

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004:621.355(045)

DOI: 10.22213/2410-9304-2022-3-24-33

### Моделирование и анализ работы системы накопления пьезоэлектрической энергии при помощи программной среды Matlab/Simulink

Ф. М. Аль-Руфайи, аспирант, Институт ядерной энергии и промышленности  
Севастопольского государственного университета, Севастополь, Россия

Б. А. Якимович, доктор технических наук, профессор, Институт ядерной энергии и промышленности  
Севастопольского государственного университета, Севастополь, Россия

В. В. Кувшинов, кандидат технических наук, Институт ядерной энергии и промышленности  
Севастопольского государственного университета, Севастополь, Россия

А. А. Аль-Саиди, аспирант, Национальный исследовательский университет (МЭИ), Москва, Россия

Д. Ф. Бордан, аспирант, Институт ядерной энергии и промышленности  
Севастопольского государственного университета, Севастополь, Россия

*В последнее время исследователи усилили интерес к получению электрической энергии от преобразования энергии вибрации, и причина этого связана с необходимостью подключения специального электронного оборудования к источнику питания, такого как система дистанционного зондирования, что может снизить затраты на техническое обслуживание и замену батарей, необходимых этим системам в определенные периоды времени. Высокая плотность энергии и хорошая вибрационная характеристика пьезоэлектрических материалов расширили область их применения в приложениях, требующих низкой мощности. Сбор энергии от пьезоэлементов – это технология, которая преобразует свободно доступную энергию окружающей среды в электрическую. Сбор энергии вибрации является предпочтительным, поскольку в окружающей среде свободно доступны колебания разной амплитуды и частоты. Накопители энергии колебаний пьезоэлектрического типа широко используются из-за их простоты в эксплуатации и совместимости с технологией изготовления малых электромеханических систем. В этом исследовании программное обеспечение Matlab/Simulink использовалось для моделирования и анализа работы пьезоэлектрической системы. С помощью программы обеспечения можно разработать модель пьезоэлектрической системы. Результаты моделирования показали возможность использования этих систем для выработки необходимой энергии в маломощных установках. Особенно важно, что эти пьезоэлектрические технологии возможно использовать для обеспечения электрической энергией автономных индивидуальных потребителей в удаленных районах Российской Федерации. Это возможно потому, что эти технологии подходят для использования при зарядке аккумуляторных батарей, что особенно важно для индивидуальных хозяйств и частных жилых домов в различных районах нашей страны.*

**Ключевые слова:** matlab/Simulink, вибрация, пьезоэлемент, сбор энергии, моделирование.

#### Введение

За последнее десятилетие с развитием беспроводных датчиков и сетей узлов связи исследователи сосредоточили большое внимание на сборе энергии из окружающей среды, такой как солнечная энергия, ветровой поток, температурный градиент и энергия механической вибрации, в качестве замены батареи [1]. Среди них энергия вибрации с высокой плотностью мощности широко распространена в промышленном производстве и в повседневной жизни, например при ходьбе человека и вращении двигателя. Кроме того, энергия вибрации от крупногабаритной машины составляет до  $\sim 800$  мкВт/см<sup>3</sup>, а мощность до 1 Вт может быть по-

лучена за счет движения ноги при ходьбе [2], что представляет большой интерес в области сбора энергии.

В настоящее время для сбора энергии вибрации в окружающей среде существует три типа устройств преобразования энергии, такие как электромагнитные, электростатические и пьезоэлектрические устройства. Основным механизмом сбора энергии электромагнитных колебаний является электромагнитная индукция закона Фарадея. Под действием внешней вибрации относительное движение между индукционной катушкой и вибрацией магнитов, вызванной изменением магнитных потоков, приводит к образованию наведенного напря-

жения [3]. Однако сбор энергии электромагнитных колебаний за счет большей выходной мощности и отказа от дополнительного источника питания трудно совместить с современной технологией промышленного производства с более высоким выходным напряжением из-за развивающейся тенденции к миниатюризации устройств [4]. Из-за электростатических и электромагнитных колебаний для сбора энергии требуется дополнительная электроэнергия, что ограничивает разработку и применение устройств, поэтому системы сбора пьезоэлектрической энергии (Piezoelectric Energy Harvesting Systems, PEHS) становятся все более значимыми и привлекают большое внимание ученых и специалистов [5–7].

Целью работы является разработка модели сбора электрической энергии при вибрации в пьезоэлектрической системе с использованием программного обеспечения MATLAB/Simulink.

### Основы и характеристики пьезоэлектрического сбора энергии

В последнее время активно развивается пленочная технология изготовления пьезоэлементов (ПЭ). Их толщина составляет около 5...100 мкм. Такие пьезопреобразователи осуществляют свою работу в течение длительного времени, вырабатывая при этом небольшое количество электрической энергии, которая воспроизводится за один цикл. Система накопления и хранения энергии таких генерирующих устройств приведена на рис. 1 [8].

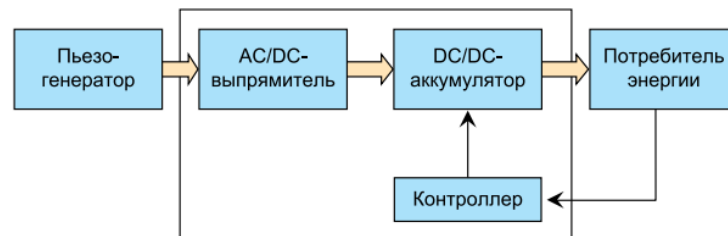


Рис. 1. Блок-схема генерирующего устройства

Fig. 1. Block diagram of the generating device

При использовании пьезобиморфов можно получить очень длинный прибор небольшой толщины. В качестве таких материалов могут быть использованы:

PZT – керамика (цирконата-титаната свинца ЦТС или PZT);

PVDF – полимер (поливинилиденфторид или ПВДФ/PVDF).

Такие устройства позволяют утилизировать энергию вибрации бытовой техники, получая значения выходной мощности до 250 мкВт [9].

На рис. 2 представлена архитектура автономной микросистемы, которая преобразует и

транспортирует энергию генератора малой мощности [10, 11].

Генератор пьезоэлектрической энергии состоит из двух основных частей [12]:

- механический модуль – вырабатывает электрическую энергию;

- электрический модуль – содержит электрическую цепь, которая преобразует и выпрямляет генерируемое напряжение.

Следовательно, эффективность накопителя энергии зависит не только от пьезоэлектрического преобразователя, но и от его интеграции в электрическую цепь.



Рис. 2. Архитектура автономной микросистемы

Fig. 2. Architecture of an autonomous microsystem

В пьезоэлектрических системах сбора энергии выделяются три фазы (рис. 3) [13]:

- преобразование механической энергии в механическую деформацию (упругость): связано с механической прочностью пьезоэлектрического устройства для сбора энергии при больших нагрузках и согласованием механического сопротивления;

- преобразование механической энергии в электрическую: включает коэффициент электромеханической связи конструкции пьезоэлектрического устройства сбора энергии и пьезоэлектрические коэффициенты;

- преобразование электрической энергии: включает согласование электрического импеданса.

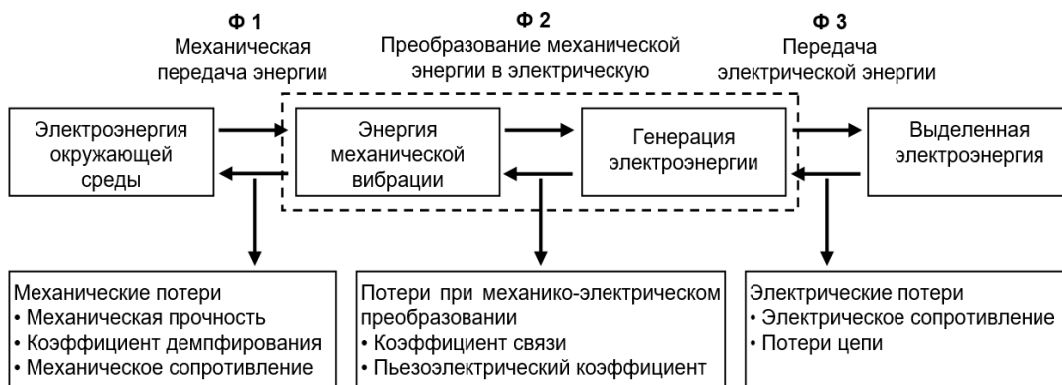


Рис. 3. 3 фазы сбора энергии вибрации

Fig. 3. 3 phase vibration energy harvesting

**Анализ и обработка существующих схем сбора энергии на основе пьезопреобразователей энергии**

На основании проведенного обзора существующих схем сбор энергии, в основе которых

находятся пьезоэлектрические устройства, можно заключить, что существуют несколько основных видов энергии, преобразующихся в электрическую. Классификация этих видов энергии приведена на рис. 4 [14].



Рис. 4. Классификация видов утилизируемой энергии и ее источники

Fig. 4. The classification types of utilized energy and its sources

Как видно из представленной на рис. 4 классификации, механическую энергию для работы пьезоэлектрических элементов представляется возможным забирать практически от любых технических устройств, природных явлений, человека, веществ, транспорта. При этом следует учитывать, что эти устройства должны воспринимать различные виды кинетической энергии. К ним относятся:

- поперечные колебания; продольные колебания; ударные воздействия различной направленности; поступательное движение;

- выделения внутренней энергии веществ в процессе химических реакций или изменения их агрегатного состояния.

Для преобразования механической (кинетической) энергии в электрическую и ее дальнейшая передача, утилизация или накопление про-

изводится с использованием специальных электрических схем.

Самая простая схема сбора пьезоэлектрической энергии, которая позволяет преобразовать механическую энергию в электрическую, представлена на рис. 5. В ней используется пьезоэлектрический излучатель звука.

В этой схеме на пьезоэлемент производится воздействие энергии от вибраций. Вследствие подобного воздействия пьезопреобразователь осуществляет выработку переменного напряжения, которым можно, например, зарядить конденсатор. Однако для этого требуется выпрямление напря-

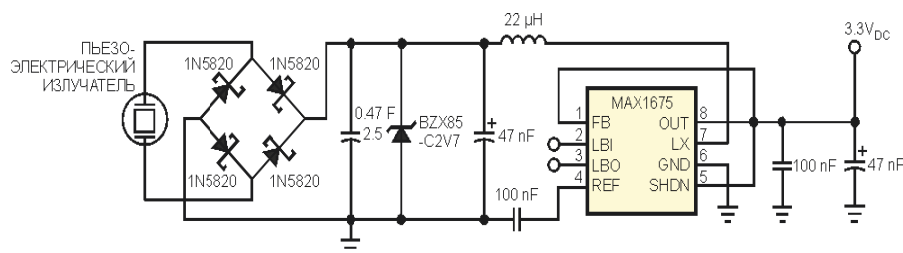


Рис. 5. Простая схема сбора энергии от вибраций с пьезоэлектрическим излучателем звука

Fig. 5. A simple circuit for harvesting energy from vibrations with a piezoelectric sound emitter

Весьма распространенным подключением пьезоэлектрического преобразователя является схема с обратной связью (см. рис. 6) [15]. Схемы с обратной связью используются, как правило, в контрольно-измерительных приборах и технике. Обратная связь дает возможность изменять технические характеристики САУ (системы автоматического управления). К таким характеристикам относятся входное и выходное сопротивление, постоянная время, динамические характеристики.

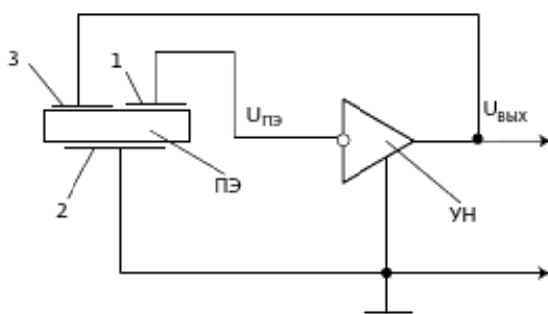


Рис. 6. Схема подключения пьезоэлектрического преобразователя с обратной связью

Fig. 6. The connection diagram of a piezoelectric transducer with feedback

Таким образом, основным назначением обратной связи является улучшение параметров измерительных устройств. Это объясняется следующим. Особенностью выходной величины

данного требования выполняется посредством включения в схему диодного моста, в котором используются диоды Шоттки. Для обеспечения высокой надежности и эффективности схемы необходимо выбирать диоды, имеющие низкое прямое напряжение и небольшие токи утечки.

Подобная схема имеет недостатки, которые заключаются в небольшом количестве вырабатываемой электроэнергии в течение достаточно продолжительного времени. В связи с этим схема требует использования особой подсистемы, предназначенной для накопления энергии на ионисторе.

пьезодатчиков является зависимость величины электрического заряда или выходного напряжения не только от интенсивности или амплитуды механического воздействия, но и от следующих параметров:

- приложенной силы;
- давления;
- ускорения;
- амплитуды колебаний.

Для снижения этих воздействий применяется обратная связь. Для обратного пьезоэффекта используется отрицательная обратная связь, передаваемая по вспомогательному каналу.

Схема, представленная на рис. 5, является замкнутой статической следящей системой. Она включает один пьезоэлемент (ПЭ), а также согласующий усилитель напряжения (УН). К поверхности ПЭ присоединены три электрода 1, 2, 3. При этом электрод 1 подсоединен к входу согласующего усилителя напряжения. Электрод 2 подключен к общему проводнику схемы. Электрод 3 подсоединен к выходу согласующего УН.

#### Энергии вибрации и методы ее сбора

С помощью пьезоэлектрических систем может происходить преобразование механической энергии в электрическую, и можно сказать, что это эффективный тип преобразования энергии из одной формы в другую.

Концепция сбора энергии вибрации (Vibration Energy Harvesting, VEH) заключается в преобра-

зовании вибраций в электрическую энергию с учетом двухэтапного преобразования: во-первых, вибрации преобразуются в относительное движение (comparative motion) между двумя элементами с использованием механического преобразователя, такого как система «масса – пружина». Затем относительное движение преобразуется в электричество с использованием механических преобразователей в электрические, таких как пьезоэлектрические материалы или переменный конденсатор [16].

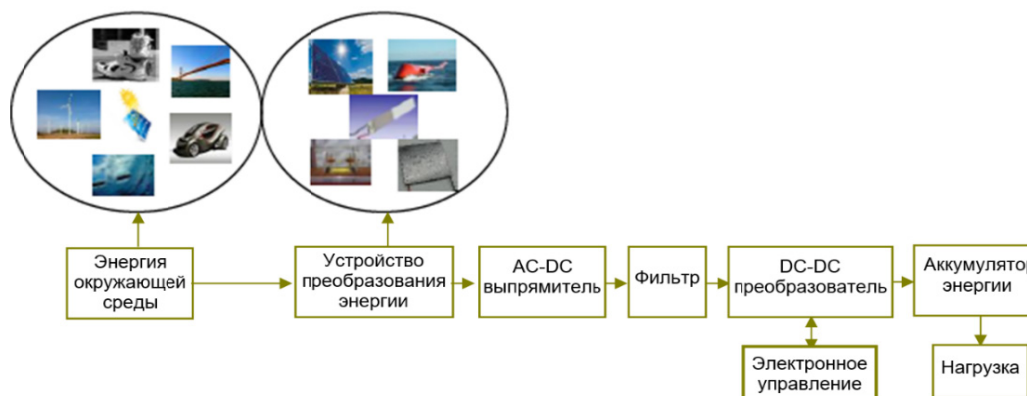


Рис. 7. Блок-схема системы VEH

Fig. 7. Block diagram of the VEH system

В целом собиратели энергии на основе пьезоэлектрических устройств зависят от трех основных механизмов: пьезоэлектрических устройств, силового электронного интерфейса и накопителя электроэнергии. Основная задача PEHS на основе вибрации заключается в повышении мощности сбора энергии. Обычно это достигается за счет разработки материалов, которые имеют более высокий потенциал электрического преобразования, и новых топологий, которые могут более эффективно использовать энергию. Выходные данные PEHS на основе вибрации также могут быть улучшены за счет использования схемы электронного преобразователя мощности. Помимо эффективной конструкции каскада обработки мощности, необходимо очень тщательно разрабатывать схему управления электронным преобразователем, поскольку схема преобразователя может эффективно улучшить энергетические характеристики всей системы. Поскольку PEHS на основе вибрации является методом, основанным на низкой мощности, минимизация потерь является одной из основных задач при разработке полностью автономной системы сбора энергии.

Можно использовать следующие уравнения для представления электрических и силовых характеристик пьезоэлектрика [19]:

$$S = s^E T + dE, \quad (1)$$

где  $S$  – тензор деформации;  $T$  – тензор напряжений;  $E$  – вектор электрического поля;  $s^E$  – матрица упругой податливости при воздействии постоянного электрического поля.

$$D = dT + \epsilon^T E, \quad (2)$$

где  $D$  – вектор электрического смещения;  $d$  – матрица пьезоэлектрической постоянной;  $\epsilon^T$  – диэлектрическая проницаемость, измеренная при постоянном напряжении.

Уравнение Гельмгольца используется для определения резонансной частоты ( $f_o$ ) пьезоэлектрических диафрагм [18, 19]:

$$f_o = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{4a^2}{d^2 h(t + ka)}}, \quad (3)$$

где  $f_o$  – резонансная частота [Гц];  $d$  – диаметр опоры;  $t$  – толщина опоры;  $c$  – скорость волны энергии;  $a$  – радиус диафрагмы;  $k$  – постоянная материала.

#### Моделирование пьезоэлемента в Matlab/Simulink

Matlab/Simulink – это подходящий и эффективный программный инструмент для моделирования и анализа моделей в инженерных исследо-

ваниях и в реальных условиях. matlab/Simulink также предоставляет графическую программную среду для системного анализа и моделирования [20].

В проведенном моделировании система состоит из механической части и электрической, где пьезоэлемент соединен с механической частью, которая стимулируется системой «пружины – массы – демпфера», создающей механическую вибрацию, как показано на рис. 8. Моделирование механической части было в Matlab/Simulink, в котором жесткость пружины 10 [Н] и коэффициент демпфирования

0,01 [Н/(м/с)] с входными синусоидальными волнами, и эта комбинация генерирует колебания на пьезоэлемент.

Электрический выход пьезоэлемента воспринимается через датчик и подается на электрическую схему сопряжения, состоящую из мостового выпрямителя, конденсатора и нагрузки. Входные параметры источников вибрации, такие как перемещение, коэффициент демпфирования, скорость, время и приложенная сила, модель позволяет легко исследовать их изменение, преобразовать безразмерный входной сигнал в физический с помощью преобразователя S-PS в Simulink.

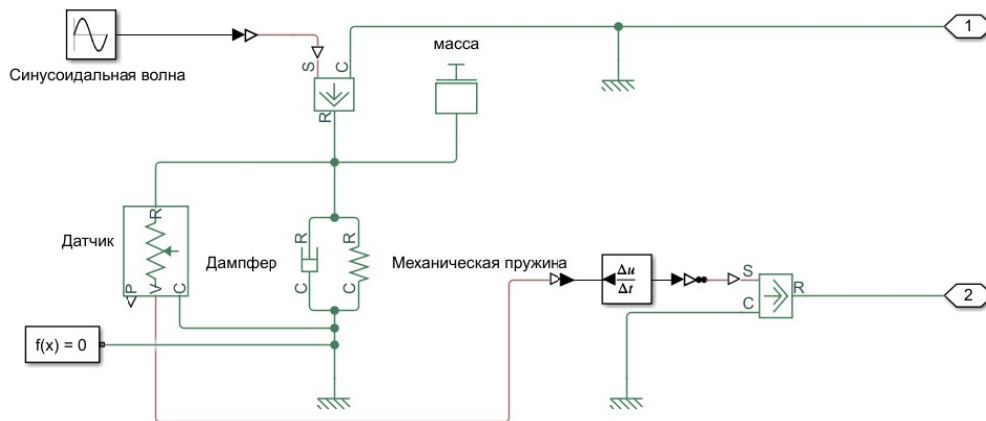


Рис. 8. Механическая часть (система возбуждения вибрации)

Fig. 8. Mechanical part (Vibration excitation system)

На рис. 9 показана модель пьезоэлектрической системы, которая снабжена вводом синусоидальной силы смещения, вызванной пружиной и демпфером. Из-за этой силы создаются вибрации на пьезоэлементе, в соответствии с пьезоэлектрическим эффектом будет генери-

роваться электрическое напряжение. Это напряжение является синусоидальным напряжением переменного тока и затем преобразуется в постоянный ток с помощью мостового выпрямителя. Через него подключен 10 кΩ электрическое сопротивление с конденсатором.

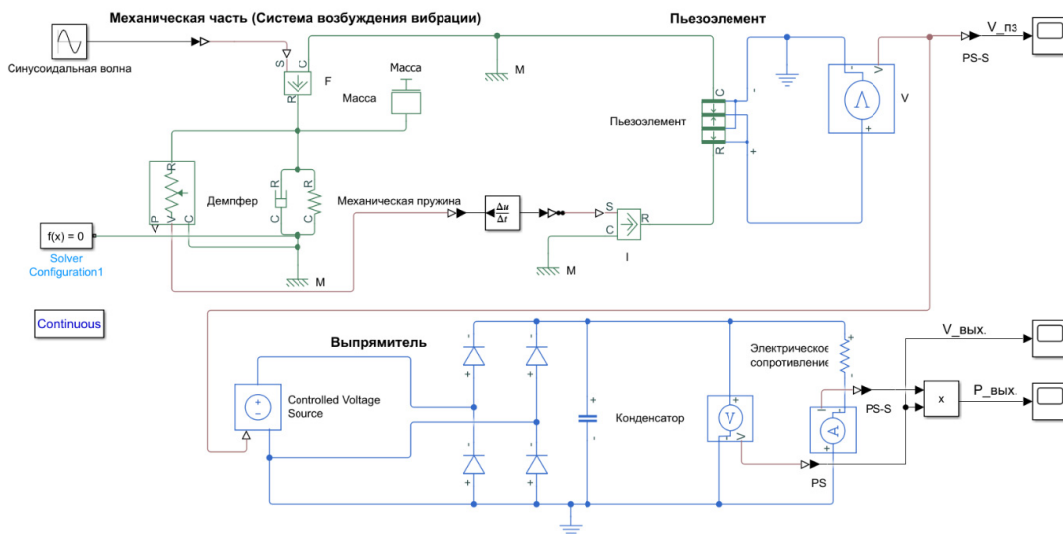


Рис. 9. Модель пьезоэлектрика в Matlab/Simulink

Fig. 9. Piezoelectric model in Matlab/Simulink

В таблице показаны свойства используемого пьезоэлемента и входные параметры.

### Характеристики пьезоэлемента и параметры

#### Piezoelectric element characteristics and parameters

Параметр	Показатель
Площадь [мм <sup>2</sup> ]	100
Толщина пьезослоя [мм]	0,3
Количество слоев	40
Постоянная пьезоэлектрического заряда [м/В]	$110 \cdot 10^{-12}$
Диэлектрическая постоянная [нФ/м]	1200
Эластичная комплаентность [м <sup>2</sup> /Н]	$13,5 \cdot 10^{-12}$

### Результаты и обсуждение

На рис. 10 показано электрическое напряжение, генерируемое пьезоэлементом, и в результате синусоидальной силы, поступающей от механической части, генерируется напряжение, которое представляет собой синусоидальное напряжение переменного тока.

На рис. 11 показано количество напряжения, генерируемого системой сбора энергии вибрации, которая генерирует высокое постоянное напряжение, подходящее для использования во многих приложениях.

На рис. 12 показана максимальная энергия, вырабатываемая системой сбора энергии.

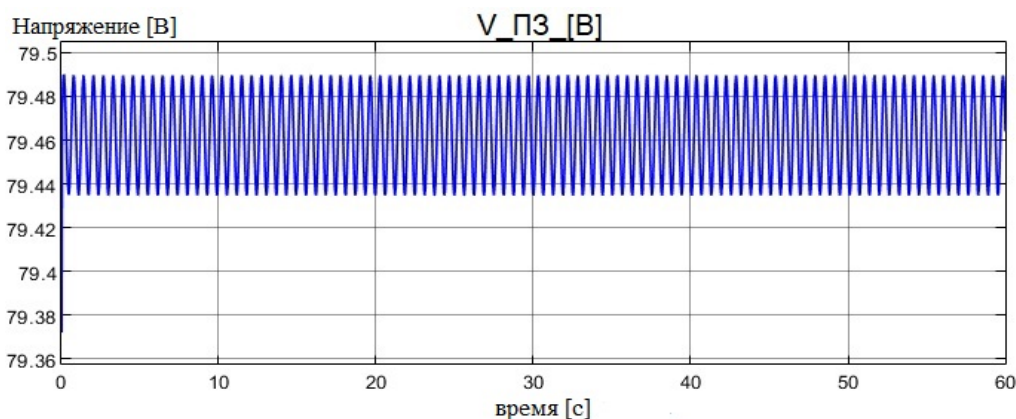


Рис. 10. Выходное переменное напряжение от пьезоэлемента

Fig. 10. AC Output voltage from piezoelectric element

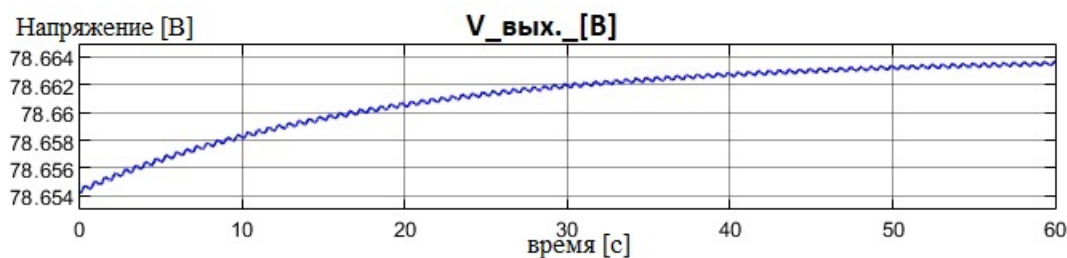


Рис. 11. Выходное напряжение постоянного тока от пьезоэлектрической системы

Fig. 11. DC output voltage from piezoelectric system

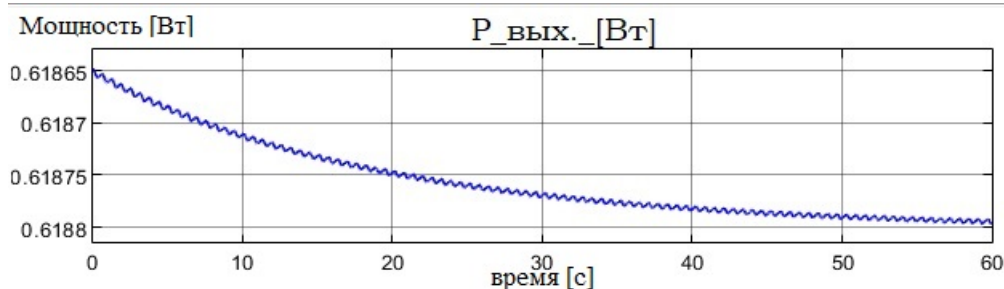


Рис. 12. Выходная мощность от системы

Fig. 12. Output power from the system

Из моделирования системы сбора энергии вибрации с помощью программы MATLAB/Simulink и полученных результатов мы пришли к выводу, что использование этих систем очень подходит для приложений, требующих низкой энергии, так как оно очень подходит для использования при зарядке батареи, используя соответствующие составные части для этого.

### Заключение

По результатам исследования схем сбора энергии на основе пьезопреобразователя можно заключить, что их состав и аппаратное оформление зависят от следующих факторов:

- типа используемого пьезоэлемента;
- назначения устройства;
- принципа использования пьезоэлектрического эффекта (прямой или обратный);
- вида внешнего воздействия, производимого на пьезоэлемент.

В каждом конкретном случае необходимо подбирать элементную базу для электрической схемы исходя из указанных выше факторов, а также требуемых значений выходной мощности и рабочего напряжения.

В работе, представленной в этой статье, обсуждается использование простого и надежного подхода к изучению и анализу пьезоэлектрических систем сбора энергии с упором на моделирование с использованием инженерного программного обеспечения.

По результатам моделирования и симуляции в программе MATLAB/Simulink отметим, что может быть выработана мощность более 0,6 Вт, и этой мощности достаточно для работы мало-мощных устройств, а также ее можно использовать для зарядки аккумуляторов.

Таким образом, развитие пьезоэлектрических методов генерации энергии в настоящее время является весьма перспективным направлением в энергетике. Дополнительные исследования этого направления позволят отказаться от использования проводных источников энергии, заменив их более дешевыми и надежными аналогами. Поиск путей повышения эффективности использования как прямого, так и обратного пьезоэффектов обеспечат долгосрочные перспективы в создании портативных приборов, датчиков, измерительной аппаратуры, в которых имеются значительные потребности различных отраслей.

### Библиографические ссылки

1. Shad Roundy, Paul Kenneth Wright, Jan M. Ra-baey [Energy scavenging for wireless sensor networks]. Springer, Boston, 2004, 212 p.

2. Paradiso J. A. and Starner T., "Energy scavenging for mobile and wireless electronics," in IEEE Pervasive Computing, vol. 4, no. 1, pp. 18-27, Jan.-March 2005. DOI: 10.1109/MPRV.2005.9.

3. Starner T. [Human-powered wearable computing] in *IBM Systems Journal*, vol. 35, no. 3.4, pp. 618-629, 1996. DOI: 10.1147/sj.353.0618.

4. Beeby S. et al [A micro electromagnetic generator for vibration energy harvesting. *Journal Micromech Microeng.* 2007, vol. 17, no 7, pp. 1257–1265.

5. Васильев И., Чуприн А. Разработка пьезоэлектрического генератора тока для обеспечения автономным питанием грузовых вагонов и платформ // *Нано индустрия*. 2016. № 5 (67). С. 86–92. DOI: <https://10.22184/1993-8578.2016.67.5.86.92>.

6. Uchino K. [Piezoelectric Energy Harvesting Systems—Essentials to Successful Developments]. *Energy Technology*, 2017, vol. 6 (5), pp. 829-848. DOI: <https://doi.org/10.1002/ente.201700785>.

7. Huet F., et al. [Vibration energy harvesting device using P(VDF-TrFE) hybrid fluid diaphragm]. *Sensors and Actuators A: Physical*, Elsevier, 2016, vol. 247, pp.12-23. DOI: 10.1016/j.sna.2016.05.029.

8. Cui X., Teng M. and Hu J., [PSPICE-Based Analyses of the Vibration Energy Harvester System with Multiple Piezoelectric Units]. in *Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 38, no. 3, pp. 246-250, 2015, DOI: 10.1109/CJECE.2015.2431312.

9. Бозуш М. В. Проектирование пьезоэлектрических датчиков на основе пространственных электроупругих моделей. М. : Техносфера, 2014. 312 с. URL: [www.piezoelectric.ru](http://www.piezoelectric.ru).

10. Гриценко А., Никифоров В., Щеголева Т. Состояние и перспективы развития пьезоэлектрических генераторов // *Компоненты и технологии*. 2012. № 9. С. 63–68.

11. Zhang Y. L., et al. Electrostatic energy harvesting device with dual resonant structure for wideband randomvibration sources at low frequency. *Review of Scientific Instruments*, 2016, vol. 87: 125001, pp. 1-8.

12. Maghsoudi Nia E., et al. [Design of a pavement using piezoelectric materials]. *Materials science and engineering technology*, John Wiley & Sons, 2019, vol. 50, no 3, pp. 320–328. DOI: <https://doi.org/10.1002/mawe.201900002>

13. Ghazanfarian, Jafar, Mohammad M. Mohammadi, and Kenji Uchino. [Piezoelectric Energy Harvesting: A Systematic Review of Reviews]. *Actuators*, 2021, Vol. 10, no. 12: 312, pp. 1-30 <https://doi.org/10.3390/act10120312>.

14. Erturk A., Inman D. [Piezoelectric Energy Harvesting], 1st ed.: John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA, 2011, 416 P.

15. Gareh S., et al. [Optimization of the Compression-Based Piezoelectric Traffic Model (CPTM) for Road Energy Harvesting Application]. *International Journal of Renewable Energy Research*, 2019, vol. 9, no 3, pp. 1272–1282. DOI: <https://doi.org/10.20508/ijrer.v9i3.9509.g7703>

16. Chen N., et al. [A piezoelectric impact-induced vibration cantilever energy harvester from speed bump



with a low-power power management circuit]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2017, vol. 254, pp. 134–144. DOI: 10.1016/j.sna.2016.12.006

17. Yalu Pei, Yilun Liu, Lei Zuo [Multi-resonant electromagnetic shunt in base isolation for vibration damping and energy harvesting]. *Journal of Sound and Vibration*, Volume 423, 2018, pp. 1-17, <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2018.02.041>

18. Исполнительные устройства и системы для микроперемещений / А. А. Бобцов, В. И. Бойков, С. В. Быстров и др. СПб. : Университет ИТМО, 2017. 134 с.

19. Hillyard, Daniel C et al. [Development of an Energy-Harvesting Shoe]. *Environmental Science*, 2014.

20. Анализ и моделирование автономной фотоэлектрической системы с использованием среды matlab/simulink / Л. М. Абдали, Х. А. Исса, К. А. Али, В. В. Кувшинов, Э. А. Бекиров // *Строительство и техногенная безопасность*. 2021. № 21(73). С. 97-105. DOI: <https://doi.org/10.37279/2413-1873-2021-21-97-105>.

### References

1. Shad Roundy, Paul Kenneth Wright, Jan M. Rabaey [Energy scavenging for wireless sensor networks]. Springer, Boston, 2004, 212 p.

2. J. A. Paradiso and T. Starner, "Energy scavenging for mobile and wireless electronics," in *IEEE Pervasive Computing*, vol. 4, no. 1, pp. 18-27, Jan.-March 2005, DOI: 10.1109/MPRV.2005.9.

3. T. Starner, [Human-powered wearable computing] in *IBM Systems Journal*, vol. 35, no. 3.4, pp. 618-629, 1996. DOI: 10.1147/sj.353.0618.

4. Beeby S. et al [A micro electromagnetic generator for vibration energy harvesting. *Journal Micromech Microeng*]. 2007, vol. 17, no 7, pp. 1257–1265.

5. Vasiliev I., Chuprin A. [Development of a piezoelectric current generator to provide autonomous power for freight cars and platforms] *Nano Industry Journal*, 2016, No. 5 (67), pp. 86–92. (In Russ.) DOI: <https://10.22184/1993-8578.2016.67.5.86.92> (in Russ.).

6. Uchino K. [Piezoelectric Energy Harvesting Systems—Essentials to Successful Developments]. *Energy Technology*, 2017, vol. 6 (5), pp. 829 – 848. DOI: <https://doi.org/10.1002/ente.201700785>

7. Huet F., et al. [Vibration energy harvesting device using P(VDF-TrFE) hybrid fluid diaphragm]. *Sensors and Actuators A: Physical*, Elsevier, 2016, vol. 247, pp.12-23. DOI: 10.1016/j.sna.2016.05.029.

8. X. Cui, M. Teng and J. Hu, [PSPICE-Based Analyses of the Vibration Energy Harvester System with Multiple Piezoelectric Units]. in *Canadian Journal of*

*Electrical and Computer Engineering*, vol. 38, no. 3, pp. 246-250, 2015, DOI: 10.1109/CJECE.2015.2431312.

9. Bogush M.V. [Design of piezoelectric sensors based on spatial electrothermoelastic models]. Tekhnosfera Publishing House, 2014, 312 p. Available at [www.piezoelectric.ru](http://www.piezoelectric.ru) (in Russ.).

10. Gritsenko A, Nikiforov V., Shchegoleva T. [Status and development prospects of piezoelectric generators]. *Journal "Komponenti and Technologie"*, No. 9, 2012. P. 63-68 (in Russ.).

11. Zhang Y. L., et al. Electrostatic energy harvesting device with dual resonant structure for wideband randomvibration sources at low frequency. *Review of Scientific Instruments*, 2016, vol. 87: 125001, pp. 1-8.

12. Maghsoudi Nia E., et al. [Design of a pavement using piezoelectric materials]. *Materials science and engineering technology*, John Wiley & Sons, 2019, vol. 50, no 3, pp. 320–328. DOI: <https://doi.org/10.1002/mawe.201900002>.

13. Ghazanfarian, Jafar, Mohammad M. Mohammadi, and Kenji Uchino. [Piezoelectric Energy Harvesting: A Systematic Review of Reviews]. *Actuators*, 2021, Vol. 10, no. 12: 312, pp. 1-30 <https://doi.org/10.3390/act10120312>.

14. Erturk A., Inman D. [Piezoelectric Energy Harvesting], 1st ed.: John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA, 2011, 416 p.

15. Gareh S., et al. [Optimization of the Compression-Based Piezoelectric Traffic Model (CPTM) for Road Energy Harvesting Application]. *International Journal of Renewable Energy Research*, 2019, vol. 9, no 3, pp. 1272–1282. DOI: <https://doi.org/10.20508/ijrer.v9i3.9509.g7703>.

16. Chen N., et al. [A piezoelectric impact-induced vibration cantilever energy harvester from speed bump with a low-power power management circuit]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2017, vol. 254, pp. 134–144. DOI: 10.1016/j.sna.2016.12.006.

17. Yalu Pei, Yilun Liu, Lei Zuo [Multi-resonant electromagnetic shunt in base isolation for vibration damping and energy harvesting]. *Journal of Sound and Vibration*, Volume 423, 2018, pp. 1-17, <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2018.02.041>.

18. Bobtsov A.A., Boykov V.I., Bystrov S.V. etc. [Executive devices and systems for micro-movements]. – St. Petersburg: ITMO University, 2017. 134 p. (in Russ.).

19. Hillyard, Daniel C et al. [Development of an Energy-Harvesting Shoe]. *Environmental Science*, 2014.

20. Abdali L.M., Issa H.A., Ali Q.A., Kuvshinov V.V., Bekirov E.A. [Analysis and simulation off-grid pv panels by using matlab / Simulink]. *Construction and industrial safety*. 2021. No. 21, p.97-105. DOI:<https://doi.org/10.37279/2413-1873-2021-21-97-105> (in Russ.).

**Modelling and Analysis of Piezoelectric Energy Storage System Operation by Means of Software Environment Matlab/Simulink**

*F. M. Al-Rufai*, Postgraduate Student, Sevastopol State University Institute of Nuclear Energy and Industry, Sevastopol, Russia

*B. A. Yakimovich*, DrSc in Engineering, Professor, Sevastopol State University Institute of Nuclear Energy and Industry, Sevastopol, Russia

*V. V. Kuvshinov*, PhD in Engineering, Associate Professor, Sevastopol State University Institute of Nuclear Energy and Industry, Sevastopol, Russia

*A. A. Al-Saidi*, Postgraduate Student, National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russia

*D. F. Bordan*, Postgraduate Student, Sevastopol State University Institute of Nuclear Energy and Industry, Sevastopol, Russia

*The interest among researches to electric energy production from vibration energy transformation has been increased recently due to the need of connection of special electronic equipment to the energy source, such as remote sensing system, enabling maintenance and battery change at specified time cost reduction. High energy thickness and sure vibration characteristics of piezoelectric materials increased the application area where low power is required. Energy collection from piezoids is a technology that transforms available environment energy into electric one. Vibration energy collection is preferred since various amplitude and frequency vibrations are available in environment. Vibration energy collectors of piezoelectrical type are widely used due to their simplicity of operation and compatibility with small electromechanical system production technology. A software Matlab / Simulink was used for modelling and analysis of piezoelectric system operation for the present research. The program allowed to develop a model of piezoelectric system. The results of modelling showed the possibility of application of such systems for the required energy production in low-power equipment. This is especially important that these piezoelectrical technologies can be applied for electric energy supply of off-grid individual consumers in the remote districts of the Russian Federation. It is possible since technologies are suitable for application during battery charge, which is especially important for individual household and private houses in various districts of our country.*

**Keywords:** Matlab/Simulink, vibration, piezoid, energy collection, modelling.

Получено: 11.05.22