

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЧЕТЫРЕХНОГИХ МЕХАТРОННЫХ ШАГАЮЩИХ УСТРОЙСТВ

Я.А. Вечерин

vyaroslav@student.bmstu.ru  
SPIN-код: 1006-4088

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

### Аннотация

Проведено исследование и выполнен сравнительный анализ энергоэффективности четырехногого мехатронного шагающего устройства, защищенного патентом РФ № 2642020, и лучших отечественных и зарубежных аналогов. Исследование энергоэффективности проводилось с помощью оценки трех основных компонентов энергозатрат: на обеспечение движения ног относительно корпуса, на поддержание веса мехатронного шагающего устройства и на развитие силы тяги. Расчеты показали, что применение исследуемой кинематической структуры мехатронного шагающего устройства обеспечивает большую энергоэффективность при перемещении по прямой ровной поверхности походкой «рысь» с заданными режимами движения. При этом удается уменьшить массу и стоимость мехатронного шагающего устройства.

### Ключевые слова

Мехатронное шагающее устройство, кинематическая структура, походка «рысь», энергозатраты, энергоэффективность, электрический привод, коэффициент сопротивления движению, MATLAB, аналитический расчет

Поступила в редакцию 29.05.2018  
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

**Введение.** Актуальной проблемой является продолжительность автономной работы мехатронных шагающих устройств (МШУ). Современные четырехногие МШУ с электрическим приводом способны работать на одном заряде от 90 минут (spotmini [1]) до 4 часов (ANYmal [2]) при массе устройства 30 кг. Снижение энергозатрат позволит уменьшить массу аккумуляторов и увеличить продолжительность автономной работы устройства.

Новизна работы заключается в применении существующих методик и средств моделирования к ранее неизвестному объекту исследования (ОИ), защищённого патентами [3], [4]. Выбор шасси МШУ обосновано в работе [5]. В данной работе выполнена проверка методики определения энергозатрат МШУ и сравнение результатов, полученных аналитически. Проводится сравнительный анализ энергоэффективности шагающих устройств с различными кинематическими структурами.

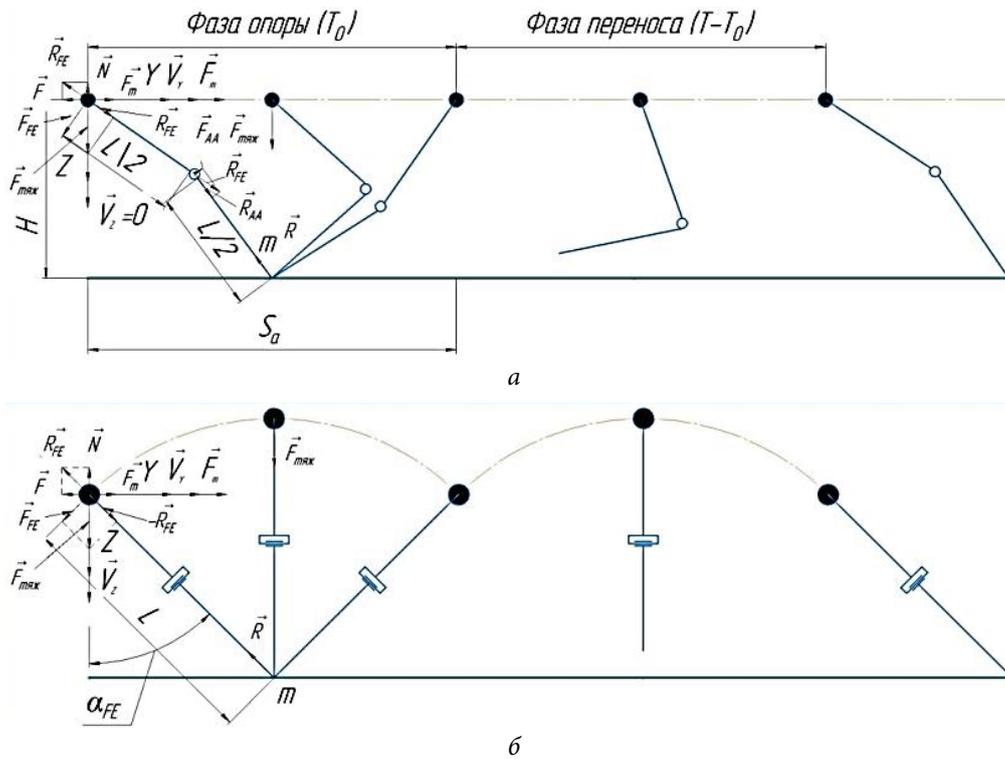
**Аналитический расчет энергозатрат мехатронного шагающего устройства.** Цель работы — исследовать энергозатраты объекта исследования и провести сравнительный анализ по энергоэффективности с отечественными и зарубежными аналогами (рис. 1).



**Рис. 1.** Мехатронные шагающие устройства:

*a* — объект исследования; *b* — аналог ANYmal; *в* — аналог SpotMini

**Параметры походки.** Все ноги совершают относительно корпуса периодическое движение, что показано на расчетной схеме (рис. 2). Сверху представлена кинематическая структура ОИ, снизу — структура аналогов.



**Рис. 2.** Расчетная схема:

*a* — аналог; *б* — ОИ

Введем следующие обозначения (взяты из [6]):

$n$  — количество ног шагающего устройства (для четырехногих МШУ  $n = 4$ );

$V$  — скорость равномерного и прямолинейного движения корпуса (для кинематической структуры объекта исследования  $V$  — горизонтальная составляющая скорости);

$H$  — клиренс, или расстояние по вертикали от опорной поверхности до середины подвеса ног;

$T_0$  — продолжительность фазы опоры;

$T_1$  — продолжительность фазы переноса;

$T$  — продолжительность одного периода движения шагающего устройства;

$S = VT_0$  — длина шага (расстояние, проходимое стопой относительно корпуса в течение фазы опоры);

$S_a = VT$  — длина шага на местности (расстояние между двумя последовательными точками постановки ног на опорную поверхность);

$L$  — длина полностью распрямленной ноги;

$M$  — масса устройства;

$g$  — ускорение силы тяжести;

$m$  — приведенная к стопе масса ноги.

Исследование энергетики движения шагающей устройства целесообразно вести в безразмерном виде [6]:

– относительная суммарная масса ног  $\mu = \frac{nm}{M}$ ;

– характеристика режима походки или относительная продолжительность фазы опоры  $\beta = \frac{T_0}{T} = 0,5$ ;

– безразмерная скорость движения  $v = \frac{V}{\sqrt{2gL}}$ ;

– безразмерная длина шага  $s = \frac{S}{L}$ ;

– безразмерная длина шага в абсолютном пространстве  $s_a = \frac{S_a}{L}$ ;

– безразмерный клиренс  $h = \frac{H}{L}$ ;

– коэффициент тяги аппарата  $\varphi = \frac{F_m}{L}$ .

#### **Энергозатраты на передвижение мехатронного шагающего устройства.**

Безразмерной величиной, характеризующей энергетику движения устройства, являются удельные энергозатраты на единицу пути, помноженной на единицу веса устройства (коэффициент сопротивления движению — КСД):  $\varepsilon = \frac{E}{mgS_a}$ .

В математической модели определения энергозатрат мехатронного шагающего устройства приняты следующие допущения: не учитываются потери на трение в суставах ног, потери энергии в приводах, а также энергозатраты на деформацию грунта. Не учитываются энергетические затраты на поддержание равновесия и на отрыв ноги от опорной поверхности.

Пусть  $W_{ij}$  — мощность в  $j$ -м шарнире  $i$ -й ноги [6]. Тогда, если тяга  $F_T = 0$ , то энергозатраты на передвижение устройства за период  $T$

$$\int_0^T \sum_{i,j} W_{ij} dt = 0.$$

Приводы в степенях подвижности ног развивают в период  $T$  как положительную, так и отрицательную мощность, то есть выделяют энергию в режиме разгона и поглощают ее в режиме торможения [6].

Предположим, что рекуперации энергии нет и энергозатраты на передвижение устройства

$$E = \int_0^T \sum_{i,j} W_{ij}^+ dt = 0,$$

где

$$W_{ij}^+ = \begin{cases} W_{ij}, & \text{если } W_{ij} > 0; \\ 0, & \text{если } W_{ij} \leq 0. \end{cases}$$

В рассматриваемом случае энергозатраты при передвижении устройства можно разделить на три составляющие:  $E_m$  — энергозатраты на поддержание веса устройства,  $E_\varphi$  — энергозатраты на создание силы тяги,  $E_l$  — энергозатраты на обеспечение колебательного движения ног относительно корпуса устройства.

Суммарные энергозатраты на передвижение аналога

$$E = E_l + E_m + E_\varphi = \frac{nm}{2} V^2 \left[ 1 + \left( \frac{k_v}{1-\beta} - 1 \right)^2 \right] + \frac{n}{n_0} MgH \ln \left( 1 + \frac{S^2}{4H^2} \right) + F_T S_a.$$

Суммарные удельные энергозатраты на передвижение аналога:

$$\varepsilon_{\text{сумм}} = \varepsilon_l + \varepsilon_m + \varepsilon_\varphi = \frac{\mu\nu}{s} \beta \left[ 1 + \left( \frac{k_v}{1-\beta} - 1 \right)^2 \right] + \frac{h}{s} \ln \left( 1 + \frac{s^2}{4h^2} \right) + \varphi.$$

Суммарные энергозатраты на передвижение объекта исследования:

$$E = E_l + E_m + E_\varphi = \frac{nm}{2} V^2 \left[ 1 + \left( \frac{k_v}{1-\beta} - 1 \right)^2 \right] + F_T S_a.$$

Суммарные удельные энергозатраты на передвижение объекта исследования:

$$\varepsilon_{\text{сумм}} = \varepsilon_l + \varepsilon_m + \varepsilon_\varphi = \frac{\mu\nu}{s} \beta \left[ 1 + \left( \frac{k_v}{1-\beta} - 1 \right)^2 \right] + \varphi.$$

**Результаты сравнения энергозатрат шагающих устройств.** Для сравнения энергозатрат шагающих устройств в режиме передвижения походкой рысь были выбраны следующие параметры:

- скорость поступательного движения корпуса при передвижении шагом  $V = 1$  м/с;
- длина ноги, примерно равная длине ноги средней собаки,  $L = 0,5$  м;
- длительности шага и фазы опоры соответственно:  $T = 1$  с,  $T_0 = 0,5$  с;
- приведенная масса ноги  $m = 1$  кг;
- масса корпуса  $M = 16$  кг;
- отношение максимальной скорости стопы в абсолютном пространстве к ее среднему значению при разгоне и торможении с постоянным ускорением:  $k_v = 2$ .

С помощью среды MATLAB численно были получены графики зависимости суммарных энергозатрат (рис. 3) и суммарных удельных энергозатрат (рис. 4) от скорости, угла отклонения от вертикали, массы и длины ноги.

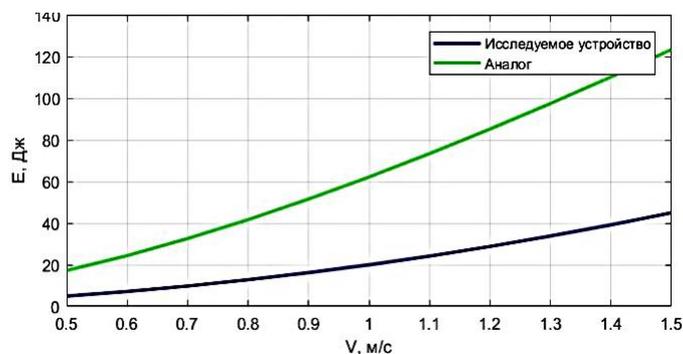


Рис. 3. Зависимость суммарных энергозатрат от скорости корпуса

На рис. 4 видно, что суммарные энергозатраты ОИ ниже, чем у аналога, и растут с увеличением скорости движения корпуса.

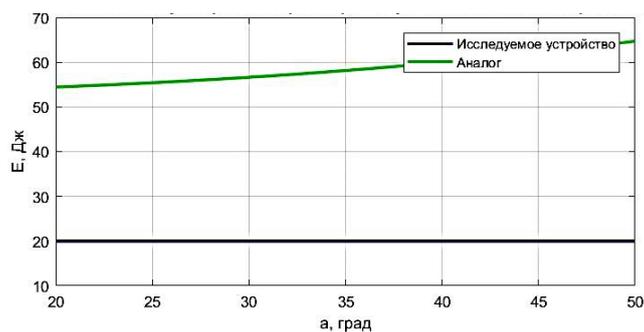


Рис. 4. Зависимость суммарных энергозатрат от угла отклонения от вертикали

На рис. 5 видно, что суммарные энергозатраты ОИ ниже, чем у аналога, и остаются постоянными на всем диапазоне изменения угла отклонения ноги от вертикали.

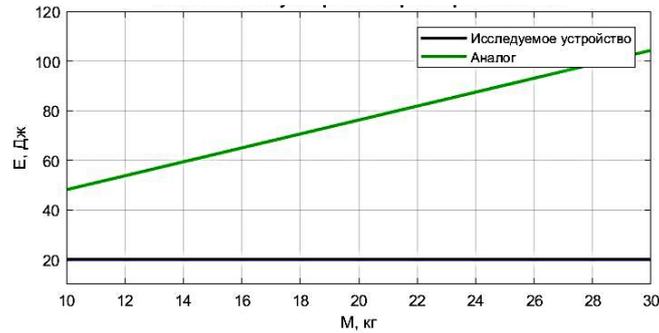


Рис. 5. Зависимость суммарных энергозатрат от массы устройства

На рис. 6 видно, что суммарные энергозатраты ОИ ниже, чем у аналога, и остаются постоянными при различной массе корпуса, что объясняется циркуляцией механической энергии и постоянной массой ног устройства.

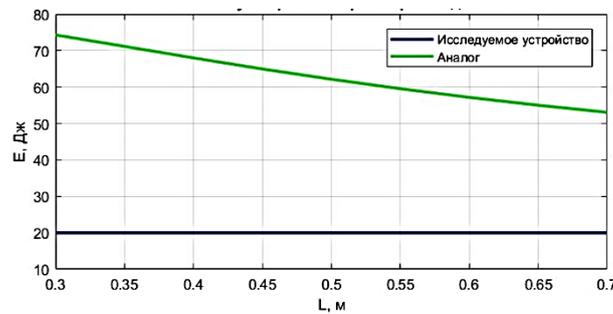


Рис. 6. Зависимость суммарных энергозатрат от длины ноги

На рис. 7 видно, что суммарные энергозатраты ОИ ниже, чем у аналога, и остаются постоянными при длине ноги от 0,3 до 0,7 м, что объясняется отсутствием энергозатрат на поддержание веса корпуса.

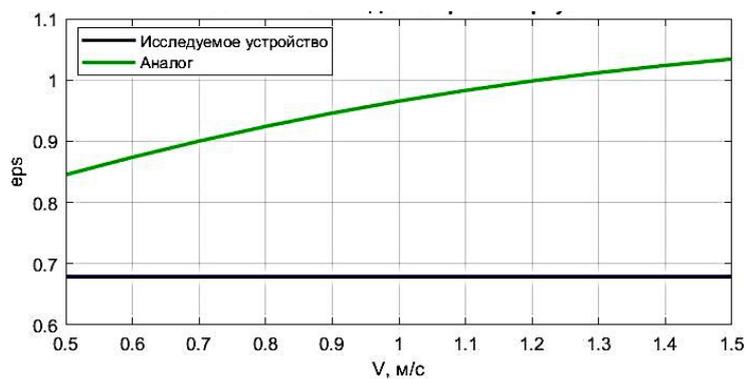


Рис. 7. Зависимость КСД от скорости корпуса

На рис. 8 видно, что КСД ОИ, ниже, чем у аналога, и остается постоянным при изменении угла сгибания/разгибания бедра.

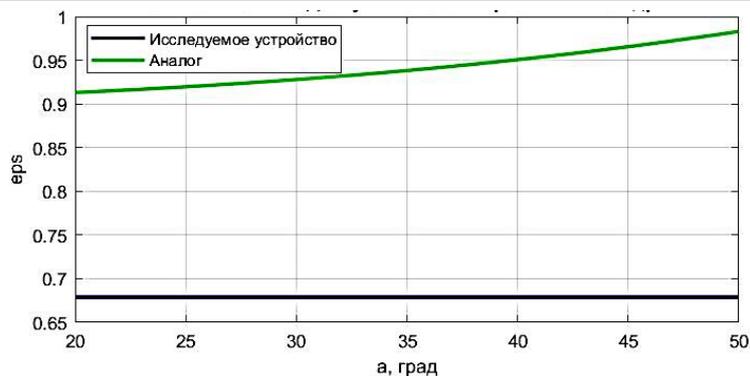


Рис. 8. Зависимость КПД от угла отклонения от вертикали

На рис. 9 видно, что КПД ОИ, ниже, чем у аналога, и остается постоянным вне зависимости от изменения угла отклонения от вертикали.

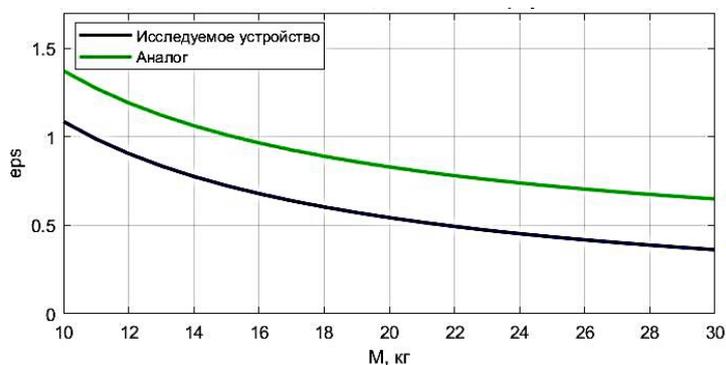


Рис. 9. Зависимость КПД от массы корпуса

На рис. 10 видно, что КПД ОИ, ниже, чем у аналога, и уменьшается с ростом массы корпуса.

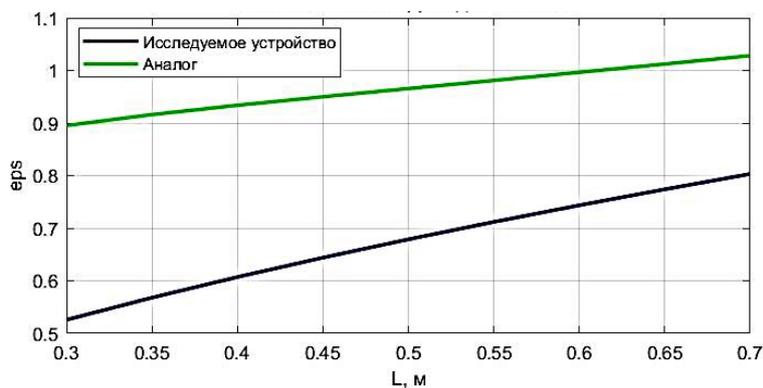
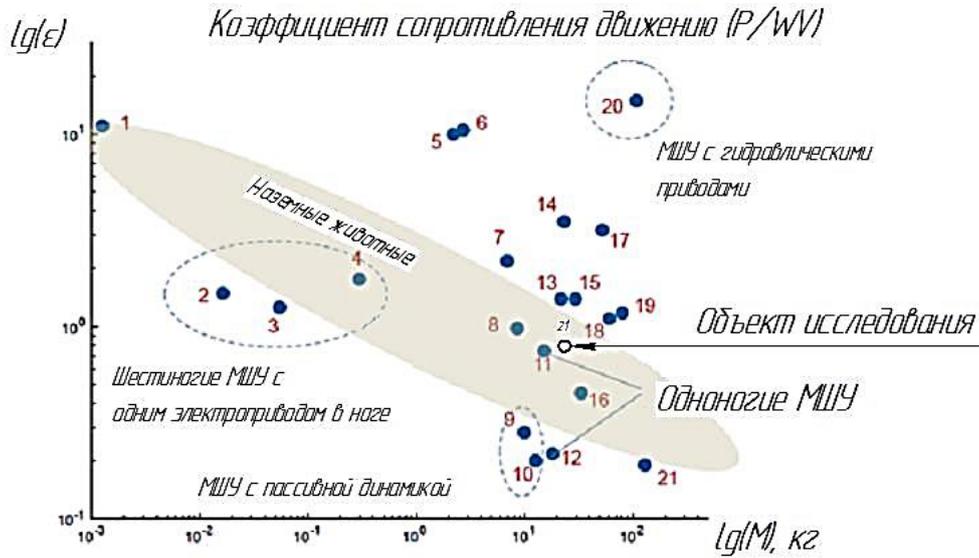


Рис. 10. Зависимость КПД от длины ноги

На рис. 11 видно, что КПД ОИ, ниже, чем у аналога, и растет с увеличением длины ноги от 0,3 до 0,7 м.



МШУ	
1. HAMR-VP (Baisch et al., 2014)	12. ARL Monopod II (Ahmadi et al., 2006)
2. X2-VelociROACH (Haldane et al., 2013)	13. Scout II (Buehler, 2002)
3. DASH (Birkmeyer et al., 2009)	14. StarETH (Hutter et al., 2013)
4. iSprawl (Kim et al., 2006)	15. Fastrunner (Cotton et al., 2012)
5. Cheetah Cub (Spröwitz, 2013)	16. MIT Cheetah (Seok et al., 2013)
6. MIT Learning Biped (Collins et al., 2005)	17. ATRIAS 2.1 (Renjewski et al., 2013)
7. Rhex hexapod (Salanli, 2001)	18. Asimo (Collins et al., 2005)
8. Rhex-biped (Neville et al., 2003)	19. KOLT (Estremera et al., 2008)
9. Cornell Ranger (Bhounsule, 2012)	20. Big Dog (Raibert et al., 2008)
10. Cornell Biped (Collins et al., 2005)	21. ETH Cargo (Gunther et al., 2015)
11. ARL Monopod I (Buehler, 2002)	22. Research Device (OW)

Рис. 11. Коэффициент сопротивления движению объекта исследования (research device) в сравнении с аналогами [8]

**Заключение.** Для сравнения шагающих устройств в англоязычной литературе [7] пользуются безразмерной величиной COT (cost of transport), которая определяется соотношением

$$COT = \frac{P}{MgV},$$

где  $P$  — затраты мощности на перемещении веса  $Mg$  со скоростью  $V$ .

Значение COT равно значению КСД. На рис. 11 показаны значения COT объекта исследования и аналогов: шестиногих: HAMR-VP, X2-VelociROACH, DASH, iSprawl, RHex hexapod; четырехногих: Cheetah Cub, MIT Cheetah [8], KOLT, BigDog [9], HAMR-VP; трехногих: Cornell biped, Cornell Ranger; двуногих: MIT learning biped, RHex-biped, Scout II, Fast Runner, ATRIAS 2.1, ASIMO; одноногих: ARL Monopod I (II), StarLETH [10], ETH Cargo.

Сравнивая энергозатраты объекта исследования и аналогов (рис. 11), можно сделать вывод, что при перемещении походкой «рысь» и с заданными режимами движения объект исследования движется энергетически более эффективно.

## Литература

- [1] Boston Dynamics: веб-сайт компании. URL: <https://www.bostondynamics.com/spot-mini> (дата обращения 15.04.2018).
- [2] ANYmal. URL: <https://www.anybotics.com/anymal> (дата обращения 15.04.2018).
- [3] Близнец П.М., Коновалов К.В., Близнец М.П., Лапшов В.С., Метасов И.Е., Артамонов Ю.П., Бошляков И.А. *Шагающее устройство*. Патент 2642020 РФ. Заявл. 24.06.2016, опублик. 23.01.2018.
- [4] Близнец П.М. *Транспортирующее устройство*. Патент 2033955 РФ. Заявл. 04.01.1991, опублик. 30.04.1995.
- [5] Близнец П.М., Рубцов В.И., Коновалов К.В., Бошляков И.А. Домашний охранный робот на базе шагающего движителя. *Символ науки*, 2017, т. 2, № 3, с. 14–20.
- [6] Лапшин В.В. *Механика и управление движением шагающих машин*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012, 199 с.
- [7] Kim S., Wensing P.W. Design of dynamic legged robots. *Foundations and Trends in Robotics*, 2017, vol. 5, no. 2, pp. 117–190.
- [8] Seok S., Wang A., Chuah M.Y., Otten D., Lang J., Kim S. Design principles for highly efficient quadrupeds and implementation on the MIT Cheetah robot. *Int. Conf. on Robotics and Automation*. IEEE, 2013, pp. 3307–3312.
- [9] Raibert M. et al. Bigdog, the rough-terrain quadruped robot. *Proc. 17th World Congress IFAC*, 2008, vol. 41, no. 2, pp. 10822–10825.
- [10] Hutter M. Design and control of legged robots with compliant actuation. Master of Science Diss. ETH Zurich, Switzerland, 196 p.

**Вечерин Ярослав Александрович** — студент кафедры «Робототехнические системы и мехатроника», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Научный руководитель** — Близнец Павел Михайлович, ведущий инженер НИИ НУК «Специальное машиностроение», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

---

**STUDY OF ENERGY EFFICIENCY OF FOUR-LEGGED MECHATRONIC WALKING DEVICES**

Ya.A. Vecherin

vyaroslav@student.bmstu.ru

SPIN-code: 1006-4088

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

**Abstract**

The article conducts a research and performs a comparative analysis of the energy efficiency of the four-legged mechatronic walking device, protected by the Russian Federation patent No. 2642020, and the best domestic and foreign counterparts. The study of energy efficiency through the evaluation of the three main components of energy costs is carried out: to ensure the movement of the legs relative to the hull, to maintain the weight of the mechatronic walking device and to develop traction. Calculations show that the application of the investigated kinematic structure of the mechatronic walking device provides greater energy efficiency when moving along a straight, flat surface with a "trot" gait with the specified driving regimes. In this case, the mass and cost of the mechatronic walking device can be reduced.

**Keywords**

*Mechatronic walking device, kinematic structure, "trot" gait, energy consumption, energy efficiency, electric drive, motion resistance coefficient, MATLAB, analytical calculation*

Received 29.05.2018

© Bauman Moscow State Technical University, 2018

**References**

- [1] Boston Dynamics: company website. Available at: <https://www.bostondynamics.com/spot-mini> (accessed 15 April 2018).
- [2] ANYmal. Available at: <https://www.anybotics.com/anymal> (accessed 15 April 2018.)
- [3] Bliznets P.M., Konovalov K.V., Bliznets M.P., Lapshov V.S., Metasov I.E., Artamonov Yu.P., Boshlyakov I.A. Shagayushchee ustroystvo [Walking device]. Patent 2642020 RF. Appl. 24.06.2016, publ. 23.01.2018.
- [4] Bliznets P.M. Transportiruyushchee ustroystvo [Transporting device]. Patent 2033955 RF. Appl. 04.01.1991, publ. 30.04.1995.
- [5] Bliznets P.M., Rubtsov V.I., Konovalov K.V., Boshlyakov I.A. Home guard robot based on walking prop. *Simvol nauki*, 2017, vol. 2, no. 3, pp. 14–20.
- [6] Lapshin V.V. Mekhanika i upravlenie dvizheniem shagayushchikh mashin [Mechanics and control on walking machines motion]. Moscow, Bauman Press, 2012, 199 p.
- [7] Kim S., Wensing P.W. Design of dynamic legged robots. *Foundations and Trends in Robotics*, 2017, vol. 5, no. 2, pp. 117–190.
- [8] Seok S., Wang A., Chuah M.Y., Otten D., Lang J., Kim S. Design principles for highly efficient quadrupeds and implementation on the MIT Cheetah robot. *Int. Conf. on Robotics and Automation*. IEEE, 2013, pp. 3307–3312.
- [9] Raibert M. et al. Bigdog, the rough-terrain quadruped robot. *Proc. 17th World Congress IFAC*, 2008, vol. 41, no. 2, pp. 10822–10825.
- [10] Hutter M. Design and control of legged robots with compliant actuation. Master of Science Diss. ETH Zurich, Switzerland, 196 p.

**Vecherin Ya.A.** — Bachelor's Degree student, Department of Robotics and Mechatronics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

**Scientific advisor** — P.M. Bliznets, Leading Engineer of the Scientific Research Institute of Mechanical Engineering, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.