

УДК 621.85-52; 531/534
DOI: 10.25686/2542-114X.2019.4.86

ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ЛОКОМОЦИЙ ДЛЯ РЕСУРСНЫХ ИСПЫТАНИЙ ЭКЗОСКЕЛЕТА МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

**А. В. Капустин¹, Ю. В. Лоскутов¹, М. Ю. Лоскутов¹,
М. Д. Соловьева², А. Р. Насыбуллин³**

¹Поволжский государственный технологический университет (г. Йошкар-Ола)

²Марийский машиностроительный завод (г. Йошкар-Ола)

³Волжский электромеханический завод (г. Волжск)

Экзоскелеты (роботизированные костюмы) в настоящее время становятся все более распространенными. Они различаются по размеру и функциональному назначению. Такие антропоморфные структуры фиксируются на конечностях и теле человека. Экзоскелеты предназначены для воспроизведения движений с возможным масштабированием усилий. Они позволяют человеку выполнять сложные действия, связанные с повышенными нагрузками. Кроме того, они помогают людям, имеющим двигательные нарушения или нервно-мышечные дисфункции, быстрее реабилитироваться и просто иметь возможность перемещаться. Медицинский экзоскелет должен полностью повторять локомоции человека, в отличие от промышленного или военного экзоскелетов. Повышенные требования при этом предъявляются к прочности и жесткости звеньев, узлов и приводов. Экзоскелет должен выдерживать вес человека до 100 кг. Должна быть высокая точность системы позиционирования суставов человека с кинематическими парами экзоскелета. Также при этом должна быть обеспечена надежность сборки узлов и изделия в целом.

Актуальность работы обусловлена необходимостью разработки стационарных методик испытаний экзоскелета, позволяющих эквивалентно воссоздать различные циклы работы, в том числе в форсированном режиме, исключающих перемещение в пространстве. В работе выполнено расчетное обоснование эквивалентности по энергетическим показателям режимов работы экзоскелета с весовым манекеном. Рассмотрены педалирование на велотренажере, ходьба, присед и вставание с опоры. Критериями эквивалентности движений в шарнире приняты среднеквадратичный вращающий момент, эквивалентная мощность, средняя частота оборотов между звеньями. Сопоставление значений основных параметров локомоций дает небольшие расхождения наибольших эквивалентных моментов, средних межзвенных частот оборотов и эквивалентных мощностей в шарнирах. По энергетическим показателям режимов работы экзоскелета с весовым манекеном локомоции (ходьба, вставание-присед и велопедальное) вполне могут быть эквивалентны при правильном выборе параметров движений. Показано, что использование велотренажера для проведения ресурсных испытаний экзоскелета вполне может быть допустимо.

Ключевые слова: экзоскелет; ресурсные испытания; локомоции человека; энергетическая эквивалентность; ходьба; велопедальное.

Введение. При запуске изделия в производство или в процессе доводки конструкции требуется проведение ресурсных испытаний – лабораторных испытаний на надежность. Их проводят для определения технического ресурса как отдельных элементов, так и всего изделия в целом [1]. В зависимости от назначения изделия данные испытания можно вы-

полнять самостоятельно в ходе периодических и/или приемочных испытаний.

В рамках реализации комплексного проекта «Создание высокотехнологичного производства многофункционального роботизированного экзоскелета медицинского назначения («РЭМ»)» (шифр 2017-218-09-1807), утвержденное постановлением Правительства Рос-

сийской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218), в Поволжском государственном технологическом университете («Волгатех») разработан и ставится на производство на Волжском электромеханическом заводе многофункциональный роботизированный экзоскелет медицинского назначения Remotion [2, 3]. Данный экзоскелет предназначен для помощи больным с нарушениями опорно-двигательного аппарата. В процессе ресурсных испытаний экзоскелета проверяют параметры, предусмотренные техническим заданием на проектирование, выявляют недостатки и погрешности изготовления узлов, ошибки алгоритма работы электромеханической части и работы процессора [4].

Задание на проведение ресурсных испы-

таний предусматривало цикл, подобный циклу реабилитации для пациента, включая:

- прямолинейную ходьбу по горизонтальной поверхности со скоростью $v = 1,5$ км/ч;
- 5 повторов вставания и приседа на опору продолжительностью примерно 30 секунд каждый.

Длительность цикла реабилитации составляет 1 час. Рассматривается человек со среднестатистическими параметрами – массой 75 кг, ростом 175 см.

Проведение ресурсных испытаний с весовым манекеном 75 кг, включающих 160 часов циклов ходьбы по беговой дорожке (см. рис. 1) и 3500 циклов «присед-вставание с опоры», потребовало суммарно 10 суток работы двух ассистентов-лаборантов.

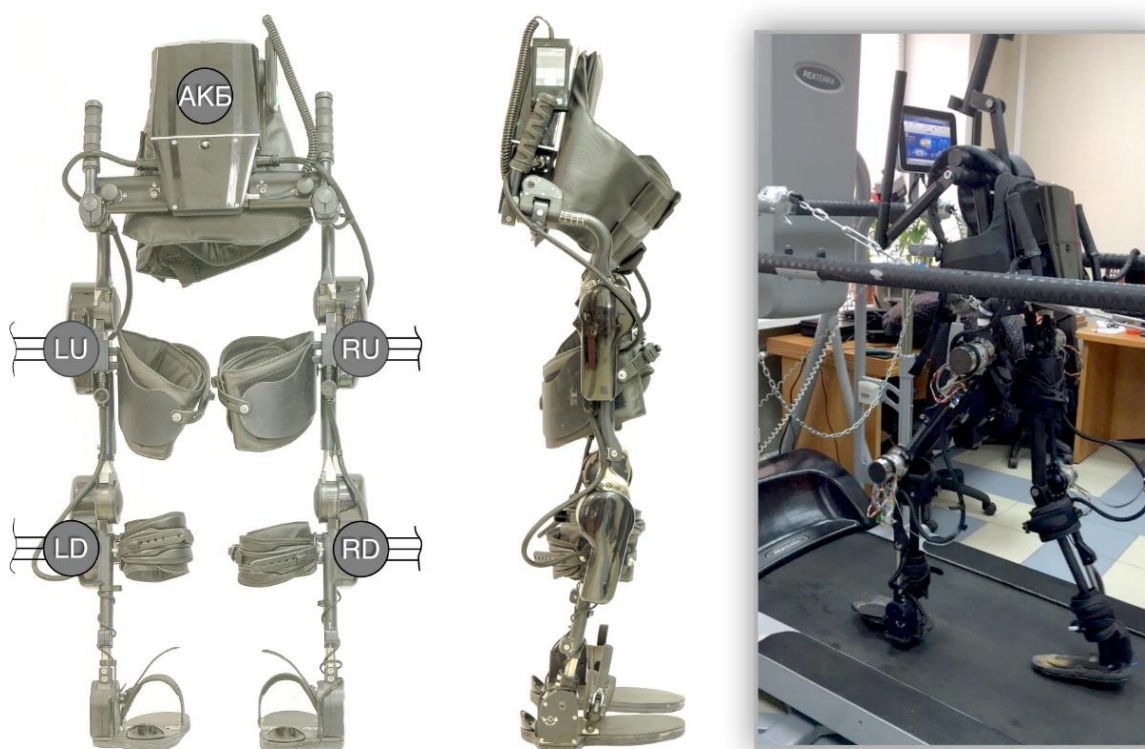


Рис. 1. Общий вид экзоскелета Remotion. Ресурсные испытания экзоскелета на беговой дорожке

Проведение испытаний в штатном режиме эксплуатации (ходьба, присед) опасно для оператора, требует больших помещений и затрат человеко-часов операторов, ассистентов, следящих за балансом равновесия и безотказ-

ностью системы человек-экзоскелет (или весовой манекен-экзоскелет). Поэтому **актуальность работы** обусловлена необходимостью разработки стационарных методик испытаний экзоскелета, позволяющих эквива-

лентно воссоздать различные циклы работы, в том числе в форсированном режиме, исключая перемещение в пространстве.

Цель работы – оценка возможности и обоснование испытаний электромеханических частей привода реабилитационного экзоскелета медицинского назначения (РЭМ) на велостенде. В работе предполагалось определить энергетические показатели режимов работы экзоскелета при ходьбе, приседе, вставании с опоры и велопедальровании, выбрать критерии эквивалентности и дать расчетное обоснование эквивалентности по энергетическим показателям выбранных режимов работы экзоскелета с весовым манекеном.

1. Аналогии функциональных движений. Для оценки возможности ресурсных испытаний РЭМ на велотренажере рассмотрим параметры pedalирования: частоту и шаг. Эти параметры имеют аналоги в других видах функциональных движений, например, ходьбе по горизонтальной поверхности [5, 6]. Анализ ходьбы показывает, что удельную работу \tilde{A} , приходящуюся на единицу пути, развиваемую при ходьбе мощность P и оптимальную длину шага $L_{\text{опт}}$ можно рассчитать по формулам [7]

$$\tilde{A} = \left(\frac{mgL}{4h} \right) + \left\{ 4\mu \frac{mgh}{L} (Fr)^2 \right\}, \quad (1)$$

$$\tilde{A}_{\text{опт}} = 2 \cdot m \cdot g \cdot (Fr) \cdot \sqrt{\mu}, \quad (2)$$

$$P = \left(\frac{mgL}{4h} v \right) + \left\{ 4\mu \frac{m}{L} v^3 \right\}, \quad (3)$$

$$L_{\text{опт}} = 4 \cdot v \cdot \sqrt{\frac{\mu \cdot h}{g}}, \quad (4)$$

где m – масса человека; g – ускорение свободного падения; L – длина шага; h – вертикальная координата положения центра масс;

$\mu = \frac{m_{\text{ноги}}}{m_{\text{корп}}}$ – отношение массы ноги к массе

корпуса; $Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot h}}$ – число Фруда; v – скорость передвижения.

Первые члены уравнений (1) и (3) в круглых скобках определяют работу и мощность, затрачиваемые на поддержание тела, вторые члены (в фигурных скобках) – на перенос ноги. Численные решения уравнений (1)-(4) [7] показали, что при $g = 9,8 \text{ м/с}^2$, $h = 1 \text{ м}$, $\mu = 0,2$ и $v = 1,25 \text{ м/с}$ (или $4,5 \text{ км/ч}$) оптимальная длина шага при ходьбе составляет $L_{\text{опт}} = 0,7 \text{ м}$ при частоте шага $f_{\text{опт}} = 105,3 \text{ шаг/мин}$. При этом мощность будет составлять $P_{\text{мин}} = 150 \text{ Вт}$.

Отмечено [7], что оптимальный шаг при ходьбе приблизительно равен шагу pedalирования, то есть четырехкратной длине кривошипа. Длина кривошипа гоночного велосипеда, согласно существующему стандарту, равна $0,171 \text{ м}$ ($6,75''$) или $0,178 \text{ м}$ ($7,0''$). Таким образом, шаг pedalирования составляет соответственно $0,684$ или $0,712 \text{ м}$. При аналогичной мощности ($P = 150 \text{ Вт}$) езда на велосипеде с частотой pedalирования $f = 105,3 \text{ об/мин}$ позволяет развить скорость 24 км/ч .

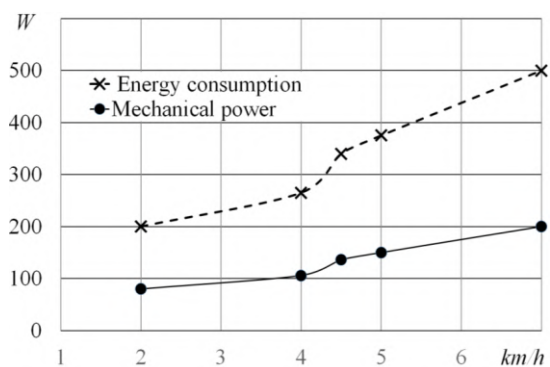


Рис. 2. Энергозатраты и механическая мощность человека при ходьбе

Такое совпадение не является случайным. Закономерность получена в результате стремления конструкторов велосипеда и спортсменов-велогонщиков к максимальной экономической организации функционального движения. В теории ходьбы и pedalирования на велосипеде исследователи и конструкторы разными способами получили общий результат: оптимальные по мощности шаг ходьбы и

шаг педалирования приблизительно равны между собой при одинаковой частоте функциональных движений.

Рассмотрим зависимости энергозатрат и развиваемой мощности от скорости движения для ходьбы и велопедалирования (см. рис. 2, 3). Отметим, что для ходьбы со скоростью 4,5 км/ч и езды на велосипеде со скоростью 24 км/ч развиваемая мощность получается сходной.

На основе работ [5-8] и результатов собственных экспериментов получены графики изменения частот оборотов, моментов в тазобедренном и коленном приводах для ходьбы, велопедалирования и цикла «вставание-присед» (см. рис. 4-5) в зависимости от фазы цикла T , %, для различных скоростей пере-

движения и массы системы. Графики построены для человека весом 75 кг, идущего со скоростью 4,5 км/ч или едущего на велосипеде со скоростью 24 км/ч.

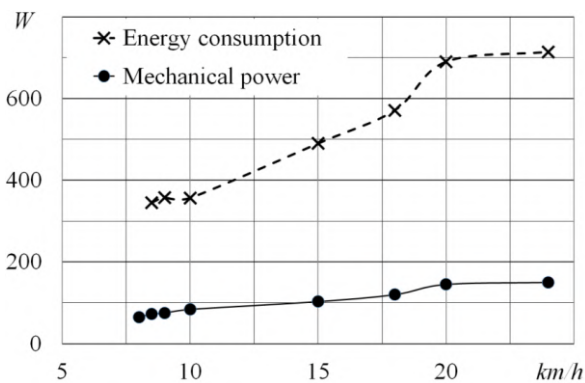


Рис. 3. Энергозатраты и механическая мощность человека при езде на велосипеде

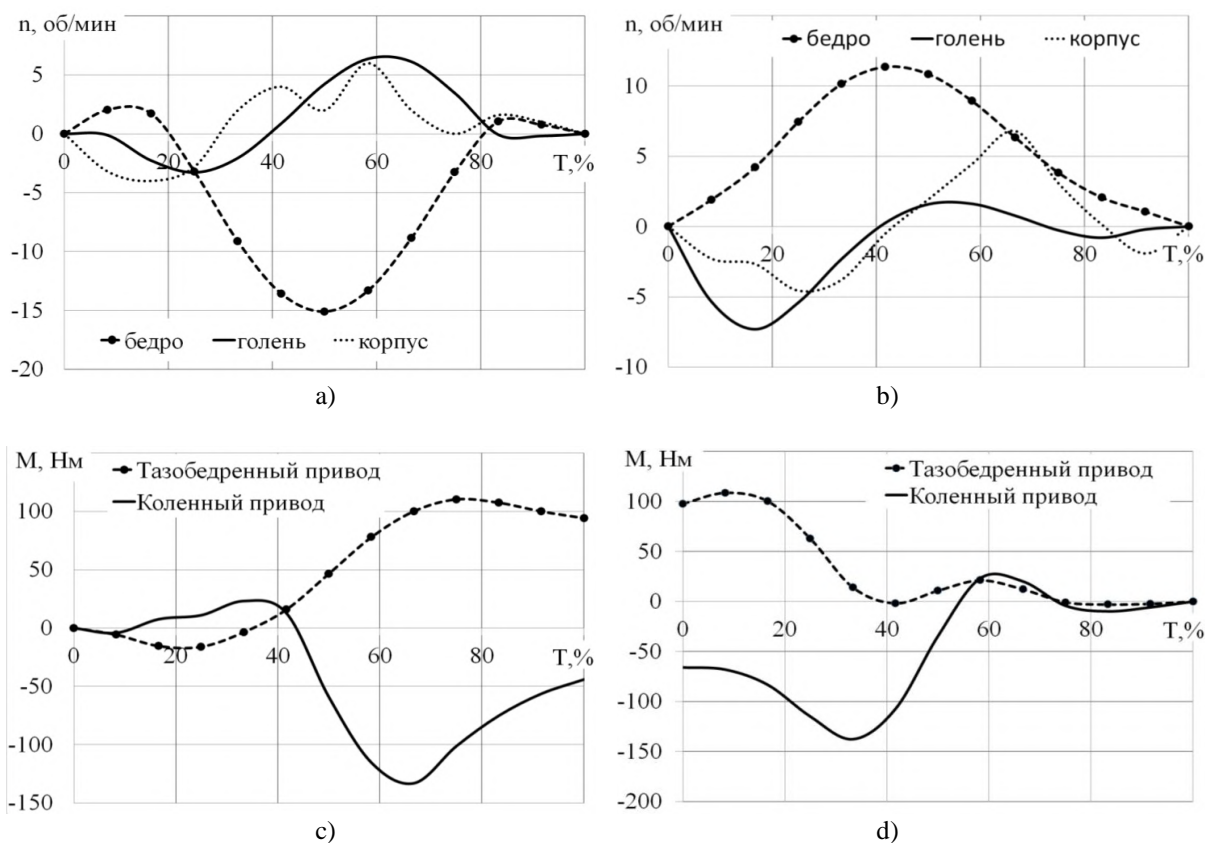


Рис. 4. Частоты вращения и моменты в цикле «вставание-присед»:

- a – частоты вращения при вставании с опоры;
- b – частоты вращения при приседе на опору;
- c – моменты при вставании с опоры;
- d – моменты при приседе на опору

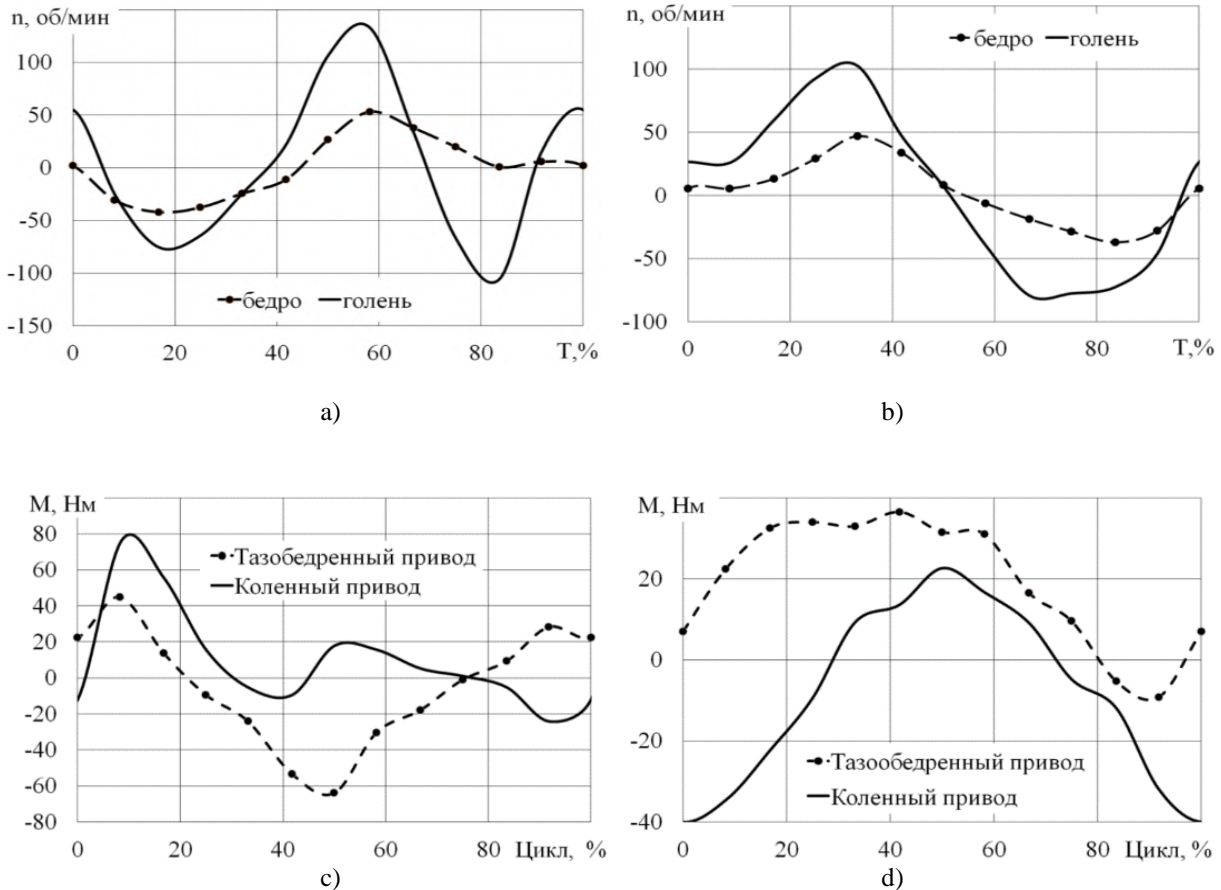


Рис. 5. Частоты вращения и моменты в локомоциях:

- a – частоты вращения при прямолинейной ходьбе со скоростью 4,5 км/ч;
- b – частоты вращения при педалировании велосипеда со скоростью 24 км/ч;
- c – моменты при прямолинейной ходьбе со скоростью 4,5 км/ч;
- d – моменты при педалировании велосипеда со скоростью 24 км/ч

2. Энергетическая эквивалентность движений. Критериями эквивалентности движений примем среднеквадратичный момент [9], возникающий в приводе,

$$M_{\text{эkv}} = \sqrt{\frac{\sum t_i M_i^2}{\sum t_i}}, \text{ Нм}, \quad (5)$$

эквивалентную мощность [9] в приводе

$$P_{\text{эkv}} = \sqrt{\frac{\sum t_i P_i^2}{\sum t_i}}, \text{ Вт}, \quad (6)$$

и среднюю частоту оборотов между звеньями

$$n_{\text{cp}} = \frac{\sum t_i n_i}{\sum t_i}, \text{ об/с}. \quad (7)$$

На основе анализа графиков движений [10], аппроксимации полученных результатов

получены основные параметры движений для различных режимов (см. таблицу).

Выводы

Анализ результатов позволяет сделать ряд выводов.

1. Сопоставление значений основных параметров локомоций в разных режимах дает небольшие расхождения наибольших эквивалентных моментов, средних межзвенных частот оборотов и эквивалентных мощностей в шарнирах.

2. По энергетическим показателям режимов работы экзоскелета с весовым манекеном локомоции (ходьба, вставание-присед и вело-педалирование) вполне могут быть эквивалентны при правильном выборе параметров движений.

Сопоставление различных движений по выбранным критериям

Вид движения	Сустав	Момент	Частота оборотов пер	Мощность $P_{экв}$	
		$M_{экв}$		изолированно	суммарно
		Нм	об/мин	Вт	
Ходьба	Скорость 4,5 км/ч, темп 105,3 шаг/мин, длина шага 0,7 м, мощность $P_{полезн}$ 150 Вт				
	тазобедренный	30,5	24,24	73,29	165,68
	коленный	25,38	60,54	92,39	
	Скорость 1,5 км/ч, темп 65 шаг/мин, длина шага 0,7 м, мощность $P_{полезн}$ 55,23 Вт				
	тазобедренный	30,5	8,08	24,43	55,23
	коленный	25,38	20,18	30,8	
Вставание	тазобедренный	68,52	5,07	103,25	253,81
	коленный	66,24	1,09	150,56	
Присед	тазобедренный	50,24	5,67	37,13	152,00
	коленный	68,79	1,45	114,87	
Велопедализирование	Скорость 24 км/ч, частота 105,3 об/мин, шаг 0,684 - 0,712 м, мощность $P_{полезн}$ 150 Вт				
	тазобедренный	24,73	21,74	70,07	125,43
	коленный	20,99	56,43	55,36	
	Режим 1 соответствия ходьбе 1,5 км/ч. Частота оборотов кривошипа 39,20 об/мин, мощность $P_{вых}$ 69 Вт				
	тазобедренный	30,55	8,09	86,55	68,96
	коленный	25,93	21,01	68,39	
	Режим 2 для вставания-приседа. Частота оборотов кривошипа 27,50 об/мин, мощность $P_{вых}$ 129 Вт				
	тазобедренный	81,11	5,68	229,77	128,44
коленный	68,84	14,74	181,56		

3. Применение подобного способа ресурсных испытаний имеет следующие преимущества:

- стационарность испытаний системы «экзоскелет – весовой манекен». Нет необходимости в больших пространствах. Большая безопасность закрепленной системы;
- упрощение подключения к измерительной аппаратуре;
- возможность проведения испытаний в форсированном режиме;
- возможность воспроизвести самые разнообразные режимы нагружения во вре-

мени, в том числе и критические для экзоскелета;

- возможность моделирования перегрузок кратковременного действия, в том числе от неправильной эксплуатации, сбоя в управлении, нештатных ситуаций, ударных нагрузений (при переносе веса с одной ноги на другую, нагрузке на подошву и т.д.) через коэффициент нагружения 1,2-1,5.

4. На основании вышеизложенного использование велотренажера для проведения ресурсных испытаний экзоскелета вполне может быть допустимо.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного проекта «Создание высокотехнологичного производства многофункционального роботизированного экзоскелета медицинского назначения («РЭМ»)), шифр 2017-218-09-1807, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Редин В.Н., Аббясов В.М. Разработка метода оценки нагруженности элементов технологических роботизированных комплексов // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2012. № 5. С. 21-24.
2. Схемные решения системы управления реабилитационным экзоскелетом медицинского назначения / А.В. Капустин, Ю.В. Лоскутов, Д.В. Скворцов, А.Р. Насыбуллин, К.С. Клюжев, А.И. Кудрявцев // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2018. № 2 (38). С. 77-86. DOI: 10.15350/2306-2819.2018.2.77
3. Synthesis of exoskeleton control algorithms based on kinematic analysis of locomotions and human gait modelling / Y. Loskutov, A. Kapustin, A. Kudryavtsev, A. Nasibullin, A. Lebedeva // Journal of Applied Engineering Science. 2018. No. 16(4). P. 583-591. DOI:10.5937/jaes16-17230
4. Казаков И.Г., Шкляр С.А. Организация производства роботизированного аппарата "экзоскелет "AUXILIUM" // Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физической культуры. 2016. Т. 93, № 2-2. С. 84-85.
5. Winter David A., Biomechanics and motor control of human movement. John Wiley & Sons, Inc., 2009. 370 p.
6. Белецкий В.В. Двухногая ходьба: модельные задачи динамики и управления. Москва: Наука, 1984. 288 с.
7. Любовицкий В.П. Гонимые велосипеды. Ленинград: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1989. 319 с.
8. Турлапов Р.Н. Модели и алгоритмы управления движением экзоскелета для вертикализации и расширения функциональных возможностей человека: дис. ... канд. техн. наук. Курск: Юго-Запад. гос. ун-т, 2015. 172 с.
9. Масандилов Л.Б., Сергиевский Ю.Н., Козырев С.К. Электропривод. Гидро- и виброприводы // Машиностроение: энциклопедия: в 40 т. Т. IV-2: в 2 кн. Кн. 1: Электропривод. Москва: Машиностроение, 2012. 520 с.
10. Mark L. Latash, Vladimir Zatsiorsky. Biomechanics and Motor Control: Defining Central Concepts. Elsevier, Academic Press, 2016. P. 426.

Информация об авторах

КАПУСТИН Александр Валерьевич – доцент кафедры сопротивления материалов и прикладной механики, кандидат технических наук, Поволжский государственный технологический университет, г. Йошкар-Ола. Область научных интересов – теория механизмов и машин, прикладная механика, биомеханика, САПР. E-mail: kapustinav@volgatech.net

ЛОСКУТОВ Юрий Васильевич – доцент кафедры сопротивления материалов и прикладной механики, кандидат технических наук, Поволжский государственный технологический университет, г. Йошкар-Ола. Область научных интересов – теоретическая механика, механика конструкций и материалов, механика сплошных сред, методы математического моделирования, САПР. E-mail: loskutovyv@volgatech.net

ЛОСКУТОВ Михаил Юрьевич – студент факультета информатики и вычислительной техники, Поволжский государственный технологический университет, г. Йошкар-Ола. Область научных интересов – робототехника, мехатроника, программирование, механика конструкций и материалов, методы математического моделирования, САПР. E-mail: mikhail.loskutov@ro.ru

СОЛОВЬЕВА Мария Дмитриевна – инженер ОАО «Марийский машиностроительный завод», г. Йошкар-Ола. Область научных интересов – прикладная механика, робототехника, медицинское оборудование, экзоскелеты. E-mail: masha_ru94@mail.ru

НАСЫБУЛЛИН Альберт Рашидович – заместитель генерального директора по экономическим вопросам и финансам АО «Волжский электромеханический завод», г. Волжск. Область научных интересов – робототехника, программирование, инновации. E-mail: Nasybullin_ar@mail.ru

УДК 621.85-52; 531/534

DOI: 10.25686/2542-114X.2019.4.86

ASSESSMENT OF ENERGY EQUIVALENCE OF VARIOUS LOCOMOTIONS FOR LIFE TESTS OF MEDICAL EXOSKELETON

**A. V. Kapustin¹, Iu. V. Loskutov¹, M. Iu. Loskutov¹,
M. D. Soloveva², A. R. Nasybullin³**

¹Volga State University of Technology (Yoshkar-Ola)

²Mari Machine Building Plant (Yoshkar-Ola)

³Volzhsk Electromechanical Plant (Volzhsk)

Exoskeletons (robotic suits) are now becoming more common. They vary in size and function. Such anthropomorphic structures are fixed on the limbs or the body. Exoskeletons are designed to reproduce movements with the possible scaling of efforts. They allow a person to perform complex actions associated with increased stress. What is more, they help people with motor impairment or neuromuscular dysfunction to move around and recover faster. Therefore, a medical exoskeleton must imitate the locomotion of a person, in contrast to industrial or military exoskeletons. Enhanced requirements are thus imposed on the strength and stiffness of the links, components and drives. Exoskeleton must support a person's weight up to 100 kg. There should be high accuracy in the positioning system of human joints with kinematic exoskeleton pairs. The assembly of units and the product as a whole should be reliable. The authors have performed calculations of the equivalence of energy indicators of the exoskeleton operating modes. The paper analyzes pedaling on an exercise bike, walking, squatting and standing up. Criteria for the equivalence of movements in the hinge are as follows: torque, equivalent power, average speed between links. Comparison of the values of the main parameters of locomotion gives small discrepancies of the largest equivalent moments, average inter-link speeds of revolutions and equivalent powers in the hinges. According to the energy indicators of the operating modes of an exoskeleton with a simulating model, locomotion (walking, standing up, sitting down and cycling) may well be equivalent provided the movement parameters are correctly selected. It has been shown that the use of an exercise bike for conducting life tests of an exoskeleton may well be acceptable.

Keywords: exoskeleton; life tests; human locomotion; energy equivalence; walking; bicycle pedaling.

REFERENCES

1. Redin V.N., Abbyasov V.M. Razrabotka parametrov otsenki nagruzhennosti elementov tekhnologicheskikh robotizirovannykh kompleksov [Development of parameters for estimating the loading of elements of technological robotic complexes], *Sborka v mashinostroyenii, priborostroyenii* [Assembly in mechanical engineering, instrumentation], 2012, No. 5, pp. 21-24.
2. Kapustin A.V., Loskutov Iu.V., Skvortsov D.V., Nasybullin A.R., Klyuzhev K.S., Kudryavtsev A.I. Skhema resheniya sistemy upravleniya reabilitatsionnym ekzoskeletom meditsinskogo naznacheniya [System of solving problems of medical rehabilitation exoskeleton management], *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta*. Ser.: Radiotekhnicheskiye i infokommunikatsionnyye sistemy [Bulletin of Volga State University of Technology. Series: Radio Engineering and Infocommunication Systems], 2018, No. 2 (38), pp. 77-86. DOI: 10.15350 / 2306-2819.2018.2.77
3. Loskutov Iu., Kapustin A., Kudryavtsev A., Nasibullin A., Lebedeva A. Synthesis of exoskeleton control algorithms based on kinematic analysis of locomotions and human gait modelling, *Journal of Applied Engineering Science*, 2018, No. 16(4), pp. 583-591. DOI: 10.5937/jaes16-17230
4. Kazakov I.G., Shklyar S.A. Organizatsiya proizvodstva robotizirovannogo apparata "ekzoskelet" AUXILIUM [Organization of production of robotic apparatus "Auxilium"], *Voprosy kurortologii, fizioterapii i lechebnoy fizicheskoy kul'tury* [Issues of balneology, physiotherapy and therapeutic physical culture], 2016, Vol. 93, No. 2-2, pp. 84-85.
5. Winter David A. Biomechanics and motor control of human movement, John Wiley & Sons, Inc., 2009, 370 p.

6. Beletskiy V.V. Dvunogaya khod'ba: model'nyye zadachi dinamiki i upravleniya [Bipedal walking: model problems of dynamics and control], Moscow: Nauka, 1984, 288 p.
7. Lyubovitskiy V.P. Gonochnyye velosipedy, Leningrad: Mashinostroyeniye [Racing bikes, Leningrad: Machinebuilding]. Leningrad, 1989, 319 p.
8. Turlapov R.N. Modelirovaniye i algoritm upravleniya dvizheniyem ekzoskeleta dlya vertikalizatsii i rasshireniya funktsional'nykh vozmozhnostey cheloveka: ruk. dis. ... kand. tekhn. nauk [Modeling and algorithm of exoskeleton motion control for verticalization and expansion of human functional capabilities: Diss. of Cand. Engineering Science], Kursk: Yugo-Zapad. gos. un-t [Southwest State University], 2015, 172 p.
9. Masandilov L.B., Sergiyevskiy Iu.N., Kozyrev S.K. Elektroprivod. Gidro i vibroprivody [Hydro and vibration drives], Mashinostroyeniye [Machinebuilding]: encyclopedia in 40 volumes, Vol. IV-2: in 2 books 1: Elektroprivod [Electric drive], Moscow: Mashinostroyeniye [Machinebuilding], 2012, 520 p.
10. Mark L. Latash, Vladimir Zatsiorsky. Biomechanics and Motor Control: Defining Central Concepts, Elsevier, Academic Press, 2016, p. 426.

Information about the authors

KAPUSTIN Aleksandr Valerevich – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Strength of Materials and Applied Mechanics, Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola. Research interests – mechanism and machine science, applied mechanics, biomechanics. E-mail: akapustin@mail.ru

LOSKUTOV Iurii Vasilevich – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Strength of Materials and Applied Mechanics, Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola. Research interests – theoretical mechanics, structural and materials mechanics, continuum mechanics, methods of mathematical modelling, CAD systems. E-mail: loskutovyv@volgatech.net

LOSKUTOV Mikhail Iurevich – student of the Faculty of Informatics and Computer Engineering, Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola. Research interests – robotics, mechatronics, programming, mechanics of structures and materials, methods of mathematical modeling, CAD. Email: mikhail.loskutov@ro.ru

SOLOVEVA Mariia Dmitrievna – Engineer, Mari Machine Building Plant, Yoshkar-Ola. Research interests – applied mechanics, robotics, medical equipment, exoskeletons. Email: masha_ru94@mail.ru

NASYBULLIN Albert Rashidovich – Deputy General Director for Economic Affairs and Finance of Volzhsk Electromechanical Plant JSC, Volzhsk. Research interests – robotics, programming, innovations. E-mail: Nasybullin_ar@mail.ru.

Библиографическая ссылка

Оценка энергетической эквивалентности различных локомоций для ресурсных испытаний экзоскелета медицинского назначения / А. В. Капустин, Ю. В. Лоскутов, М. Ю. Лоскутов, М. Д. Соловьева, А. Р. Насыбуллин // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Материалы. Конструкции. Технологии. – 2019. – № 4(12). – С. 86-94. – DOI: 10.25686/2542-114X.2019.4.86