмов характерны ряд преимуществ, связанных с высокой надежностью работы. Недостатком такого рода механизмов является увеличение массы звеньев, что приводит к увеличению их инерционности и оказывает негативное влияние на работу экзоскелета [1-2].

Механизмы второго типа являются наиболее перспективными [1-3]. Для подобных механизмов характерны ряд преимуществ, связанных с достижением результата при минимальном увеличении веса конструкции экзоскелета.

Механизмы, относящиеся к третьей категории, также широко применяются в робототехнике, здесь статическое равновесие положения механизма достигается за счет применения управляемой силы трения в шарнирных соединениях и приводах. Недостатком устройств такого типа является то, что в процессе эксплуатации механизма

фрикционные свойства отдельных пар трения могут изменяться, что приводит к потере механизмом свойств гравитационной компенсации [2].

2. Результаты и их обсуждение

Рассмотрим схему подъема груза человеком с использованием экзоскелета (рис. 1). На данном этапе рассмотрим гравитационный механизм второго типа. Представим расчетную схему человека в экзоскелете в виде многосвязной системы твердых тел, связанных между собой шарнирами. Предполагается, что нижние конечности человека и звенья экзоскелета движутся одинаково и представляют 7 твердых тел, связанных между собой цилиндрическими шарнирами, оснащенными электроприводами. Руки расположены вертикально и удерживают груз массой m_8 . Стопы че-

ловека не отрываются от опорной поверхности.

Движение груза происходит за счет работы электроприводов, расположенных в зоне голеностопного, коленного и бедренного суставов. Так как при подъеме груза движение экзоскелета происходит в сагиттальной плоскости, то положение звеньев экзоскелета в пространстве можно определить с помощью 4 независимых параметров.

Таким образом, четыре угла задают положение экзоскелета.

$$\bar{q} = (\varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_6)^T. \quad (1)$$

Будем искать вектор обобщенных координат \bar{q} . Пусть дана блочная вектор-функция $\bar{F}(\bar{q})$, которая определяет значения, соответствующие проекциям центра масс и груза в зависимости от обобщенных координат \bar{q} .

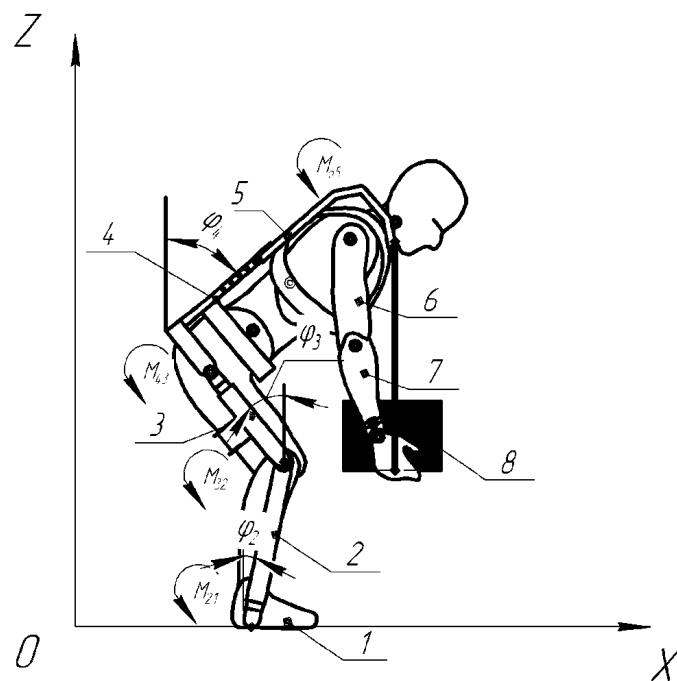


Рис. 1. Схема человека в экзоскелете при подъеме груза

$$\bar{F}(\bar{q}) = [\bar{S}_{80}(\bar{q}), \bar{r}_c(\bar{q})]^T. \quad (2)$$

Введем также вектор-функцию:

$$\bar{\Phi}(t) = [x_8(t), y_8(t), x_c(t), y_c(t)]^T, \quad (3)$$

которая определяет положение центра масс и груза на заданных траекториях. Так как

$$\bar{F}(\bar{q}) = \bar{\Phi}(t), \quad (4)$$

то получим уравнение (3), из решения которого можно определить значения вектора \bar{q} по заданной функции $\bar{\Phi}(t)$. Для получения решения этого уравнения продифференцируем (3) по времени:

$$\frac{\partial \bar{F}}{\partial \bar{q}} \dot{\bar{q}} = \dot{\bar{\Phi}}(t). \quad (5)$$

Отсюда,

$$\dot{\bar{q}} = \left(\frac{\partial \bar{F}}{\partial \bar{q}} \right)^{-1} \dot{\bar{\Phi}}(t). \quad (6)$$

Обозначим обратную матрицу Якоби

$$J^{-1} = \left(\frac{\partial \bar{F}}{\partial \bar{q}} \right)^{-1}. \quad (7)$$

Тогда, в дискретной форме выражение (6) можно представить в виде:

$$\bar{q}^{k+1} = \bar{q}^k + \alpha_k J^{-1} \Delta \bar{\Phi}(t). \quad (8)$$

Все четыре этапа подъема груза экзоскелетом изображены на рисунке 2.

Зависимости абсолютных углов поворота звеньев (спина, бедро, голень) получены в результате решения обратной задачи кинематики (рис. 3).

Далее, зададим изменение нормальной реакции (рис. 4) в виде полинома третьего порядка:

$$N_{80} = (0, \sum_{i=0}^3 k_i t^i)^T. \quad (9)$$

Подъем груза разделим на четыре этапа. Первый – подход к грузу, второй – захват груза руками, третий – отрыв груза от поверхности, четвертый – подъем груза.

Силы и моменты, действующие на груз, представим в виде двух векторов.

$$\bar{\Phi}_{80} = (R_{80}, \bar{M}_{80})^T. \quad (10)$$

$$\bar{\Phi}_{87} = (F_{87}, \bar{M}_{87})^T.$$

(11)

Эти векторы равны между собой

$$\bar{\Phi}_{80} = \bar{\Phi}_{87}. \quad (12)$$

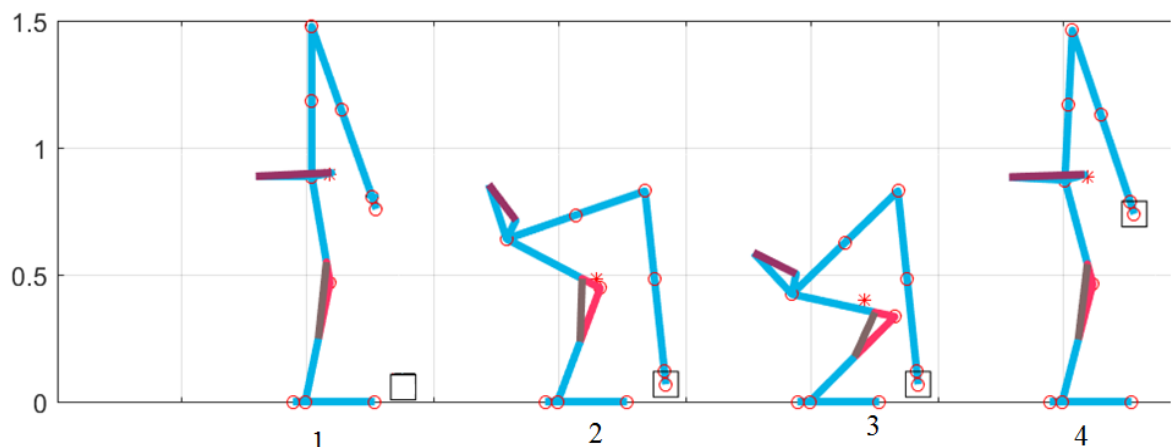


Рис. 2. Положение человека в экзоскелете в различные моменты времени

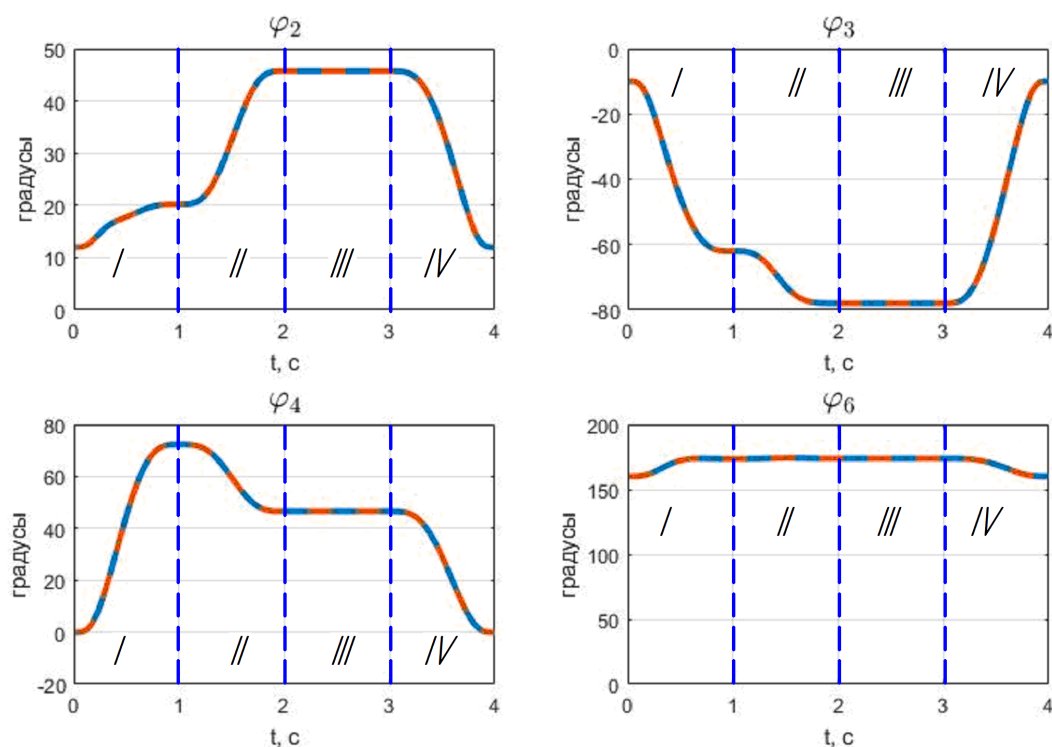


Рис. 3. Зависимость абсолютных углов, определяющих положение звеньев экзоскелета во времени

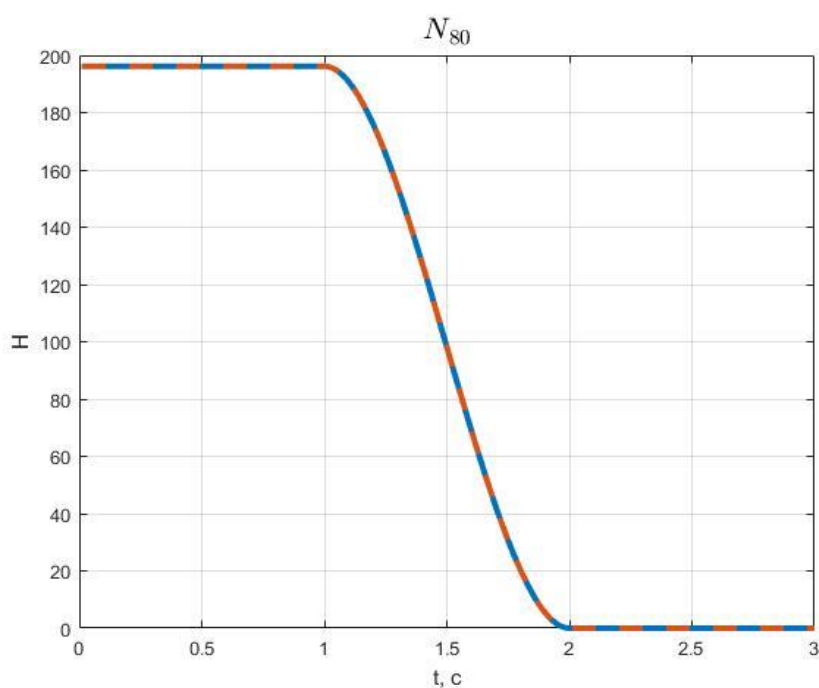


Рис. 4. Зависимость нормальной реакции от времени

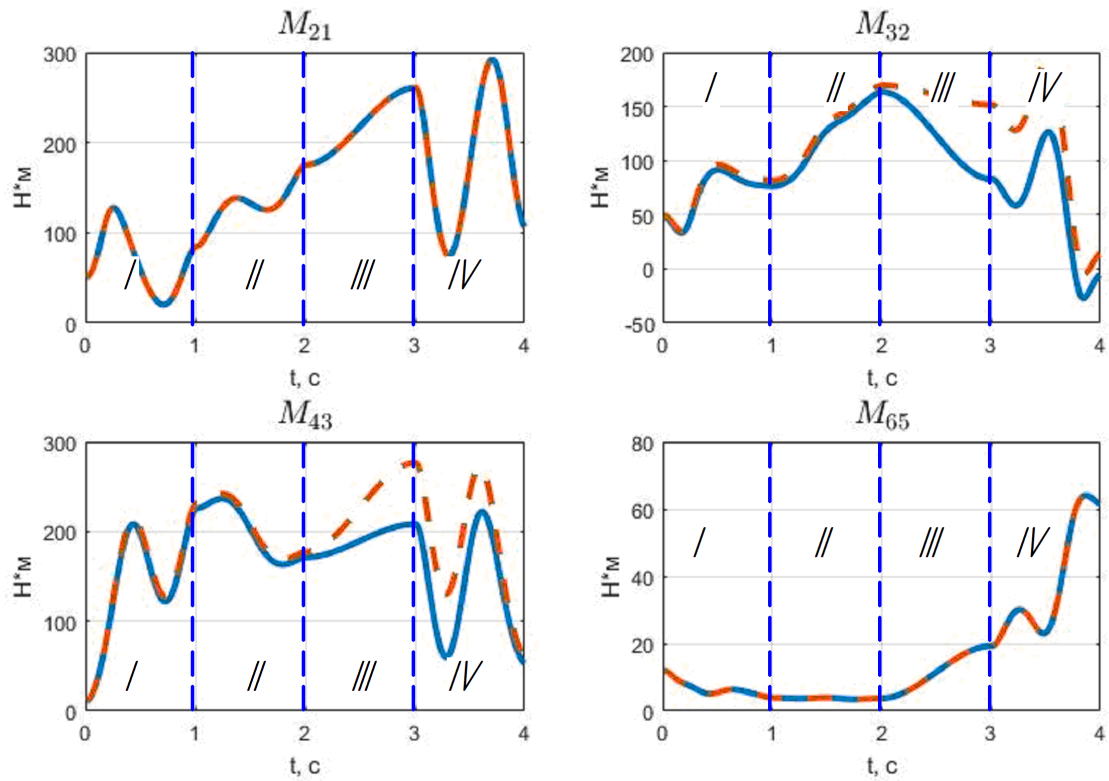


Рис. 5. Зависимость моментов от времени

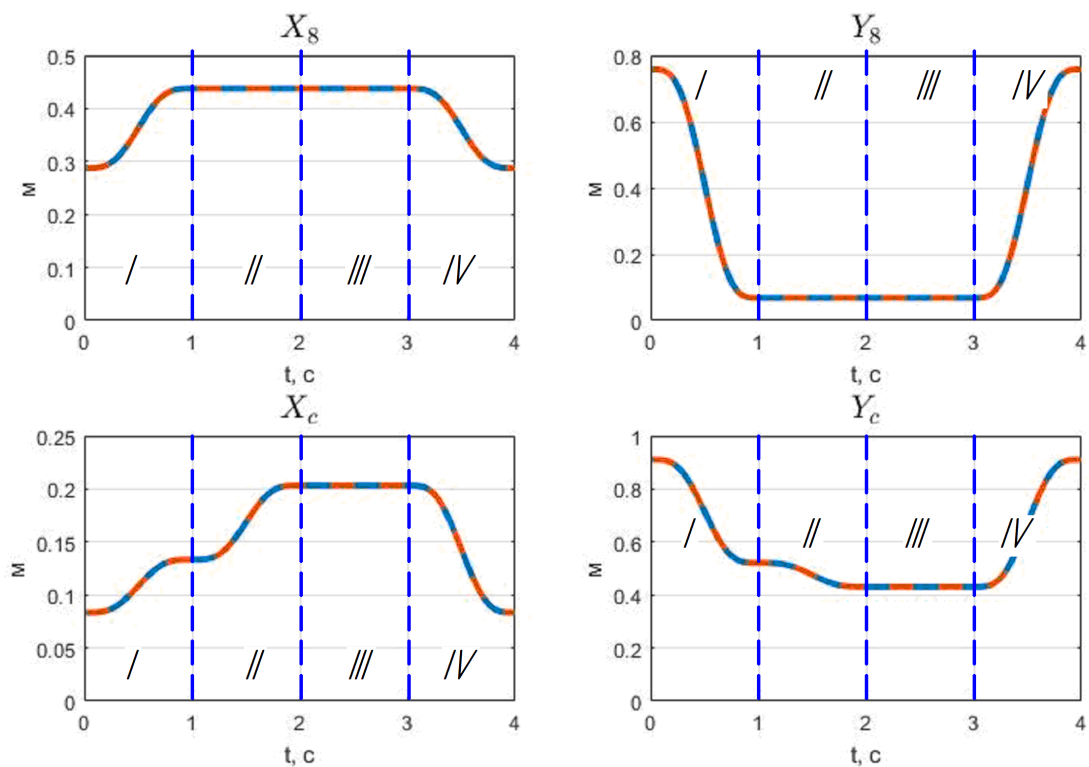


Рис. 6. Зависимость координат, определяющих положение груза от времени

Пусть вектор $\bar{S}_{80} = (x_{80} y_{80} \varphi_{80})^T$ определяет положение груза как при нахождении на поверхности, так и при отрыве. Моменты, действующие в соответствующих шарнирах, образуют вектор

$$\bar{M} = (M_{21} \ M_{32} \ M_{43} \ M_{65})^T. \quad (13)$$

Определить этот вектор можно по формуле

$$\bar{M}^T = J(\bar{q}) \bar{\Phi}_{80}^T, \quad (14)$$

$$\text{где } J(\bar{q}) = \frac{\partial \bar{S}_{80}(\bar{q})}{\partial \bar{q}}. \quad (15)$$

По заданному вектору \bar{q} необходимо определить вектор моментов электроприводов.

Поставив все выражения, получим:

$$\bar{M}_{ed} = A\ddot{\bar{q}} + \dot{A}\dot{\bar{q}} - \frac{1}{2}\dot{\bar{q}}^T \left(\frac{A\dot{\bar{q}}}{\partial \bar{q}} \right) + \frac{\partial \Pi}{\partial \bar{q}}, \quad (16)$$

$$\bar{M}_{ed} = A\ddot{\bar{q}} + \left(\dot{A} - \frac{1}{2} \left(\frac{A\dot{\bar{q}}}{\partial \bar{q}} \right)^T \right) \dot{\bar{q}} + \frac{\partial \Pi}{\partial \bar{q}}. \quad (17)$$

В результате проведения всех вычислений получим значения моментов электроприводов от времени (рис. 5).

Выводы

В статье разработана математическая модель подъема груза человеком в экзоскелете. Выполнено математическое моделирование процесса подъема груза с помощью электроприводов экзоскелета. Особое внимание уделено изучению влияния гравитационных компенсаторов на величину моментов, создаваемых электроприводами бедренного и коленного шарниров. Показано, что применение гравитационных компенсаторов позволяет значительно снизить нагрузку на электроприводы. Также проведено исследование энергетических затрат в процессе подъема груза.

Список литературы

1. Yatsun 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, December. P. 1-6. IEEE.
2. Yatsun 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, June. P. 322-326. IEEE.
3. Yatsun S., Savin S., Yatsun A. Motion Control Algorithm for a Lower Limb Exoskeleton Based on Iterative LQR and ZMP method for trajectory generation. 2016 ITM Web Conference.
4. Yatsun S., Savi 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, October. P. 113-118. IEEE.
5. Yatsun 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, October. P. 107-112. IEEE.

6. Yatsun S., Yatsun A., Savin S., Postolnyi A. Approach to motion control of an exoskeleton in “verticalization-to-walking” regime utilizing pressure sensors. In Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER). IEEE International Conference. 2016, June. P. 452-456. IEEE.

7. Yatsun S., Savin S., Lushnikov B., Yatsun A. System analysis of sagittal plane human motion wearing an exoskeleton using marker technology. In ITM Web of Conferences. 2016, January, vol. 6. EDP Sciences.

8. Vorochaeva L.Yu., Yatsun A.S., Yatsun S.F. Controlling a Quasistatic Gait of an Exoskeleton on the basis of the Expert System. St. Petersburg, 2017.

9. Yatsun S., Savin S., Gerasimov M.S. Decision-making system for the lower extremities on the basis of collected neural networks. Progress of vehicles and systems, 2018. P. 198-199.

10. Bolotnik N. N., Zeidis I. M., Zimmerman K., Yatsun S. F. Dynamics of controlled movements of vibration systems // Izv.R.RAN. TISU. 2006. №5. P.1-11.

Поступила в редакцию 13.02.2019

Подписана в печать 21.03.2019

Reference

1. Yatsun 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, December, pp. 1-6. IEEE.

2. Yatsun 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, June, pp. 322-326. IEEE.

3. Yatsun S., Savin S., Yatsun A. Motion Control Algorithm for a Lower Limb Exoskeleton Based on Iterative LQR and ZMP method for trajectory generation. 2016 ITM Web Conference.

4. Yatsun S., Savi 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, October, pp. 113-118. IEEE.

5. Yatsun 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. October, pp. 107-112. IEEE.

6. Yatsun S., Yatsun A., Savin S., Postolnyi A. Approach to motion control of an exoskeleton in “verticalization-to-walking” regime utilizing pressure sensors. In Cyber Technol-

ogy in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER). IEEE International Conference. 2016, June, pp. 452-456. IEEE.

7. Yatsun S., Savin S., Lushnikov B., Yatsun A. System analysis of sagittal plane human motion wearing an exoskeleton using marker technology. In ITM Web of Conferences. 2016, January, vol. 6. EDP Sciences.

8. Vorochaeva L.Yu., Yatsun A.S., Yatsun S.F. Controlling a Quasistatic Gait of an Exoskeleton on the basis of the Expert System. St. Petersburg, 2017.

9. Yatsun S., Savin S., Gerasimov M.S. Decision-making system for the lower extremities on the basis of collected neural networks. Progress of vehicles and systems, 2018, pp. 198-199.

10. Bolotnik N. N., Zeidis I. M., Zimmerman K., Yatsun S. F. Dynamics of controlled movements of vibration systems. *Izv.R.RAN. TISU*. 2006, no.5, pp.1-11.

Received 13.02.2019

Accepted 21.03.2019

Информация об авторах / Information about the Authors

Сергей Фёдорович Яцун, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой механики, мехатроники и робототехники, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: teormeh@inbox.ru

Sergey F. Yatsun, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of Mechanics, Mechatronics and Robotics Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation
e-mail: teormeh@inbox.ru

Владимир Михайлович Антипов, магистрант, кафедра механики, мехатроники и робототехники, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: vovik_0_1@mail.ru

Vladimir M. Antipov, Master Student, Mechanics, Mechatronics and Robotics Department Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: vovik_0_1@mail.ru

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

Andrey Ye. Karlov, Post-Graduate Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: teormeh@mail.ru

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

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