

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Л.А. Зинченко
В.В. Макаrchук
А.Е. Маслов

lyudmillaa@mail.ru
vvmakarchuk@gmail.com
mysol93@rambler.ru

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

Аннотация

Распределенные микроэлектромеханические системы широко применяют в различных практических приложениях, в частности, в Интернете вещей. Рассмотрено математическое и программное обеспечение для исследования характеристик альтернативных источников энергии, которые могут быть использованы при автономной работе распределенных микроэлектромеханических систем. Приведены данные о применении конечно-элементных моделей для исследованных возможных вариантов реализации устройства. Минимальные частоты собственных колебаний во всех исследуемых случаях оказались более 40 кГц, что позволило сделать вывод о потенциальной применимости исследованных источников альтернативной энергии в различных классах электронной аппаратуры. Для всех изученных вариантов применения время отклика не превышало 13 мкс. Таким образом, исследованные источники альтернативной энергии могут быть применены в приложениях, обеспечивающих работу Интернета вещей

Ключевые слова

Интеллектуальные среды, распределенные микроэлектромеханические системы, пьезоэлектрический эффект, метод конечных элементов

Поступила в редакцию 16.02.2016
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант 16-07-00676 а)

Введение. Интернет вещей¹ — одна из перспективных областей применения распределенных микроэлектромеханических систем (МЭМС) [1, 2]. Переход к широкому использованию интеллектуальных сред позволит значительно повысить качество жизни людей и безопасность жизнедеятельности.

Концепция Интернета вещей была предложена в 1999 г. как дальнейшее развитие инфокоммуникационных технологий за счет организации взаимодействия различных физических объектов, сенсоров и устройств приема и передачи данных. Ожидается, что к 2020 г. 26 млрд устройств будут подключены к Интернету вещей.

¹ Интернет вещей — единая сеть физических объектов, способных изменять параметры внешней среды или свои, собирать информацию и передавать ее на другие устройства.

Достижения в области искусственного и вычислительного интеллекта [3] позволили перейти к практическому использованию распределенных интеллектуальных систем и сред (Ambient Intelligence, интеллектуальное окружающее пространство). Для развертывания таких систем необходима разработка сенсоров и актюаторов [1, 2, 4–7], выполняющих функции связи реального мира и виртуального пространства. Они могут быть реализованы на базе различных физических принципов, например, с использованием пьезоэлектрического эффекта [5], эффекта Холла или комбинации нескольких эффектов [6].

Вне зависимости от используемого физического эффекта, чувствительные и исполнительные элементы интеллектуальных сред требуют энергоснабжения. В связи с этим представляется перспективной разработка источников энергии, позволяющих обеспечить автономное энергоснабжение интеллектуальных сред. К таким источникам предъявляют повышенные требования к массогабаритным характеристикам и надежности.

В настоящей статье рассмотрено математическое и программное обеспечение для исследования параметров пьезоэлектрических элементов, предназначенных для накопления электрической энергии в результате механических воздействий, возникающих при ходьбе человека [7].

Для решения поставленной задачи был использован пакет ANSYS [4], позволяющий моделировать работу пьезоэлектрических устройств.

Краткие сведения о пакете ANSYS. Моделирование работы чувствительных элементов (датчиков) может быть выполнено как на основе численных методов, так и методов компьютерной алгебры. Однако в связи со сложностью построения аналитических моделей устройств, использующих анизотропные материалы, при исследовании параметров пьезоэлектрических элементов были применены численные методы, одним из которых является метод конечных элементов.

По сравнению с методом конечных разностей и методом граничных элементов метод конечных элементов позволяет достичь компромисса между точностью и временем моделирования [4, 10].

Программный комплекс ANSYS является одной из наиболее известных CAE-систем, предназначенной для решения дифференциальных уравнений в частных производных методом конечных элементов. Графический интерфейс указанного программного комплекса показан на рис. 1. Графическое окно в центре позволяет визуализировать все действия, проводимые с моделью пьезоэлектрического устройства. Для удобства слева от него расположены инструменты для управления процессом моделирования.

На горизонтальной панели вверху экрана расположены элементы управления проектом и базой данных модели, а также командная строка, которая позволяет работать с системой в пакетном режиме с помощью языка APDL (ANSYS Parametric Design Language). Все доступные команды можно просмотреть командой «Справка», которая также находится на горизонтальной панели.

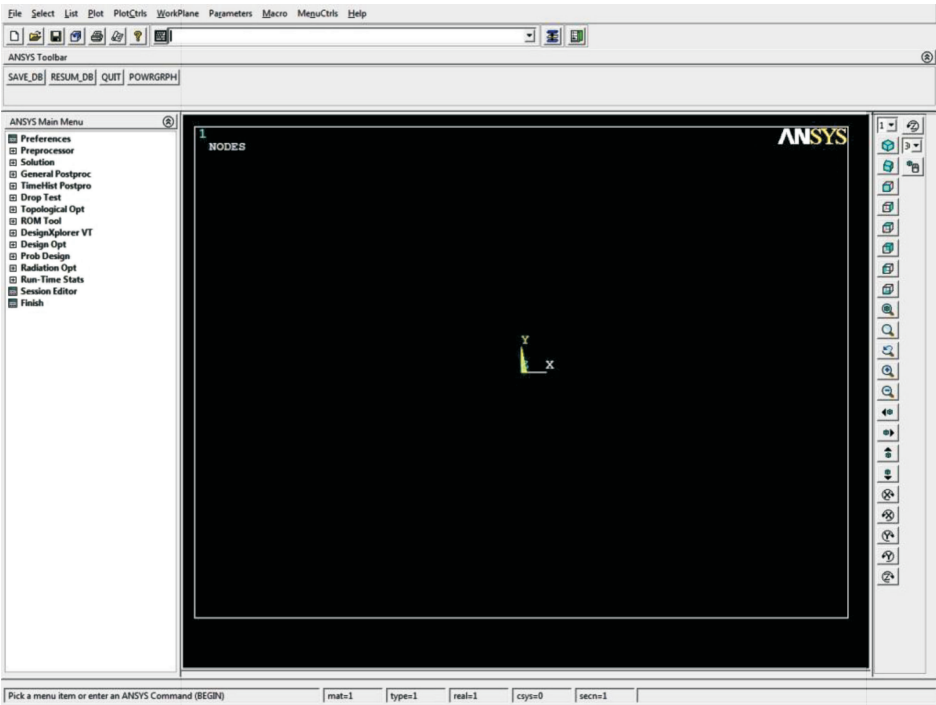


Рис. 1. Графический интерфейс программного комплекса ANSYS

Для определения частот и форм собственных колебаний выполняют модальный анализ.

Альтернативный источник энергии на пьезоэлектрическом эффекте. Самый простейший актюатор (сенсор), который может быть использован для решения поставленной задачи, представляет собой пластину (рис. 2), выполненную из пьезоэлектрического материала ЦТС.

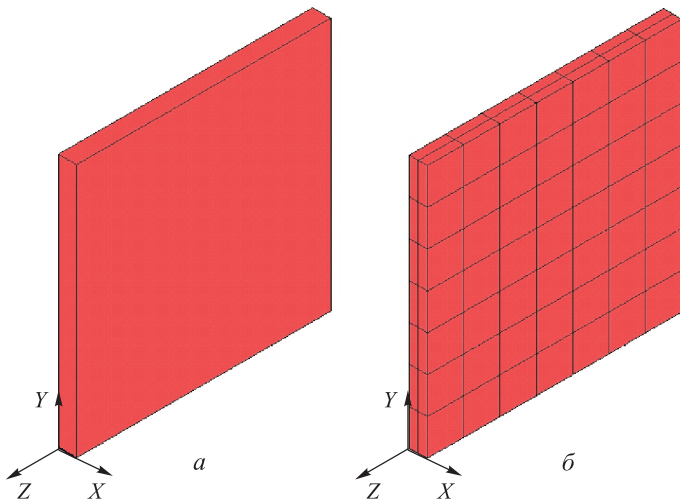


Рис. 2. 3D-модель пьезоэлектрического устройства (а) и его конечно-элементная модель (б)

В настоящее время компания Face International Corporation (США) выпускает линейку различных генераторов серии ТН, основанных на пьезоэлектрическом эффекте [11]. В данной работе приведены результаты исследований характеристик альтернативных источников энергии с использованием генераторов ТН6R и ТН7R, массогабаритные характеристики которых представлены ниже.

В связи с тем, что перечисленные пьезоэлектрические генераторы имеют ограничения на максимально допустимое напряжение, были исследованы следующие три варианта их использования:

- 1) один генератор типа ТН6R;
- 2) 20 генераторов типа ТН7R, соединенных последовательно;
- 3) 40 генераторов типа ТН7R, соединенных последовательно.

Массогабаритные характеристики пьезоэлектрических генераторов фирмы Face International Corporation серии ТН

	Габаритные размеры пьезоэлемента, мм	Масса, г
ТН6R	50 × 50 × 0,38	16,3
ТН7R	70 × 70 × 0,25	18,0

Массогабаритные характеристики исследуемых вариантов использования пьезоэлектрических устройств приведены в таблице. Анализ этих характеристик позволяет сделать следующий вывод: для всех исследуемых случаев массогабаритные характеристики пьезоэлектрических генераторов существенно лучше аналогичных характеристик других альтернативных источников энергии.

Массогабаритные характеристики исследуемых вариантов использования пьезоэлектрических устройств

Номер варианта	Длина L , мм	Ширина D , мм	Высота H , мм	Масса, г
1	0,38	50	50	16,3
2	5,0	70	70	360
3	10	70	70	720

Моделирование характеристик генераторов проведено при номинальной температуре 27 °С с использованием блочного метода Ланцоша [3], который имеет более быструю сходимость по сравнению с другими методами в программном комплексе ANSYS.

Для моделирования в программном комплексе ANSYS была реализована программа на языке APDL [3]. Систематизированные данные о числе конечных элементов и числе узлов конечно-элементных моделей для каждого рассматри-

ваемого варианта при их анализе в программном комплексе ANSYS представлены ниже. Наибольшее число конечных элементов потребовалось для создания конечно-элементной модели пьезоэлектрического генератора с минимальными размерами.

Число узлов и число элементов конечно-элементной модели пьезоэлектрического генератора

Номер варианта	1	2	3
Число:			
узлов	2720	656	245
элементов	450	98	32

Минимальные частоты собственных колебаний исследуемых генераторов при номинальных габаритных размерах показаны на рис. 3, формы собственных

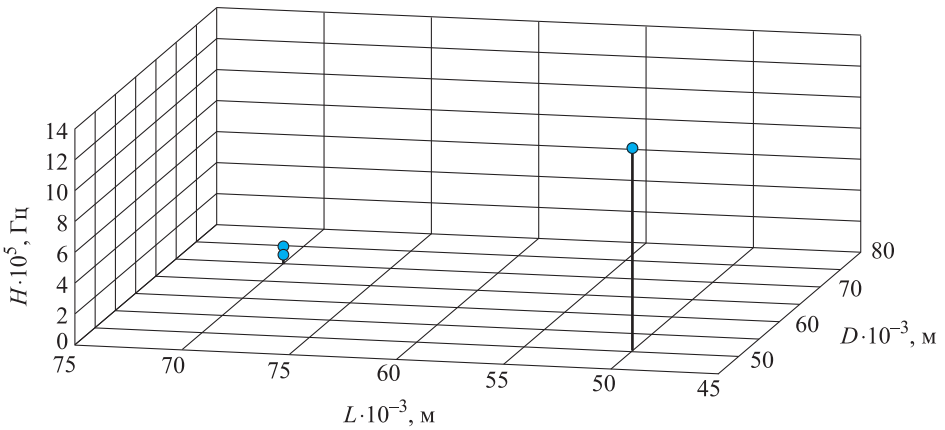


Рис. 3. Минимальные частоты собственных колебаний пьезоэлектрических генераторов при номинальных габаритных размерах

колебаний для различных значений минимальных частот собственных колебаний — на рис. 4.

Время отклика пьезогенератора t_n обратно пропорционально минимальной частоте собственных колебаний f_{min} [5]:

$$t_n = \frac{2}{\pi f_{min}}$$

Расчетные значения времени отклика для трех рассматриваемых вариантов приведены в ниже:

Номер варианта	1	2	3
Время отклика, 10^{-6} с.....	0,49	6,48	13,0

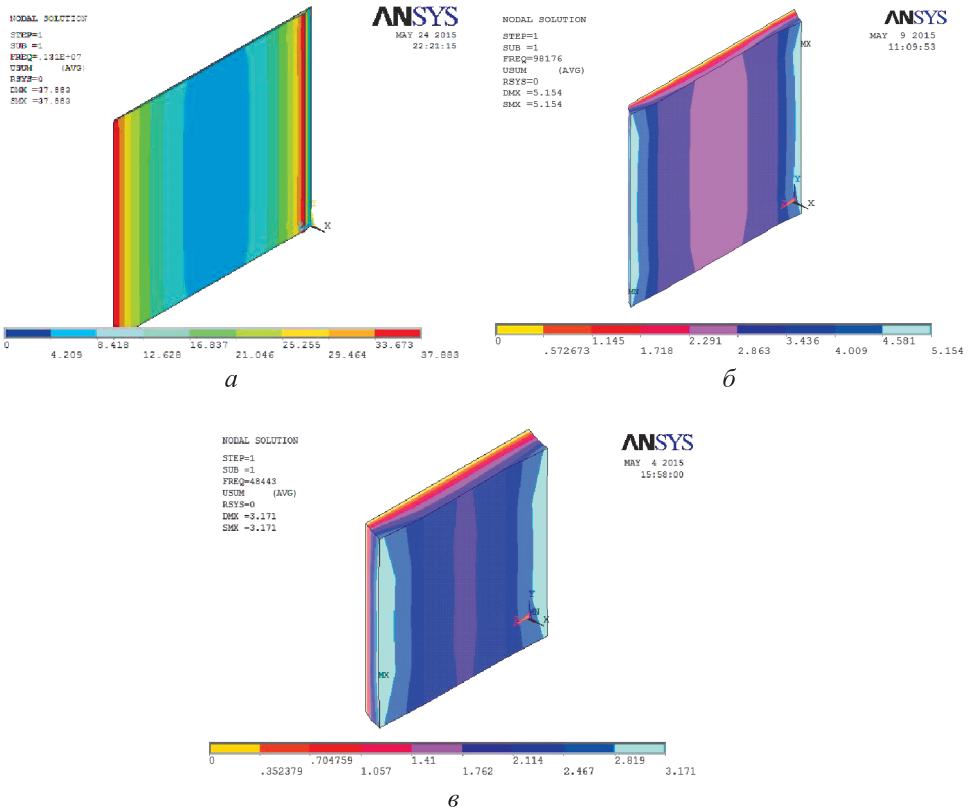


Рис. 4. Формы собственных колебаний при значениях минимальной частоты собственных колебаний $f = 1,31$ МГц для варианта 1 (а), $f = 98,176$ кГц для варианта 2 (б), $f = 48,443$ кГц для варианта 3 (в) (цветовая шкала показывает значение деформации участков пластины из пьезоэлектрического материала, м)

Выводы. Для исследования параметров альтернативных источников энергии для интеллектуальных устройств может быть использован метод конечных элементов, реализованный в программном комплексе ANSYS. Применение этого комплекса позволяет определить значения минимальных частот собственных колебаний пьезоэлектрических генераторов, что в свою очередь позволяет оценить время отклика пьезогенераторов к внешним механическим воздействиям.

Следует отметить, что минимальные частоты собственных колебаний во всех исследуемых случаях оказались более 40 кГц. Это позволило сделать вывод о потенциальной применимости исследованных альтернативных источников энергии в различной электронной аппаратуре (наземной, морской и космической).

Для всех вариантов использования генераторов время отклика не превышало 13 мкс. Это свидетельствует о том, что исследованные альтернативные источники энергии могут быть применены в приложениях, обеспечивающих работу Интернета вещей.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Shakhnov V., Zinchenko L., Kosolapov I.* Simulation of distributed MOEMS for smart environments // Proc. of 2014 10th International Conference on Advanced Semiconductor Devices & Microsystems (ASDAM 2014). Smolenice, October 20–22, 2014, Slovak University of Technology in Bratislava. IEEE. 2014. P. 201–204.
2. *Shakhnov V., Makarchuk V., Zinchenko L., Verstov V.* Heterogeneous knowledge representation for VLSI Systems and MEMS Design // Proc. of 2013 IEEE 4th International Conference on Cognitive Infocommunications (CogInfoCom 2013). Budapest, December 2–5, 2013, MTA SZTAKI, ВМЕ ТМІТ, Obuda University, IEEE. 2014. P. 189–194.
3. *Бионические информационные системы и их практические применения / В.В. Курейчик, В.М. Курейчик, Л.А. Зинченко, С.Н. Сорокин, В.Г. Редько, Ю.Р. Цой, Л.Г. Комарцева, Н.Г. Ярушкина, А.Е. Янковская.* М.: Физматлит, 2011. 288 с.
4. *Зинченко Л.А.* САПР наносистем. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 224 с.
5. *Негоденко О.Н., Липко С.И., Зинченко Л.А., Прокопенко В.Г.* Схемотехника экологических датчиков с пьезоэлектрическими резонаторами // Изв. СКНЦ ВШ. Сер. Техн. науки. 1992. № 3–4. С. 43–45.
6. *Зинченко Л.А., Косолапов И.А., Шахнов В.А.* Особенности многомасштабного моделирования микрооптоэлектромеханических систем с учетом технологических погрешностей // Датчики и системы. 2013. № 9. С. 29–37.
7. *Olympio R., Patel A., Wickenheiser A.* Theoretical and experimental analysis of frequency up-conversion energy harvesters under human-generated vibrations // Proc. of SPIE 9057, Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems 2014. San-Diego, March 10–13, 2014, Intelligent Materials Forum, Jet Propulsion Laboratory, National Science Foundation. SPIE. 2014. 1072 p.
8. *Зинченко Л.А., Негоденко О.Н., Липко С.И., Прокопенко В.Г.* Машинное моделирование транзисторных аналогов негатронов // Радиотехника. 1992. № 10–11. С. 87–90.
9. *Негоденко О.Н., Зинченко Л.А., Татаринцев С.А.* Применение компьютерной алгебры в задачах исследования собственных шумов транзисторных аналогов негатронов // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2000. № 1. С. 90–97.
10. *Шахнов В.А., Зинченко Л.А.* Особенности математического моделирования в задачах проектирования наносистем // Информационные технологии и вычислительные системы. 2009. № 4. С. 84–92.
11. *Face international corporation.* URL: <http://www.thunderandlightningpiezos.com> (дата обращения: 08.02.2016).

Зинченко Людмила Анатольевна — д-р техн. наук, профессор кафедры «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

Макарчук Владимир Васильевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

Маслов Артем Евгеньевич — студент кафедры «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Зинченко Л.А., Макаrchук В.В., Маслов А.Е. Исследование характеристик источников энергии для интеллектуальных устройств // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2016. № 5. С. 51–60. DOI: 10.18698/0236-3933-2016-5-51-60

INVESTIGATION OF THE CHARACTERISTICS OF ENERGY SOURCES FOR INTELLIGENT ENVIRONMENTS

L.A. Zinchenko
V.V. Makarchuk
A.E. Maslov

lyudmillaa@mail.ru
vvmakarchuk@gmail.com
mysol93@rambler.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

Distributed micro-electro-mechanical systems (MEMS) are used in different applications, including the Internet of Things. The paper presents the mathematical models and software that can be applied to research the characteristics of alternative energy sources. The sources can be used in auto-nomous distributed MEMS. We show that the use of the finite element method and ANSYS software allows researching the piezoelectric effect elements properties. We present the data on the applied finite element models for the investigated devices. The minimum modal frequency for all cases was above 40 kHz. Therefore, the sources are suitable for different applications. For all cases delay time was below 13 ms. As a result, we conclude that these alternative energy sources can be used in the Internet of things applications

Keywords

Intelligent environments, distributed micro-electro-mechanical systems (MEMS), piezoelectric effect, finite element method

REFERENCES

[1] Shakhnov V., Zinchenko L., Kosolapov I. Simulation of distributed MOEMS for smart environments. *Proc. of 2014 10th International Conference on Advanced Semiconductor Devices & Microsystems (ASDAM 2014)*. Smolenice, October 20–22, 2014, Slovak University of Technology in Bratislava. IEEE, 2014, pp. 201–204.

- [2] Shakhnov V., Makarchuk V., Zinchenko L., Verstov V. Heterogeneous knowledge representation for VLSI Systems and MEMS Design. *Proc. of 2013 IEEE 4th International Conference on Cognitive Infocommunications (CogInfoCom 2013)*. Budapest, December 2–5, 2013, MTA SZTAKI, BME TMIT, Obuda University. IEEE, 2014, pp. 189–194.
- [3] Kureychik V.V., Kureychik V.M., Zinchenko L.A., Sorokin S.N., Red'ko V.G., Tsoy Yu.R., Komartseva L.G., Yarushkina N.G., Yankovskaya A.E. Bionicheskie informatsionnye sistemy i ikh prakticheskie primeneniya [Bionic information systems and their practical application]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2011. 288 p.
- [4] Zinchenko L.A. SAPR nanosistem [CAD of nanosystems]. Moscow, MGTU im. N.E. Bauman Publ., 2011. 224 p.
- [5] Negodenko O.N., Lipko S.I., Zinchenko L.A., Prokopenko V.G. Circuitry of environmental sensors with piezoelectric resonators. *Izv. SKNC VSh. Ser. Tehn. Nauki* [University News. North-Caucasian Region. Technical Sciences Series], 1992, no. 3–4, pp. 43–45 (in Russ.).
- [6] Zinchenko L.A., Kosolapov I.A., Shakhnov V.A. Features of multiscale modeling of micro-opto-electromechanical systems for DFM. *Datchiki i sistemy* [Sensors & Systems], 2013, no. 9, pp. 29–37 (in Russ.).
- [7] Olympio R., Patel A., Wickenheiser A. Theoretical and experimental analysis of frequency up-conversion energy harvesters under human-generated vibrations. *Proc. of SPIE 9057, Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems 2014*. San-Diego, March 10–13, 2014. Intelligent Materials Forum, Jet Propulsion Laboratory, National Science Foundation, SPIE, 2014. 1072 p.
- [8] Zinchenko L.A., Negodenko O.N., Lipko S.I., Prokopenko V.G. Computer modeling negatron transistor analogues. *Radiotekhnika* [Radioengineering], 1992, no. 10–11, pp. 87–90 (in Russ.).
- [9] Negodenko O.N., Zinchenko L.A., Tatarintsev S.A. Application of computer algebra to the negatron transistor analogue inherent noise research tasks. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy Rossii. Radioelektronika* [Proceedings of the Russian Universities: Radioelectronics], 2000, no. 1, pp. 90–97 (in Russ.).
- [10] Shakhnov V.A., Zinchenko L.A. Features of mathematical modeling at the solution of problems of design of nanosystems. *Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy* [Information Technologies and Computing Systems], 2009, no. 4, pp. 84–92 (in Russ.).
- [11] Face international corporation. Available at: <http://www.thunderandlightningpiezos.com> (accessed 08.02.2016).

Zinchenko L.A. — Dr. Sci. (Eng.), Professor of Design and Technology of Electronic Equipment Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

Makarchuk V.V. — Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Professor of Design and Technology of Electronic Equipment Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

Maslov A.E. — student of Design and Technology of Electronic Equipment Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Zinchenko L.A., Makarchuk V.V., Maslov A.E. Investigation of the Characteristics of Energy Sources for Intelligent Environments. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2016, no. 5, pp. 51–60. DOI: 10.18698/0236-3933-2016-5-51-60