

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЧЕТЫРЕХНОГОГО МЕХАТРОННОГО ШАГАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА В ПАКЕТЕ МАТЛАВ SIMULINK

Я.А. Вечерин

gonatanben@yandex.ru

SPIN-код: 1006-4088

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

Аннотация

Актуальной проблемой является определение энергоэффективности мехатронных шагающих устройств. Статья посвящена математическому моделированию динамики и сравнительному анализу энергоэффективности объекта исследования и лучших зарубежных аналогов. Объект исследования — четырехногое мехатронное шагающее устройство, защищенное патентом РФ № 2642020. Цель исследования — определить энергоэффективность объекта методом математического моделирования. В результате эксперимента определена максимальная скорость передвижения устройства базовой походкой типа «рысь». Полученные результаты показывают более высокую энергоэффективность объекта исследования по сравнению с аналогами, что делает устройство более дешевым в изготовлении и привлекательным для коммерческого использования. Подобные устройства многофункциональны в повседневной жизни и в быту. Их можно применить для переноса малогабаритных грузов при отсутствии лифтов в малоэтажных частных домах, наблюдения передвижения по территории дома и оповещения пользователя о пожаре.

Ключевые слова

Мехатронное шагающее устройство, кинематическая конструкция, математическое моделирование, параметры движения, энергоэффективность, электрический привод, механическая мощность, механическая работа

Поступила в редакцию 19.11.2018

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

Введение. Актуальность работы заключается в исследовании энергоэффективности объекта исследования с неизвестной ранее кинематической конструкцией, мировая новизна которой защищена патентами [1, 2].

Новизна исследования заключается в применении методов математического моделирования к объекту исследования (ОИ) (рис. 1). Проведено математическое моделирование динамики и определены энергозатраты мехатронного шагающего устройства (МШУ). Выполнен сравнительный анализ энергоэффективности шагающих устройств с различными кинематическими конструкциями (рис. 1) [3–5].

Описание кинематической конструкции. Достигнуто упрощение кинематической конструкции шагающих устройств без потери основных функциональных свойств (рис. 2). Объект исследования содержит только две степени свободы в каждой ноге [2, 6].

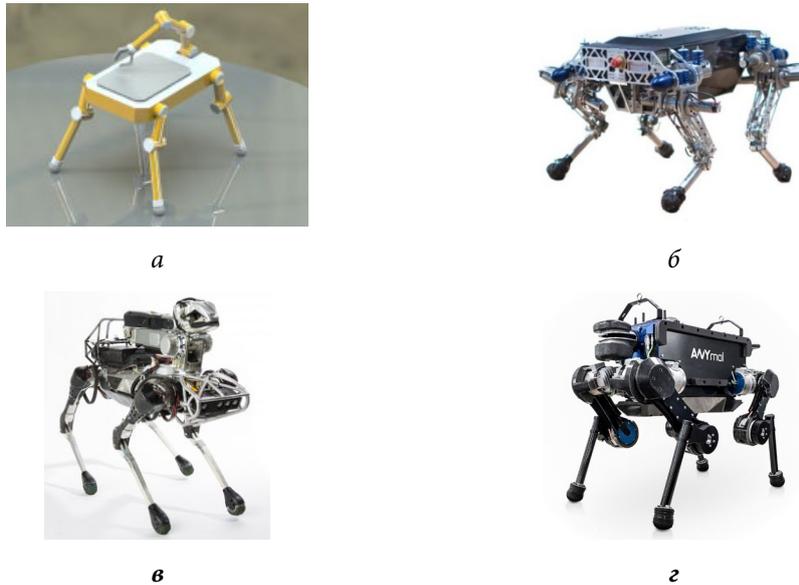
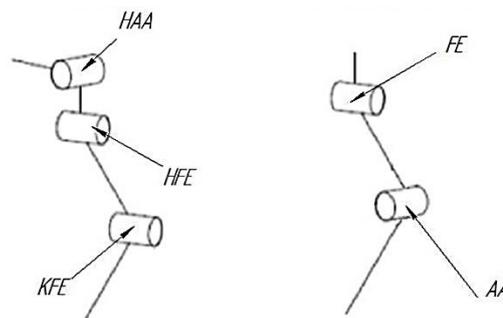


Рис. 1. Мехатронные шагающие устройства:
a — объект исследования; *b* — StarETH; *c* — Spot mini; *d* — ANYmal

Моделирование динамики МШУ. В пакете MATLAB Simulink выполнено математическое моделирование мехатронного шагающего устройства (рис. 3). Математическая модель — система абсолютно твердых тел, функцией которой является описание движения МШУ на плоскости. Система состоит из подсистем, которые функционально можно подразделить на три типа: описывающие взаимодействие ног с опорной поверхностью, движение ног относительно опорной поверхности и относительно тела.



Обозначение	Наименование
<i>H</i>	Бедро
<i>K</i>	Колено
<i>FE</i>	Сгибание/разгибание
<i>AA</i>	Приведение/отведение

Рис. 2. Количество приводов и кинематическая конструкция ноги аналогов (слева) и ОИ (справа)

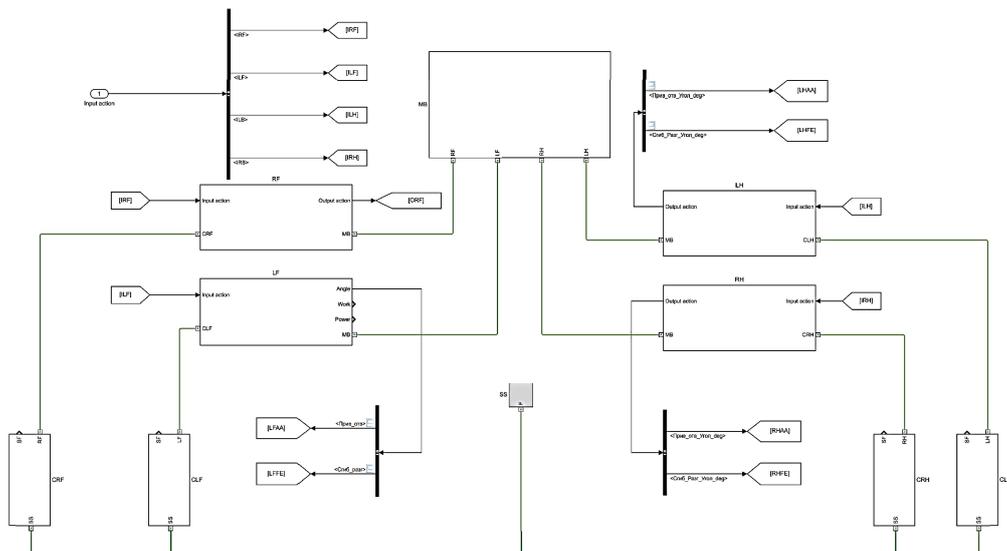


Рис. 3. Математическая модель исследуемого устройства

В процессе моделирования происходит вычисление положений относительных систем координат, связанных с твердыми телами, и визуализация их перемещения.

Подсистема ноги. Подсистема ноги (рис. 4) необходима для определения углов, потребляемой электрической и механической мощности. Она состоит из двух подсистем типов: поворота (FE и AA) и преобразования координат бедра и голени/стопы (T и SF). Подсистема преобразования координат служит для определения положения звеньев относительно абсолютной системы координат, а подсистема поворота — для поворота привода на требуемый угол.

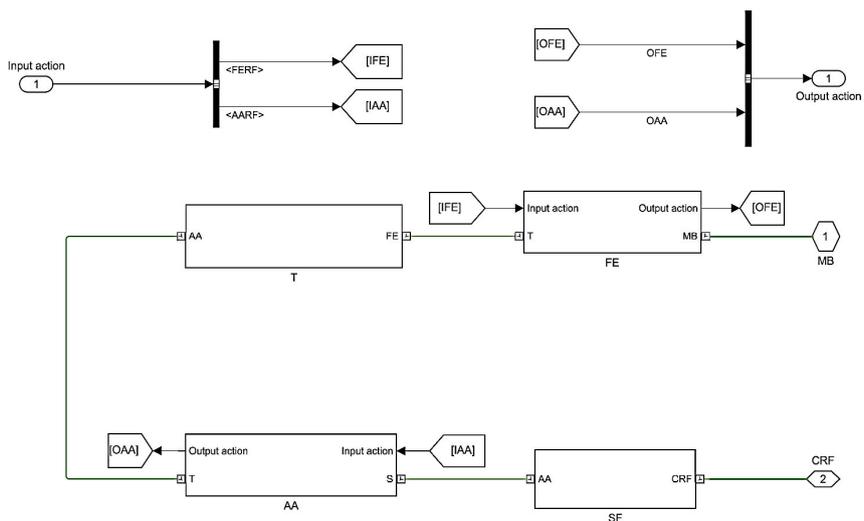


Рис. 4. Математическая модель ноги

Математическая модель привода. Привод (рис. 5) состоит из БДПТ (бесколлекторный двигатель постоянного тока) Maxon EC 90 flat 160 W, планетарного редуктора с передаточным отношением $i = 20$ и датчика положения.

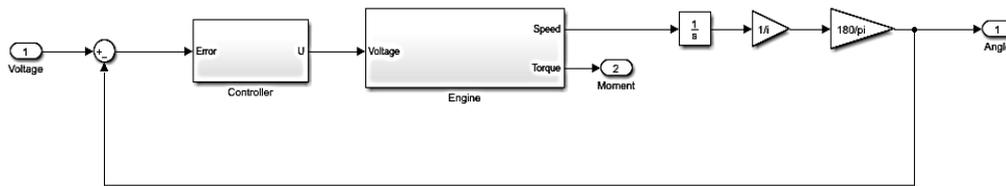


Рис. 5. Математическая модель привода

Электрическая мощность определяется по формуле

$$P = I^2 R_t,$$

где I — ток якоря, R_t — сопротивление якоря.

Характеристики двигателя Maxon EC 90 flat 160 W

Сопротивление якоря R_t , Ом	0,523
Индуктивность якоря L_t , мГн	0,554
Коэффициент момента двигателя C_m , Нм/А	0,11
Коэффициент ЭДС двигателя C_e , В/(рад/с)	0,11

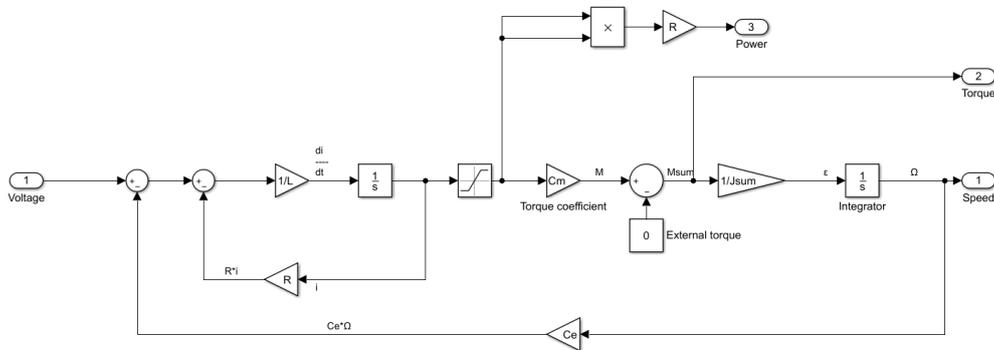


Рис. 6. Математическая модель двигателя

Математическая модель взаимодействия ног с опорной поверхностью. Для учета действия сил трения и давления ног на опорную поверхность используется блок Sphere to Plane Force библиотеки Contact Forces lib (рис. 7) со следующими параметрами контакта (рис. 14): $R_{сф} = 0,08$ мм, $L_{опоры} = 3$ мм, $W_{опоры} = 10$ мм (рис. 8).

Моделирование перемещения. Математическая модель МШУ, выполненная в пакете MATLAB Simulink, была адаптирована для целей определения параметров движения, механической мощности и работы. Экспериментально получены зависимости перечисленных параметров. Был проведен ряд экспериментов для длительности цикла ходьбы $T = 0,5; 1,0; 10$ с.

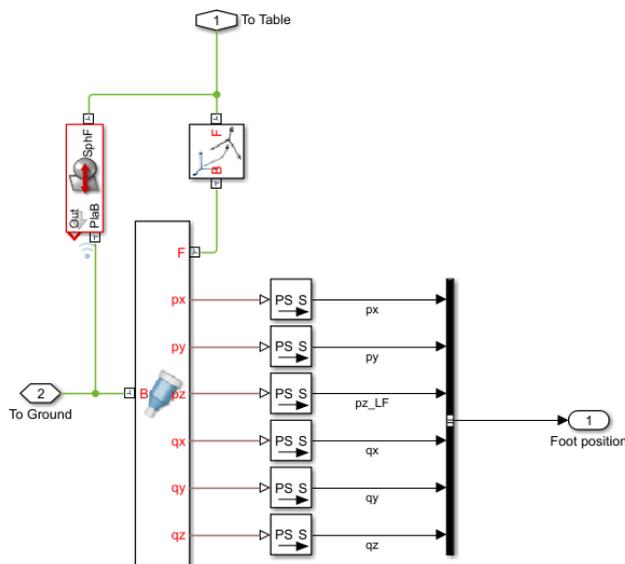


Рис. 7. Моделирование контакта ноги с опорной поверхностью

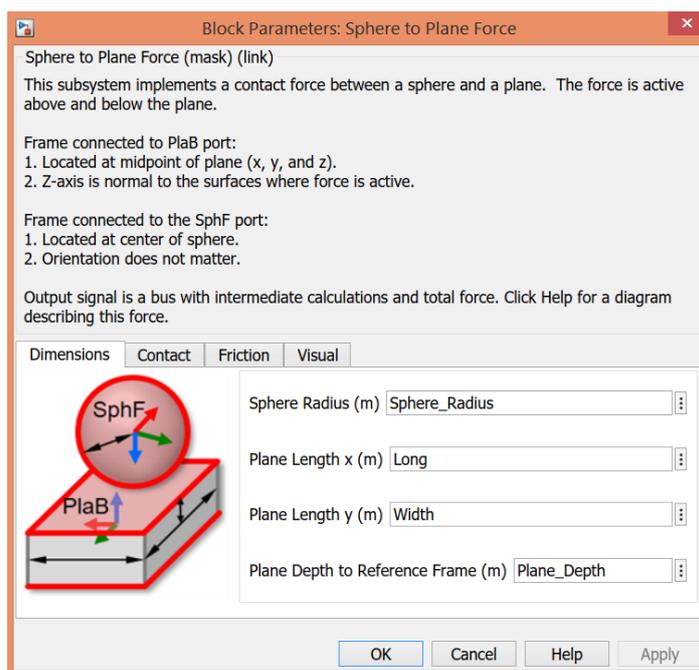


Рис. 8. Параметры контакта ноги с опорной поверхностью

Результаты моделирования. При значениях $T < 1$ с (рис. 9, 10) для сохранения поперечной устойчивости возникает необходимость стабилизировать корпус относительно опорной поверхности. Наилучший с точки зрения энергоэффективности диапазон продолжительностей циклов ходьбы T принадлежит промежутку 1...4 с (рис. 11, 12). Значения $T > 4$ с (рис. 13, 14) характеризуются большим расходом энергии на поддержание веса устройства.

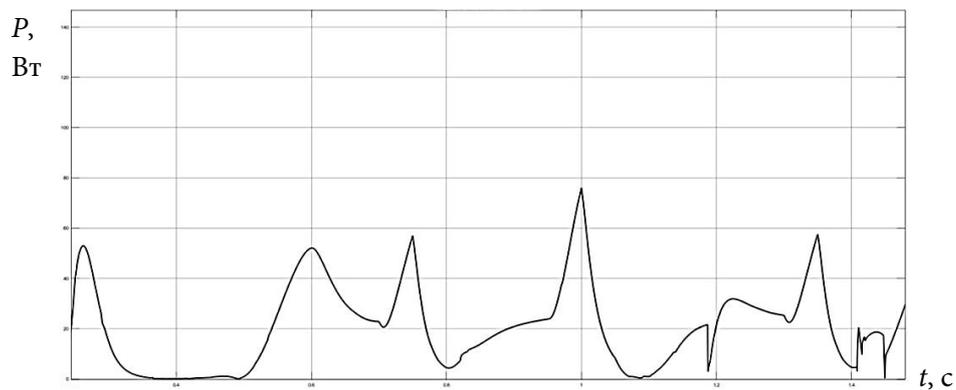


Рис. 9. Суммарная механическая мощность ($T = 0,5$ с)

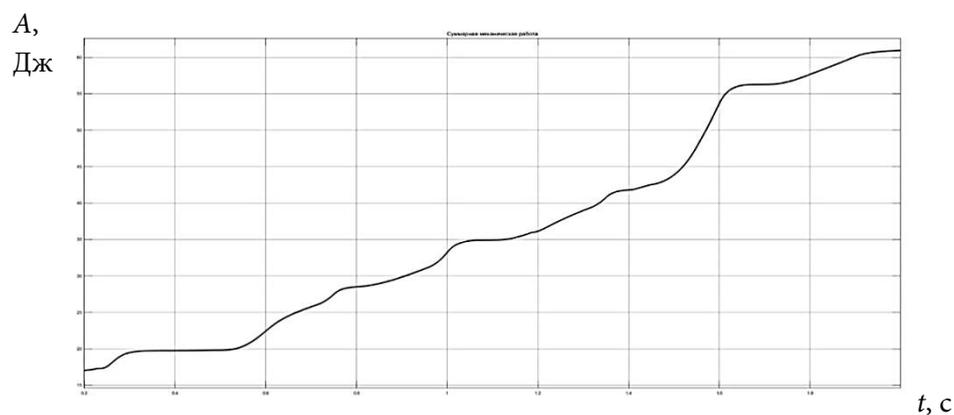


Рис. 10. Суммарная механическая работа ($T = 0,5$ с)

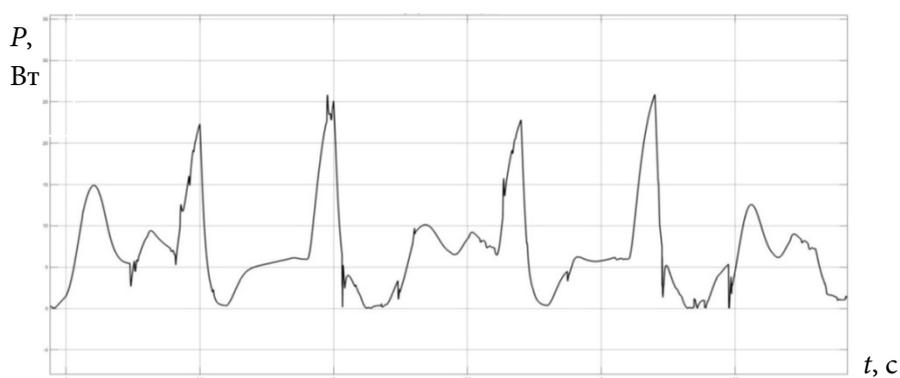


Рис. 11. Суммарная механическая мощность ($T = 1$ с)

Максимальная скорость ходьбы МШУ $v = 0,5$ м/с. Дальнейшее увеличение скорости требует стабилизации корпуса относительно опорной поверхности.

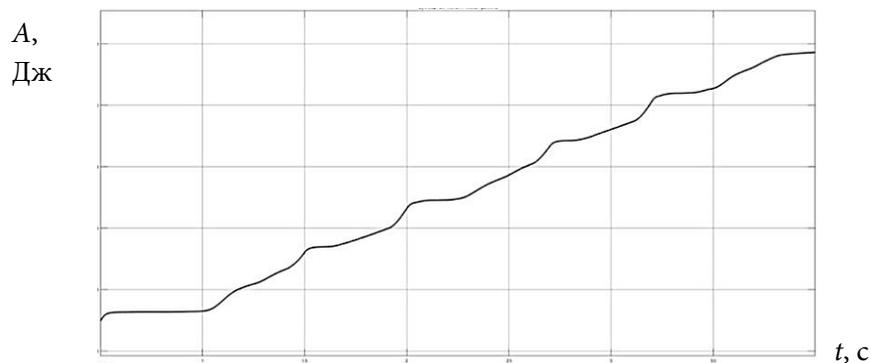


Рис. 12. Суммарная механическая работа ($T = 1$ с)

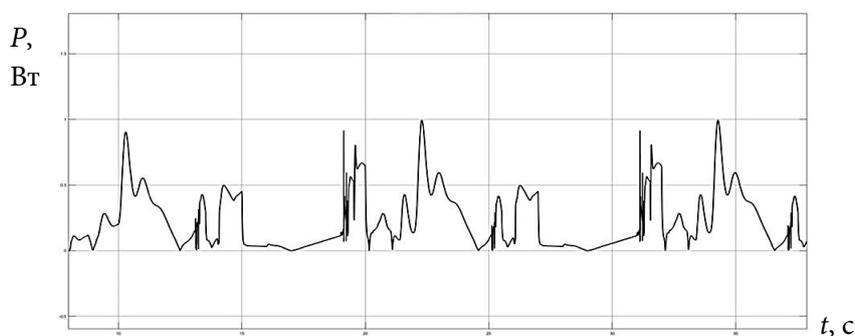


Рис. 13. Суммарная механическая мощность ($T = 10$ с)

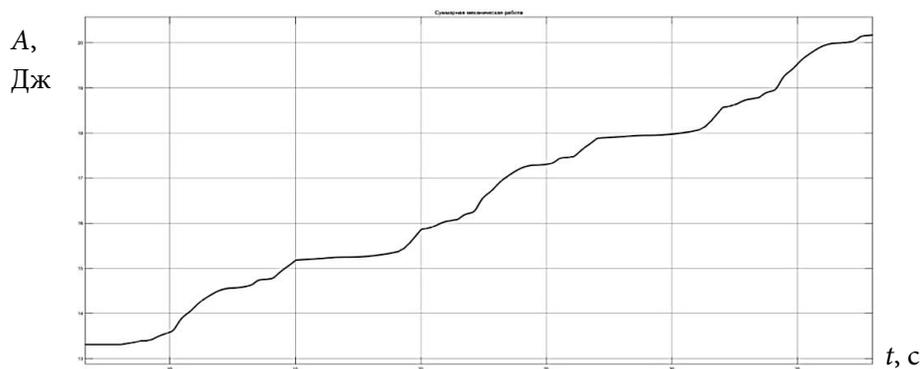


Рис. 14. Суммарная механическая работа ($T = 10$ с)

Сравнение энергозатрат, полученных путем аналитического расчета и компьютерного моделирования. Сравнение аналитических и экспериментальных результатов, полученных в различных опытах, приведено в табл. 1.

Сравнение аналитических и экспериментальных результатов

Номер опыта	Аналитический расчет	Компьютерное моделирование
1	$E = 4$ Дж ($v = 0,5$ м/с)	$E = 25$ Дж ($v = 0,4$ м/с; $t = 0,05$ с; $T = 0,5$ м/с)
2	$E = 4$ Дж ($v = 0,5$ м/с)	$E = 5$ Дж ($v = 0,2$ м/с, $T = 1$ с)
3	$E = 4$ Дж ($v = 0,5$ м/с)	$E = 2$ Дж ($v = 0,6$ м/с, $T = 1$ с)

Таким образом, энергозатраты, полученные путем компьютерного моделирования, сравнимы с энергозатратами, полученными путем аналитического расчета ($E = 5$ Дж, полученное путем компьютерного моделирования, и $E = 4$ Дж, полученное аналитически).

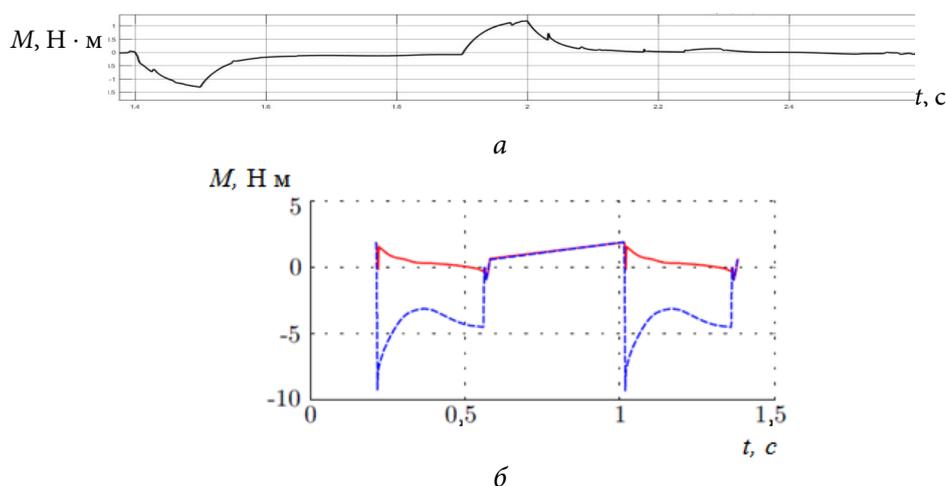


Рис. 15. График зависимости моментов сгибания/разгибания бедра от времени (синим и черным цветами показан момент, красным — сила контакта) [3]:

a — ОИ; b — StarLETH

На рис. 15 видно, что средние значения моментов равны $5 \text{ Н} \cdot \text{м}$ в фазе опоры. Сравнивая графики параметров движения ОИ (рис. 15) и аналога StarLETH при скорости $v = 0,2$ м/с для ОИ и $v = 0,7$ м/с для StarLETH, можно сделать вывод, что ОИ в 5 раз эффективнее аналога (табл. 2).

Сравнение характеристик мехатронных шагающих устройств

Характеристика	ANYmal	ОИ
Масса, кг	30	30
Потребляемая мощность, Вт	300	160
Полезная нагрузка, кг	Не более 10	Не более 10
Продолжительность автономной работы, ч	2–4	4–8
Скорость, м/с	Не более 1	Не более 1

Заключение. В результате проделанной работы выполнено сравнение энергоэффективности ОИ и аналогов. На основе аналитического расчета энергозатрат, проведенного по методике В.В. Лапшина [7, 8], получено значение коэффициента сопротивления движению (КСД).

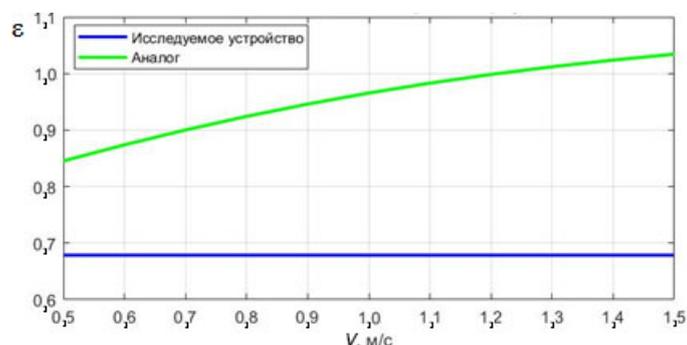


Рис. 16. График зависимости КСД от скорости движения корпуса ОИ и аналога

На рис. 16 видно, что при скорости устройств $v = 0,5$ м/с значение $КСД_{ОИ} = 0,68$ меньше значения $КСД_{аналога} = 0,85$ на 20 %. Мощность аналога ANYmal равна 300 Вт. Поскольку у ANYmal 12 приводов, каждый привод будет потреблять 25 Вт. Значение КСД ОИ на 20 % меньше, чем у аналогов, поэтому приводы также будут потреблять на 20 % меньше. Мощность одного привода составит 20 Вт. Поскольку ОИ имеет 8 приводов, суммарная потребляемая мощность составит $P = 160$ Вт.

Таким образом, можно сделать вывод о более высокой энергоэффективности ОИ по сравнению с аналогами. Данное преимущество возникает вследствие использования меньшего числа приводов и отсутствия статических моментов в колене. Кинематическая конструкция ОИ позволяет экономить энергию на малых (до $v = 0,5$ м/с) скоростях, что делает его привлекательным для домашнего применения.

Литература

- [1] 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, опубл. 23.01.2018.
- [2] Близнец П.М. *Транспортирующее устройство*. Патент 2033955 РФ. Заявл. 04.01.1991, опубл. 30.04.1995.
- [3] Hutter M. Design and control of legged robots with compliant actuation. Master of Science Diss. ETH Zurich, Switzerland, 196 р.
- [4] Spot mini. URL: <https://www.bostondynamics.com/spot-mini> (дата обращения 15.04.2018).
- [5] Hutter M., Gehring Ch., Jud D., et al. ANYmal - a highly mobile and dynamic quadrupedal robot. *IEEE/RSJ IROS*, 2016, pp. 38–44.

- [6] Близнец П.М., Рубцов В.И., Коновалов К.В., Бошляков И.А. Домашний охраный робот на базе шагающего движителя. *Символ науки*, 2017, т. 2, № 3, с. 14-20.
- [7] Лапшин В.В. *Механика и управление движением шагающих машин*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012, 199 с.
- [8] Вечерин Я.А. Исследование энергоэффективности четырёхногих мехатронных шагающих устройств. *Политехнический молодежный журнал*, 2018, № 8. URL: <http://ptsj.ru/articles/362/362.pdf>.

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

MODELING THE DYNAMICS OF THE FOUR-LEGGED MECHATRONIC WALKING DEVICE IN THE MATLAB SIMULINK

Ya.A. Vecherin

gonatanben@yandex.ru

SPIN-code: 1006-4088

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The determination of the energy efficiency of mechatronic walking devices is the actual problem nowadays. The article is devoted to mathematical modeling of the dynamics and comparative analysis of the energy efficiency of the object of study and the best foreign analogues. The object of the study is a four-legged mechatronic walking device, which is proprietary device (the Russian Federation patent No. 2642020). The purpose of the study is to determine the energy efficiency of an object using mathematical modeling. As a result of the experiment, the maximum speed of the device movement with a basic gait like "lynx" was determined. The results show the higher energy efficiency of the object of study in comparison with analogues, which makes the device cheaper for manufacturing and more attractive for commercial use. Such devices are multifunctional in everyday life. They can be used to transfer small loads in the absence of elevators in low-rise private houses, to monitor movement within the house and to alert the user about a fire.

Keywords

Mechatronic walking device, kinematic construction, mathematical modeling, motion parameters, energy efficiency, electric drive, mechanical power, mechanical work

Received 19.11.2018

© Bauman Moscow State Technical University, 2018

References

- [1] 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.
- [2] Bliznets P.M. Transportiruyushchee ustroystvo [Transporting device]. Patent 2033955 RF. Appl. 04.01.1991, publ. 30.04.1995.
- [3] Hutter M. Design and control of legged robots with compliant actuation. Master of Science Diss. ETH Zurich, Switzerland, 196 p.
- [4] Spot mini. Available at: <https://www.bostondynamics.com/spot-mini> (accessed 15 April 2018).
- [5] Hutter M. et al. ANYmal - a highly mobile and dynamic quadrupedal robot. *IEEE/RSJ IROS*, 2016, pp. 38–44.
- [6] Bliznets P.M., Rubtsov V.I., Konovalov K.V., Boshlyakov I.A. Home guard robot based on walking mover. *Simvol nauki* [Symbol of Science], 2017, vol. 2, no. 3, pp. 14–20.
- [7] Lapshin V.V. Mekhanika i upravlenie dvizheniem shagayushchikh mashin [Mechanics and control on walking machines motion]. Moscow, Bauman Press, 2012, 199 p.

- [8] Vecherin Ya.A. Study of energy efficiency of four-legged mechatronic walking devices. *Politekhnicheskij molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2018, no. 8. Available at: <http://ptsj.ru/articles/362/362.pdf>.

Vecherin Yaroslav Aleksandrovich — Magister's Degree student, Department of Robotic systems and mechatronics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.