

ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА СБОРА ЭНЕРГИИ

Е.В.Кузьмин, В.С.Леонтьев, А.А.Чуланов, Д.В.Коваленко, Д.А.Усик*, Р.В.Петров

SOLID-STATE ENERGY HARVESTING DEVICES

E.V.Kuzmin, V.S.Leontiev, A.A.Chulanov, D.V.Kovalenko, D.A.Usik*, R.V.Petrov

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, 7777744444@mail.ru

*АО «ОКБ-Планета», Великий Новгород, usikda@okbplaneta.ru

Глобальный энергетический кризис и загрязнение окружающей среды, вызванные главным образом увеличением потребления невозобновляемых источников энергии, побудили исследователей изучить альтернативные энергетические технологии, которые могут использовать энергию, доступную в окружающей среде. Механическая энергия — это наиболее распространенная энергия окружающей среды, которую можно уловить и преобразовать в полезную электрическую энергию. Пьезоэлектрическое, магнитострикционное и магнитоэлектрическое преобразования являются наиболее распространенными механизмами сбора энергии. В результате ожидается, что в ближайшем будущем многие электронные устройства будут питаться от пьезоэлектрических, магнитострикционных и магнитоэлектрических генераторов. В данной статье представлен обзор современного состояния твердотельных устройств сбора энергии, в частности пьезоэлектрических, магнитострикционных и магнитоэлектрических. Изложены принципы преобразования энергии, разъяснены механизмы работы.

Ключевые слова: магнитоэлектрическая структура, устройство сбора энергии, преобразование энергии

Для цитирования: Кузьмин Е.В., Леонтьев В.С., Чуланов А.А., Коваленко Д.В., Усик Д.А., Петров Р.В. Твердотельные устройства сбора энергии // Вестник НовГУ. Сер.: Технические науки. 2021. №4(125). С.33-37. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.4\(125\).33-37](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.4(125).33-37)

The global energy crisis and environmental pollution, caused mainly by the increased consumption of non-renewable energy sources, have prompted researchers to explore alternative energy technologies that can use the energy available in the environment. Mechanical energy is the most common environmental energy that can be captured and converted into useful electrical energy. Piezoelectric, magnetostrictive and magnetoelectric transformations are the most common mechanisms of energy collection. As a result, it is expected that in the near future many electronic devices will be powered by piezoelectric, magnetostrictive and magnetoelectric generators. This article provides an overview of the current state of solid-state energy harvesting devices, in particular, piezoelectric, magnetostrictive and magnetoelectric. The principles of energy conversion are outlined; the mechanisms of operation are explained.

Keywords: magnetoelectric structure, energy harvester, energy conversion

For citation: Kuzmin E.V., Leontiev V.S., Chulanov A.A., Kovalenko D.V., Usik D.A., Petrov R.V. Solid-state energy harvesting devices // Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences. 2021. №4(125). P.33-37. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.4\(125\).33-37](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.4(125).33-37)

Введение

На сегодняшний день основным трендом развития мировой радиоэлектроники является повышение функциональности, уменьшение энергопотребления и миниатюризация сенсоров [1-3]. В большинстве случаев для питания различных сенсоров используются аккумуляторные батареи, что является серьезным недостатком, а также большой проблемой с точки зрения экологичности. Решение этих проблем находится в окружающей среде: энергия механических колебаний, тепло, электромагнитное излучение и др. Устройства, собирающие данную энергию и преобразующие ее в электрическую, называются твердотельными устройствами сбора энергии. Полученную энергию можно использовать для работы сети беспроводных сенсоров, мобильной электроники, имплантируемых сенсоров, биомедицинских сенсоров и т.д. В случае с имплантируемыми сенсорами при работе на аккумуляторных батареях возникает проблема замены, связанная с риском инфицирования. Как

видно из вышесказанного, актуальность данной тематики является обоснованной. Как результат, проведено большое количество теоретических и экспериментальных исследований разработки твердотельных устройств сбора энергии в качестве источников питания для различных сенсоров.

Наиболее популярными твердотельными устройствами сбора энергии являются устройства на основе магнитострикционных, пьезоэлектрических и магнитоэлектрических материалов. В магнитострикционных материалах магнитные домены вращаются под действием внешнего механического напряжения и изменяются (растягиваются/сжимаются) пропорционально нагрузке, преобразовывая магнитные свойства материала за счет обратной магнитострикции (магнитоупругий эффект) [4]. Пьезоэлектрические материалы индуцируют ЭДС под действием механических деформаций [5]. Устройства сбора энергии на основе пьезоэлектрических материалов обладают большим потенциалом за счет возможности преобразования энергии вибраций и деформаций в электрическую. Магнитоэлектрические (МЭ)

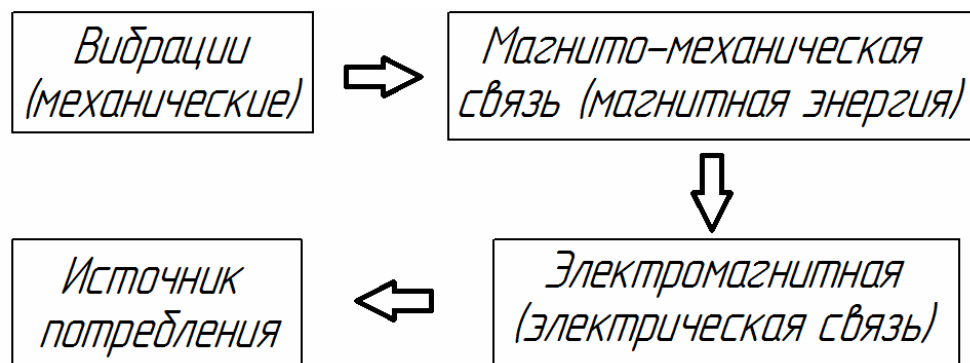


Рис.1. Блок-схема преобразований магнитострикционных устройств сбора энергии

материалы вызывают большой интерес для разработки устройств сбора энергии [6-9]. Чувствительным элементом такого устройства является магнитострикционная пьезоэлектрическая структура, проявляющая магнитоэлектрический эффект соответственно. Такие МЭ композитные структуры обладают более высокими выходными значениями по сравнению с однофазными структурами [10].

В статье представлен обзор твердотельных устройств сбора энергии. Особое внимание сосредоточено на наиболее перспективных (на взгляд авторов) трех типах материалов для разработки устройств сбора энергии: 1) магнитострикционные; 2) пьезоэлектрические; 3) магнитоэлектрические.

Устройства сбора энергии на основе магнитострикционных материалов

Устройство сбора энергии (Energy Harvesting Device) — это устройство, получающее необходимую для работы энергию из окружающей среды. Магнитострикционные устройства сбора энергии преобразуют из вибрационной энергии в электрическую в два этапа:

- 1) механическая энергия передается в магнитную посредством магнитомеханических связей в магнитострикционном материале;
- 2) магнитная энергия преобразуется в электрическую через электромагнитную связь в электрических цепях (рис.1).

На рис.2 представлена конструкция магнитострикционного генератора, ключевого компонента — устройства сбора энергии. В харвестере генератор преобразует механическую энергию в электрическую. Генератор — механизм-посредник между преобразователем и внешней энергией.

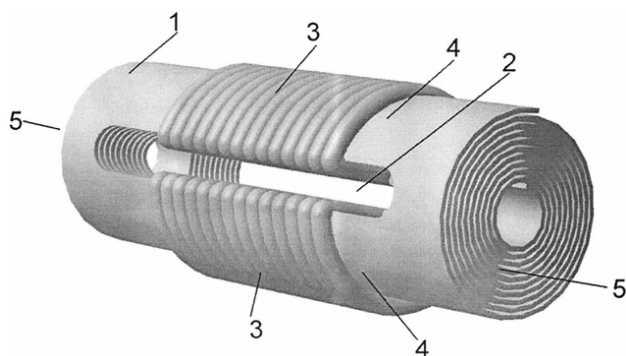


Рис.2. Конструкция магнитострикционного генератора

Генератор выполнен из ленты магнитострикционного материала, свернутой в тело цилиндрической формы 1, вдоль образующей цилиндра 1 имеется сквозное окно 2, обмотка возбуждения 3 проходит через окно 2 и уложена на сегменты 4 цилиндра 1. Число сквозных окон 2 может быть больше одного. Торцы 5 цилиндра 1 являются излучающей поверхностью.

Данный генератор работает следующим образом. Переменное напряжение резонансной частоты, подводимое к обмотке возбуждения 3 от ультразвукового генератора, например от УЗГ-2-10 (не показан), возбуждает продольные колебания в сегментах 4 цилиндра 1. Излучение акустической энергии преобразователем в среду обработки осуществляется с торцов 5 цилиндра 1.

Магнитострикционный генератор, выполненный из ленты магнитострикционного материала, свернутой в тело цилиндрической формы, и содержащий обмотку возбуждения, отличается тем, что вдоль образующей цилиндра имеется по меньшей мере одно сквозное окно, а обмотка возбуждения проходит через окно и уложена на сегменты цилиндра, при этом толщина стенки цилиндра определяется требуемой мощностью преобразователя. Данный тип преобразования энергии из механической в электрическую является вполне эффективным механизмом для харвестинга.

Широкое распространение получили аксиальные и изгибные типы устройств сбора энергии. В качестве магнитострикционного материала используют терфенол-D, $\text{Fe}_{81,6}\text{Ga}_{18,4}$, метглас, галфенол. В работе [11] представлен роторно-импульсный магнитострикционный харвестер, используемый для вращения коленного сустава человека. Харвестер состоит из двенадцати подвижных стержней терфенола-D, окруженных соответственно подобранными катушками, и альтернативной массы постоянных магнитов, зажатого в каждой части корпуса. В харвестере предусмотрена генерация энергии при помощи вращательного электромагнитного и магнитострикционного эффектов. Такой харвестер может генерировать индуцированное напряжение до 60-80 В при низкочастотном вращении частотой 0,91 Гц, что больше, чем у электромагнитных харвестеров катушечного типа. Харвестер также может безопасно и эффективно использоваться при медленной ходьбе человека и периодических раскачиваниях, он имеет наведенное напряжение 20-40 В.

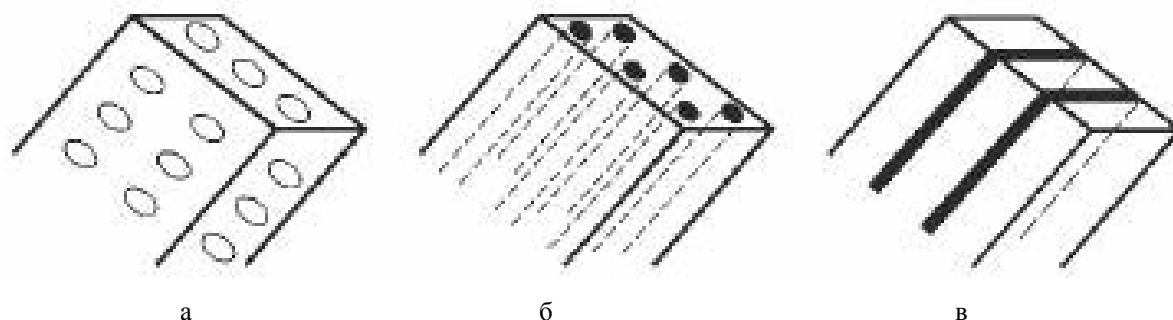


Рис.3. Типы композитных структур: а) объемные; б) столбчатые; в) слоистые

S. Kieta и др. представили высокомогущный магнитострикционный виброгенератор для беспроводной электроники без батарей. Генератор основан на параллельной балочной консольной конструкции, состоящей из намотанной на пластину галфенола катушки и стержней с постоянными магнитами для подмагничивания. Колебательная сила, действующая на наконечник, изгибает кантилевер при вибрации, вызывая изменение напряжения пластины галфенола, что оказывает воздействие на магнитный поток и создает напряжение на катушке. Этот генератор имеет преимущество перед другими, такими как пьезоэлектрические или генераторы с движущимися магнитами, с точки зрения высокой эффективности и надежности и низкого электрического сопротивления. Такой харвестер демонстрирует максимальную мощность 0,73 Вт и энергию 4,7 мДж при частоте свободных колебаний 202 Гц и при приложенной силе 25 Н [12].

Устройства сбора энергии на основе пьезоэлектрических материалов

Открытие эффективных пьезоэлектрических материалов, таких как цирконат титанат свинца ЦТС ($\text{Pb}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$) и титанат бария (BaTiO_3), стало большим скачком в области разработки устройств сбора энергии. Существуют разные типы композитных структур по типу связности: 0-3 (объемные), 1-3 (столбчатые) и 2-2 (слоистые) (рис.3).

Наиболее распространенной конструкцией для пьезоэлектрического устройства сбора энергии является консольная балка с пьезоэлектрическим материалом, жестко закрепленным с одного конца (рис.4).

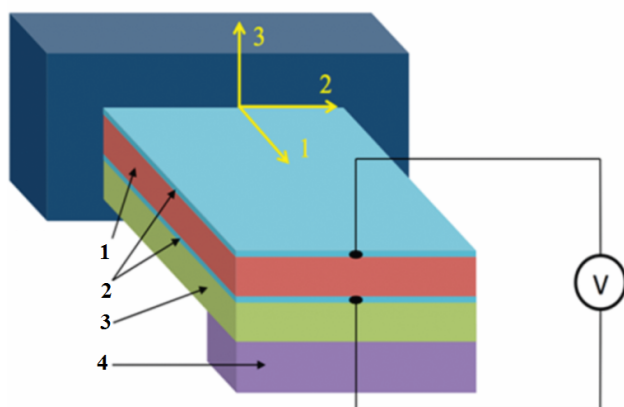


Рис.4. Конструкция для пьезоэлектрического устройства сбора энергии: 1 — пьезоэлектрический материал; 2 — электроды; 3 — эластичный слой; 4 — магнит

В качестве пьезоэлектрических материалов используется ЦТС, PVDF и ZnO. В статье [13] описываются трехслойные структурированные пьезоэлектрические устройства сбора энергии на основе многослойных структур из ЦТС. Измеренные значения внутренней емкости образцов данных устройств от однослойных до трехслойных составляли 0,84 мкФ, 1,62 мкФ и 2,43 мкФ. Измеренные выходные напряжения образцов составляли 10,41 В для однослойных, 11,24 В — для двухслойных и 12,26 В — для трехслойных конструкций. Значения сохраненной выходной мощности составляли примерно 45,52 мкВт для однослойных, 102,33 мкВт — для двухслойных и 182,62 мкВт — для трехслойных харвестеров. Значения генерируемой мощности таких устройств сбора энергии составляли соответственно 0,63, 0,82 и 1,25 мВт.

В работе M.G.Kang et. al. [14] представлен твердотельный харвестер с выходным напряжением в 209 В. Он выполнен на основе вертикально ориентированного массива сверхдлинных нанопроволок $\text{Pb}(\text{Zr}_{0,52}\text{Ti}_{0,48})\text{O}_3$ (ЦТС), изготовленного с использованием электроспиннинга нановолокон. Разработан новый тип интегрированного наногенератора со сверхвысоким выходным напряжением 209 В и плотностью тока 23,5 мкА/см², что в несколько раз выше предыдущих рекордных значений. Выходной сигнал можно напрямую использовать для стимуляции седалищного нерва лягушки и для индукции сокращения икроножной мышцы лягушки. Такой харвестер может мгновенно запитать коммерческий светоизлучающий диод (СИД) без процесса предварительного накопления энергии.

Устройства сбора энергии на основе магнитоэлектрических композитов

Магнитоэлектрический (МЭ) эффект определяется как возникновение поляризации под действием магнитного поля (прямой эффект) и, наоборот, возникновение намагниченности под действием электрического поля (обратный эффект). Было показано, что в отличие от однофазных магнитоэлектриков МЭ композиты, сочетающие упруго связанные пьезоэлектрические и магнитострикционные фазы, обладают гигантским МЭ эффектом даже при комнатной температуре [15].

В работе [16] был представлен МЭ харвестер с использованием МЭ элементов в качестве источника энергии. Макет устройства в составе восьми МЭ элементов с размерами одного элемента 40×10×0,5 мм на

частоте переменного магнитного поля около 38 Гц на выходе устройства вырабатывал постоянное напряжение около 1,12 В и ток 3,8 мкА. Переменное напряжение до выпрямителя составляло около 1,7 В. Общая генерируемая мощность составила 4,28 мкВт. Sujoy Kumar Ghosh и др. [17] разработали гибкий МЭ харвестер с беспроводной системой для интернет-вещей на основе магнитомеханического наногенератора. Такой харвестер собирает энергию за счет МЭ PVDF-TrFE / NFO 0-3. Наноккомпозитная структура работает на частоте 50 Гц. Выходное напряжение такого устройства составило 1,4 В и удельную выходную мощность на единицу площади 0,05 мкВт/см². Гибкий харвестер уже прошел успешные испытания и продемонстрировал свою работоспособность.

Плюсы и минусы рассмотренных типов харвестеров

Сравнивая магнитострикционные, пьезоэлектрические и магнитоэлектрические устройства сбора энергии, видно, что каждый тип обладает своими преимуществами и недостатками.

Таблица 1
Преимущества и недостатки харвестеров

Тип	Преимущества	Недостатки
Магнитострикционный	Высокая механическая прочность; низкое выходное сопротивление; высокий коэффициент связи; отсутствие эффекта старения; возможность компактного исполнения	Высокая нелинейность; крупногабаритные подмагничивающие магнитные катушки
Пьезоэлектрический	Высокий коэффициент связи; возможность интеграции в МЭМС	Низкая механическая прочность объемных структур; гибкие ПВДФ структуры обладают слабой механической связью; высокое выходное сопротивление; утечка заряда; эффект старения
Магнитоэлектрический	Высокий коэффициент связи; возможность интеграции в МЭМС; высокий магнитомеханический эффект связи; высокая плотность энергии; высокая линейность; высокая чувствительность	Эффект старения; утечка заряда

Наиболее выделяющимся на фоне других являются магнитоэлектрические устройства. Конструк-

тивно такие устройства выполнены в основном на основе эффекта колебательных процессов. Известно, что колебания или вибрация способствуют интенсивному выделению энергии в МЭ элементе. Энергия, вырабатываемая МЭ элементом при воздействии вибрации, в общем случае складывается из двух составляющих: магнитострикционной и пьезоэлектрической. В табл.2 приведены сравнительные характеристики рассмотренных в данной статье устройств сбора энергии. Были выбраны наиболее эффективные устройства каждого типа.

Таблица 2
Сравнительные характеристики рассмотренных устройств сбора энергии

Тип устройства	U , В	P , мВт	f , Гц	Ссылка
Магнитострикционный	60-80	—	0,91	[11]
Пьезоэлектрический	12,26	1,25	—	[13]
Магнитоэлектрический	1,12	0,0038	38	[16]

Заключение

В данной статье обобщается информация о последних исследованиях в области пьезокерамики/полимеров, магнитострикционных сплавов и МЭ мультиферроиков для устройств сбора энергии. Представлен обзор конструкций и проблем, связанных с характеристиками, изготовлением, моделированием и разработкой, а также долговечностью и надежностью устройств сбора энергии. Изложены принципы преобразования энергии, разъяснены механизмы работы.

Анализируя современные тенденции развития микроэлектроники, можно ожидать, что в ближайшем будущем многие электронные устройства будут питаться от пьезоэлектрических, магнитострикционных и магнитоэлектрических генераторов.

1. Petrov R.V., Kuzmin E.V., Bichurin M.I. et al. Hybrid magnetoelectric converter // Journal of Physics: Conference Series. Electronic edition. 2020. Vol.1658. Article number: 012038. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1658/1/012038>
2. Кузьмин Е.В., Леонтьев В.С., Петрова А.Р. и др. Исследование магнитоэлектрической структуры Метглас/GaAs/Метглас для применения в источниках энергии // Вестник НовГУ. Сер.: Технические науки. 2021. №2(123). С.31-35. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2\(123\).31-35](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2(123).31-35)
3. Kuzmin E.V., Platonov S.V., Bichurin M.I. et al. The study of microwave range energy harvesting device // J. of Physics: Conf. Series. 2019. Vol.1352. Article number: 012029. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1352/1/012029>
4. Сулейманов А.И., Саидов О.А. Магнитоупругий эффект при симметричном изгибе с вращением // Мониторинг. Наука и технологии. 2013. №2. Ст.12.
5. Акулов Н.С., Гельфенбейн А., Бычков Н. Влияние упругих напряжений на ход кривой намагничивания // ЖЭТФ. 1933. Т.3. Вып.1. С.53-58.
6. Petrov R.V., Petrov V.M., Bichurin M.I. et al. Modeling of dimensionally graded magnetoelectric energy harvester // JMMM. 2015. Vol.383. P.246-249. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2014.10.145>
7. Petrov R.V., Kolesnikov N.A., Bichurin M.I. Magnetoelectric alternator // Energy Harvesting and Systems. 2016. Vol.3. Is.2. P.173-180. DOI: <https://doi.org/10.1515/ehs-2015-0024>

8. Петров Р.В., Бичурин М.И. Магнитоэлектрический преобразователь энергии // Тр. междунар. конф. «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты», МКЭЭЭ 2016. Алушта, Крым, 19-24 сентября 2016. С.117-118.
9. Bichurin M., Kolesnikov N., Petrov R., Aleksic S. Magnetolectric energy source // *Electrotechnica and Electronica*. 2015. Vol.50. Issue 9-10. P.19-22.
10. Zhai J., Xing Z., Dong S. et al. Magnetolectric laminate composites: an overview // *Journal of the American Ceramic Society*. 2008. Vol.91. P.351-358. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2008.02259.x>
11. Yan B., Zhang C., Li L. Design and fabrication of a high-efficiency magnetostrictive energy harvester for high-impact vibration systems // *IEEE Trans. Magn.* 2015. Vol.51. Article number: 8205404. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2015.2441295>
12. Kita S., Ueno T., Yamada S. Improvement of force factor of magnetostrictive vibration power generator for high efficiency // *J. Appl. Phys.* 2015. Vol.117. P.17B508. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4907237>
13. Shin D.J., Jeong S.J., Seo C.E. et al. Multi-layered piezoelectric energy harvesters based on PZT ceramic actuators // *Ceram. Int.* 2015. Vol.41 (S1). P.S686-S690.
14. Long Gu, Nuanyang Cui, Li Cheng et al. Flexible fiber nanogenerator with 209 V output voltage directly powers a light-emitting diode // *Nano Lett.* 2013. Vol.13 (1). P.91-94. DOI: <https://doi.org/10.1021/nl303539c>
15. Nan C.-W., Bichurin M.I., Dong S. et al. Multiferroic magnetolectric composites: historical perspectives, status, and future directions // *J. Appl. Phys.* 2008. Vol.103. P.031101. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.2836410>
16. Петров Р.В., Колесников Н.А., Бичурин М.И. Устройство сбора энергии с применением магнитоэлектрических элементов // *Фундаментальные исследования*. 2015. №7-4. С.712-717.
17. Sujoy Kumar Ghosh, Kritish Roy, Hari Krishna Mishra et al. Rollable magnetolectric energy harvester as a wireless iot sensor acs sustainable // *Chemistry & Engineering*. 2020. Vol.8 (2). P.864-873.
5. Akulov N.S., Gelfenbein A. Vliyanie uprugikh napryazheniy na khod krivoy namagnichivaniya [Influence of elastic stresses on the course of the magnetization curve]. *Zhurnal eksperimental'noy i teoreticheskoy fiziki – Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 1933, vol. 3, no. 1.
6. Petrov R.V., Petrov V.M., Bichurin M.I., Zhou Y., Priya S. Modeling of dimensionally graded magnetolectric energy harvester. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2015, vol. 383, pp. 246-249. doi:10.1016/j.jmmm.2014.10.145
7. Petrov R.V., Kolesnikov N.A., Bichurin M.I. Magnetolectric alternator. *Energy Harvesting and Systems*, 2016, vol. 3, no. 2, pp. 173-180. doi: 10.1515/ehs-2015-0024
8. Petrov R.V., Bichurin M.I. Magnitoelektricheskiy preobrazovatel' energii [Magnetolectric energy converter]. *Trudy mezhdunar. konf. "Elektromekhanika, elektrotekhnologii, elektrotekh-nicheskiye materialy i komponenty"* – Proceedings of the International Conference "Electromechanics, Electrical Technologies, Electrical Materials and Components", Alushta, Crimea, 2016, pp. 117-118.
9. Bichurin M., Kolesnikov N., Petrov R., Slavoljub A. Magnetolectric energy source. *Electrotechnica and Electronica*, 2015, vol. 50, no. 9-10, pp.19-22.
10. Zhai J., Xing Z., Dong S., Li J., & Viehland D. Magnetolectric laminate composites: an overview. *Journal of the American Ceramic Society*, 2008, vol. 91, pp. 351-358. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2008.02259.x>
11. Yan B., Zhang C., Li L. Design and fabrication of a high-efficiency magnetostrictive energy harvester for high-impact vibration systems. *IEEE Trans. Magn.*, 2015, vol. 51, art. no. 8205404. doi: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2015.2441295>
12. Kita S., Ueno T., Yamada S. Improvement of force factor of magnetostrictive vibration power generator for high efficiency. *J. Appl. Phys.* 2015, vol. 117, 17B508, doi: <https://doi.org/10.1063/1.4907237>
13. Shin D.J., Jeong S.J., Seo C.E., Cho K.H., Koh J.H. Multi-layered piezoelectric energy harvesters based on PZT ceramic actuators. *Ceram. Int.*, 2015, vol. 41 (S1), pp. S686-S690.
14. Long Gu, Nuanyang Cui, Li Cheng, Qi Xu, Suo Bai, Miaomiao Yuan, Weiwei Wu, Jinmei Liu, Yong Zhao, Fei Ma, Yong Qin, and Zhong Lin Wang. Flexible Fiber Nanogenerator with 209 V Output Voltage Directly Powers a Light-Emitting Diode. *Nano Lett.*, 2013, vol. 13 (1), pp. 91-94. doi: <https://doi.org/10.1021/nl303539c>
15. Nan, C.-W., Bichurin, M.I., Dong, S., Viehland, D., Srinivasan, G. Multiferroic magnetolectric composites: historical perspectives, status, and future directions. *J. Appl. Phys.* 2008, vol. 103, p. 031101. doi: <https://doi.org/10.1063/1.2836410>
16. Petrov R.V., Kolesnikov N.A., Bichurin M.I. Ustroystvo sbora energii s primeneniym magnitoelektricheskikh elementov [Energy collection device using magnetolectric elements]. *Fundamental'nyye issledovaniya – Fundamental research*, 2015, no. 7-4, pp. 712-717.
17. Sujoy Kumar Ghosh, Kritish Roy, Hari Krishna Mishra, Manas Ranjan Sahoo, Biswajit Mahanty, Prakash Nath Vishwakarma, and Dipankar Mandal. Rollable Magnetolectric Energy Harvester as a Wireless IoT Sensor ACS Sustainable. *Chemistry & Engineering*, 2020, vol. 8(2), pp. 864-873.

References