

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛАСТИЧНЫХ АКТЮАТОРОВ
С ТОРСИОННОЙ ПРУЖИНОЙ ПЕРЕМЕННОЙ ЖЕСТКОСТИ
В РОБОТИЗИРОВАННЫХ УСТРОЙСТВАХ РЕАБИЛИТАЦИИ

М. С. МАЛОВ*, В. М. МУСАЛИМОВ, С. Ю. ЛОВЛИН

*Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия,
mishamalov1@gmail.com

Аннотация. Исследуется вопрос оптимальной упругости пружины в актюаторе с целью разработки эффективных и компактных гибких соединений с использованием физических пружин для возможного применения в носимых роботизированных устройствах реабилитации. Представлен обзор отечественных и зарубежных разработок, указаны различные подходы к классификации актюаторов по расположению пружины. Рассмотрены преимущества и недостатки альтернативных решений, разработан концепт плоского торсиона, который позволит собирать несколько пружин на одном валу.

Ключевые слова: роботизированная локомоторная реабилитация, переменная жесткость, упругий актюатор

Ссылка для цитирования: Малов М. С., Мусалимов В. М., Ловлин С. Ю. Применение эластичных актюаторов с торсионной пружиной переменной жесткости в роботизированных устройствах реабилитации // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 7. С. 527—534. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-7-527-534.

APPLICATION OF ELASTIC ACTUATORS WITH TORSION SPRING OF VARIABLE STIFFNESS
IN ROBOTIC REHABILITATION DEVICES

M. S. Malov*, V. M. Musalimov, S. Yu. Lovlin

*ITMO University, St. Petersburg, Russia,
mishamalov1@gmail.com

Abstract. The issue of optimal spring elasticity in the actuator is investigated in order to develop efficient and compact flexible joints using physical springs for possible use in wearable robotic rehabilitation devices. An overview of domestic and foreign developments is presented, various approaches to the classification of actuators by the spring location are described. The advantages and disadvantages of alternative solutions are considered; a concept of flat torsion is developed, which allows for assembling several springs on one shaft.

Keywords: robotic locomotor rehabilitation, variable stiffness, elastic actuator

For citation: Malov M. S., Musalimov V. M., Lovlin S. Yu. Application of elastic actuators with torsion spring of variable stiffness in robotic rehabilitation devices. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 7. P. 527—534 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-7-527-534.

Введение. Синергия человека и роботизированной системы на любом уровне взаимодействия повышает общую производительность совместной деятельности за счет полного или взаимодополняющего использования их возможностей и способностей при выполнении задания. В более сложных случаях, таких как ассистирование локомоции человека или реабилитация после

нейромускульных травм, робот-помощник, выполняя вспомогательную роль, должен обеспечивать безопасное взаимодействие с пользователем при выполнении управляемой задачи [1]. Первой ступенью, обеспечивающей безопасность, должна служить конструкция самого устройства [2].

Для решения подобных задач в сфере реабилитации были использованы наработанные решения в биомехатронике. Концепция, сформированная в 1995 г. М. Ульямсоном в работе „Series Elastic Actuators“ (SEA — линейный упругий привод), получила дальнейшее развитие [3]. Такая конструкция обеспечивает устойчивость SEA к ударным нагрузкам, низкий выходной механический импеданс, пассивное накопление механической энергии и повышенную пиковую мощность, что, в свою очередь, позволяет точно управлять положением входного звена и тем самым обеспечивать безопасное взаимодействие пользователя и робота. При такой конструкции необходимо учитывать множество нюансов, один из самых важных — баланс жесткости пружины актюатора. Это свойство заключается в равновесии между выдерживаемыми нагрузками и управляющим импедансом, для которого пружина не должна быть слишком жесткой, что является одной из самых сложных задач при проектировании SEA.

Контроль усилия на выходном звене. При сравнении работы обычного „жесткого“ робота с линейными приводами и движений человека легко заметить, что первым довольно сложно даются управление силой и автономное взаимодействие с поверхностью. На основании этого группа ученых Массачусетского технологического института [4], опытным путем уменьшая пропускную способность и жесткость конструкции привода, добилась увеличения контроля и стабильности силы. Данный метод заключается в размещении упругого элемента последовательно с источником энергии, которым обычно является двигатель постоянного тока с редуктором или гидравлический цилиндр. Первичная схема упругого актюатора представлена на рис. 1.

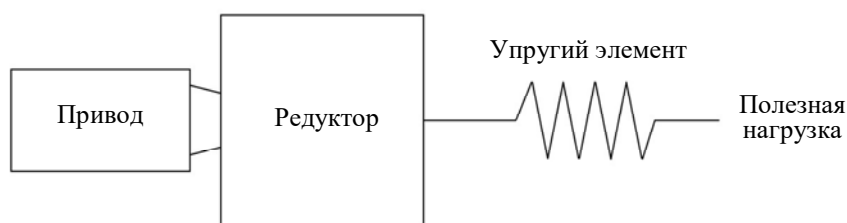


Рис. 1

В дальнейшем эта схема получила широкое распространение и применение, было разработано несколько основных типологий.

Основной сложностью в проектировании актюатора до сих пор является подбор пружины или упругого элемента. Классический подход представляет собой последовательный расчет базовых параметров упругого элемента с последующим их сравнением с параметрами готового изделия либо создание индивидуального элемента. Наиболее распространенным типом пружины кручения является цилиндрическая, стандартные параметры которой — длина l и диаметр d . Формула для максимального напряжения сдвига при кручении имеет следующий вид:

$$\tau_{\max} = \frac{16T_{\max}}{\pi d^3}, \quad (1)$$

где $T_{\max}$ — максимальная сила.

Для расчета минимального диаметра пружины перегруппируем выражение (1):

$$d_{\min} = \sqrt[3]{\frac{32T_{\max}}{\pi\sigma_T}}, \quad (2)$$

используя критерий текучести Треска, а именно: текучесть материала „начинается“ при $T_{\max}=0,5\sigma_T$, где σ_T — напряжение текучести. Выражения для угла закручивания пружины на выходе, минимальной длины пружины (при данном угле) и ее результирующей жесткости, где G — модуль сдвига, имеют следующий вид:

$$\gamma = \frac{32T_{\max}l}{\pi d^4 G}; \quad l_{\min} = \frac{\pi d_{\min}^4 G \gamma}{32T_{\max}}, \quad k = \frac{\pi d_{\min}^4 G}{32l}.$$

Актюаторы, основанные на торсионной пружине. Практически все существующие SEA были разработаны в соответствии с определенными требованиями. Известные на данный момент классификации актюаторов базируются на принципе расположения пружины, а именно (рис. 2):

- упругий привод с чувствительной силой реакции — пружина расположена в позиции 1 или 2, перед передачей усилия;
- упругий привод с датчиком передаваемого усилия — пружина расположена в позиции 3, внутри передачи;
- упругий привод с датчиком усилия — пружина расположена в позиции 4, после трансмиссии.

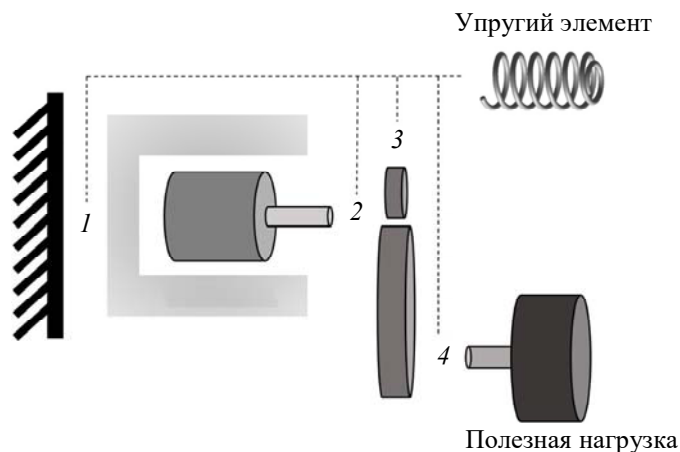


Рис. 2

Упругий элемент, включенный в SEA, является самой важной частью привода и необходим для реализации высокоточного управления силой. Проблема управления высокоточными актюаторами, перспективы их развития и применения, а также классификация систем управления подробно рассмотрены в работах [5, 6].

Однако при выборе классификации актюатора по типологии пружин возможно, как представлено в [7], применение систем управления и процесс проектирования всего механизма может быть упрощен. Можно выделить два типа эластичных элементов актюатора. Первый тип — это системы с линейными пружинами сжатия, расположенными таким образом, что при вращении вала шарнира создается центрирующий упругий момент. Подробно это решение представлено в работах группы ученых из Университета Твенте (Нидерланды) [8], а также в работе международной группы ученых из Италии и Бельгии [9].

Второй тип эластичных элементов — это системы, в которых используются пружины кручения, напрямую соединенные с нагрузкой, что в некоторых случаях можно классифицировать как торсион. Так, в работе [10] рассматривается торсионная пружина с двойной спиралью (рис. 3, а). Двойная спиральная конструкция нивелирует действующие на центр пружины нежелательные радиальные силы, когда пружина деформируется под действием крутящего момента. Похожая конструкция применена и в работе [11]. Другое решение описано в [12] (рис. 3, б), где в конструкции двуногого робота Kurmet применена спиралевидная однонаправленная торсионная пружина.

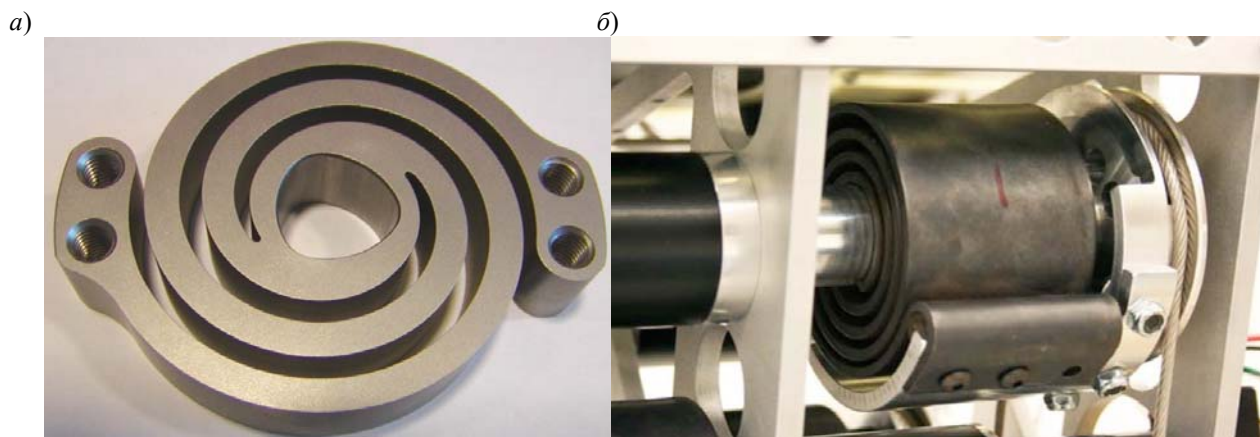


Рис. 3

Множество конструкций актюаторов, основанных на двух принципиальных видах конфигурации упругого элемента, получили свое развитие, однако существенным недостатком данных решений является невозможность модуляции жесткости во время работы.

Одним из перспективных направлений модернизации эластичных актюаторов является применение спиральных анизотропных тел в качестве упругого элемента. Такая конструкция была апробирована для применения в подвесах магниточувствительных элементов магнито-статического вариометра, входящего в состав геофизического комплекса GI-MTS-1 [13]. Конструкция обладает свойствами упругой анизотропии. Использование таких торсионных элементов позволит, в свою очередь, снизить модуль кручения (повысить чувствительность); повысить устойчивость к изменению климатических факторов; повысить временную стабильность (уменьшить температурный дрейф нуля) и повысить устойчивость к динамическим нагрузкам. Отличительной чертой конструкции является отсутствие неустойчивости характеристик при производстве, а также возможность модулирования упругости во время ротации.

Данное решение отличается глубокой проработкой математического аппарата вычисления ключевых параметров. Расчет основных параметров устройства представляет собой совокупность уравнений статики и динамики. К примеру, в работах [14—16] приведены уравнения, связывающие внешние силы и моменты с линейными (e) и угловыми (θ) деформациями спирально-анизотропных стержней (САС):

$$\left. \begin{aligned} \frac{P}{\pi R^2 E} &= A_{11}e + A_{12}\theta; \\ \frac{M}{\pi R^3 E} &= A_{21}e + A_{22}\theta, \end{aligned} \right\}$$

где A_{11} , A_{22} , $A_{12} = A_{21}$ — модули растяжения, кручения, растяжения-кручения соответственно; E — модуль упругости САС; P — осевая нагрузка; M — скручивающий момент; R — радиус САС.

Представленное решение позволит использовать не только весь математический аппарат, разработанный для управления классическими „жесткими“ приводами, но и такие свойства SEA, как упругость и точность.

Применительно к реабилитационным устройствам модульность рассмотренной конструкции позволит адаптировать носимую роботизированную систему к конкретной задаче ассистирования человеку при ходьбе или к полноценному курсу реабилитации.

Модульная конструкция торсионной пружины. Для корректной биомеханики движения любого сустава необходимо модулировать жесткость пружины во время ходьбы. Альтернативным решением для реализации конструкции переменной жесткости может быть механизм, замещающий анизотропию упругости на управляемую. На основе данного предположения был разработан концепт плоского торсиона, представленный на рис. 4.

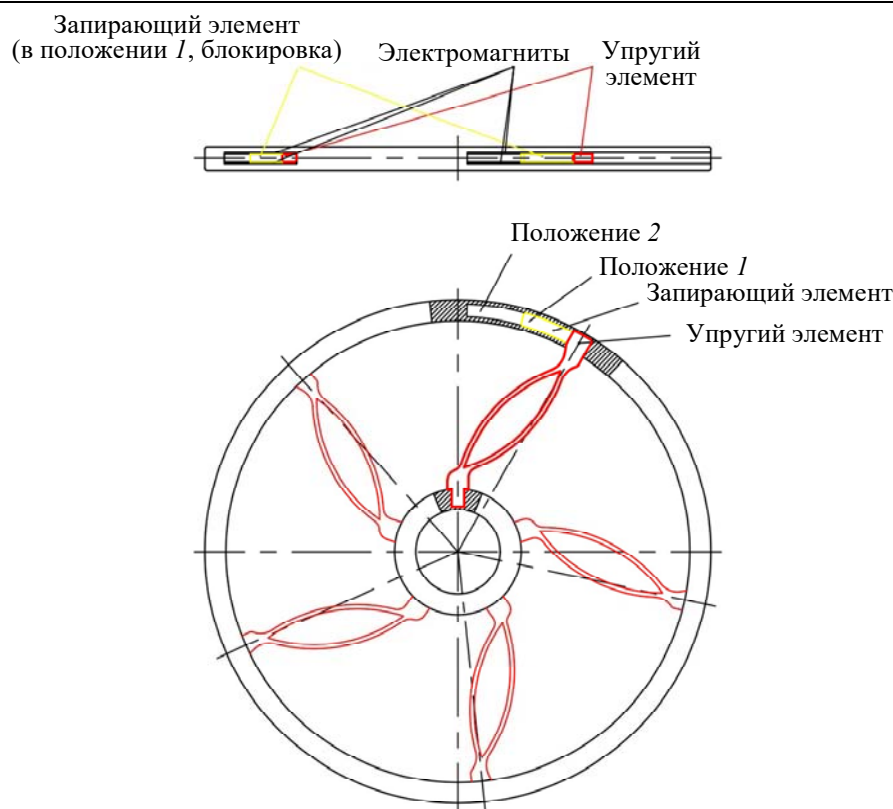


Рис. 4

Предполагается, что изменению жесткости будет способствовать перемещение запирающего элемента вдоль поля электромагнитов, а именно: упругий элемент блокируется запирающим элементом в начальном положении 1. Внутренний диаметр элемента для соединения с валом планируется выполнять со шлицевым соединением, равно как и внешний. Такое решение позволит собирать несколько пружин на одном валу. При необходимости уменьшить жесткость при кручении запирающий элемент становится свободным и перемещается в положение 2, тем самым обеспечивая холостой ход упругого элемента. 3D-визуализация предлагаемого устройства представлена на рис. 5.

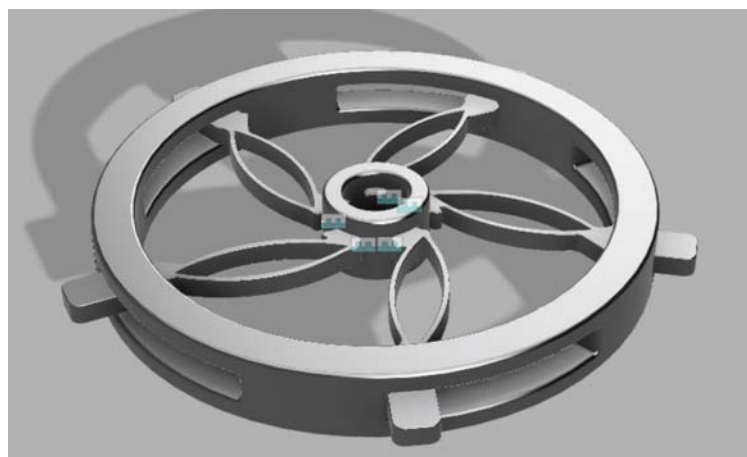


Рис. 5

Основная задача при проектировании готового устройства — определение физических значений его параметров. Предполагаемая многоступенчатость конструкции позволит регулировать жесткость в сборке пружин в широком диапазоне, исключая необходимость аппроксимации расчетных значений к значениям стандартной конструкции.

Предложенный концепт торсионной пружины нуждается в основательной проработке конструкции и создании методики расчета упругого элемента.

Применение эластичных актюаторов. Действие локомоторной механотерапии неоднократно доказано множеством ученых. Несмотря на то, что локомоторная терапия является сравнительно новым направлением, в некоторых медицинских учреждениях, помимо клинического применения роботизированных систем, проводятся также научные исследования, связанные с использованием данного метода. [17]. Основой устройств, применяемых в локомоторной терапии, является упругий актюатор, обеспечивающий безопасное и контролируемое взаимодействие человека и робота.

Универсальность применения эластичных актюаторов позволяет использовать их в том числе и для создания носимых ортезов. Для конструкции такого рода привод должен соответствовать многим требованиям, в частности обладать возможностью имитации внутреннего передаточного числа сустава, а также подвижностью в разных плоскостях. Такую конструкцию, учитывая требования безопасности и поддерживая необходимый уровень комфорта, можно рассматривать как источник энергии для экзоскелета. Подобное решение, основанное на системе приводов с усилителем, может представлять собой серию пружин между двигателем и суставом человеческого тела, при этом должно осуществляться управление выходным крутящим моментом и смещением упругого элемента. В будущем возможно применение нейронной сети для реализации устойчивого управления положением привода путем компенсации нелинейных характеристик нагрузки, таких как сила тяжести и трение. Подтверждением данной гипотезы могут служить полученные китайскими учеными экспериментальные результаты, показывающие, что актюатор имеет хорошее следование положению и податливость, при этом реализуется безопасное взаимодействие между экзоскелетом и телом человека [18].

Заключение. Исследован вопрос оптимальной упругости пружины в актюаторе в целях разработки эффективных и компактных гибких соединений для применения в реабилитационных устройствах. Предложена модульная торсионная пружина для эластичного актюатора. Для апробации решения в дальнейшем необходимо провести макетирование торсиона, собрать конструкцию из нескольких элементов и провести испытания.

Вариативность применения и широкий диапазон выходных характеристик при компактных конструктивных решениях позволяет использовать эластичный актюатор с внедренной модульной торсионной пружиной не только для создания ортеза, но и в перспективе для конструирования устройств роботизированной локомоторной механотерапии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Khatib O., Yokoi K., Brock O., Chang Kyong Sok, Casal A. Robots in Human Environments: Basic Autonomous Capabilities // Intern. Journal Robotic Res. 1999. N 18. P. 684—696.
2. De Santis A., Siciliano B., De Luca A., Bicchi A. An atlas of physical human–robot interaction // Mechanism and Machine Theory. 2008. Vol. 43, iss. 3. P. 253—270, DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2007.03.003.
3. Williamson M. M. Series Elastic Actuators // Tech. Rep. 1524: Massachusetts Institute of Technology. Boston, 1995.
4. Robinson D. W., Pratt J. E., Paluska D. J., Pratt G. A. Series Elastic Actuator Development for a Biomimetic Walking Robot // IEEE/ASME Intern. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics, Atlanta, GA, Sept. 19—22, 1999.
5. Paine N., Oh S., Sentis L. Design and control considerations for highperformance series elastic actuators // IEEE/ASME Trans. on Mechatronics. 2014. Vol. 19. P. 1080—1091.
6. Paine N., Mehling J. S., Holley J., Radford N. A., Johnson G., Fok C. L., Sentis L. Actuator Control for the NASA-JSC Valkyrie Humanoid Robot: A Decoupled Dynamics Approach for Torque Control of Series Elastic Robots // J. Field Robot. 2015. N 32. P. 378—396.
7. Carpino G., Accoto D., Sergi F., Tagliamonte L. N., Guglielmelli E. A Novel Compact Torsional Spring for Series Elastic Actuators for Assistive Wearable Robots // ASME Journal of Mechanical Design. 2012. N 134(12). P. 121002. DOI: 10.1115/1.4007695.

8. Veneman J. F., Ekkelenkamp R., Kruidhof R., Helm F. van der, Kooij H. van der. A series elastic- and bowden-cable-based actuation system for use as torque actuator in exoskeleton-type robots // Intern. Journal of Robotics Research. 2006. N 25(3). P. 261—281.
9. Tsagarakis N., Laffranchi M., Vanderborght B., Caldwell D. A compact soft actuator unit for small scale human friendly robots // Proc. IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation. 2009. P. 4356—4362.
10. Lagoda C., Schouten A., Stienen A., Hekman E., Kooij H. van der. Design of an electric series elastic actuated joint for robotic gait rehabilitation training // Proc. of the 3rd IEEE RAS and EMBS Intern. Conf. on Biomedical Robotics and Biomechatronics. 2010. P. 21—26.
11. Stienen A., Hekman E., Braak H. ter, Aalsma A., Helm F. van der, Kooij H. van der. Design of a rotational hydroelastic actuator for a powered exoskeleton for upper limb rehabilitation // IEEE Trans. on Biomedical Engineering. 2010. N 57(3). P. 728—735.
12. Knox B., Schmiedeler J. P. A unidirectional series-elastic actuator design using a spiral torsion spring // ASME Journal of Mechanical Design. 2009. N 131(125001). P. 1—5.
13. Геофизический комплекс 01-МТ8-1. Техническое описание. СПб: СПбФ ИЗМИРАН, 2009. 38 с.
14. Мусалимов В. М. Механика деформируемого кабеля. СПб: СПбГУ ИТМО, 2005. 203 с.
15. Мусалимов В. М., Мокряк С. Я., Соханев Б. В., Шиянов В. Д. Определение упругих характеристик гибких кабелей на основе модели спирально-анизотропного тела // Механика композитных материалов. 1984. № 1. С. 136—141.
16. Мусалимов В. М., Перепелкина С. Ю., Паасуке М., Гапеева Е., Ерелине Я. Статистическое моделирование передаточных отношений коленного сустава // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. № 20 (3). С. 446—454.
17. Даминов В. Д. Роботизированная локомоторная терапия в нейрореабилитации // Вестн. восстановительной медицины. 2012. № 1.
18. Qian Chenglong, Zhu Aibin, Song Jiyuan, Shen Huang, Zhang Xiaodong, Cao Guangzhong. Design and Control of a Novel Series Elastic Actuator for Knee Exoskeleton // Proc. of the 12th Intern. Conf. on Intelligent Robotics & Applications, ICIRA. 2019. P. 629—640. DOI: 10.1007/978-3-030-27535-8_56.

Сведения об авторах

- | | |
|------------------------------------|---|
| Михаил Сергеевич Малов | — аспирант; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: mishamalov1@gmail.com |
| Виктор Михайлович Мусалимов | — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: musvm@yandex.ru |
| Сергей Юрьевич Ловлин | — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники |

Поступила в редакцию 20.04.22; одобрена после рецензирования 29.04.22; принята к публикации 31.05.22.

REFERENCES

1. Khatib O., Yokoi K., & Brock O., Chang K., Casal A. *Intern. J. Robotic Res.*, 1999, no. 18, pp. 684—696.
2. De Santis A., Siciliano B., De Luca A., Bicchi A. *Mechanism and Machine Theory*, 2008, no. 3 (43), pp. 253—270, ISSN 0094-114X, <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2007.03.003>.
3. Williamson M.M. *Series Elastic Actuators*, Tech. Rep. 1524: Massachusetts Institute of Technology. Boston, 1995.
4. Robinson D.W., Pratt J.E., Paluska D.J., Pratt G.A. *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, Sept. 19—22, 1999, Atlanta, GA.
5. Paine N., Oh S., Sentis L. *IEEE/ASME Trans. Mechatron.*, 2014, no. 19, pp. 1080—1091.
6. Paine N., Mehling J.S., Holley J., Radford N.A., Johnson G., Fok C.L., Sentis L. *J. Field Robot.*, 2015, no. 32, pp. 378—396.
7. Carpino G., Accoto D., Sergi F., Tagliamonte L.N., and Guglielmelli E. *ASME. J. Mech. Des.*, December 2012, no. 12(134), pp. 121002, <https://doi.org/10.1115/1.4007695>.
8. Veneman J.F., Ekkelenkamp R., Kruidhof R., van der Helm F., and van der Kooij H. *International Journal of Robotics Research*, 2006, no. 3(25), pp. 261—281.
9. Tsagarakis N., Laffranchi M., Vanderborght B., and Caldwell D. *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2009, pp. 4356—4362.
10. Lagoda C., Schouten A., Stienen A., Hekman E., and van der Kooij H. *Proc. 3rd IEEE RAS and EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics*, 2010, pp. 21—26.
11. Stienen A., Hekman E., ter Braak H., Aalsma A., van der Helm F., and van der Kooij H. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2010, no. 3(57), pp. 728—735.

12. Knox B., and Schmiedeler J.P. *ASME Journal of Mechanical Design*, 2009, no. 131(125001), pp. 1–5.
13. Geofizicheskiy kompleks 01-MT8-1. Tekhnicheskoye opisaniye (*Geophysical Complex 01-MT8-1. Technical Description*), St. Petersburg, 2009, 38 p. (in Russ.)
14. Musalimov V.M. *Mekhanika deformiruyemogo kabelya* (Deformable Cable Mechanics), St. Petersburg, 2005, 203 p. (in Russ.)
15. Musalimov V.M., Mokryak S.Ya., Sokhanov B.V., Shiyanov V.D. *Mekhanika kompozitnykh materialov*, 1984, no. 1, pp. 136–141. (in Russ.)
16. Musalimov V.M., Perepelkina S.Yu., Pääsuke M., Gapeeva E.N., Ereline J. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2020, no. 3 (20), pp. 446–454, DOI: 10.17586/2226-1494-2020-20-3-446-454. (in Russ.)
17. Daminov V.D. *Vestnik vosstanovitel'noy meditsiny*, 2012, no. 1. (in Russ.)
18. Qia Chenglong, Zhu Aibin, Song Jiyuan, Shen Huang, Zhang Xiaodong, Cao Guangzhong, *Design and Control of a Novel Series Elastic Actuator for Knee Exoskeleton*, 2019, DOI: 10.1007/978-3-030-27535-8_56.

Data on authors

Mikhail S. Malov	—	Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: michaelmalov21@gmail
Victor M. Musalimov	—	Dr. Sci., Professor; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: musvm@yandex.ru
Sergey Yu. Lovlin	—	PhD, Associate professor; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics

Received 20.04.22; approved after reviewing 29.04.22; accepted for publication 31.05.22.