

*АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ
В МАШИНОСТРОЕНИИ*

УДК 681.532

© 2017 г. Савин С.И., Яцун А.С., Яцун С.Ф.

**ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЙ АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ
ВЕРТИКАЛИЗАЦИЕЙ ЭКЗОСКЕЛЕТА***Юго-Западный государственный университет, г. Курск*

Рассматривается экзоскелет нижних конечностей и решается задача повышения его энергоэффективности. Сформулирована задача нелинейной оптимизации. В качестве оптимизируемых параметров выступают коэффициенты регулятора системы управления экзоскелетом. Целевая функция выбрана так, чтобы оптимальный набор коэффициентов обеспечивал высокую точность работы системы управления и ее энергоэффективность. Описан численный метод решения задачи оптимизации и представлены результаты моделирования.

Экзоскелеты представляют собой носимые устройства для расширения функциональных возможностей человека, находящие применение в медицине, промышленности, военной сфере [1–3]. Одной из задач, решаемых экзоскелетами, является обеспечение вертикализации пациента из положения сидя. Этот наиболее энергоемкий процесс изучается в целом ряде работ [4–6].

Потребление энергии оказывает существенное влияние на массогабаритные характеристики экзоскелета, а также на требования к емкости аккумуляторных батарей. Существует ряд исследований, посвященных вопросу повышения энергоэффективности экзоскелетов в различных режимах движения [7–9]. При этом вопрос оптимизации алгоритмов управления экзоскелетами в режиме вертикализации с точки зрения энергозатрат остается недостаточно изученным.

Одним из подходов к повышению энергоэффективности экзоскелета является оптимизация алгоритма управления экзоскелетом с целью снижения потерь энергии в процессе выполнения движения за счет минимизации времени выполнения вертикализации [10, 11].

В настоящей статье для повышения энергоэффективности процесса вертикализации производится оптимизация параметров системы управления, для чего используются подходы, описанные в работах [12–13].

Математическая модель экзоскелета. Рассмотрим задачу о вертикализации человека в экзоскелете. Расчетная схема экзоскелета показана на рис. 1. На схеме использованы следующие обозначения: $\varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$ – углы, определяющие ориентацию звеньев 2, 3 и 4

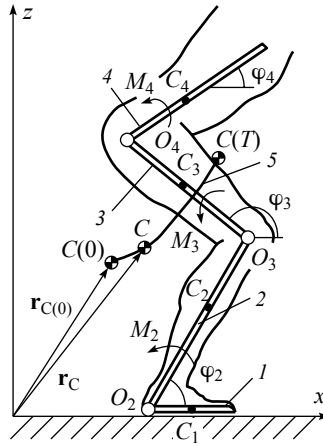


Рис. 1. Расчетная схема экзоскелета: 1–4 – звенья экзоскелета, 5 – траектория центра масс, r_C – текущее положение центра масс экзоскелета, $r_C(0)$ – положение центра масс в начальный момент времени

относительно горизонтали, C_i – центр масс i -го звена, C – центр масс экзоскелета, O_{i+1} – шарнир, соединяющий i -е звено со следующим, M_i – момент электропривода, установленного в этом шарнире ($i = \overline{1,3}$). Звенья имеют массы m_i и длины l_i . Примем, что звенья являются абсолютно твердыми телами и стопа экзоскелета (звено 1) остается неподвижной в процессе его движения. Введем вектор обобщенных координат $\mathbf{q} = [\varphi_2 \ \varphi_3 \ \varphi_4]^T$, который однозначно определяет положение механизма.

В качестве критерия энергоэффективности выберем величину

$$\varepsilon = |A| / \int_0^T Q dt, \quad (1)$$

где $\int_0^T Q dt$ – потери на электроприводах; T – время выполнения вертикализации;

$A = \int_0^T mg \cdot \dot{r}_C dt$ – работа силы тяжести при заданном перемещении центра масс; m – полная масса механизма; \mathbf{g} – ускорение свободного падения; $\mathbf{r}_C = [x_C \ z_C]^T$ – вектор, задающий положение центра масс механизма.

Величину Q , определяющую потери в электроприводах в формуле (1), представим в виде $Q = (\mathbf{u}^* - \mathbf{u})^T \mathbf{R}(\mathbf{u}^* - \mathbf{u})$, где \mathbf{R} – матрица приведенных сопротивлений электродвигателей; $\mathbf{u} = [M_1 \ M_2 \ M_3]^T$ – вектор управляющих воздействий; $\mathbf{u}^* = [M_1^* \ M_2^* \ M_3^*]^T$ – вектор управляющих воздействий, необходимый для получения желаемых временных зависимостей обобщенных координат $\mathbf{q}^*(t)$

$$\mathbf{u}^* = \mathbf{B}^{-1}(\mathbf{H}\ddot{\mathbf{q}}^* + \mathbf{C} + \mathbf{G}), \quad (2)$$

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}^* + \mathbf{B}^{-1}\mathbf{H}(\mathbf{K}_p\mathbf{e} + \mathbf{K}_d\dot{\mathbf{e}}), \quad (3)$$

где \mathbf{H} – обобщенная матрица инерции механизма; \mathbf{C} – вектор обобщенных Кориолисовых и нормальных сил инерции; \mathbf{G} – вектор обобщенной силы тяжести; \mathbf{B} – матрица,

связывающая вектор управляющих воздействий с вектором обобщенных сил, создаваемых приводами; $\mathbf{e} = \mathbf{q}^* - \mathbf{q}$ – ошибка управления,

$$\mathbf{K}_p = \begin{bmatrix} k_1 & 0 & 0 \\ 0 & k_2 & 0 \\ 0 & 0 & k_3 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{K}_d = \begin{bmatrix} k_4 & 0 & 0 \\ 0 & k_5 & 0 \\ 0 & 0 & k_6 \end{bmatrix},$$

– диагональные матрицы коэффициентов регулятора; k_j – положительные коэффициенты регулятора ($j = \overline{1,6}$).

Значения матриц и векторов, а также способ их нахождения даны в [12–15]. Общие методы анализа уравнений кинематики и динамики шагающих механизмов раскрыты в [16–20]. Регулятор (2), (3), описан в [21–24].

Токи в обмотках электроприводов связаны с создаваемыми моментами выражением $C_\tau \eta I_i = M_i$, где I_i – ток в обмотках i -го электропривода, C_τ – постоянная момента электродвигателей, η – передаточное отношение редуктора. Желаемые значения токов I_i^* определим по формуле: $I_i^* = M_i^*/(\eta C_\tau)$, а M_i^* получим из уравнения (2). Токи I_i^*

определяют потери энергии $Q^* = \sum_{i=1}^3 I_i^{*2} R_i$ при движении экзоскелета по желаемой траектории, где R_i – активное сопротивление обмоток i -го электропривода. Величина Q^* соответствует минимальному значению потерь энергии при заданной траектории движения центра масс экзоскелета. Определим величину Q в скалярной форме

$$Q = \sum_{i=1}^3 ((I_i^* - I_i)^2 R_i). \quad (4)$$

С учетом (4) матрица приведенных сопротивлений \mathbf{R} имеет вид

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} R_1/(C_\tau^2 \eta^2) & 0 & 0 \\ 0 & R_2/(C_\tau^2 \eta^2) & 0 \\ 0 & 0 & R_3/(C_\tau^2 \eta^2) \end{bmatrix}.$$

Формула (4) позволяет найти дополнительные потери в электроприводах, возникающие из-за отклонения реальной траектории от желаемой. Минимизируя Q можно повысить энергоэффективность экзоскелета.

Система автоматического управления экзоскелета включает в себя: генератор задающих воздействий, определяющий желаемую траекторию центра масс экзоскелета; блок решения обратной задачи кинематики, вычисляющий значение $\mathbf{q}^*(t)$, реализующее эту траекторию; компаратор, вычисляющий ошибку управления $\mathbf{e} = \mathbf{q}^* - \mathbf{q}$; регулятор (3) и объект управления – модель экзоскелета (подробнее эти блоки раскрыты в [11]). Реализованный способ управления экзоскелетом основан на генерации траектории центра масс экзоскелета $x_C(z_C)$ из условия, что точка ZMP (от англ. zero moment point) находится внутри опорного полигона.

Оптимизация параметров системы управления. В качестве вектора варьируемых параметров выберем $\mathbf{k} = [k_1 \ k_2 \ k_3 \ k_4 \ k_5 \ k_6]^T$. Компоненты вектора \mathbf{k} определены на интервалах $0 \leq k_j \leq k_{\max,j}$, где $k_{\max,j}$ – максимальное допустимое значение коэффициента регулятора, $j = \overline{1,6}$.

Зададим целевую функцию $J = J(\mathbf{k})$, как взвешенную сумму двух интегральных критериев качества:

$$J = \mu_1 J_1 + \mu_2 J_2, \quad J_1 = \int_0^T [(\mathbf{q}^* - \mathbf{q})^T (\mathbf{q}^* - \mathbf{q})] dt \cdot \left(\int_0^T (\mathbf{q}^*)^T \mathbf{q}^* dt \right)^{-1}, \quad J_2 = \int_0^T Q dt \cdot \left(\int_0^T Q^* dt \right)^{-1},$$

где μ_1, μ_2 – весовые коэффициенты. Варьируя коэффициенты μ_1, μ_2 можем получить регуляторы, обеспечивающие большую точность или большую энергоэффективность. Критерий J_1 растет при увеличении модуля ошибки управления e , а критерий J_2 – при росте величины Q . Таким образом минимизация J обеспечивает уменьшение как ошибки управления, так и величины потерь.

Решение задачи по определению оптимальных параметров регулятора состоит в нахождении вектора \mathbf{k}_m , приводящего J к минимуму.

Рассмотрим двухэтапный метод настройки регулятора экзоскелета [12]. На первом этапе, используя LP τ последовательность выбираются n точек в пространстве варьируемых параметров. На втором этапе решается задача нелинейной оптимизации методом внутренней точки.

Результаты численной оптимизации. Рассмотрим результаты оптимизации при следующих значениях параметров $\mu_1 = 0,9$, $\mu_2 = 0,1$. Используя рассмотренный алгоритм были найдены следующие оптимальные значения коэффициентов k_j : $k_1 = 58$, $k_2 = 192$, $k_3 = 64$, $k_4 = 20$, $k_5 = 31$, $k_6 = 1000$.

На рис. 2 показаны вычисленные временные зависимости обобщенных координат $\varphi_2(t)$, $\varphi_3(t)$, $\varphi_4(t)$ и их желаемые графики $\varphi_2^*(t)$, $\varphi_3^*(t)$, $\varphi_4^*(t)$. На рис. 3 показаны временные зависимости моментов M_i . На рис. 4 показана зависимость целевой функции J от k_1 , k_2 при фиксированных значениях k_3, k_4, k_5, k_6 . Минимум J достигается при $\mathbf{k} = \mathbf{k}_m$.

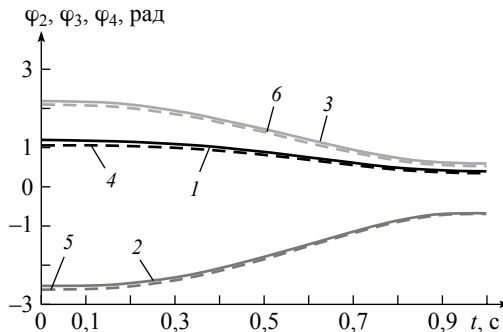


Рис. 2. Временные зависимости обобщенных координат: 1 – $\varphi_2(t)$, 2 – $\varphi_3(t)$, 3 – $\varphi_4(t)$, 4 – $\varphi_2^*(t)$, 5 – $\varphi_3^*(t)$, 6 – $\varphi_4^*(t)$

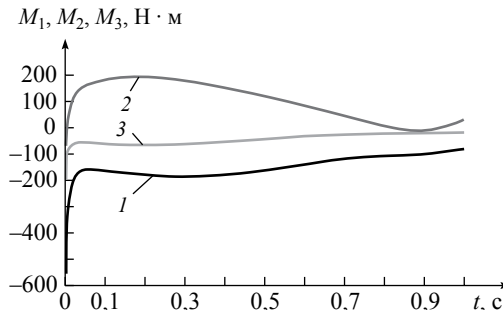


Рис. 3. Временные зависимости моментов электроприводов: 1 – $M_1(t)$, 2 – $M_2(t)$, 3 – $M_3(t)$

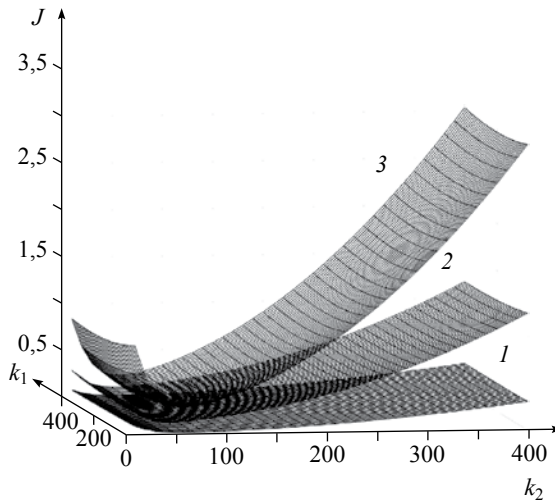


Рис. 4. Целевая функция при фиксированных значениях k_3, k_4, k_5, k_6 : 1 – поверхность $J(k_1, k_2)$ при $\mu_1 = 0,1, \mu_2 = 0,9$, 2 – поверхность $J(k_1, k_2)$ при $\mu_1 = 0,5, \mu_2 = 0,5$, 3 – поверхность $J(k_1, k_2)$ при $\mu_1 = 0,9, \mu_2 = 0,1$

Для повышения энергоэффективности полученного регулятора следует увеличивать величину μ_2 , уменьшая μ_1 . Рассмотрим оптимальный регулятор для случая $\mu_1 = 0,5, \mu_2 = 0,5$: $k_1 = 144, k_2 = 10, k_3 = 10, k_4 = 98, k_5 = 1555, k_6 = 1118$.

Дальнейшее увеличение величины μ_2 позволяет получить регулятор, обеспечивающий большую энергоэффективность. Приведем оптимальные значения коэффициентов для случая $\mu_1 = 0,1, \mu_2 = 0,9$: $k_1 = 142, k_2 = 94, k_3 = 231, k_4 = 74, k_5 = 47, k_6 = 1325$.

Сформулирована задача нелинейной оптимизации параметров регулятора экзоскелета, реализующего вертикализацию. Целевая функция задана как взвешенная сумма двух интегральных критериев качества, связанных с точностью и энергопотреблением механической системы. Оптимизация была выполнена численными методами глобальной оптимизации для различных значений весовых коэффициентов целевой функции, показано, что выбор оптимального вектора \mathbf{k}_m многократно снижает величину целевой функции, повысив точность работы системы автоматического управления и снизив энергопотребление.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 14-39-00008).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dellon B., Matsuoka Y.* Prosthetics, exoskeletons, and rehabilitation / IEEE Robotics and Automation magazine. 2007. 14(1). P. 30.
2. *Bogue R.* Exoskeletons and robotic prosthetics: a review of recent developments / Industrial Robot: An International Journal. 2009. 36(5). P. 421–427.
3. *Dhand S., Singla A., Virk G.S.* A brief review on human-powered lower-limb exoskeletons // In Conference on Mechanical Engineering and Technology (COMET-2016). Varanasi, India. IIT (BHU) 2016. P. 1–7.
4. *Jasińska-Choromańska D., Szykiedans K., Wierciak J. et al.* Mechatronic system for verticalization and aiding the motion of the disabled // Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences. 2013. 61(2). P. 419–431.
5. *Jatsun S., Savin S., Yatsun A. et al.* Adaptive control system for exoskeleton performing sit-to-stand motion // In Mechatronics and its Applications (ISMA), 10th International Symposium on. IEEE, 2015. P. 1–6.

6. *Sergey J., Sergei S., Andrey Y.* Comparative analysis of iterative LQR and adaptive PD controllers for a lower limb exoskeleton // In Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER). International Conference on. IEEE, 2016. P. 239–244.
7. *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.
8. *Jatsun S., Savin S., Yatsun A. et al.* Control system parameter optimization for lower limb exoskeleton with integrated elastic elements // Advances in Cooperative robotics. Proceeding of the 19th International Conference on CLAWAR2016. London. P. 797–805.
9. *Witte K.A., Zhang J., Jackson R.W. et al.* Design of two lightweight, high-bandwidth torque-controlled ankle exoskeletons // IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Seattle. IEEE, 2015. P. 1223–1228.
10. *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 on. Athens. IEEE, 2016. P. 322–326.
11. *Пановко Г.Я., Савин С.И., Яцун С.Ф. и др.* Моделирование процесса вставания экзоскелета из положения сидя // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2016. № 3. С. 19–24.
12. *Яцун С.Ф., Савин С.И., Яцун А.С. и др.* Синтез параметров регулятора экзоскелета, с использованием Iрт последовательностей // Известия Юго-Западного гос. университета. Серия “Техника и технологии”. 2015. № 4 (17). С. 24–31.
13. *Jatsun S., Savin S., Yatsun A.* Comparative analysis of global optimization-based controller tuning methods for exoskeleton performing push recovery / Proceedings of 20th International Conference on System Theory. Control and Computing Joint Conference SINTES 20. SACCs 16. SIMSIS 20, 2016. Fundata. IEEE, 2015. P. 107–112.
14. *Jatsun S.F., Vorochaeva L.Yu., Yatsun A.S. et al.* The modelling of the standing-up process of the anthropomorphic mechanism // In Assistive Robotics: Proceedings of the 18th International Conference on CLAWAR 2015. Hangzhou. World Scientific Publishing. 2015. P. 175–182.
15. *Пановко Г.Я., Яцун С.Ф., Савин С.И. и др.* Особенности управления движением многозвенной электромеханической системы с учетом свойств электропривода // Машиностроение и инженерное образование. 2016. № 2 (47). С. 2–10.
16. *Формальский А.М.* Перемещение антропоморфных механизмов. М.: Наука, 1982. 368 с.
17. *Лапшин В.В.* Механика и управление движением шагающих машин. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. 200 с.
18. *Брискин Е.С., Чернышев В.В.* Динамика шагающих машин с двигателями на базе цикловых механизмов при ослабленной гравитации / Проблемы машиностроения и надежности машин. 2006. № 1. С. 15–20.
19. *Брискин Е.С., Соболев В.М.* Тяговая динамика шагающих машин с ортогональными двигателями // Проблемы машиностроения и надежности машин. 1990. № 3. С. 28–34.
20. *Брискин Е.С.* Об общей динамике и повороте шагающих машин // Проблемы машиностроения и надежности машин. 1997. № 6. С. 33–39.
21. *Jatsun S., Savin S., Yatsun A. et al.* Study of Controlled Motion of Exoskeleton Moving from Sitting to Standing Position // In Advances in Robot Design and Intelligent Control. Belgrade. Springer International Publishing. 2016. P. 165–172.
22. *Jatsun S., Savin S., Lushnikov B. et al.* Algorithm for motion control of an exoskeleton during verticalization // In ITM Web of Conferences. EDP Sciences. 2016. V. 6. P. 1–6.
23. *Craig J.J., Hsu P., Sastry S.S.* Adaptive control of mechanical manipulators // The International Journal of Robotics Research. 1987. 6(2). P. 16–28.
24. *Ortega R., Spong M.W.* Adaptive motion control of rigid robots: A tutorial // Automatica. 1989. 25(6). P. 877–888.