

УДК 621.865.8

**С.И. Савин**, канд.техн.наук, с.н.с., ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск, Россия) (e-mail: savinswsu@mail.ru)

**Л.Ю. Ворочаева**, канд.техн.наук, доцент, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск, Россия) (e-mail: mila180888@yandex.ru)

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ АНТРОПОМОРФНЫХ МЕХАНИЗМОВ С ГИБКИМИ ПЕРЕДАЧАМИ ВВЕДЕНИЕМ ВИРТУАЛЬНЫХ ЗВЕНЬЕВ**

*В настоящее время антропоморфных шагающих роботов можно отнести к наиболее перспективным модельным роботам с точки зрения их внедрения в урбанизированную среду за счет взаимодействия с человеком и использования существующей инфраструктуры при выполнении различных технологических задач. Для адекватной работы системы управления таких роботов требуется разработка их точных математических моделей, в которых учитываются свойства приводов, передач и сенсоров.*

*В данной работе рассмотрены подходы к описанию модели двуногого шагающего робота при учете упругих передач между его звеньями. Робот представляет собой трехзвенный механизм, движущийся в сагиттальной плоскости и осуществляющий посадку или вставание. Предложены два варианта составления математической модели робота. В первом используются уравнения Лагранжа, при этом число уравнений, описывающих движение робота, увеличивается вдвое за счет внедрения упругих связей по сравнению со случаем, когда этими связями пренебрегают. Во втором варианте модель движения робота и модель работы упругих элементов записываются отдельно, что не приводит к увеличению числа уравнений. К преимуществам этого метода можно отнести тот факт, что он позволяет сохранить структуру и свойства уравнений движения механизма, используемые при построении методов управления в случаях, когда упругие свойства передач не учитываются, а также сохранить структуру матрицы при обобщенных ускорениях.*

*Приведены результаты моделирования движения робота при двух вариантах составления его математической модели (в первом случае модель содержит три обобщенные координаты, а во втором – шесть), проведено их сравнение. Установлено, что в целом обе математические модели ведут себя практически идентично, наиболее существенные различия проявляются при формировании управляющих воздействий, генерируемых регулятором.*

**Ключевые слова:** антропоморфный шагающий робот; модельный робот; модель упругой передачи; СТС-регулятор.

**DOI:** 10.21869/2223-1560-2018-22-3-59-66

**Ссылка для цитирования:** Савин С.И., Ворочаева Л.Ю. Моделирование антропоморфных механизмов с гибкими передачами введением виртуальных звеньев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2018. Т. 22, № 3(78). С. 59-66.

\*\*\*

### **Введение**

В настоящее время наблюдается все больший интерес к мобильной робототехнике, в особенности к мобильным роботам, способным функционировать в урбанизированных средах и взаимодействовать с человеком. Наиболее перспективным типом модельных роботов, приспособленных для такого режима функционирования, являются антропоморфные механизмы, в частности – антропо-

морфные шагающие роботы. Такие роботы должны быть способны использовать существующую инфраструктуру, разработанную для человека, и естественным образом дополнять существующие технологические процессы и сервисы.

Основной проблемой, связанной с внедрением шагающих роботов, остается управление такого рода системами. Алгоритмы управления, использующие мо-

дельную информацию (имеющие возможность производить манипуляции с достаточно точной математической моделью устройства на каждой итерации работы системы автоматического управления) показали значительные успехи в решении задач стабилизации и управления такими роботами [1]. Были рассмотрены такие задачи, как восстановление вертикальной устойчивости после столкновения [2-3], передвижение по лестницам и опорным поверхностям сложной формы [4-5] и др.

Среди распространенных методов управления шагающими механизмами можно выделить алгоритмы, основанные на модификации линейного квадратичного регулятора [6], и методы, использующие решение задачи квадратичного программирования, для определения управляющих воздействий (в том числе, предиктивные методы) [1, 7-8]. Имеют место и другие подходы, основанные на модификациях СТС (от англ. *computed torque controller*) и пропорционально-дифференциальных регуляторов [9-10].

Для всех перечисленных способов управления важным является доступ к достаточно точной математической модели устройства. Пример такой модели приведен в [11]. На достоверность такой модели могут повлиять ряд параметров моделируемого механизма и его системы управления, такие как нелинейные свойства приводов [12], свойства сенсоров, упрощения, сделанные при описании кинематики и динамики устройства и др. Одним из таких упрощений является пренебрежение упругими свойствами передачи, связывающей электропривод и звенья шагающего механизма. В общем случае эта передача может обладать упругими свойствами, а в некоторых слу-

чаях такие свойства являются желательными [13]. Введение упругих элементов в конструкцию антропоморфных механизмов рассматривалось и ранее [14], при этом вопрос об эффективном способе моделирования устройств с упругими передачами, пригодном для использования системой управления робота, остается открытым. В этой работе рассмотрим один из таких способов.

### Моделирование упругих передач

В этой работе рассмотрим робота, каждая пара звеньев которого соединена идентичным приводом с передачей, обладающей упругими свойствами. Схематичное изображение шарнира робота показано на рис. 1.

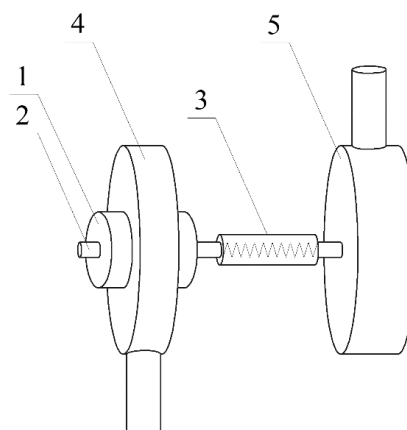


Рис. 1. Схематичное изображение активного шарнира робота: 1 – привод; 2 – вал привода; 3 – передача с упругими свойствами; 4 и 5 – звенья, приводимые в движение приводом

Рисунок 1 иллюстрирует, что введение упругой передачи увеличивает число степеней свободы механизма: вал 1 может вращаться, не изменяя относительной ориентации звеньев 4 и 5. В случае, если механизм имеет  $n$  звеньев, последовательно соединённых через подобные шарниры с упругими передачами, то для описания конфигурации механизма по-

требуется  $2n$  переменных. При использовании Лагранжева формализма при составлении уравнений движения это приводит к двукратному росту числа уравнений в сравнении со случаем, когда пере-

дачи не обладали упругими свойствами. На рис. 2 приведены две расчетные схемы для голени шагающего робота – с учетом упругости передачи (рис. 2 а) и без учета (рис. 2 б).

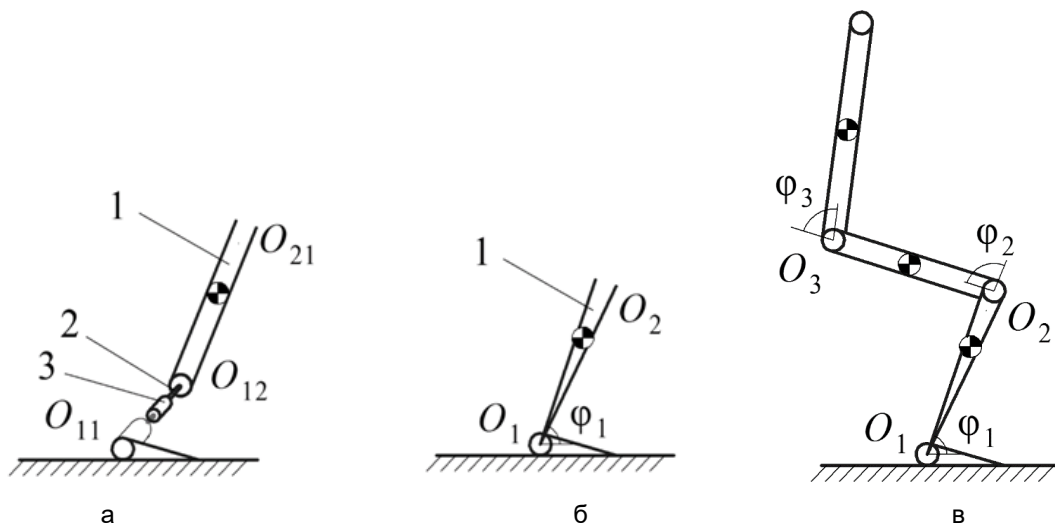


Рис. 2. а, б – расчетные схемы голени шагающего робота: 1 – голень, 2 – упругий элемент, 3 – вал привода и соединённые с ним элементы редуктора; в – расчетная схема механизма

На рис. 2 использованы обозначения:  $O_i$  – шарниры робота,  $\varphi_i$  – углы, определяющие ориентацию звеньев робота.

В общем случае робот может быть описан уравнениями следующего вида:

$$\mathbf{H}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{c} = \mathbf{B}\mathbf{u}, \quad (1)$$

где  $\mathbf{H}$  – обобщённая матрица инерции;  $\ddot{\mathbf{q}}$  – вектор обобщенных ускорений;  $\mathbf{c}$  – вектор обобщенных сил, не связанных с работой приводов;  $\mathbf{B}$  – матрица, связывающая моменты приводов с создаваемыми ими обобщенными силами;  $\mathbf{u}$  – вектор моментов приводов. Таким образом, робот описывается набором из  $2n$  уравнений.

Для моделирования механизмов с упругими передачами можно использовать следующий альтернативный подход, позволяющий не увеличивать число уравнений, описывающих динамику ро-

бота. Он состоит в моделировании динамики валов упругих передач отдельно от динамики робота. В таком случае робот будет описываться двумя наборами из  $n$  дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \mathbf{H}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{c} = \mathbf{B}\mathbf{u}_s, \\ \mathbf{H}_s\ddot{\mathbf{q}}_s = \mathbf{u} - \mathbf{u}_s, \end{cases} \quad (2)$$

где  $\mathbf{u}_s$  – вектор моментов упругих элементов,  $\mathbf{H}_s$  – матрица инерции валов приводов,  $\ddot{\mathbf{q}}_s$  – вектор ускорений валов приводов.

Преимуществом второго подхода является то, что он сохраняет структуру и свойства уравнений движения механизма, используемые при построении некоторых методов управления в случаях, когда упругие свойства передач могут не учитываться. Наиболее важным сохраняемым свойством является размерность

вектора  $\ddot{\mathbf{q}}$ . Это важно в связи с тем, что рост числа обобщенных координат при неизменном числе приводов усложняет задачу управления, делая некоторые методы управления не применимыми. Вторым сохраняемым свойством является структура матрицы  $\mathbf{H}$ . Это составляет существенное отличие модели (2) от уравнений (1), где матрица  $\mathbf{H}$  включает как инерции звеньев робота, так и валов приводов, что делает её плохо определённой (её собственные числа могут иметь большой разброс значений). Это приводит к усложнению моделирования движения механизма (например, может потребоваться использование алгоритмов интегрирования, разработанных для жестких систем дифференциальных уравнений [15]).

### Описание робота

Будем рассматривать антропоморфный механизм, описанный в работах [9-12]. Этот механизм представляет собой модель робота, движущегося в сагиттальной плоскости и осуществляющего вставку или посадку. Механизм включает три подвижных звена: тело, бедро и голень. Расчетная схема механизма показана на рис. 2, в.

Траектории движения робота будем задавать, решая обратную задачу кинематики для заданной траектории центра масс робота, как это было сделано в работе [16]. Проведем моделирование движения механизма для случая, когда масса каждого звена  $m_i = 20$  кг, длина  $l_i = 0,6$  м, а центр масс расположен в геометрическом центре звена. Для валов приводов и связанных с ними частей редуктора момент инерции принимался равным  $I_i = 0,5$  кг·м<sup>2</sup>.

В качестве регулятора будем использовать СТС регулятор. Описание и настройка данного регулятора могут быть найдены в работах [10, 17]. Регулятор описывается выражением:

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

где  $\mathbf{q}^* = \mathbf{q}^*(t)$  – желаемые значения обобщенных координат,  $\mathbf{K}_p$  и  $\mathbf{K}_d$  – матрицы коэффициентов. Здесь будем использовать  $\mathbf{K}_p = 300\mathbf{I}$ ,  $\mathbf{K}_d = 200\mathbf{I}$ , где  $\mathbf{I}$  – единичная матрица.

В следующем разделе будем производить численные эксперименты с двумя математическими моделями: моделью с тремя степенями свободы, описываемой уравнениями (2) (далее будем называть её «3 dof модель»), и моделью с шестью степенями свободы, описываемую уравнениями (1) (далее будем называть её «6 dof модель»). Сравнение полученных результатов моделирования для этих моделей составляет содержание следующего раздела.

### Моделирование движения робота

Основная цель проводимого в этом разделе эксперимента – показать, как различные способы моделирования механизма с упругими передачами влияют на получаемые результаты моделирования. При этом важно, чтобы используемые системы управления были эквивалентны. Для обеспечения этой эквивалентности будем использовать регулятор (3), работающий с моделью с тремя степенями свободы.

Проведем моделирование динамики модели с шестью степенями свободы и обозначим полученные временные зависимости обобщенных координат как

$\varphi_i(t)$ . Аналогичные зависимости, полученные для модели с тремя степенями

свободы обозначим как  $\bar{\varphi}_i(t)$ , результаты моделирования приведены на рис. 3.

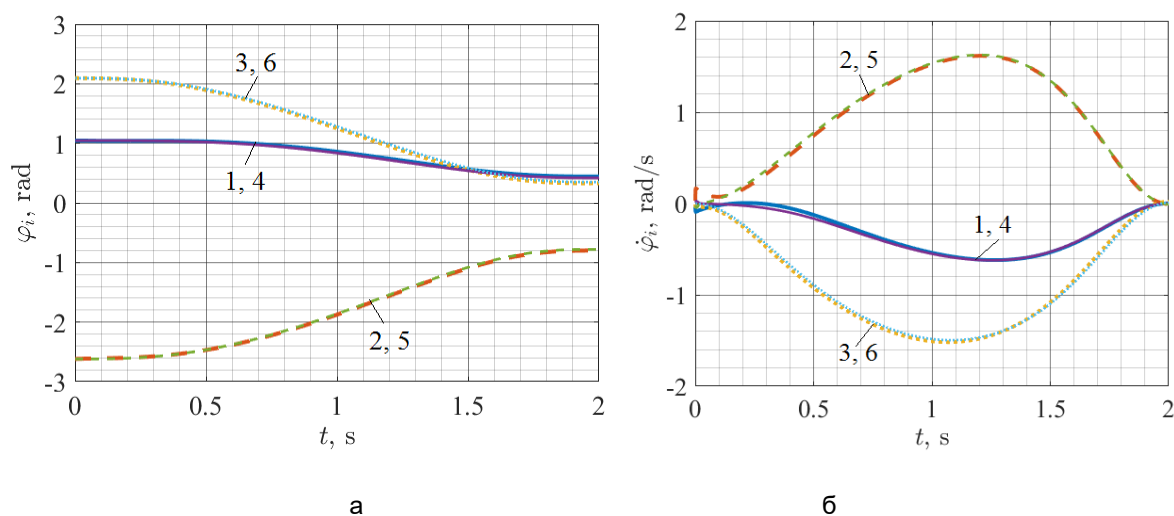


Рис. 3. Временные зависимости: а – обобщенных координат, 1 –  $\varphi_1(t)$ , 2 –  $\varphi_2(t)$ , 3 –  $\varphi_3(t)$ , 4 –  $\bar{\varphi}_1(t)$ , 5 –  $\bar{\varphi}_2(t)$ , 6 –  $\bar{\varphi}_3(t)$ ; б – обобщенных скоростей, 1 –  $\dot{\varphi}_1(t)$ , 2 –  $\dot{\varphi}_2(t)$ , 3 –  $\dot{\varphi}_3(t)$ , 4 –  $\dot{\bar{\varphi}}_1(t)$ , 5 –  $\dot{\bar{\varphi}}_2(t)$ , 6 –  $\dot{\bar{\varphi}}_3(t)$

Полученные результаты моделирования указывают на то, что обе математические модели ведут себя практически идентично, хотя некоторые отклонения имеют место. При этом, наиболее существенные различия проявляются при анализе управляющих воздействий, генерируемых регулятором (рис. 4).

Заметим, что 3 dof модель имеет регулятор с точной модельной информацией, тогда как 6 dof модель использует регулятор, настроенный на 3 dof модель; это делает различия между полученными временными зависимостями ожидаемым. Важно заметить, что полученное различие является достаточно существенным, если целью моделирования является выявление свойств управляющих воздействий (например, если моделирование проводится с целью выявления требуемых параметров электроприводов).

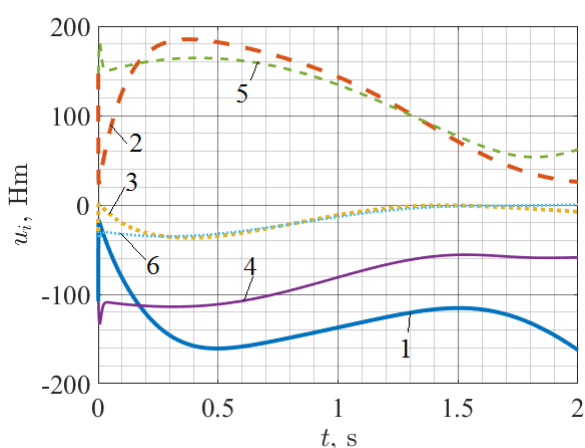


Рис. 4. Временные зависимости управляющих воздействий: 1 –  $u_1(t)$ , 2 –  $u_2(t)$ , 3 –  $u_3(t)$ , 4 –  $\bar{u}_1(t)$ , 5 –  $\bar{u}_2(t)$ , 6 –  $\bar{u}_3(t)$

### Заключение

В работе рассмотрены два подхода к разработке математической модели движения двуногого шагающего робота при учете упругих передач между его звеньями. При одном из подходов наблюдается двукратное увеличение числа уравнений, описывающих движение устройства. При втором подходе, заключающемся в использовании двух наборов уравнений,

один из которых описывает движение робота, а второй - работу упругих передач, число уравнений остается неизменным. В результате анализа и сравнения временных графиков изменения обобщенных координат и скоростей для двух ранее указанных подходов установлено, что обе математические модели ведут себя практически идентично. Небольшие различия наблюдаются при формировании управляющих воздействий.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №18-38-00140\18.*

### Список литературы

1. Griffin R., Wiedebach G., Bertrand S., Leonessa A. Pratt J. Straight-Leg Walking Through Underconstrained Whole-Body Control. 2017. arXiv preprint arXiv: 1709.03660.
2. Pratt J., Carff J., Drakunov S., Goswami A. Capture point: A step toward humanoid push recovery // Proc. 6th IEEE-RAS Intern. Conf. Humanoid Robots. Genova, Italy, 2006, pp. 200-207.
3. Jatsun S., Savin S., Yatsun A. Motion control algorithm for exoskeleton push recovery in the frontal plane // Proc. Intern. Conf. on Robotics in Alpe-Adria Danube Region. Belgrade, Serbia, 2016, pp. 474-481.
4. Dai H., Tedrake R. Planning robust walking motion on uneven terrain via convex optimization // Proc. 16th IEEE-RAS Intern. Conf. Humanoid Robots. Cancun, Mexico, 2016, pp. 579-586. IEEE.
5. Jatsun S., Savin S., Yatsun A. Footstep Planner Algorithm for a Lower Limb Exoskeleton Climbing Stairs // Proc. Intern. Conf. on Interactive Collaborative Robotics. Hatfield, UK, 2017, pp. 75-82.
6. Mason S., Rotella N., Schaal S., Righetti L. Balancing and walking using full dynamics LQR control with contact constraints // Proc. 16th IEEE-RAS Intern. Conf. Humanoid Robots. Cancun, Mexico, 2016, pp. 63-68.
7. Galloway K., Sreenath K., Ames A.D., Grizzle J.W. Torque saturation in bipedal robotic walking through control Lyapunov function-based quadratic programs // IEEE Access. 2015. Vol. 3. P. 323-332.
8. Savin S., Vorochaeva L. Nested quadratic programming-based controller for pipeline robots // Proc. Intern. Conf. Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). St. Petersburg, Russia. 2017. P. 1-6.
9. Адаптивная система управления экзоскелета, осуществляющего вертикализацию человека / С.Ф. Яцун, С.И. Савин, А.С. Яцун, Р.Н. Турлапов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия Техника и технологии. 2015. №3 (16). С. 30-37.
10. Синтез параметров регулятора экзоскелета, с использованием Iрт последовательностей / С.Ф. Яцун, С.И. Савин, А.С. Яцун, И.А. Яковлев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2015. №4 (17). С. 24-31.
11. Jatsun S.F., Vorochaeva L.Yu., Yatsun A.S., Savin S.I. The modelling of the standing-up process of the anthropomorphic mechanism // Proc. 18th Intern. Conf. Assistive Robotics (CLAWAR). HangZhou, China, 2015. P. 175-182.
12. Особенности управления движением многозвенной электромеханической системы с учетом свойств электропривода / Г.Я. Пановко, С.Ф. Яцун, С.И. Савин, А.С. Яцун // Машиностроение и инженерное образование. 2016. № 2 (47). С. 2-10.
13. Pratt J.E., Krupp B.T. Series elastic actuators for legged robots // Unmanned Ground Vehicle Technology Vi. Orlando, Florida, United States, 2004, vol. 5422, pp. 135-145.



14. Jatsun S., Savin S., Yatsun A., Postolnyi A. Control system parameter optimization for lower limb exoskeleton with integrated elastic elements // Proc. 19th Intern. Conf. Advances in Cooperative robotics (CLAWAR). London, UK, 2016. P. 797-805.

15. Хайпер Э., Ваннер Г. Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. Жесткие и дифференциально-алгебраические задачи. М.: Мир, 1999. 685 с.

16. Jatsun S., Savin S., Yatsun A., Malchikov A. Study of controlled motion of ex-

oskeleton moving from sitting to standing position // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2015. Vol. 371. P. 165-172.

17. Jatsun S., Savin S., Yatsun A. Comparative analysis of iterative LQR and adaptive PD controllers for a lower limb exoskeleton // Proc. IEEE Intern. Conf. Cyber Technology in Automation, Control and Intelligent Systems (CYBER). Chengdu, China, 2016. P. 239-244.

Поступила в редакцию 23.04.18

UDC 621.865.8

**S.I. Savin**, Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher, Southwest State University (Kursk, Russia) (e-mail: savinswsu@mail.ru)

**L.Yu. Vorochaeva**, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Southwest State University (Kursk, Russia) (e-mail: mila180888@yandex.ru)

### **SIMULATION OF ANTHROPOMORPHIC ROBOTS WITH ELASTIC DRIVES BY INTRODUCING VIRTUAL LINKS**

*Anthropomorphic walking robots are among the most promising robot types, due to the possibility to introduce them into the urbane environment through the use of the existing infrastructure. Control systems developed for such robots require access to the exact mathematical models of these robots, taking into account the properties of actuators, gears and sensors.*

*In this paper, we consider approaches to describing the model of a bipedal walking robot with elastic drives. The robot is a three-link mechanism that moves in the sagittal plane and performs verticalization (sit-to-stand transfer). Two variants of describing the dynamics of the robot are shown. In the first variant, the number of equations describing the movement of the robot is doubled due to the introduction of elastic drives, in comparison with the case when there are no elastic elements present. In the second variant, there is robot model and the elastic element dynamics model, and both are described separately. The advantages of this method include the fact that it allows us to preserve the structure and properties of the equations of motion of the mechanism used in constructing control methods in cases when the elastic properties of the gears are not taken into account, and it also allows to conserve the structure of the generalized inertia matrix.*

*The simulation results are presented in two described previously variants, their comparison is made. It is established that both mathematical models behave almost identically, with the most significant differences manifested in the formation of control actions generated by the regulator.*

**Key words:** anthropomorphic walking robot; model-based control; elastic drive; CTC controller.

**DOI:** 10.21869/2223-1560-2018-22-3-59-66

**For citation:** Savin S.I., Vorochaeva L.Yu., Simulation of Anthropomorphic Robots with Elastic Drives by Introducing Virtual Links. Proceedings of the Southwest State University, 2018, vol. 22, no. 3(78), pp. 59-66 (in Russ.).

\*\*\*

### **Reference**

1. Griffin R., Wiedebach G., Bertrand S., Leonessa A. Pratt J. Straight-Leg Walking Through Underconstrained Whole-Body

Control. 2017. arXiv preprint arXiv:1709.03660.

2. Pratt J., Carff J., Drakunov S., Goswami A. Capture point: A step toward humanoid push recovery. Proc. 6th IEEE-RAS

Intern. Conf. Humanoid Robots. Genova, Italy, 2006, pp. 200-207.

3. Jatsun S., Savin S., Yatsun A. Motion control algorithm for exoskeleton push recovery in the frontal plane. Proc. Intern. Conf. on Robotics in Alpe-Adria Danube Region. Belgrade, Serbia, 2016, pp. 474-481.

4. Dai H., Tedrake R. Planning robust walking motion on uneven terrain via convex optimization. Proc. 16th IEEE-RAS Intern. Conf. Humanoid Robots. Cancun, Mexico, 2016, pp. 579-586. IEEE.

5. Jatsun S., Savin S., Yatsun A. Footstep Planner Algorithm for a Lower Limb Exoskeleton Climbing Stairs. Proc. Intern. Conf. on Interactive Collaborative Robotics. Hatfield, UK, 2017, pp. 75-82.

6. Mason S., Rotella N., Schaal S., Righetti L. Balancing and walking using full dynamics LQR control with contact constraints. Proc. 16th IEEE-RAS Intern. Conf. Humanoid Robots. Cancun, Mexico, 2016, pp. 63-68.

7. Galloway K., Sreenath K., Ames A.D., Grizzle J.W. Torque saturation in bipedal robotic walking through control Lyapunov function-based quadratic programs. IEEE Access, 2015, vol. 3, pp. 323-332.

8. Savin S., Vorochaeva L. Nested quadratic programming-based controller for pipeline robots. Proc. Intern. Conf. Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). St. Petersburg, Russia, 2017, pp. 1-6.

9. Jacun S.F., Savin S.I., Jacun A.S., Turlapov R.N. Adaptivnaja sistema upravljenja jekzoskeleta, osushhestvljajushhego vertika-lizaciju cheloveka. Izvestija Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija Tehnika i tehnologii, 2015, no.3 (16), pp. 30-37.

10. Jacun S.F., Savin S.I., Jacun A.S., Jakovlev I.A. Sintez parametrov reguljatora jekzoskeleta, s ispol'zovaniem lpt posle-

dovatel'nostej. Izvestija Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija Tehnika i tehnologii, 2015, no. 4 (17), pp. 24-31.

11. Jatsun S.F., Vorochaeva L.Yu., Yatsun A.S., Savin S.I. The modelling of the standing-up process of the anthropomorphic mechanism. Proc. 18th Intern. Conf. Assistive Robotics (CLAWAR). HangZhou, China, 2015, pp. 175-182.

12. Panovko G.Ja., Jacun S.F., Savin S.I., Jacun A.S. Osobennosti upravlenija dvizheniem mnogozvennoj jelektromehani-cheskoj sistemy s uchetom svojstv jelektroprivoda. Mashinostroenie i inzhenernoe obrazovanie, 2016, no. 2 (47), pp. 2-10.

13. Pratt J.E., Krupp B.T. Series elastic actuators for legged robots. Unmanned Ground Vehicle Technology VI. Orlando, Florida, United States, 2004, vol. 5422, pp. 135-145.

14. Jatsun S., Savin S., Yatsun A., Postolnyi A. Control system parameter optimization for lower limb exoskeleton with integrated elastic elements. Proc. 19th Intern. Conf. Advances in Cooperative robotics (CLAWAR). London, UK, 2016, pp. 797-805.

15. Hayrer E., Vanner G. Solution of ordinary differential equations. Hard and differential algebraic problems. Moscow, Mir Publ., 1999, 685 p.

16. Jatsun S., Savin S., Yatsun A., Malchikov A. Study of controlled motion of exoskeleton moving from sitting to standing position. Advances in Intelligent Systems and Computing, 2015, vol. 371, pp. 165-172.

17. Jatsun S., Savin S., Yatsun A. Comparative analysis of iterative LQR and adaptive PD controllers for a lower limb exoskeleton. Proc. IEEE Intern. Conf. Cyber Technology in Automation, Control and Intelligent Systems (CYBER). Chengdu, China, 2016, pp. 239-244.