

УДК 612.829.3
DOI: 10.18799/29495407/2023/3/30

Пассивный медицинский экзоскелет для реабилитации пациентов с локомоторными нарушениями

Д.А. Князев✉, Н.Е. Ловчев, А.В. Орешкин

Московский государственный технологический университет «Станкин», Россия, г. Москва,

✉ denn0762@gmail.com

Аннотация

Целью исследования является разработка прототипа медицинского экзоскелета для реабилитации пациентов с локомоторными нарушениями. Проанализировано строение нижней конечности человека, и на основе изученной информации сформулированы требования, предъявляемые к конструкции экзоскелета. Используя знания, полученные при изучении аналогичных решений в области построения экзоскелетов, разработана конструктивная и кинематическая схемы, смоделированы составные части суставов экзоскелета и детали, соединяющие части конструкции. С целью определения нагрузки, оказываемой на упругие элементы, используемые в экзоскелете, проведён расчёт требуемых параметров упругих элементов конструкции. Исходя из полученных данных выбраны упругие элементы для создания прототипа экзоскелета. Результатом работы является создание прототипа пассивного медицинского экзоскелета с использованием аддитивных технологий.

Ключевые слова: Пассивный медицинский экзоскелет, прототип экзоскелета, опорно-двигательный аппарат, механотерапия, реабилитация.

Для цитирования: Князев Д.А., Ловчев Н.Е., Орешкин А.В. Пассивный медицинский экзоскелет для реабилитации пациентов с локомоторными нарушениями // Известия томского политехнического университета. Промышленная кибернетика. – 2023. – Т. 1. – № 3. – С. 1–6. DOI: 10.18799/29495407/2023/3/30

UDC 612.829.3
DOI: 10.18799/29495407/2023/3/30

Passive medical exoskeleton for rehabilitation of patients with locomotor disorders

D.A. Knyazev✉, N.E. Lovchev, A.V. Oreshkin

Moscow State University of Technology «Stankin», Moscow, Russian Federation

✉ denn0762@gmail.com

Abstract

The aim of the research is to develop a prototype of a medical exoskeleton for rehabilitation of patients with locomotor disorders. The article analyzes the structure of human lower limb and, based on the information studied, formulates the requirements for the design of the exoskeleton. Using the knowledge gained from studying similar solutions in the field of building exoskeletons the authors have developed a structural and kinematic diagram. They modeled the components of the exoskeleton joints and the parts connecting the parts of the structure. In order to determine the load exerted on the elastic elements used in the exoskeleton, the required parameters of the elastic structural elements were calculated. Based on the data obtained, elastic elements were selected to create a prototype exoskeleton. The result of the work is the creation of a prototype of a passive medical exoskeleton using additive technologies.

Keywords: Passive medical exoskeleton, exoskeleton prototype, musculoskeletal system, mechanotherapy, rehabilitation.

For citation: Knyazev D.A., Lovchev N.E., Oreshkin A.V. Passive medical exoskeleton for rehabilitation of patients with locomotor disorders. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Industrial Cybernetics*, 2023, vol. 1, no. 3, pp. 1–6. DOI: 10.18799/29495407/2023/3/30

Введение

Экзоскелеты – одна из инновационных биоинженерных технологий, которая заключается в разработке специальных мехатронных устройств в виде внешнего каркаса человека, благодаря которым увеличивается его мускульная сила. Производительность человека-оператора экзоскелета таким образом усиливается в несколько десятков раз. Современные экзоскелеты являются сложными техническими системами, характеризующимися многообразием рабочих процессов и характеристик, относящихся к разным областям знаний: электронике, кибернетике, механике, гидрогазодинамике и др.

Одним из наиболее эффективных методов реабилитации после различных нарушений опорно-двигательной системы является реабилитация с помощью экзоскелета. Экзоскелет позволяет постепенно укреплять мышцы, восстанавливать моторику, а также мышечную память пациента. Для укрепления мышечной или костной ткани используют пассивные экзоскелеты.

На рынке представлено не так много решений в области построения пассивных медицинских экзоскелетов. Одно из таких решений – конструкция экзоскелета для компенсации веса человека при ходьбе и беге. Данное устройство может применяться при реабилитации и с целью транспортировки грузов [1–5]. Данная конструкция содержит седло, соединенную с ним раму и экзоподы. Основным элементом компенсации веса служит аккумулятор потенциальной энергии (газ или пружина) и включатель аккумулятора (управляемый храповый механизм; клапан гидравлического механизма; фрикционный механизм обратного хода). Таким образом, разработка пассивного медицинского экзоскелета, основной функцией которого будет непосредственно реабилитация, является актуальной задачей.

Разработка требований к экзоскелету

На первом этапе исследования определены клинико-анатомические требования к активным и пассивным экзоскелетам нижней конечности. Отметим, что в настоящее время не существует общего стандарта предъявляемых требований к экзоскелетам, исходя из этого требования, представленные в работе, сформулированы с опорой на строение и функционирование здоровой конечности, а также проводимые в клиниках реабилитационные процедуры.

С этой целью обобщен материал по активной и пассивной амплитуде движений нижней конечности у полностью здорового человека и её потере при различных состояниях. Нога анатомически состоит из трёх основных частей: бедра, голени и стопы (рис. 1). Бедро образовано бедренной костью (самой массивной и прочной из человеческих костей) и надколенником, защищающим коленный сустав. Надколенник обеспечивает блок при разгибании голени. Голень образуют большая и малая берцовые кости. Стопу образует множество мелких костей. Место сочленения бедренной кости с тазовой костью называется тазобедренным суставом. Сочленение бедренной и берцовых костей называется коленным суставом, а берцовых костей с костями стопы – голеностопным суставом [6].



Рис. 1. Строение скелета нижней конечности
Fig. 1. Lower limb skeleton structure

Главной задачей реабилитации является восстановление и продление активной жизнедеятельности, социальная интеграция и обеспечение приемлемого качества жизни.

Важно сказать, что реабилитация – это очень индивидуальный метод и мало того, что упражнения подбираются индивидуально, и устройства, используемые при реабилитации, должны иметь индивидуальную подстройку.

Из различных видов реабилитации нас интересует физическая реабилитация. Её средствами являются: лечебная физическая культура, лечебный массаж, физиотерапия, механотерапия.

В настоящее время растет количество роботизированного оборудования, которое практически полностью формирует движения пациента. Наиболее востребованные тренажеры – автоматизированные механические устройства, работающие благодаря электрическому приводу. И, конечно, всегда остаются простые механизмы, требующие от пациента физических усилий во всей полноте.

Таким образом, сформулируем общие требования к разрабатываемому прототипу экзоскелета:

- однотипность строению нижней конечности человека;
- легкость и прочность конструкции;
- мобильность и доступность по себестоимости;
- безопасность для человека;
- должен состоять из биологически инертных материалов;
- должен обладать объёмом движений, приближённым к показателям здорового человека.

Дополнительные требования к конструкции экзоскелета:

- индивидуальная настройка в зависимости от роста пациента;
- возможность замены комплектующих экзоскелета по мере износа;
- возможность анатомической параметризации.

При формировании конструкции экзоскелета необходимо соблюдать ограничения подвижности суставов человека, приведенные в таблице.

Разработка конструкции медицинского экзоскелета для реабилитации пациентов с локомоторными нарушениями

На втором этапе исследования разработана кинематическая (рис. 2) и конструкционная схемы экзоскелета (рис. 3).

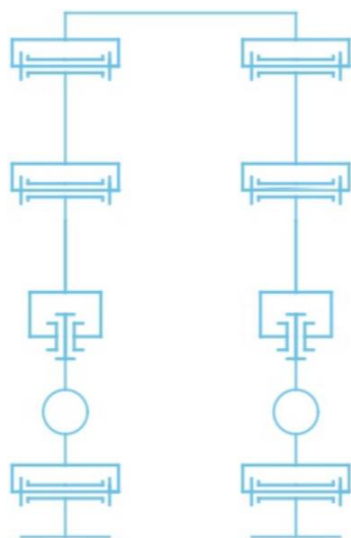


Рис. 2. Кинематическая схема экзоскелета
Fig. 2. Exoskeleton kinematic diagram

Таблица. Ограничения подвижности суставов человека
Table. Limitation of human joint mobility

Сустав Joint	Тип движения Movement type	Норма Norm	Ограничение/Limitation		
			Незначительное Minor	Умеренное Moderate	Значительное Significant
Тазобедренный Hip	Сгибание Bending	<100	100–109	110–119	≥120
	Разгибание Extension	180–171	170–161	160–151	≤150
	Отведение Abduction	50–26	25–21	20–16	≤15
			(°)		
Коленный Knee	Сгибание Bending	30–59	60–89	90–109	≥110
	Разгибание Extension	180–176	175–171	170–161	≤160
Голеностопный Ankle	Подоплюнное сгибание Plantar flexion	150–121	120–111	110–101	≤100
	Тыльное разгибание Dorsi extension	70–74	75–79	80–84	≥85

Как видно из кинематической схемы экзоскелета, конструкция предполагает обеспечить по одной подвижности в коленном и тазобедренном суставах и три подвижности в голеностопном суставе.

На данном этапе представлена упрощенная кинематическая схема экзоскелета. Сама конструкция предполагает установку пружинных элементов коленного и голеностопного соединений обособленно от основной силовой части, как показано на конструкционной схеме (рис. 3).

Пружинный элемент в тазобедренном суставе расположен внутри системы, на оси вращения, так как этот сустав сам по себе имеет достаточно большие размеры ввиду приходящихся на него нагрузок.

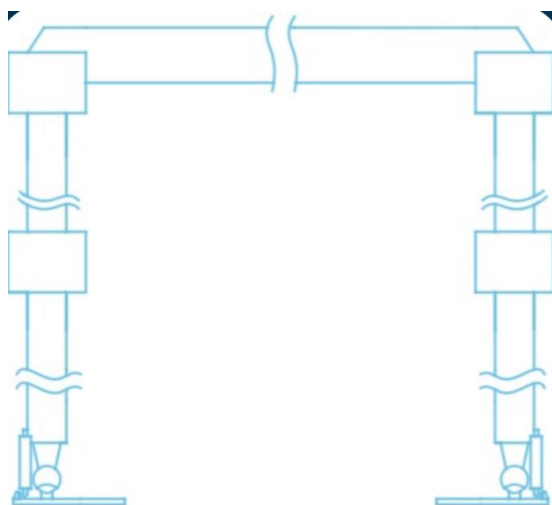


Рис. 3. Конструкционная схема экзоскелета
Fig. 3. Exoskeleton structural diagram

Подбор пружинных элементов для системы компенсации веса

Рассмотрим две части ноги как независимые системы. Предположим, что тело испытуемого, без учёта веса ног, весит 50 кг ($F_1=490,5$ Н) [7, 8]. Вес одного бедра примем равным 4 кг ($G=39,24$ Н). Проведём расчёт из предположения, что при наклоне бедра на угол 45 градусов от линии горизонта во время приседа пружина, создающая силу F_2 , должна обеспечить неподвижность системы, то есть компенсировать действие силы тяжести G и веса тела F_1 [9, 10]. Составим уравнение моментов для двух случаев:

Угол отклонения от горизонта равен 90 градусов, то есть испытуемый стоит.

В таком случае очевидно, что момент вращения задаётся лишь силой F_2 для обеспечения статического положения $F_2=0$.

Угол отклонения от горизонта равен 45 градусов, то есть испытуемый находится в приседе.

Допуск: вращение по часовой стрелке принимаем за положительное направление. Уравнение моментов для данной ситуации будет выглядеть следующим образом:

$$M = F_2 \cdot l - G \cdot BD - F_1 \cdot TB,$$

где M – общий момент внешних сил; l – расстояние отступа точки приложения силы F_2 от центральной оси звена; F_2 – сила, создаваемая пружиной и обеспечивающая компенсацию веса; F_1 – вес тела человека, без учёта веса ног; BD – расстояние от края звена экзоскелета до точки приложения силы тяжести в момент приседания под углом 45 градусов; TB – расстояние от края звена экзоскелета до проекции на горизонтальную ось другого края звена в момент приседания под углом 45 градусов.

Учитывая, что угол отклонения от горизонта равен 45 градусам, а длина звена $AB = 35$ см:

$$TB = \cos 45^\circ \cdot AB = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot 0,35 \approx 0,25 \text{ м}.$$

Зная, что точка приложения силы тяжести G находится в центре звена, примем:

$$BD = \frac{TB}{2} = \frac{0,25}{2} = 0,125 \text{ м}.$$

Рассчитаем F_2 с учетом, что $l=3$ см и $M=0$:

$$F_2 = \frac{G \cdot BD + F_1 \cdot TB}{l} = \frac{127,53}{0,03} = 4251 \text{ Н},$$

тогда коэффициент упругости пружины растяжения:

$$K = \frac{F_2}{\Delta L},$$

где ΔL – длина растяжения пружины.

Зная размер вала, через который натянут тросик, идущий от пружины, и угол наклона бедренного звена, можно рассчитать:

$$\Delta L = 2 \cdot \pi \cdot 0,03 \cdot \frac{45}{360} \approx 0,0236 \text{ м} = 2,36 \text{ см}$$

где 0,03 – радиус вала.

Исходя из проделанных вычислений:

$$K = \frac{4251}{0,0236} \approx 180127 \text{ Н/м}.$$

Таким образом, для конструирования экзоскелета необходимо подобрать пружину с коэффициентом упругости 180127 Н/м и ходом 0,0236 см либо эквивалентную пружину с увеличенным ходом и пропорционально уменьшенным коэффициентом упругости для обеспечения необходимой силы натяжения тросика пружины. При этом длина пружины, по сути, ограничена длиной звена с вычетом хода пружины, однако для удобства крепежа стоит ограничить максимальную длину пружины до 2/3 от длины звена.

Расчёт пружины голевого звена рассчитывается аналогично, за исключением изменённых параметров, а именно: $F_1=529,74$ Н; $G=29,43$ Н; угол равен 60 градусам; $l=3$ см; $AB=45$ см; радиус вала равен 3 см.

В данном случае угол изменён на 60 градусов, так как при длинах звеньев 35 и 45 см, а также наклоне бедренного звена от горизонта на 45 градусов, угол наклона голенного звена от горизонта равен 60 градусам.

Расчет второго звена проводится аналогично, но для пружины растяжения.

На следующем этапе исследования, используя программное обеспечение Fusion 360, была создана 3D-модель экзоскелета и спроектирован комплекс крепёжных элементов (рис. 4), необходимых для соединения частей конструкции.

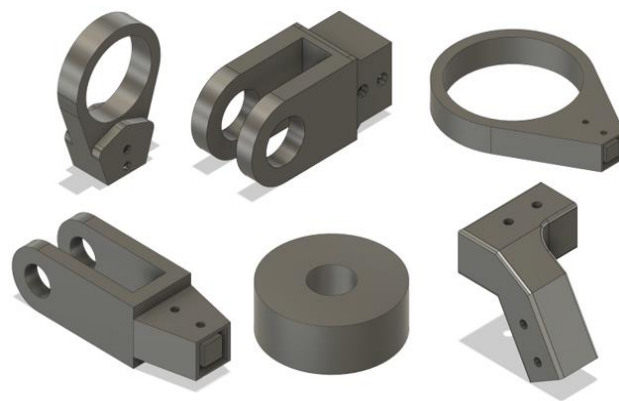


Рис. 4. Крепёжные элементы
 Fig. 4. Connecting elements

Прототип медицинского экзоскелета для реабилитации пациентов с локомоторными нарушениями

Разработанный прототип экзоскелета состоит:

- из стопы;
- голенного звена;
- бедренного звена;
- соединителя, обеспечивающего объединение ног экзоскелета в единую конструкцию.

Крепление экзоскелета к телу носителя осуществляется при помощи ремневой системы. Прототип экзоскелета представлен на рис. 5, 6.



Рис. 5. Нога экзоскелета на человеке

Fig. 5. Exoskeleton leg on a person



Рис. 6. Экзоскелет

Fig. 6. Exoskeleton

Заключение

Разработанный и описанный в статье прототип медицинского экзоскелета для реабилитации пациентов с локомоторными нарушениями позволяет проверить работоспособность компонентной базы, сформировать требования к разрабатываемому прототипу, оценить преимущества и недостатки данной конструкции.

Собранный прототип экзоскелета имеет ряд недостатков, которые можно устранить за счет использования более дорогих материалов, в частности замена всех 3D-печатных деталей на металлические позволит сделать конструкцию стабильнее, а добавление каркаса для спины позволит экзоскелету более плотно фиксироваться на теле человека. Вместо пластины под ступню эргономичнее вмонтировать в конструкцию часть элемента обуви.

Однако, даже несмотря на недостатки, данный прототип достаточно прочен и пригоден к использованию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Экзоскелет: пат. 2760527 Российская Федерация, МПК А61Н 3/00, № 2021110519: заявл. 2021.04.15; опубл. 2021.11.26. – 11 с.
2. Простая конструкция компенсации веса человека при ходьбе и беге: пат. 2489130 Российская Федерация, МПК А61Н 3/00, № 2011148041/14: заявл. 2011.11.28; опубл. 2013.08.10. – 13 с.
3. Основы реабилитации двигательных нарушений по методу Козьявкина / В.И. Козьявкин, Н.Н. Сак, О.А. Качмар, М.А. Бабадаглы. – Львов: НВФ «Украинские технологии», 2007. – 192 с.
4. Усилитель мышц голени // Pikabu.ru. URL: https://pikabu.ru/story/usitel_myishts_goleni_7051255 (дата обращения: 10.05.2023).
5. Турлапов Р.Н. Динамика управляемого движения четырехзвенового аппарата для расширения функциональных возможностей человека: дис. ... канд. наук. – Курск, 2015. – 152 с.
6. Реабилитация пациентов с заболеваниями опорно-двигательного аппарата // Библиофонд. URL: <https://www.bibliofond.ru/view.aspx?id=802268> (дата обращения: 10.05.2023).
7. Пассивный экзоскелет нижних конечностей человека / Н.Д. Бабанов, М.Г. Мощенков, Г.П. Егоров, О.В. Кубряк // Динамика сложных систем – XXI век. – 2019. – № 4. – С. 23–28.

8. Экзоскелет для разгрузки нижних конечностей: пат. 202527 Российская Федерация, МПК А61Н 3/00, № 2020134460: заявл. 21.10.2020; опубл. 20.02.2021. – 9 с.
9. Клинико-анатомическое обоснование требований к разработке экзоскелетов верхней конечности / А.А. Воробьев, А.В. Петрухин, О.А. Засыпкина, П.С. Кривоножкина // Оренбургский медицинский вестник. – 2014. – Т. II. – № 3 (7). – С. 14–18.
10. Обоснование требований к разработке экзоскелета микрохирурга / А.А. Воробьев, В.Ф. Байтингер, Ф.А. Андрющенко, А.А. Никулин // Волгоградский научно-медицинский журнал. – 2016. – № 3 (51). – С. 38–40.

REFERENCES

1. Borisov A.V., Borisova V.L., Konchina L.V., Kulikova M.G., Maslova K.S. *Ekzoskelet* [Exoskeleton]. Patent RF, no. 2021110519, 2021.
2. Rodin I.A. *Prostaya konstruktsiya kompensatsii vesa cheloveka pri khodbe i bege* [A simple design for compensating a person's weight when walking and running]. Patent RF, no. 2011148041/14, 2013.
3. Kozyavkin V.I., Sak N.N., Kachmar O.A., Babadagly M.A. *Osnovy reabilitatsii dvigatelnykh narusheniy po metodu Kozyavkina* [Fundamentals of rehabilitation of movement disorders using the Kozyavkin method]. Lvov, NVF "Ukrainian Technologies" Publ., 2007. 192 p.
4. Usilitel myshts goleni [Shin muscle strengthener]. *Pikabu.ru*. Available at: https://pikabu.ru/story/usilitel_myshts_goleni_7051255 (accessed: 10 May 2023).
5. Turlapov R.N. *Dinamika upravlyаемого dvizheniya chetyrehzvennogo apparata dlya rasshireniya funktsionalnykh vozmozhnostey cheloveka*. Diss. Kand. nauk [Dynamics of controlled movement of a four-link apparatus for expanding human functional capabilities. Cand. Diss.]. Kursk, 2015. 152 p.
6. Reabilitatsiya patsientov s zabolevaniyami oporno-dvigatel'nogo apparata [Rehabilitation of patients with diseases of the musculoskeletal system]. *Bibliofund*. Available at: <https://www.bibliofund.ru/view.aspx?id=802268> (accessed: 10 May 2023).
7. Babanov N.D., Moshchenkov M.G., Egorov G.P., Kubryak O.V. Passivny ekzoskelet nizhnikh konechnostey cheloveka [Passive exoskeleton of the human lower extremities]. *Dinamika slozhnykh sistem – XXI vek*, 2019, no. 4, pp. 23–28.
8. Glebov V.V., Kangin M.V., Kangin E.M., Kumaneev M.A. *Ekzoskelet dlya nizhnikh konechnostey* [Exoskeleton for unloading the lower extremities]. Patent RF, no. 2020134460, 2021.
9. Vorobyev A.A., Petrukhin A.V., Zasyapkina O.A., Krivonozhkina P.S. Kliniko-anatomicheskoe obosnovanie trebovaniy k razrabotke ekzoskeletov verkhney konechnosti [Clinical and anatomical substantiation of the requirements for the development of exoskeletons of the upper limb]. *Orenburgskiy meditsinskiy vestnik*, 2014, vol. II, no. 3 (7), pp. 14–18.
10. Vorobiev A.A., Baytinger V.F., Andruschenko F.A., Nikulin A.A. Substantiation of the requirements for the development of exoskeleton for microsurgery. *Volgogradskiy nauchno-meditsinskiy zhurnal*, 2016, no. 3 (51), pp. 38–40. In Rus.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Денис Алексеевич Князев, магистрант Московского государственного технологического университета «Станкин», Россия, 127055, г. Москва, Вадковский пер., 1. denn0762@gmail.com

Николай Евгеньевич Ловчев, магистрант Московского государственного технологического университета «Станкин», Россия, 127055, г. Москва, Вадковский пер., 1. nk.lovchev@gmail.com

Алексей Викторович Орешкин, магистрант Московского государственного технологического университета «Станкин», Россия, 127055, г. Москва, Вадковский пер., 1. d56.a@mail.ru

Поступила в редакцию: 10.11.2023

Поступила после рецензирования: 10.12.2023

Принята к публикации: 20.12.2023

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Denis A. Knyazev, master's student, Moscow State University of Technology «Stankin», 1, Vadkovsky lane, Moscow, 127055, Russian Federation. denn0762@gmail.com

Nikolay E. Lovchev, master's student, Moscow State University of Technology «Stankin», 1, Vadkovsky lane, Moscow, 127055, Russian Federation. nk.lovchev@gmail.com

Alexey V. Oreshkin, master's student, Moscow State University of Technology «Stankin», 1, Vadkovsky lane, Moscow, 127055, Russian Federation. d56.a@mail.ru

Received: 10.11.2023

Revised: 10.12.2023

Accepted: 20.12.2023