

Lower body exoskeletons**Экзоскелеты нижней части тела***A. V. Mesropyan* *, *Yu. O. Urazbakhtina**A. B. Mesropyan* *, *Ю. О. Уразбахтина*

Ufa State Aviation Technical University, K. Marx Str. 12, Ufa, 450008, Russia

* mesropyan.av@ugatu.su

Уфимский государственный авиационный технический университет, Россия, 450008, Уфа, ул. К. Маркса, 12

* mesropyan.av@ugatu.su

ABSTRACT

This article is devoted to the problem of excluding immobilization syndrome in patients by means of their verticalization. The article examines the method of verticalization using exoskeletons of the lower body, the existing schematic solutions of exoskeletons, as well as promising areas of research in this area. The classification of medical exoskeletons of the lower body used for verticalization of patients during rehabilitation is given. Based on the analysis of the exoskeleton market and consumer reviews, the authors identified the necessary characteristics that, in their opinion, the next generation exoskeleton should have. Based on the results of the analysis of scientific publications, trends were revealed in the selection and construction of calculation schemes for exoskeletons and the compilation of mathematical models to describe the gait of a man-machine complex. The main goals and objectives of further research in the field of designing exoskeletal devices for patient rehabilitation have been determined.

KEYWORDS

Rehabilitation; verticalization; classification; exoskeleton; review.

АННОТАЦИЯ

Работа посвящена проблеме исключения у пациентов иммобилизационного синдрома путем их вертикализации. Исследуется способ вертикализации с помощью экзоскелетов нижней части тела, существующие схемные решения экзоскелетов, а также перспективные направления исследований в данной области. Приводится классификация медицинских экзоскелетов нижней части тела, использующихся для вертикализации пациентов при реабилитации. На основе проведенного анализа рынка экзоскелетов и отзывов потребителей авторы выявили необходимые характеристики, которыми, по их мнению, должен обладать экзоскелет следующего поколения. По результатам анализа научных публикаций были выявлены тенденции в выборе и построении расчетных схем экзоскелетов и составлении математических моделей для описания походки человека-машинного комплекса. Определены основные цели и задачи дальнейших исследований в области проектирования экзоскелетных устройств для реабилитации пациентов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Реабилитация; вертикализация; классификация; экзоскелет; обзор.

Введение

Иммобилизационный синдром (ИС) – одна из наиболее часто решаемых проблем при проведении реабилитационных мероприятий. Частота его развития у пациентов с острой церебральной недостаточностью достигает 65–80%, а у пациентов отделений реанимации с длительностью пребывания более 48 часов – 55–98% [1].

Причинами ИС являются:

- острая церебральная недостаточность (инсульт, черепно-мозговая и спинномозговая травма, инфекции и интоксикации ЦНС, полирадикулонейропатии и т.д.);
- острое поражение периферической нервной системы (полирадикулонейропатии);
- осложнения медицинских воздействий (постельный режим, седация, миорелаксация, искусственная вентиляция легких и т.д.).

Единственным способом преодоления иммобилизационного синдрома в части сохранения витальных параметров стабильными в любом положении тела по отношению к гравитационному полю Земли является вертикализация пациента.

Помимо существующих технологий вертикализации при помощи 3-х секционных кроватей и поворотных столов сегодня всемирной популярностью пользуются экзоскелеты для реабилитации пациентов. Однако, несмотря на существующее количество коммерческих предложений по медицинским экзоскелетам, создание роботизированного комплекса, отвечающего всем требованиям потребителей, остается актуальной проблемой.

1. Анализ существующих экзоскелетов для реабилитации

По результатам анализа рынка технических средств по реабилитации больных была создана классификация существующих экзоскелетов, приведенная на рис. 1.

По итогам опросов медицинского персонала и пациентов, использующих экзоскелеты для реабилитации, были выявлены лучшие компании-производители [2]. В их число входят: Parker Hannifin Corporation (США), Lockheed Martin (США), Hyundai Motor Company (Южная Корея), Rewalk Robotics Ltd. (США), Ekso Bionics Holding Inc. (США), Honda Moto Company (Япония), SuitX Inc. (США), Bionik Laboratories (Канада), Myomo Inc. (Япония), Ottobock HealthCare GmbH (Германия).

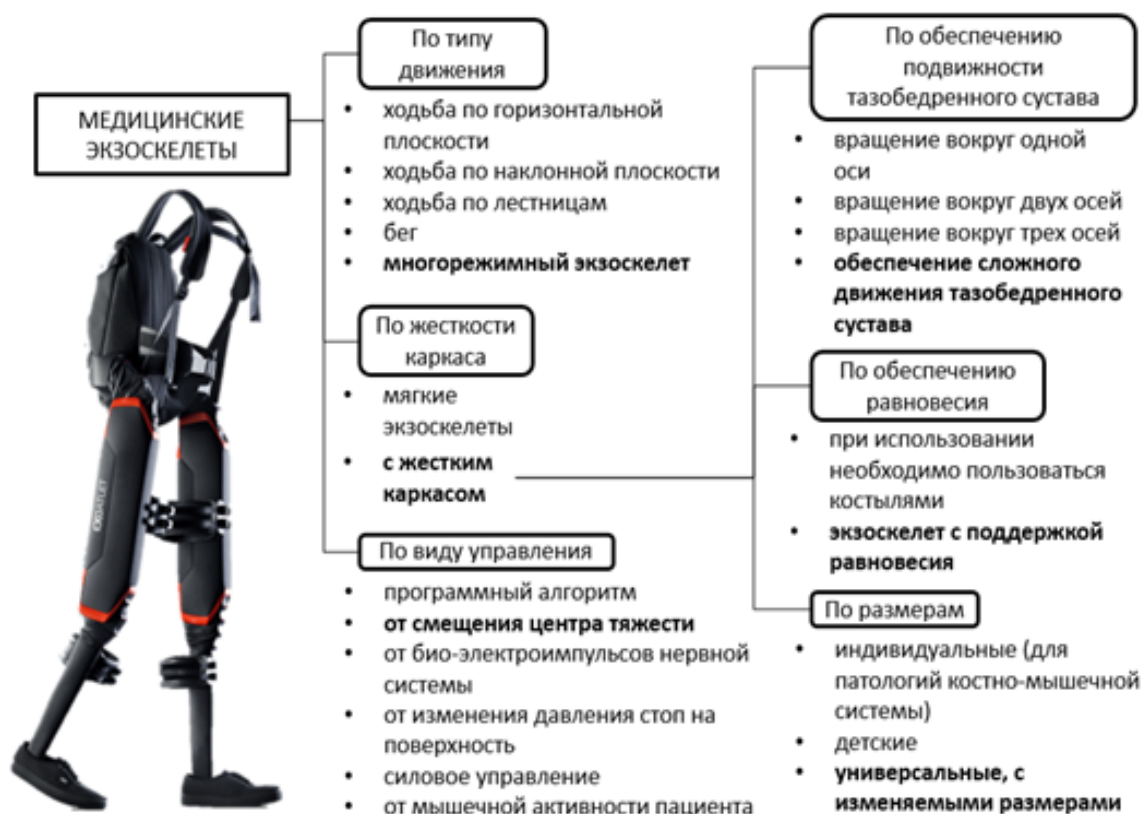


Рис. 1. Классификация экзоскелетов нижней части тела для вертикализации пациентов

Fig. 1. Classification of lower body exoskeletons for verticalization of patients

Проанализировав отличительные особенности экзоскелетов для вертикализации пациентов указанных компаний-производителей и отзывы потребителей, авторы собрали несколько характеристик, которыми, по их мнению, должен обладать экзоскелет будущего:

- прочный, жесткий каркас;
- минимальный вес устройства;
- отсутствие лямок и рюкзаков, давящих на плечи;
- отсутствие гистерезиса и ошибок управления;
- наличие системы ограничений движения суставов в соответствии с анатомией человека;
- возможность изменения размеров;
- наличие программной адаптивной помощи;
- система автоматического поддержания равновесия человека-машинного комплекса;
- возможность сохранения и обработки данных о тренировке бортовым компьютером;
- наличие подсказок при тренировке для пациента;
- обеспечение всех видов движения сложных суставов (например, тазобедренного) в соответствии с анатомией человека.

Для возможности создания человека-машинного комплекса, повторяющего есте-

ственные движения человека при ходьбе, необходимо разработать корректную расчетную схему и методику математического моделирования динамики ходьбы. Расчетные схемы подразделяются по количеству звеньев, подобранных в соответствии с обеспечением требуемого числа степеней свободы и количества рассматриваемых суставов. При составлении математической модели зачастую используют уравнения Лагранжа второго рода, решения которых находятся численными методами, при этом за обобщенные координаты принимаются угловые переменные.

Так, в своей диссертации А. В. Борисов приводит расчетную схему человека из 11 деформируемых звеньев, центры масс которых смещаются при их деформации. Рассмотрено плоское движение, возможно создание вращающего момента в каждом соединении. Математическая модель построена на уравнениях Лагранжа второго рода [3].

Расчетная схема экзоскелета с полицентрической схемой колена команды южнокорейских ученых Т. Lee, D. Lee, B. Song и Y. Baek приведена на рис. 2. За счет реализации сложного движения узла коленного сустава гидроцилиндром, экзоскелет снижает болевые ощущения при использовании за счет повторения смещения осей вращения коленного сустава человека при движении [4].

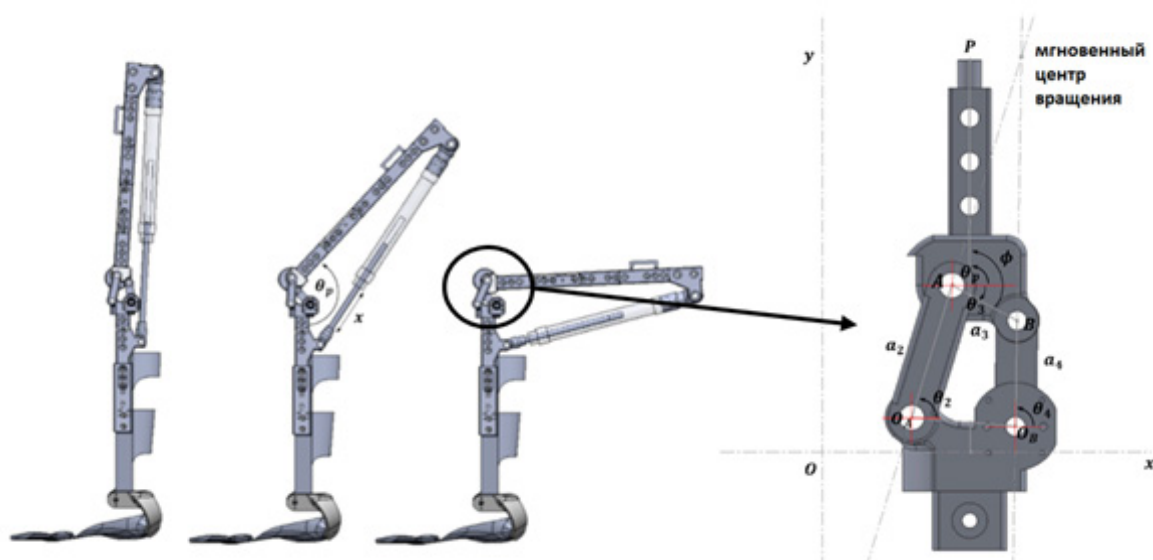


Рис. 2. Расчетная схема экзоскелета Т. Lee, D. Lee, B. Song и Y. Baek [4]

Fig. 2. Design scheme of exoskeleton T. Lee, D. Lee, B. Song and Y. Baek [4]

Математическая модель экзоскелета (1) с полицентрической схемой колена состоит из уравнения неразрывности, динамики подкачивающего насоса, динамики гидроцилиндра и уравнения баланса расходов [4].

$$\left\{ \begin{array}{l} D_m \dot{\theta}_m + C_m (P_2 - P_1) - C_m P_1 - Q_1 = 0, \\ Q_2 - C_m P_2 - C_m (P_2 - P_1) - D_m \dot{\theta}_m = 0; \\ Q_L = \frac{Q_1 + Q_2}{2} = D_m \dot{\theta}_m - (C_m + \frac{C_m}{2}) P_L; \\ P_L = P_1 - P_2; \\ \left\{ \begin{array}{l} \frac{V_1}{\beta_e} \dot{P}_1 = -A_1 \dot{x} - C_m (P_1 - P_2) - C_{m1} (P_1 - P_r) + Q_1 \\ \frac{V_2}{\beta_e} \dot{P}_2 = -A_2 \dot{x} - C_m (P_1 - P_2) - C_{m2} (P_2 - P_r) + Q_2 \end{array} \right. \\ \left\{ \begin{array}{l} V_1 = V_1^0 + A_1 x, \\ V_2 = V_2^0 + A_2 x; \end{array} \right. \\ \dot{P}_L = \frac{4\beta_e}{V} (Q_L - \bar{A}\dot{x} - C_L P_L) \\ m\ddot{x} = P_L \bar{A} - f(x) - F_L; \\ f(x) = B\dot{x} + \mathcal{K}; \\ m\ddot{x} = \frac{4\beta_e}{V} (Q_L - \bar{A}\dot{x} - C_L P_L) \bar{A} - \dot{f}(x) - \dot{F}_L; \\ Q_L = D_m \dot{\theta}_m = \tilde{s}_r^{-1} D_m u. \end{array} \right. \quad (1)$$

Однако использование гидравлического привода исполнительных механизмов в рассмотренном варианте экзоскелета предпо-

лагает наличие гидравлического бака, который увеличивает габариты и вес устройства, а вслед за ним и инерционность системы.

В своей статье В. Chen предлагает метод моделирования походки человека с костылями. Расчетная схема приведена на рис. 3 [5].

Для составления математической модели по данной расчетной схеме было использовано определение центра масс системы и центра давления на горизонтальную поверхность, которые связаны между собой уравнением (2) [5].

$$\Delta x_{COG} = k_j \Delta x_{COP}, \quad (2)$$

где Δx_{COG} – абсцисса центра тяжести; k_j – коэффициент пропорциональности, установленный в предварительном эксперименте; Δx_{COP} – абсцисса центра давления на горизонтальную поверхность.

Неантропоморфный экзоскелет Н. Lee, Н. Kim и J. Park позволяет осуществлять вращение тазобедренного сустава в трех плоскостях и минимизирует болевые эффекты от несовпадения осей вращения суставов человека с исполнительными приводами экзоскелета. Расчетная схема человеко-машинного комплекса представлена на рис. 4 [6].

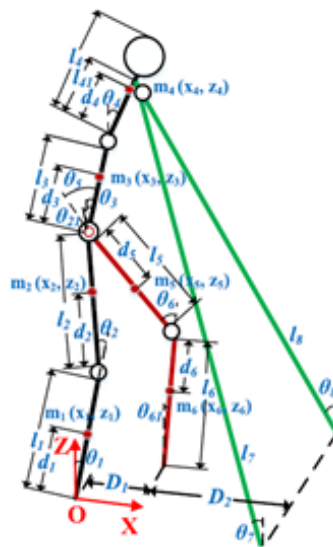


Рис. 3. Расчетная схема человека с костылями В. Chen, С.-Н. Zhong, X. Zhao и др. [5]

Fig. 3. Design scheme of a person with crutches В. Chen, С.-Н. Zhong, X. Zhao, etc. [5]

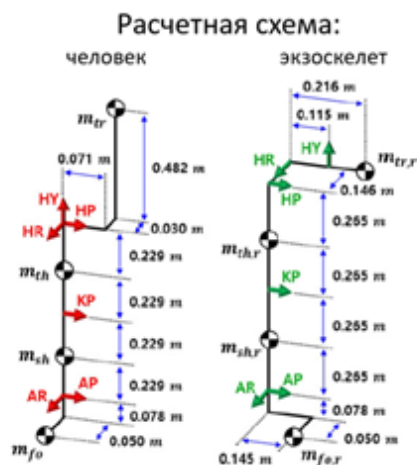


Рис. 4. Расчетная схема человека и неантропоморфного экзоскелета
H. Lee, H. Kim, J. Park [6]

Fig. 4. Design scheme of a person and a non-anthropomorphic exoskeleton
H. Lee, H. Kim, J. Park [6]

Недостатком указанного схемного решения является невозможность крепления устройства к человеку, а также невозможность учета в предложенной математической модели нежесткости силовых элементов конструктивных элементов и люфтов в сопрягаемых узлах.

Выводы

На основе проведенного анализа программ реабилитации пациентов и использования экзоскелетов для вертикализации людей с нарушениями функций опорно-двигательного аппарата были выявлены следующие проблемы существующих экзоскелетных устройств:

- высокий удельный вес экзоскелетного устройства;
- наличие лямок, рюкзаков, давящих на плечи и сковывающих, в определенных условиях, движения пациентов;

- болевые эффекты в местах контакта человека и экзоскелета;
- низкое быстродействие системы;
- отсутствие системы предохранения от травм пациента в случае неправильной настройки устройства;
- ошибки при считывании управляющих сигналов в виде электроимпульсов мышечной активности с кожи пациентов;
- отсутствие интуитивно понятных подсказок программы для корректировки движений пациента;
- отсутствие автоматического поддержания равновесия человеко-машинного комплекса;
- отсутствие привода голеностопного сустава, что не способствует быстрому восстановлению кровообращения.

Цели, задачи и декомпозиция задач разработки медицинского экзоскелета, отвечающего требованиям безопасности, представлена на рис. 5.

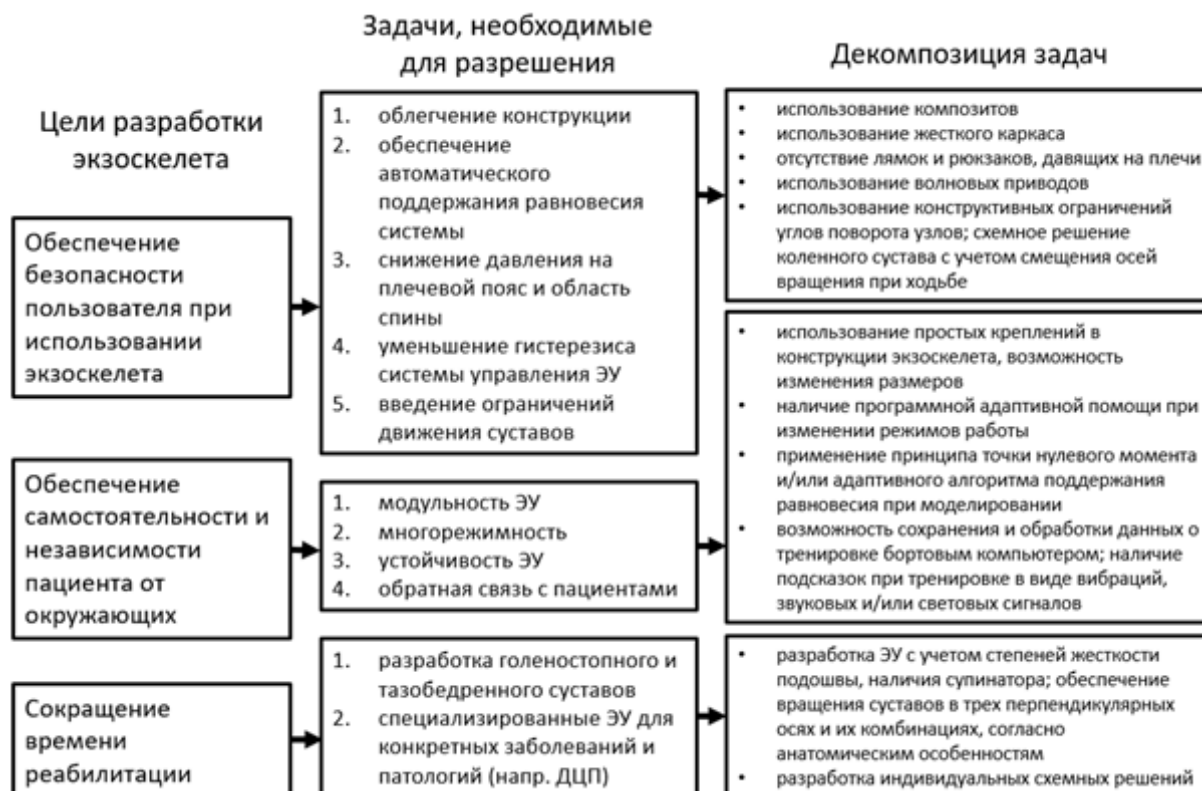


Рис. 5. Цели и задачи разработки экзоскелета для вертикализации пациентов

Fig. 5. Objectives and objectives of the development of an exoskeleton for verticalization of patients

Разработка удобного, легкого и простого в эксплуатации экзоскелета остается актуальной задачей. Декомпозиция задач по результатам проведенного аналитического обзора экзоскелетных устройств позволила определить ключевые направления и содержание работ по созданию перспективного образца экзоскелетного устройства.

Список литературы

1. Алашеев А. М., Анисимова Л. Н., Белкин А. А. Вертикализация пациентов в процессе реабилитации. Клинические рекомендации, 2014. 63 с.
2. Топ 10 производителей экзоскелетов. URL: <http://robotrends.ru/robopedia/proizvoditeli-ekzoskeletov>
3. Борисов А. В. Динамика механических стержневых систем со звеньями переменной длины применительно к эндо- и экзоскелетам. Москва, 2018.
4. Design and control of a polycentric knee exoskeleton using an electro-hydraulic actuator /

T. Lee et al. // Sensors (Switzerland). 2020. V. 20, Iss. 1. DOI: 10.3390/s20010211.

5. Reference Joint Trajectories Generation of CUHK-EXO Exoskeleton for System Balance in Walking Assistance / B. Chen et al. // IEEE Access. 2019. V. 7. P. 33809–33821. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.109384.

6. Lee H., Kim H. J., Park J. Control of a nonanthropomorphic exoskeleton for multi-joint assistance by contact force generation // International Journal of Advanced Robotic Systems. 2018. V. 15, Iss. 3. P. 1–12. DOI: 10.1177/1729881418782098.

7. Chen S., Chen Z., Yao B. Precision Cascade Force Control of Multi-DOF Hydraulic Leg Exoskeleton // IEEE Access. 2018. V. 6 (1). P. 8574–8583. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2801351.

8. A soft robotic exosuit improves walking in patients after stroke / L. N. Awad et al. // Science Translational Medicine. 2017. V. 9, Iss. 400. DOI: 10.1126/scitranslmed.aai9084.

9. Personalised Control of Robotic Ankle Exoskeleton Through Experience-Based Adaptive Fuzzy Inference / K. Yin et al. // *IEEE Access*. 2019. V. 7. P. 72221–72233. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2920134.
10. Design and control of a bio-inspired soft wearable robotic device for ankle-foot rehabilitation / Y.-L. Park et al. // *Bioinspiration and Biomimetics*. 2014. V. 9, No. 1. Article number 016007. DOI: 10.1088/1748-3182/9/1/016007.
11. Suebsomran A. Design and control of a passive compliant actuation with positioning measurement by LED and photodiode detector for medical application // *Measurement and Control*. 2021. V. 54, Iss. 3–4. P. 216–230. DOI: 10.1177/0020294021989749.
12. Lewis C. L., Ferris D. P. Invariant hip moment pattern while walking with a robotic hip exoskeleton // *Journal of Biomechanics*. 2011. V. 44, Iss. 5. P. 789–793. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2011.01.030.
13. Petcu A., Tarnita D., Tarnita D. N. Design and virtual model of an exoskeleton for lower limb rehabilitation // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. V. 997 (1). Article number 012085. DOI: 10.1088/1757-899X/997/1/012085.
14. Herr H. M., Paluska D. J., Dilworth P. Artificial human limbs and joints employing actuators, springs and variable-damper elements. Patent USA 10588759 B2, Int. Cl. A61F 2/64, A61F 2/68. Publ. 17.03.2020.
15. Orthopedic device including protruding members / Walsh C. J. et al. // Patent USA 10864100 B2, Int. Cl. A61F 5/00, A61F 5/01. Publ. 15.12.2020.
16. Motion assistance apparatus / Choi H. D. et al. // Patent USA 10688009 B2, Int. Cl. A61H 3/00, B25J 9/00. Publ. 23.06.2020.
17. Exoskeleton structure that provides force assistance to the user / Soucy F. et al. // Patent USA 10864133 B2, Int. Cl. A61H 3/00, A61H 1/02. Publ. 15.12.2020.
18. Sugishima Y., Mizutani A., Park K. Y. Etching liquid, kit of same, etching method using same, method for producing semiconductor substrate product, and method for manufacturing semiconductor element. Patent US 2016/0083650 A1, Int. Cl. B25J 9/00, A61H 3/00, A61F 5/01, A61H 1/02 2020. Publ. 24.03.2016.
19. State-of-the-art research in robotic hip exoskeletons: A general review / B. Chen et al. // *Journal of Orthopaedic Translation*. 2020. V. 20. P. 4–13. DOI: 10.1016/j.jot.2019.09.006.
20. Model-based mechanical design of a passive lower-limb exoskeleton for assisting workers in shotcrete projection / S. L. Capitani et al. // *Meccanica*. 2021. V. 56, Iss. 1. P. 179–193. DOI: 10.1007/s11012-020-01282-3.
21. Fluid-driven origami-inspired artificial muscles / S. Li et al. // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2017. V. 114 (50). P. 13132–13137. DOI: 10.1073/pnas.1713450114.
22. Variable stiffness devices and methods of use / M. Popovic et al. // Patent USA 10952888 B2, Int. Cl. A61F 5/05, A61F 5/058. Publ. 23.03.2021.
23. Ings R. D. Hybrid hydrostatic rotary actuator apparatus. Patent USA 10895271 B2, Int. Cl. F15B 11/072, F15B 15/12, F15B 15/10, B25J 13/02, B25J 9/11. Publ. 19.01.2021.
24. Tools for simulating humanoid robot dynamics: A survey based on user feedback / S. Ivaldi et al. // 2014 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots. 2014. P. 842–849. DOI: 10.1109/HUMANOIDS.2014.7041462.