

РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ГАЛОПИРУЮЩИХ РОБОТОВ СО ЗВЕНЬЯМИ ПЕРЕМЕННОЙ ДЛИНЫ

И. И. БОРИСОВ¹, Р. А. ЗАЩИТИН¹, С. А. КОЛЮБИН¹, С. СТРАМИДЖИОЛИ²

¹Университет ИТМО 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: borisovii@itmo.ru

²Университет Твенте, 7500AE, Энсхеде Нидерланды

Представлен алгоритм структурно-параметрического синтеза механизмов ног галопирующих роботов, способных перемещаться в условиях неопределенной среды при внешних динамических контактных взаимодействиях и использовании относительно простых регуляторов по положению и скорости. Динамическая локомоция галопирующих роботов, механизмы ног которых имитируют опорно-двигательную систему животных, обеспечивается благодаря звену переменной длины (ЗПД) с пассивным регулированием. ЗПД, представляющее собой соединение двух твердотельных звеньев посредством подпружиненной призматической кинематической пары, вводится в состояние резонанса для обеспечения энергоэффективной динамической локомоции, рекуперации энергии при соударении с полом, нивелирования неровностей подстилающей поверхности.

Ключевые слова: синтез механизмов, галопирующие роботы, шагающие роботы, энергоэффективность, биомиметика

Введение. Проектирование машин, способных перемещаться подобно человеку или животным, долгое время было одним из главных вызовов робототехники [1]. Основными преимуществами шагающих/галопирующих роботов по сравнению с роботами на колесной базе являются способность перемещаться по неровной поверхности, обеспечивая дискретный характер контакта с подстилающей поверхностью, и способность перемещать центр масс относительно точки контакта. Эти преимущества критически важны для работы робота в неструктурированной и динамической среде.

Актуальной задачей является разработка энергоэффективных локомоционных роботов, осуществляющих *динамическую локомоцию*, способных обеспечить большой запас хода, экономно расходуя „энергетический бюджет“. Для стабильного взаимодействия с объектами внешней среды робототехническая система должна обладать свойством адаптивности, которое может быть как реализовано на уровне алгоритмов управления движением, так и заложено как свойство механической системы.

При использовании первого подхода применяют методы управления по регулированию силы контактного взаимодействия, например с помощью механического импеданса [2], либо учитывая энергию взаимодействия [3]. Алгоритмические подходы предъявляют высокие требования к техническому оснащению робота: регулятор должен успевать за динамикой физического процесса. Например, продолжительность контакта робота-гепарда (Massachusetts Institute of Technology) с подстилающей поверхностью порядка 80 мс и для обеспечения стабильной локомоции регулятор должен успевать обрабатывать сигналы на такой скорости [2].

Альтернативным подходом является интеграция эластичных элементов в конструкцию ноги робота, благодаря чему обеспечивается адаптивность к форме поверхности пола. Вследствие непрерывного характера работы пружин и демпферов становится возможным нивелировать влияние шумов измерений датчиков и запаздывания при обработке сигналов, тем самым снизить требования к техническому оснащению робота. Эластичные элементы могут быть использованы для рекуперации энергии при движении робота [4].

В настоящей статье представлен алгоритм структурно-параметрического синтеза плоских рычажных механизмов ног галопирующих роботов, способных осуществлять динамическую локомоцию, с использованием регуляторов, решающих задачи стабилизации и слежения скорости и положения входных звеньев.

Обзор аналогов. На рис. 1 представлена классификация механизмов ног галопирующих роботов по принципу приведения в движение. Полноприводные механизмы с открытой кинематической цепью (рис. 1, а) используются в большинстве роботов. С их помощью можно воспроизвести практически любую траекторию в рамках рабочего пространства, однако необходима комплексная система управления и планирование траектории [5—7]. Неполноприводные механизмы, механизмы с большим количеством степеней свободы, чем управляющих двигателей, представлены на рис. 1, б (с открытой кинематической цепью) и рис. 1, в (с замкнутой кинематической цепью). Механическая адаптация используется для поглощения энергии удара и обеспечения автоколебательного режима работы робота [8]. Полноприводные с замкнутой кинематической цепью (рис. 1, г) не способны обеспечить динамическую локомоцию и используются при проектировании шагающих роботов, обеспечивающих статическую локомоцию. К ним относятся стопоходящая машина Чебышева, лямбда-механизм Чебышева и другие механизмы [9], преобразующие вращательное движение кривошипа в движение, приближенное к прямолинейному на определенном участке пути.

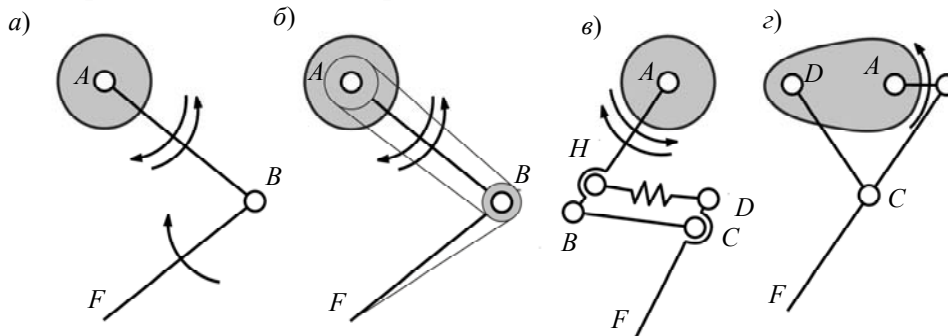


Рис. 1

Для обеспечения одновременно стабильного характера динамического контактного взаимодействия, энергоэффективности, минимизации массы и габаритов робота при использовании минимального количества управляющих двигателей, приводимых в движение простыми алгоритмами управления, необходимо синтезировать неполноприводные механизмы, оснащенные гибкими элементами и способные входить в режим автоколебаний.

Для повышения энергоэффективности галопирующих роботов осуществляется пассивная динамическая локомоция или в конструкции робота используются эластичные элементы, способных выполнять рекуперацию энергии удара [10]. Апробация пассивных шагающих роботов, осуществляющих динамическую локомоцию, была проведена в работах [11, 12]. В работах [13, 14] для рекуперации энергии использовались актуаторы с упругими элементами.

В настоящей статье предлагается метод проектирования неполноприводных энергоэффективных галопирующих роботов, позволяющий решать задачи управления движением в условиях контактного взаимодействия на базе простых регуляторов по положению и по скорости. Метод предполагает реализацию в конструкции решений, позволяющих механически декомпозировать каналы управления и задавать желаемый характер движения за счет голономных связей механизма, в частности, путем введения в конструкцию роботов пассивных звеньев переменной длины (ЗПД) с целью обеспечения адаптивности и энергоэффективности систем. ЗПД — гибкое тело или система твердых тел, входящее в две вращательные кинематические пары, расстояние между которыми изменяется вследствие приложенной внешней нагрузки и голономных связей механизма.

В предыдущих публикациях были раскрыты способы оптимизации параметров эластичных элементов, вводимых в состояние резонанса, для повышения энергоэффективности робота [15]. Частный случай структурно-геометрического синтеза механизма с эластичными элементами представлен в статье [16]. В настоящей статье предложен общий алгоритм структурно-параметрического синтеза механизмов ног для энергоэффективных галопирующих роботов с ЗПД.

Алгоритм структурно-параметрического синтеза плоских рычажных механизмов ног галопирующих роботов

Структурный синтез

1. Определить степень свободы базисного механизма W_0 по формуле Чебышева для плоских механизмов с низшими кинематическими парами:

$$W_0 = 3n - 2P_5 - P_4,$$

где n — число подвижных звеньев, P_5 — число кинематических пар пятого класса, P_4 — число кинематических пар четвертого класса. При $W_0 = 1$ реконфигурация траектории выходной точки обеспечивается смещением стойки звена, не являющимся входным.

2. Рассчитать массив возможных сочетаний кинематических пар P_l и подвижных звеньев n_l присоединяемой структурной группы, обладающей нулевой степенью подвижности ($W_l = 0$), по формуле:

$$W_l = 3n_l - 2P_l$$

учитывая, что P_l и n_l могут быть только целыми.

3. Определить варианты присоединяемой группы, состоящей из рассчитанных сочетаний чисел кинематических пар P_l и подвижных звеньев n_l , рассчитать число свободных поводков присоединяемой группы и внести полученные данные в таблицу.

4. Прикрепить рассчитанную присоединяемую структурную группу к базисному механизму для получения полного механизма ноги. Одно из звеньев присоединяемой структурной группы (групп) со свободным поводком крепится к выходной точке базисного механизма, последующий поводок крепится к неподвижному звену, если между прикрепляемым к выходной точке базисного механизма звеном и звеном со свободным поводком нет промежуточных звеньев, в противном случае — к одному из подвижных звеньев, не являющихся входным.

5. Среди двухвершинных звеньев присоединяемой группы выбрать кандидатов на роль ЗПД для обеспечения автоколебательных процессов динамической локомоции и определить их минимально допустимую длину с учетом возможного конструктивного исполнения.

Оптимизация параметров

6. Выбрать сочетание ЗПД, какое еще не было проверено, зафиксировать значение длины ЗПД на минимальном значении (см. п. 5), а для остальных звеньев оптимизировать геометрические параметры полноприводного механизма ноги. В результате должна быть получена кинематическая схема со звеньями фиксированной длины в полноприводном режиме.

7. Определить минимальную и максимальную длину выбранного сочетания ЗПД так, чтобы при ее изменении в этом диапазоне все возможные траектории выходных звеньев принадлежали заданной рабочей области (минимальная длина не может быть меньше определенной в п. 5).

8. Задать динамические параметры всех звеньев механизма (массы, моменты инерции, координаты центров масс) с учетом применяемых конструкционных материалов и технологии изготовления устройства.

9. Провести энергетический анализ механизма для расчета количества энергии, затрачиваемой на перемещение.

10. Оптимизировать параметры звена переменной длины для обеспечения минимума коэффициента затрат энергии на перемещение (КЗП). Если были проверены не все варианты ЗПД — вернуться в п. 6, иначе перейти к п. 11.

11. Выбрать наилучшую модификацию механизма с ЗПД исходя из удобства конструирования элементов и критерия минимизации КЗП. В результате должен быть получен механизм ноги галопирующего робота, который с помощью звена переменной длины на основе гибкого элемента с пассивным регулированием способен адаптироваться к поверхности пола, погасить силу и рекуперировать энергию удара, а также обеспечивать автоколебательный режим динамической локомоции.

Пример синтеза механизма ноги. Перед началом синтеза необходимо выбрать базисный механизм, который способен преобразовать вращательное движение входных звеньев в поступательное перемещение выходных точек механизма. Гармоническое воздействие на эластичный элемент со стороны механизма необходимо для ввода последнего в состояние резонанса с целью обеспечения автоколебательного характера работы робота. В [9] представлены различные механизмы, способные преобразовать вращательное движение вала двигателя в поступательное движение выходной точки механизма, что необходимо для возбуждения резонанса ЗПД с гибким элементом и обеспечения автоколебательных процессов динамической локомоции.

В качестве базисной структуры для первого примера был выбран „минитаур“ (minitaur) (рис. 2, а). Для установки ЗПД с гибким элементом к базисному механизму необходимо добавить структурную группу Ассур (рис. 2, б), на место одного из звеньев которой устанавливается ЗПД (рис. 2, в).

Параметр	Значение				
	1	2	3	4	5
n_l	1	2	3	4	5
P_l	—	3	—	6	—
m_l	—	2	—	3	—

Занесем массив возможных сочетаний кинематических пар P_l и подвижных звеньев n_l присоединяемой структурной группы в таблицу. Необходимо помнить, что степень подвижности W_l присоединяемой структурной группы должна равняться нулю и не изменять степень свободы базисного механизма.

Наиболее простой является структурная группа, состоящая из двух подвижных звеньев, трех сочленений и двух свободных поводков m_l , которая присоединена к выходной точке базисного механизма B (рис. 2, б) одним поводком и к неподвижному звену в точке E вторым поводком, т.к. между звеном, прикрепляемым к выходной точке базисного механизма, и звеном со свободным поводком нет промежуточных звеньев.

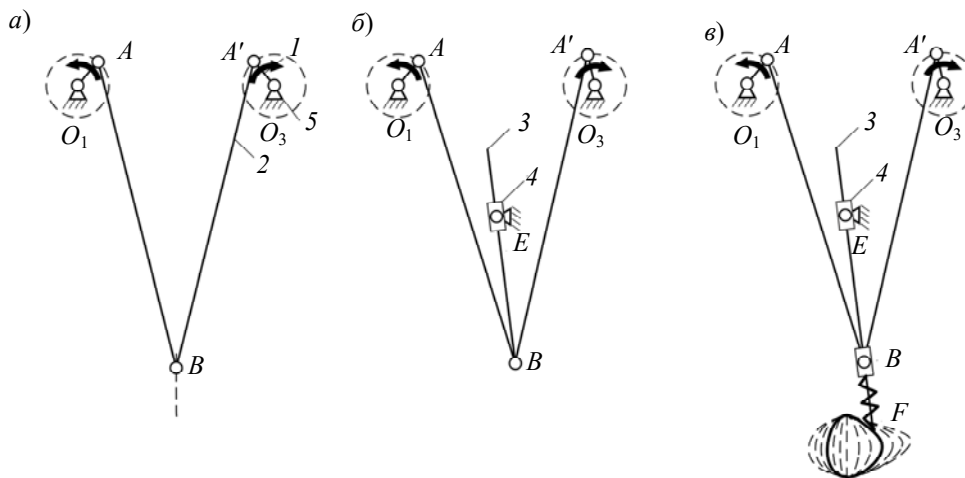


Рис. 2

Добавление структурных групп позволит создать свободные звенья для интеграции ЗПД. Под ЗПД понимается гибкое тело или система твердых тел, связанных подпружиненной призматической кинематической парой, входящее в две вращательные кинематические пары,

изменение расстояния между которыми обуславливается только голономными связями механизма и внешней нагрузкой, приложенной к выходному звену робота. Общее число степеней свободы ноги после интеграции ЗПД должно увеличиться на единицу, поскольку гибкий элемент может рассматриваться как дополнительный актюатор.

ЗПД может быть установлено только на место двухвершинных звеньев. На рис. 2, в изображен механизм ноги с ЗПД, установленным на место двухвершинного звена BF . Предлагается использовать планетарный редуктор для приведения в движение обоих кривошипов от одного двигателя постоянного тока, а также оснастить роботов дополнительным двигателем для управления относительным положением кривошипов. При управлении роботом должны решаться задачи стабилизации скорости вращения кривошипов и управления относительным положением кривошипов друг относительно друга для изменения горизонтальной составляющей траектории точки контакта с полом (рис. 2, в). Если фаза между кривошипами равна нулю, то точка B перемещается по вертикальной прямой, что позволяет роботу прыгать на месте, с ростом фазы увеличивается горизонтальная составляющая перемещения, что приводит к увеличению скорости бега робота. Обе задачи стабилизации могут быть решены с использованием методов управления по ошибке, например с помощью ПИ-регулятора для стабилизации скорости и ПИД-регулятора — для положения.

Для второго примера возьмем четырехзвенный механизм (рис. 3, а). Приведем пример присоединения структурной группы к базисному механизму (см. таблицу). Если происходит присоединение всего двух подвижных звеньев в базисный механизм, единственным вариантом остается установка ЗПД в EF (рис. 3, б, в). При интеграции четырех и более подвижных звеньев в базисный механизм возможна вариативность. На рис. 3, г, д представлены возможные варианты интеграции ЗПД в HD и KN .

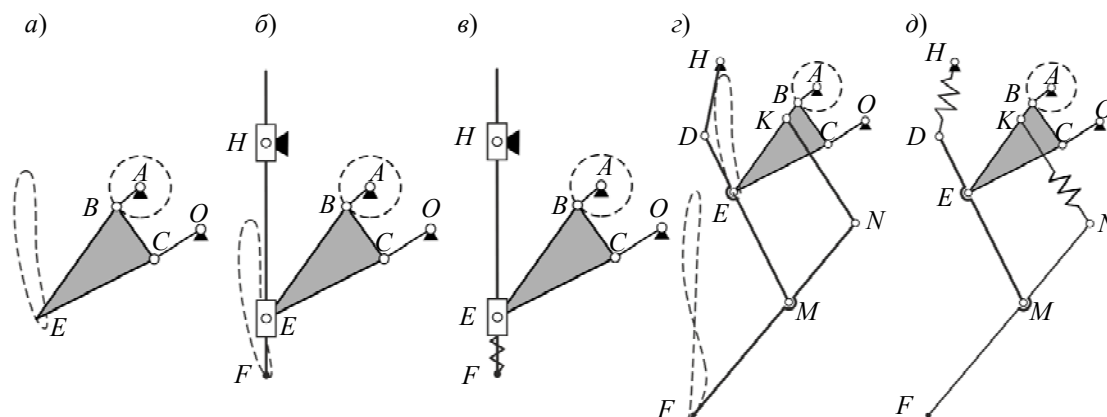


Рис. 3

Последующая оптимизация геометрических параметров проводится при помощи численных методов, если механизм состоит из небольшого количества звеньев. Для многозвенных структур могут быть применены приближенные методы синтеза, например синтез по дискретным положениям: по двум крайним и n промежуточным, где число положений влияет на точность воспроизводимой траектории. Ограничения, накладываемые на геометрические параметры звеньев, определяются по крайним позициям выходного звена для верхнего и нижнего положения точки контакта с полом с учетом требуемой траектории.

Параметры гибких элементов оптимизируются методом математического программирования. Целевой функцией, требующей минимизации, является коэффициент затрат энергии на перемещение, равный отношению затраченной энергии к произведению веса робота на преодоленное расстояние $CoT = E/Wd$ [2]. Регулируемыми параметрами ЗПД являются коэффициент жесткости и длина пружины либо модуль Юнга и коэффициент Пуассона гибкого элемента, ограниченные небольшим интервалом значений, при которых достижимо стабильное

галопирующее поведение. Критерием стабильности является повторяемость траектории точки контакта с полом, критерием энергоэффективности является стремление целевой функции к значению 0,4 или ниже (рекорд энергоэффективности для галопирующих роботов [2]). Оптимизация параметров была проведена методом направленного поиска с использованием имитационного моделирования.

Заключение. Разработан алгоритм структурно-параметрического синтеза механизма ноги галопирующего робота, способного решать задачу собственного перемещения при динамическом взаимодействии с подстилающей поверхностью при использовании простых регуляторов по положению и скорости, например простые для настройки ПИД-регуляторы. Вычислительная сложность этих алгоритмов значительно ниже, чем для регуляторов по импедансу или следящих регуляторов на основе полной нелинейной динамической модели робота. Представленный алгоритм позволяет синтезировать разнообразные плоские механизмы, динамическая локомоция которых основана на резонансе гибкого элемента, интегрированно в ЗПД.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kim S. et al. Design of dynamic legged robots // *Foundations and Trends in Robotics*. 2017. Vol. 5, N 2. P. 117—190.
2. Seok S. et al. Design principles for energy-efficient legged locomotion and implementation on the MIT cheetah robot // *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 2014. Vol. 20, N 3. P. 1117—1129.
3. Folkertsma G. A. Energy-based and biomimetic robotics. University of Twente, 2017.
4. Haberland M. et al. The effect of swing leg retraction on running energy efficiency // *IEEE/RSJ Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems*. 2011. P. 3957—3962.
5. Bhounsule P. et al. Design and control of Ranger: an energy-efficient, dynamic walking robot // *Adaptive Mobile Robotics*. World Scientific, 2012. P. 441—448.
6. Bledt G. et al. MIT Cheetah 3: Design and control of a robust, dynamic quadruped robot // *IEEE/RSJ Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. 2018. P. 2245—2252.
7. Semini C. et al. HyQ-Hydraulically actuated quadruped robot: Hopping leg prototype // *2nd IEEE RAS & EMBS Intern. Conf. on Biomedical Robotics and Biomechanics*. 2008. P. 593—599.
8. Weinmeister K. et al. Cheetah-cub-S: Steering of a quadruped robot using trunk motion // *IEEE Intern. Symp. on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR)*. 2015. P. 1—6.
9. Артоболовский И. И. Механизмы в современной технике. Т. I. Рычажные механизмы. М.: Наука, 1979. 608 с.
10. Duindam V., Stramigioli S. Modeling and control for efficient bipedal walking robots. Springer, 2009. Ser. vol. 53. 214 p.
11. Tedrake R. et al. Actuating a simple 3D passive dynamic walker // *IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation*. 2004. Vol. 5. P. 4656—4661.
12. McGeer T. Passive bipedal running // *Proc. of the Royal Society of London. B. Biological Sciences*. 1990. Vol. 240, N 1297. P. 107—134.
13. Hurst J. W., Chestnutt J. E. The actuator with mechanically adjustable series compliance // *IEEE Transact. on Robotics*. 2010. Vol. 26, N 4. P. 597—606.
14. Hutter M. et al. A compliant quadrupedal robot for fast, efficient, and versatile locomotion // *Adaptive Mobile Robotics — Proc. 15th Intern. Conf. on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines*. 2012. P. 483—490.
15. Borisov I. I. et al. Study on Elastic Elements Allocation for Energy-Efficient Robotic Cheetah Leg // *IEEE/RSJ Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. 2019. P. 1696—1701.
16. Борисов И. И., Монич Д. С., Колюбин С. А. Разработка метода геометрического синтеза и параметрической оптимизации механизма ноги галопирующего робота // *Науч.-техн. вестн. информационных технологий, механики и оптики*. 2019. Т. 19, № 5. С. 832—839.

<i>Сведения об авторах</i>	
Иван Игоревич Борисов	— канд. техн. наук; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: borisovii@itmo.ru
Роман Александрович Защитин	— Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; инженер; E-mail: roman.zashchitin@itmo.ru
Сергей Алексеевич Колубин	— д-р техн. наук; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: s.kolyubin@itmo.ru
Стефано Страмиджиоли	— д-р техн. наук, профессор; Университет Твенте, департамент электротехники, математики и информатики электротехники, математики и информатики; E-mail: s.stramigioli@utwente.nl

Поступила в редакцию
03.02.2020 г.

Ссылка для цитирования: Борисов И. И., Защитин Р. А., Колубин С. А., Страмиджиоли С. Разработка энергоэффективных галопирующих роботов со звеньями переменной длины // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 4. С. 345—352.

DEVELOPMENT OF ENERGY-EFFICIENT GALLOPING ROBOTS WITH VARIABLE-LENGTH LINKS

I. I. Borisov¹, R. A. Zashchitin¹, S. A. Kolyubin¹, S. Stramigioli²

¹*ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia*
E-mail: borisovii@itmo.ru

²*University of Twente, 7500AE, Enschede, Netherlands*

An algorithm for structural-parametric synthesis of leg mechanisms of galloping robots that can move in an uncertain environment with external dynamic contact interactions and the use of relatively simple position and speed controllers is presented. Dynamic locomotion of galloping robots, whose leg mechanisms mimic the musculoskeletal system of animals, is provided by a variable-length link with passive regulation. The variable-length link, which is a connection of two solid-state links by means of a spring-loaded prismatic kinematic pair, is introduced into the resonance state to ensure energy-efficient dynamic locomotion, energy recovery when colliding with the floor, and leveling of the underlying surface irregularities.

Keywords: synthesis of mechanisms, galloping robots, walking robots, energy efficiency, biomimetics

REFERENCES

1. Kim S. et al. *Foundations and Trends in Robotics*, 2017, no. 2(5), pp. 117–190.
2. Seok S. et al. *IEEE/asme transactions on mechatronics*, 2014, no. 3(20), pp. 1117–1129.
3. Folkertsma G.A. *Energy-based and biomimetic robotics*, University of Twente, 2017.
4. Haberland M. et al. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2011, pp. 3957–3962.
5. Bhounsule P. et al. *Adaptive Mobile Robotics*, World Scientific, 2012, pp. 441–448.
6. Bledt G. et al. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2018, pp. 2245–2252.
7. Semini C. et al. *2nd IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics*, 2008, pp. 593–599.
8. Weinmeister K. et al. *IEEE International Symposium on Safety, Security, And Rescue Robotics (SSRR)*, 2015, pp. 1–6.
9. Artobolevskiy I.I. *Mekhanizmy v sovremennoy tekhnike. Tom I Rychazhnyye mekhanizmy* (Mechanisms in Modern Technology. Vol. I. Linkage), Moscow, 1979, 608 p. (in Russ.)
10. Duintam V., Stramigioli S. *Modeling and Control for Efficient bipedal Walking Robots*, Springer, 2009, Ser. vol. 53, 214 p.
11. Tedrake R. et al. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2004, vol. 5, pp. 4656–4661.
12. McGeer T. *Proceedings of the Royal Society of London. B. Biological Sciences*, 1990, no. 1297(240), pp. 107–134.
13. Hurst J.W., Chestnutt J.E. *IEEE Transactions on Robotics*, 2010, no. 4(26), pp., N. P. 597—606.
14. Hutter M. et al. *Adaptive Mobile Robotics – Proc. 15th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines*, 2012, pp. 483–490.
15. Borisov I.I. et al. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2019, pp. 1696–1701.

16. Borisov I.I., Monich D.S., Kolyubin S.A. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2019, no. 5(19), pp. 832–839. (in Russ.)

Data on authors

- Ivan I. Borisov** — PhD; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics;
E-mail: borisovii@itmo.ru
- Roman A. Zashchitin** — ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; Engineer;
E-mail: roman.zashchitin@itmo.ru
- Sergey A. Kolyubin** — Dr. Sci.; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics;
E-mail: s.kolyubin@itmo.ru
- Stefano Stramigioli** — Dr. Sci., Professor; University of Twente, Department of Electrical Engineering, Mathematics and Computer Science;
E-mail: s.stramigioli@utwente.nl

For citation: Borisov I. I., Zashchitin R. A., Kolyubin S. A., Stramigioli S. Development of energy-efficient galloping robots with variable-length links. *Journal of Instrument Engineering*. 2020. Vol. 63, N 4. P. 345—352 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-4-345-352