

С.Ф. Яцун, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Россия, 305040, Курск, ул. 50 лет Октября, 94) (e-mail: teormeh@inbox.ru)

В.М. Антипов, магистрант, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Россия, 305040, Курск, ул. 50 лет Октября, 94) (тел. 7(4712) 22-26-26)

А.Е. Карлов, аспирант, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Россия, 305040, Курск, ул. 50 лет Октября, 94) (тел. 7(4712) 22-26-26)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОДЪЕМА ГРУЗА С ПОМОЩЬЮ ПРОМЫШЛЕННОГО ЭКСОСКЕЛЕТА

Применение экзоскелетов в промышленности является одним из путей для улучшения условий труда и повышения производительности рабочих [1-3]. Поэтому последние годы в развитых странах мира получили распространение такие экзоскелеты, как Fortis, HULC, HAL, Panasonic и другие [4-6]. Дальнейшее внедрение экзоскелетов предполагает глубокое изучение механизмов взаимодействия человека и экзоскелета при выполнении различных движений, связанных с подъемом груза. Одним из наиболее сложных и, как следствие, травматичных является этап отрыва груза от поверхности, этот этап предшествует подъему груза. И именно на этом этапе чаще всего происходят травмы опорно-двигательного аппарата человека. Как известно, самая распространенная причина травм межпозвоночных дисков – неправильная работа с грузами. Человек вполне может поднять значительный вес, если использует правильную технику. Как известно, спортсмены-тяжелоатлеты, грузчики могут поднять вес превышающий их собственный в разы [7-10]. Экзоскелет может помочь человеку поднимать тяжести. Для освоения техники подъема важно создать виртуальный тренажер (математическую модель) и оптимизировать процесс подъема на компьютере.

В статье рассмотрена задача о подъеме груза человеком с использованием экзоскелета. Предложено рассматривать подъем в виде трех последовательных этапов. Разработана математическая модель экзоскелета, описывающая движение в различных режимах движения. Решена обратная задача кинематики, позволяющая найти углы поворота звеньев экзоскелета на этапе подготовки, и предложена методика определения приводных моментов на этапах подъема груза.

Для изучения процесса подъема груза в данной статье разработана математическая модель подъема груза от опорной поверхности человеком с использованием экзоскелета, при этом предполагается, что всю работу выполняют приводы экзоскелета.

Ключевые слова: экзоскелеты; подъем груза; математическая модель; отрыв от поверхности.

DOI: 10.21869/2223-1560-2018-22-6-14-20

Ссылка для цитирования: Яцун С.Ф., Антипов В.М., Карлов А.Е. Моделирование подъема груза с помощью промышленного экзоскелета // Известия Юго-Западного государственного университета. 2018. Т. 22, № 6(81). С. 14-20.

1. Математическая модель

На рис.1 представлена схема подъема груза от опорной поверхности с применением экзоскелета. В зависимости от формы и конструкции груза, его можно обхватить двумя руками сразу (сверху, обхватывая под дном) или захватить его сначала под один край, а затем – под противоположный край. Наиболее удобно поднимать груз при наличии рукоятки, установленной на верхней поверхности груза. Именно этот случай рассмотрим далее (рис.1). Модель состоит из восьми

твердых тел массой m_i и длиной L_i , связанных между собой активными шарнирами, в каждом из которых расположены управляемые электроприводы. Груз 8 расположен на горизонтальной опорной поверхности. Взаимодействие груза и опорной поверхности моделируется реакцией опоры, включающей как силы N_{80}, F_{80} , так и момент M_{80} , причем $\bar{R}_{80} = \bar{N}_{80} + \bar{F}_{80}$. На предплечье человека 7 со стороны груза действуют сила F_{87} и момент M_{87} . Стопа экзоскелета также

взаимодействует с опорной поверхностью, при этом возникают приведенные силы реакции и момент N_{10}, F_{10}, M_{10} . Кроме этого, на экзоскелет действуют силы веса $\bar{G}_i = m_i \bar{g}$, $\bar{g}^T = (0 \ -g \ 0)^T$.

Отрыв груза происходит за счет работы электроприводов, расположенных в зоне голеностопного, коленного и бедренного суставов. Так как движение происходит в сагиттальной плоскости, то положение звеньев экзоскелета в пространстве можно определить с помощью 6 независимых параметров. Вектор обобщенных координат имеет вид: $\bar{q} = (\varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5, \varphi_6, \varphi_7)^T$.

Будем считать, что отрыв груза от поверхности состоит из двух основных этапов. Первый - подготовка позы человека в экзоскелете к отрыву груза происходит на интервале $0 < t < t_1$. При этом реакция опорной поверхности на груз остается постоянной $N_{80} = N_{80}^{max} = m_8 g$, а $F_{87} = 0$.

На втором этапе происходит отрыв груза на интервале времени $t_1 < t < t_2$. В этом случае, реакция опорной поверхности на груз уменьшается до нуля по заданному закону $N_{80} = N_{80}(t)$. При отрыве груза нужно обеспечить равновесие человека, что возможно при нахождении проекции центра масс внутри опорного полигона, поэтому проекция центра масс переносится в окрестность точки А. Отрыв груза от поверхности происходит ногами, не прогибая дугой спину, постепенно поворачивая её из наклонного положения в положение «прямо». Груз при этом остается неподвижным, а реакция N_{80} уменьшается до 0. При выполнении условия $N_{80} = 0$ и $F_{87} = m_8 g$ завершается отрыв груза и начинается подъем.

Из опыта известно, что поднимать груз удобно, если руки остаются прямыми, тогда

$$\varphi_6 = \varphi_7. \tag{1}$$

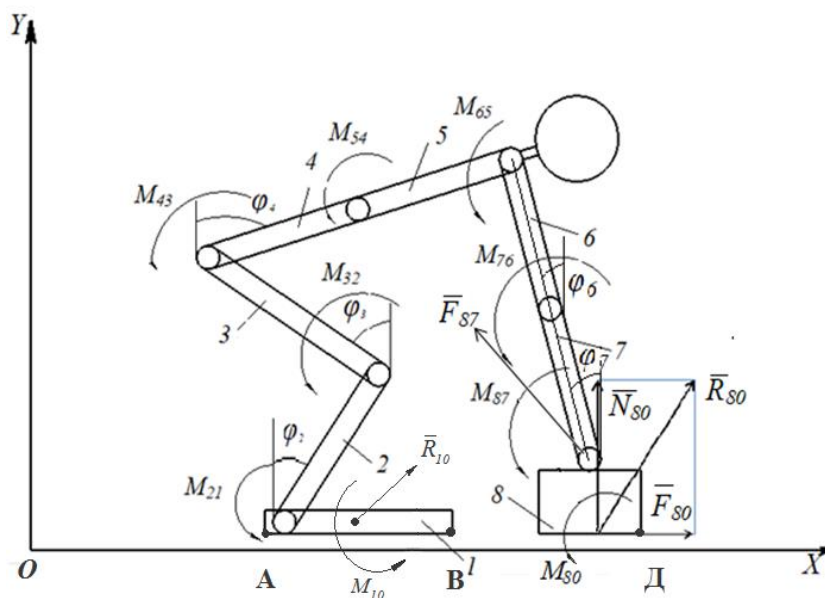


Рис.1. Схема отрыва груза от поверхности: N_{80}, F_{80}, M_{80} – вертикальная и горизонтальная реакции опорной поверхности; \bar{F}_{87} - сила, действующая на груз со стороны руки; $M_{i,i-1}$ – моменты, создаваемые электроприводами шарниров. Вектор моментов электроприводов $\bar{M} = (M_{21} \ M_{32} \ M_{43} \ M_{65})^T$. Реакция опорной поверхности $\bar{R}_{80} = \bar{N}_{80} + \bar{F}_{80}$

При работе с тяжестями позвоночник всегда должен оставаться прямым. Тогда нагрузка распределится равномерно, и опасности повреждения не возникнет. Это касается как отрыва груза, так и его подъема. Чем ближе центр тяжести груза к позвоночнику, тем меньшее усилие требуется, чтобы удержать спину прямой.

Если спина остается прямой, то получаем условие:

$$\varphi_4 = \varphi_5. \tag{2}$$

Таким образом, вектор, задающий положение экзоскелета, с учетом (1), (2) имеет вид:

$$\bar{q} = (\varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_6)^T. \tag{3}$$

В начальный момент перед отрывом груза поза человека задана вектором:

$$\bar{q}_0 = (\varphi_{20}, \varphi_{30}, \varphi_{40}, \varphi_{60})^T. \tag{4}$$

За время $0 < t < t_1$ происходит подготовка позы экзоскелета к отрыву груза от поверхности, заключающаяся в том, что человек приседает, стопы максимально приближены к грузу, спина прямая и близка к вертикальному положению. Положение тела в момент начала отрыва при $t=t_1$ определяется вектором

$$\bar{q}_1 = (\varphi_{21}, \varphi_{31}, \varphi_{41}, \varphi_{61})^T. \tag{5}$$

Положение центра масс экзоскелета задается вектором $\bar{r}_C(t) = (x_C, y_C)^T$, который определим по формуле

$$\bar{r}_C = \frac{\sum_{i=2-8} m_i \bar{r}_{Ci}}{\sum_{i=2-8} m_i}, \tag{6}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & t_0 & t_0^2 & t_0^3 & t_0^4 & t_0^5 & t_0^6 & t_0^7 \\ 1 & t_1 & t_1^2 & t_1^3 & t_1^4 & t_1^5 & t_1^6 & t_1^7 \\ 0 & 1 & 2 \cdot t_0 & 3 \cdot t_0^2 & 4 \cdot t_0^3 & 5 \cdot t_0^4 & 6 \cdot t_0^5 & 7 \cdot t_0^6 \\ 0 & 1 & 2 \cdot t_1 & 3 \cdot t_1^2 & 4 \cdot t_1^3 & 5 \cdot t_1^4 & 6 \cdot t_1^5 & 7 \cdot t_1^6 \\ 0 & 0 & 2 & 6 \cdot t_0 & 12 \cdot t_0^2 & 20 \cdot t_0^3 & 30 \cdot t_0^4 & 42 \cdot t_0^5 \\ 0 & 0 & 2 & 6 \cdot t_1 & 12 \cdot t_1^2 & 20 \cdot t_1^3 & 30 \cdot t_1^4 & 42 \cdot t_1^5 \\ 0 & 0 & 0 & 6 & 24 \cdot t_0 & 60 \cdot t_0^2 & 120 \cdot t_0^3 & 210 \cdot t_0^4 \\ 0 & 0 & 0 & 6 & 24 \cdot t_1 & 60 \cdot t_1^2 & 120 \cdot t_1^3 & 210 \cdot t_1^4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_0 \\ c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \\ c_5 \\ c_6 \\ c_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_C(t_0) \\ x_C(t_1) \\ \dot{x}_C(t_0) \\ \dot{x}_C(t_1) \\ \ddot{x}_C(t_0) \\ \ddot{x}_C(t_1) \\ \ddot{x}_C(t_0) \\ \ddot{x}_C(t_1) \end{bmatrix}, \tag{9}$$

\bar{r}_{Ci} - координаты центра масс i -го звена.

$$\bar{r}_{Ci} = \bar{r}_{O_{i,i-1}} + \bar{r}_{C_{iO_{i,i-1}}}. \tag{7}$$

Положим, что начало системы координат совпадает с шарниром O_{21} , тогда

$$\bar{r}_{O_{i,i-1}} = \sum_{i=3}^7 \bar{r}_{O_{i,i-1}O_{i-1,i-2}}.$$

$\bar{r}_{O_{i,i-1}O_{i-1,i-2}} = (l_{i-1} \sin \varphi_{i-1}, l_{i-1} \cos \varphi_{i-1})^T$ - радиус вектор $i, i-1$ шарнира. $\bar{r}_{C_{iO_{i,i-1}}} = (l_{Ci} \sin \varphi_i, l_{Ci} \cos \varphi_i)^T$ - радиус-вектор центра масс i -го звена.

Законы изменения координат центра масс от времени представим в виде

$$x_C(t) = \sum_{i=0}^7 c_i t^i, \quad y_C(t) = \sum_{i=0}^7 d_i t^i. \tag{8}$$

Проекция центра масс x_C в начальный момент времени $t=0$ может находиться на интервале $x_A < x_C < x_D$, например в окрестности точки В. Однако при $t=t_1$ проекция должна переместиться в окрестность точки А области $x_A < x_C < x_B$. Поэтому необходимо заранее спланировать траекторию движения проекции центра масс на плоскости Oxy .

Проекция y_C определяется из условий комфорта расположения человека в экзоскелете и зависит от индивидуальных особенностей. Коэффициенты c_i, d_i находятся из граничных условий как решение следующих систем алгебраических уравнений:

$$\begin{bmatrix} 1 & t_0 & t_0^2 & t_0^3 & t_0^4 & t_0^5 & t_0^6 & t_0^7 \\ 1 & t_1 & t_1^2 & t_1^3 & t_1^4 & t_1^5 & t_1^6 & t_1^7 \\ 0 & 1 & 2 \cdot t_0 & 3 \cdot t_0^2 & 4 \cdot t_0^3 & 5 \cdot t_0^4 & 6 \cdot t_0^5 & 7 \cdot t_0^6 \\ 0 & 1 & 2 \cdot t_1 & 3 \cdot t_1^2 & 4 \cdot t_1^3 & 5 \cdot t_1^4 & 6 \cdot t_1^5 & 7 \cdot t_1^6 \\ 0 & 0 & 2 & 6 \cdot t_0 & 12 \cdot t_0^2 & 20 \cdot t_0^3 & 30 \cdot t_0^4 & 42 \cdot t_0^5 \\ 0 & 0 & 2 & 6 \cdot t_1 & 12 \cdot t_1^2 & 20 \cdot t_1^3 & 30 \cdot t_1^4 & 42 \cdot t_1^5 \\ 0 & 0 & 0 & 6 & 24 \cdot t_0 & 60 \cdot t_0^2 & 120 \cdot t_0^3 & 210 \cdot t_0^4 \\ 0 & 0 & 0 & 6 & 24 \cdot t_1 & 60 \cdot t_1^2 & 120 \cdot t_1^3 & 210 \cdot t_1^4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_0 \\ d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ d_4 \\ d_5 \\ d_6 \\ d_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_c(t_0) \\ y_c(t_1) \\ \dot{y}_c(t_0) \\ \dot{y}_c(t_1) \\ \ddot{y}_c(t_0) \\ \ddot{y}_c(t_1) \\ \ddot{y}_c(t_0) \\ \ddot{y}_c(t_1) \end{bmatrix}, \quad (10)$$

где t_0 – начальный момент времени, t_1 – время движения на втором этапе.

Положение груза определяется вектором $\bar{S}_{80} = (x_{80}, y_{80}, \varphi_{80})^T$,

где $x_{80} = \sum_{i=2}^7 l_i \sin \varphi_i$, $y_{80} = \sum_{i=2}^7 l_i \cos \varphi_i$, $\varphi_{80} = 0$. (11)

Так как груз неподвижен, то

$$x_{80} = OB = const; \quad y_{80} = 0. \quad (12)$$

На рисунке ниже показано, как изменялись задающие координаты в процессе подъема груза.

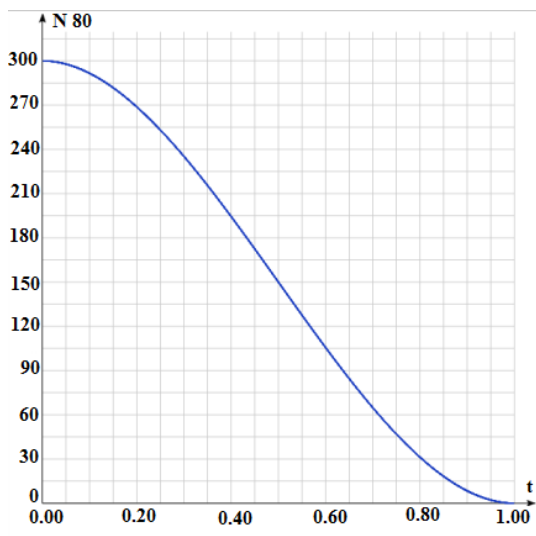


Рис. 2. Заданное изменение нормальной реакции

Задавая желаемый закон изменения реакции $\bar{R}_{80} = (F_{80}, N_{80})^T$ на интервале $t_1 < t < t_2$, найдем законы изменения управляющих моментов $\bar{M}(t)$, которые обеспечивают отрыв груза от поверхности. Далее, зададим изменение нормаль-

ной реакции в виде полинома третьего порядка:

$$\bar{R}_{80} = (0, \sum_{i=0}^3 \kappa_i t^i)^T. \quad (13)$$

Коэффициенты полинома нормальной реакции определим из уравнения:

$$\begin{bmatrix} 1 & t_1 & t_1^2 & t_1^3 \\ 1 & t_2 & t_2^2 & t_2^3 \\ 0 & 1 & 2t_1 & 3t_1^2 \\ 0 & 1 & 2t_2 & 3t_2^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \kappa_0 \\ \kappa_1 \\ \kappa_2 \\ \kappa_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_8 g \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

2. Результаты моделирования

На рис. 3 показаны зависимости моментов, развиваемых электродвигателями в зависимости от веса груза. Изменение моментов носит немонотонный характер. Имеет место колебательность. Максимальные значения момента возникают в приводе, установленном в бедренном шарнире и достигают значений 360 Нм в момент отрыва груза от поверхности.

Выводы

Показано, что этапу подъема груза предшествуют два этапа движения, связанные с подготовкой экзоскелета к отрыву груза от опорной поверхности и непосредственно отрыв груза. Разработана математическая модель экзоскелета, описывающая движение в различных режимах движения. Сформулированы условия выполнения первого, второго и тре-

твѣго этапов. Решена обратная задача кинематики, позволяющая найти углы поворота звеньев экзоскелета на этапе под-

готовки и предложена методика определения приводных моментов на этапах подъема груза.

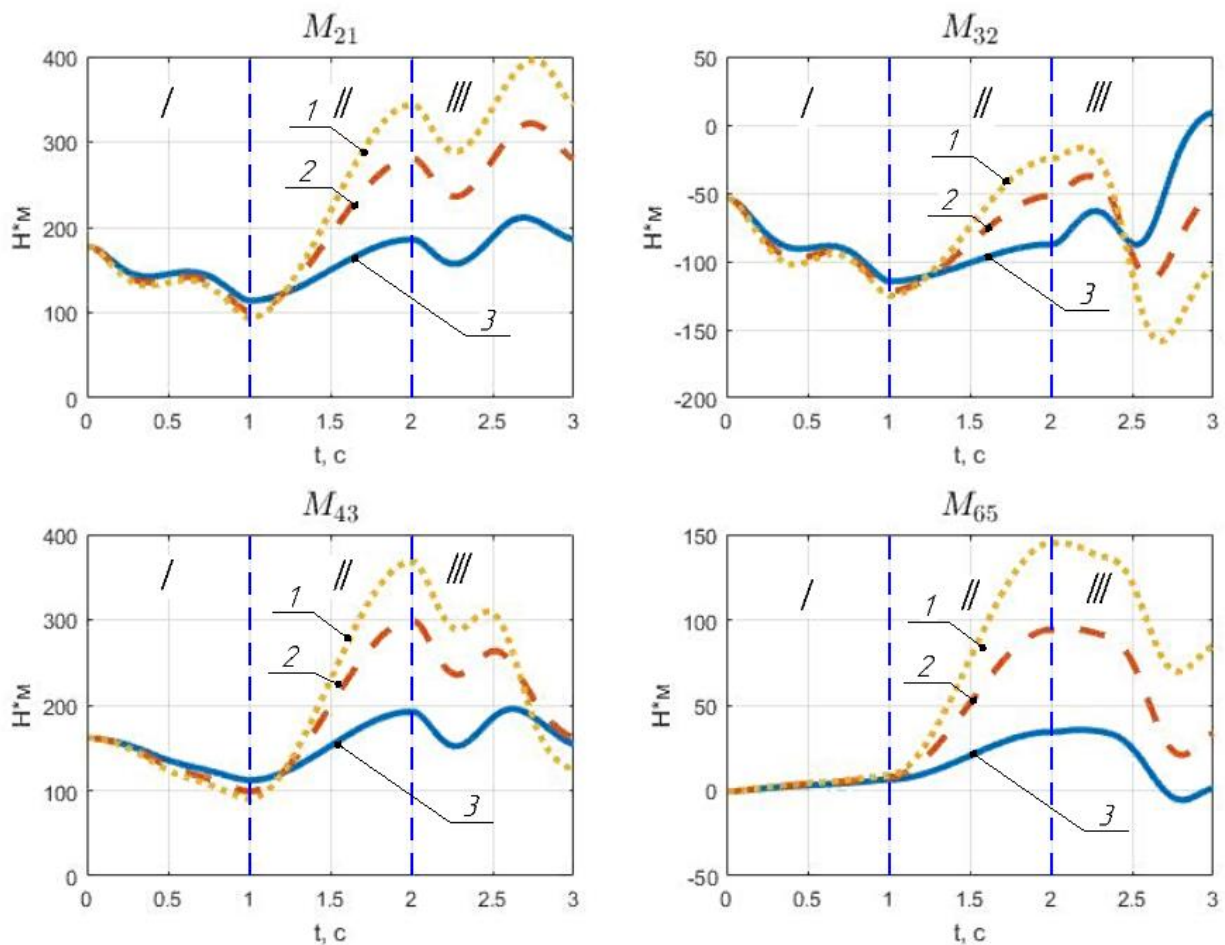


Рис. 3. Графики моментов, создаваемых электроприводами экзоскелета: 1-вес груза 500Н; 2-вес груза 300Н; 3-2-вес груза 100Н

Благодарности

Данная статья подготовлена при финансовой поддержке РФФИ, проект №18-08-00773А «Изучение закономерностей взаимодействия стоп экзоскелета с шероховатой опорной поверхностью».

Список литературы

1. Jatsun S., Savin S., Yatsun A. and Turlapov R., 2015, December. Adaptive control system for exoskeleton performing sit-to-stand motion. In Mechatronics and its

Applications (ISMA), 2015 10th International Symposium on (pp. 1-6). IEEE.

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

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

Mechanisms and Machine Science, 2018, vol. 48. C. 305-317.

4. Jatsun S., Savin S., Yatsun A., 2016, October. 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 on (pp. 113-118). IEEE.

5. Jatsun S., Savin S., Yatsun A., 2016, October. 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 on (C. 107-112). IEEE.

6. Jatsun S., Yatsun A., Savin S., Postolnyi A., 2016, June. 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), 2016 IEEE International Conference on (C. 452-456). IEEE.

7. Jatsun S., Savin S., Lushnikov B. and Yatsun A., 2016, January. System analysis

of sagittal plane human motion wearing an exoskeleton using marker technology. In ITM Web of Conferences (Vol. 6). EDP Sciences.

8. Yatsun S.F., Savin S.I., Andrey Y. Study of controlled motion of an exoskeleton performing obstacle avoidance during a single support walking phase // 20th International Conference on System Theory, Control and Computing, ICSTCC 2016 - Joint Conference of SINTES 20, SACCS 16, SIMSIS 20 Proceedings. 2016. C. 113-118.

9. Изучение управляемого движения экзоскелета во фронтальной плоскости в режиме восстановления равновесия / С.Ф. Яцун, С.И. Савин, А.С. Яцун, А.В. Мальчиков // Экстремальная робототехника. 2016. Т. 1. № 1. С. 236-245.

10. Экзоскелеты: анализ конструкций, принципы создания, основы моделирования: монография / С.Ф. Яцун, С.И. Савин, О.В. Емельянова, А.С. Яцун, Р.Н. Турлапов. Курск, 2015. С.179.

Поступила в редакцию 19.11.18

UDC 621

S.F. Yatsun, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Southwest State University (Russia, 305040, Kursk, 50 Let Oktyabrya str., 94) (e-mail: teormeh@inbox.ru)

V.M. Antipov, Southwest State University (Russia, 305040, Kursk, 50 Let Oktyabrya str., 94) (tel. 7 (4712) 22-26-26)

A.E. Karlov, Post-Graduate Student, Southwest State University (Russia, 305040, Kursk, 50 Let Oktyabrya str., 94)

MODELING OF LOADING BY INDUSTRIAL EXOSKELET

The article deals with the task of lifting a weight by a person using an exoskeleton. It is proposed to consider lifting in the form of three successive stages. A mathematical model of the exoskeleton, describing movement in various modes of movement, has been developed. The inverse task of kinematics was solved, which allows finding the rotation angles of the exoskeleton links at the preparatory stage. The method for determining the driving moments at the stages of lifting the load is proposed.

Key words: exoskeletons; weight lifting; mathematical model; separation from the surface.

For citation: Yatsun S.F., Antipov V.M., Karlov A.E. Modeling of Loading by Industrial Exoskeleton. Proceedings of the Southwest State University, 2018, vol. 22, no. 6(81), pp. 14-20 (in Russ.).

Reference

1. Jatsun S., Savin S., Yatsun A., Turlapov R., 2015, December. Adaptive control system for exoskeleton performing sit-to-stand motion. In *Mechatronics and its Applications (ISMA), 2015 10th International Symposium on* (pp. 1-6). IEEE.
2. Jatsun S., Savin S., Yatsun A., 2016, June. Improvement of energy consumption for a lower limb exoskeleton through verticalization time optimization. In *Control and Automation (MED), 2016 24th Mediterranean Conference on* (pp. 322-326). IEEE.
3. Jatsun S., Savin S., Yatsun A. Motion Control Algorithm for a Lower Limb Exoskeleton Based on Iterative LQR and ZMP method for trajectory generation. *Mechanisms and Machine Science*, 2018, vol. 48, pp. 305-317.
4. Jatsun S., Savin S., Yatsun A., 2016, October. 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 on* (pp. 113-118). IEEE.
5. Jatsun S., Savin S., Yatsun A., 2016, October. 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 on* (pp. 107-112). IEEE.
6. Jatsun S., Yatsun A., Savin S., Postolnyi A. 2016, June. 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), 2016 IEEE International Conference on* (pp. 452-456). IEEE.
7. Jatsun S., Savin S., Lushnikov B. and Yatsun A., 2016, January. System analysis of sagittal plane human motion wearing an exoskeleton using marker technology. In *ITM Web of Conferences (Vol. 6)*. EDP Sciences.
8. Yatsun S.F., Savin S.I., Andrey Y. Study of controlled motion of an exoskeleton performing obstacle avoidance during a single support walking phase. 20th International Conference on System Theory, Control and Computing, ICSTCC 2016 Joint Conference of SINTES 20, SACCS 16, SIMSIS 20 Proceedings, 2016, pp. 113-118.
9. Jacun S.F., Savin S.I., Jacun A.S., Mal'chikov A.V. Izuchenie upravljajemogo dvizhenija jekzoskeleta vo frontal'noj ploskosti v rezhime vosstanovlenija ravnovesija *Jekstremal'naja robototehnika*, 2016, vol. 1, no. 1, pp. 236-245.
10. Jacun S.F., Savin S.I., Emel'janova O.V., Jacun A.S., Turlapov R.N. Jekzoskelety: analiz konstrukcij, principy sozdanija, osnovy modelirovanija. Kursk, 2015, p. 179.