

УДК 621.313.8

## УСТРОЙСТВО СБОРА ЭНЕРГИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

**Петров Р.В., Колесников Н.А., Бичурин М.И.**

*ФГБОУ ВПО «Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого»,  
Великий Новгород, e-mail: Mirza.Bichurin@novsu.ru*

В статье рассматривается конструкция устройства сбора энергии с применением магнитоэлектрических элементов. В устройстве использованы восемь магнитоэлектрических элементов, изготовленных из пьезоэлектрика ЦТС-19 и магнитострикционного сплава Метглас. Размер одного элемента  $40 \times 10 \times 0,5$  мм. Общие габаритные размеры устройства составили: диаметр 12 см, толщина 2,4 см. Устройство состоит из двух дисков. На одном, неподвижном, закреплены магнитоэлектрические элементы, на втором, вращающемся, закреплены магниты. При вращении диска с магнитами на диске с магнитоэлектрическими элементами создаётся переменное магнитное поле. На частоте переменного магнитного поля около 38 Гц на выходе устройство выдавало 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 мВт. Разработанное устройство может быть применено в конструкциях ветроэлектростанций, гидрогенераторах, турбогенераторах и другой электрогенерирующей аппаратуре.

**Ключевые слова:** сбор энергии, магнитоэлектрический эффект, магнитоэлектрический элемент

## ENERGY HARVESTING DEVICE BASED ON MAGNETOELECTRIC ELEMENTS

**Petrov R.V., Kolesnikov N.A., Bichurin M.I.**

*Novgorod State University, Veliky Novgorod, e-mail: Mirza.Bichurin@novsu.ru*

The article is devoted to research the design of the energy-harvesting device using the magnetoelectric elements. Eight ME elements based on the piezoelectric material PZT and magnetostrictive alloy Metglas were used in the device. Size of one element is of  $40 \times 10 \times 0,5$  mm. General dimensions of the device as follows: diameter of 12 cm, thickness of 2,4 cm. The device consists of two discs. ME elements were installed on the static disk and the magnets were fixed on the second rotating disk. AC magnetic field is created on the disk with ME elements by rotation of the disc with magnets. The device produces the output DC voltage of 1,12 V and a current of 3,8  $\mu$ A at the frequency of AC magnetic field of 38 Hz. AC voltage before the rectifier was of 1,7 V. Total generator power amounted to 4,28  $\mu$ W. The developed device can be used in the design of wind-electric generating plants, hydro generators, turbo generators and other power generating equipment.

**Keywords:** energy harvesting, magnetoelectric effect, magnetoelectric element

В современном мире всё больше внимания уделяется созданию возобновляемых источников энергии. Устройства сбора энергии, если не решают эту задачу, то по крайней мере способствуют облегчению энергетических режимов. Исследование посвящено новому устройству сбора энергии с использованием магнитоэлектрического (МЭ) эффекта. Такое устройство может быть применено, например, в ветроэлектростанциях, гидрогенераторах, турбогенераторах и аналогичного применения электрооборудовании, предназначенном для преобразования механической энергии первичных двигателей в электрическую.

В одной из первых статей по использованию МЭ эффекта в устройствах для сбора энергии [6] дано описание общих принципов работы такого устройства. С тех пор этой теме посвящено большое количество работ, описывающих всевозможные устройства [8]. Основу этих устройств составляют МЭ элементы, изготовленные из специаль-

но подобранных материалов [1], которые действуют благодаря МЭ эффекту [3]. Конструктивно они выполнены в основном на эффекте колебательных процессов. Известно, что колебания или вибрация способствуют интенсивному выделению энергии в МЭ элементе. Энергию затем преобразуют к нужному уровню и аккумулируют. Энергия, вырабатываемая МЭ элементом при воздействии вибрации, в общем случае складывается из двух составляющих – из энергии, преобразованной за счёт пьезоэффекта, и энергии, преобразованной благодаря магнитоэлектрическому эффекту [4, 9].

В отличие от прочих устройств сбора энергии предлагаемое обладает рядом преимуществ. Например, по сравнению с панелями на солнечных элементах устройство имеет более компактный размер и не требует солнца и большой площади поверхности для работы. Для электромагнитных генераторов характерен большой вес и материалоемкость, в отличие от них МЭ элементы имеют меньший вес и не используют в сво-

ём составе дорогостоящую медь для обмоток. Если используется резонансный режим работы МЭ элементов, то это значительно, на несколько порядков, увеличивает выходную мощность.

### МЭ элементы

МЭ элементы могут быть выполнены из разных материалов, в нашем случае мы используем магнитоэлектрично-пьезоэлектрический слоистый материал, который состоит из пьезоэлектрика ЦТС-19 и магнитоэлектричного материала метглас [2]. На пьезоэлектрик с двух сторон приклеены

лучше располагать элементы согласно осям симметрии с максимальной плотностью упаковки. На рис. 1 один из вариантов такого расположения, изображен продольный и поперечный разрез устройства: слева конструкция неподвижного диска с МЭ элементами, справа устройство в разрезе. Устройство состоит из неподвижного диска 1, в плоскости которого установлены МЭ элементы 2 и магниты для подмагничивания 3; подвижного диска 4 с установленными на нём магнитами 5, который закреплён на оси 6, электрический потенциал снимается с электродов 7.

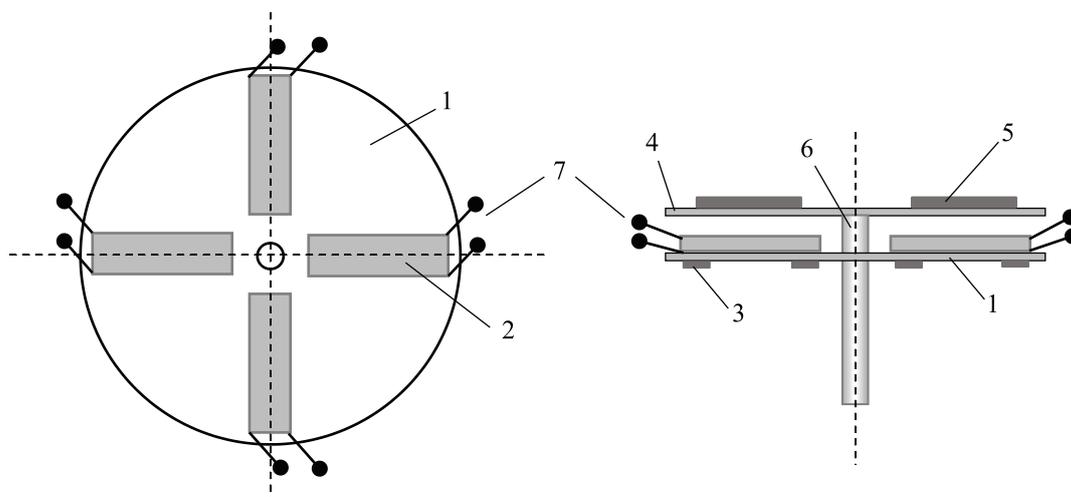


Рис. 1. Конструкция устройства сбора энергии с использованием МЭ элементов

пластины метгласа, который одновременно служит в качестве электродов, с которых снимается напряжение. Размер готового МЭ элемента 40×10×0,5 мм.

### Конструкция устройства

Конструкция устройства построена на использовании МЭ элементов. Для эффективной работы устройства необходимо правильно расположить МЭ элемент в постоянном и переменном магнитных полях. Одним из конструктивно оптимальных вариантов является поперечное направление намагничивания МЭ элемента, когда постоянное и переменное магнитные поля направлены под углом 90° к направлению поляризации пьезоэлектрика. При конструировании устройства необходимо учитывать, что отклонение в направлении магнитных полей могут существенно снизить МЭ эффект и уменьшить значение выходного напряжения.

Расположение МЭ элементов может быть произвольным, но для того чтобы получить максимально возможный эффект,

устройство работает следующим образом. На ось 6 передаётся вращающий момент от внешнего источника движения. Ось вращает закреплённый на ней диск 4 с установленными магнитами 5. Магниты 5 предназначены для создания переменного магнитного поля, наводимого в МЭ элементах 2 при их вращении. На неподвижный диск 1 установлены постоянные подмагничивающие магниты 3 для создания необходимого магнитного поля смещения в МЭ элементе. При вращении диска 4 с магнитами 5 переменное магнитное поле индуцирует переменный электрический потенциал на обкладках МЭ элемента благодаря действию МЭ эффекта: переменное магнитное поле воздействует на Метглас, который в результате магнитоэлектричного эффекта изменяет свои геометрические размеры, что приводит к давлению на пьезоэлектрическую фазу МЭ элемента, а это в свою очередь индуцирует появление электрического потенциала на обкладках МЭ элемента из-за действия пьезоэлектрического эффекта. МЭ элементы могут быть соединены между

собой последовательно, параллельно, либо используются раздельно. Если для изготовления МЭ элементов используется поляризованный пьезоэлектрик, то необходимо учитывать полярность подключения элементов. И, наконец, электрический потенциал снимается с электродов 7 устройства. Очевидно, что скорость вращения диска 4 при постоянной частоте тока в МЭ элементах статора сохраняется постоянной и не зависит от нагрузки на валу, т.е. режим работы устройства синхронный. Рассматриваемое устройство работает как синхронный генератор.

### Макет устройства

Конструкция, показанная на рис. 1, была реализована в макете. В макете устройства МЭ элементы размещены и закреплены симметрично на CD диске. Макет устройства изображён на рис. 2. Постоянное подмагничивающее поле, действующее на МЭ элементы, создано магнитами, закреплёнными на неподвижном диске – статоре. Подвижный диск – ротор, вращается от внешнего источника движения – небольшого электрического двигателя. Ротор выполнен в форме диска, на котором закреплены постоянные магниты. На роторе крепились два ниобиевых магнита с размером  $24 \times 12 \times 4$  мм. При вращении ротора постоянные магниты создают переменное магнитное поле в зоне расположения МЭ элементов, что приводит к возникновению в них электрического потенциала благодаря МЭ эффекту. Энергия, полученная от МЭ элементов, выпрямляется, а затем запасается. Общие габаритные размеры устройства: диаметр 12 см, толщина 2,4 см. В составе устройства присутствовало 8 МЭ элементов размером  $40 \times 10 \times 0,5$  мм состава Метглас на ЦТС. Все восемь элементов были объединены в единую цепь через выпрямительные мосты.

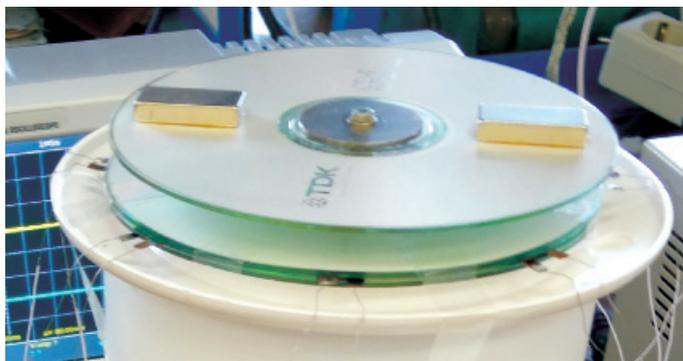


Рис. 2. Макет устройства сбора энергии с использованием МЭ элементов

### Измерительный стенд

В состав стенда вошли МЭ устройство сбора энергии, выпрямительный блок из диодных мостов, осциллограф НМО722, мультиметр НМ8112-3, блок питания НУ3002, коллекторный электрический двигатель, скорость вращения которого управляется напряжением от блока питания. Для измерения переменных и постоянных магнитных полей использовался гауссметр DX-180. С помощью блока питания регулировалась частота вращения электродвигателя. Электродвигатель вращал подвижный диск устройства. С помощью осциллографа проводились измерения потенциала на МЭ элементах. Мультиметр обеспечивал точное измерение тока и напряжения как переменного, так и постоянного выпрямленного сигнала.

### Измерение характеристик МЭ элемента

На рис. 3 приведены характеристики выходного напряжения и тока МЭ элемента в зависимости от частоты при подмагничивающем поле около 40 Э. Таким образом, оптимальный режим работы, при котором МЭ коэффициент достигает максимума  $1,4 \text{ В}/(\text{см} \cdot \text{Э})$ , это около 50 Гц при низкочастотном режиме и  $2,08 \text{ В}/(\text{см} \cdot \text{Э})$  около 41 кГц в режиме резонанса. При подмагничивающем поле 65 Э и переменном магнитном поле 1 Э на частоте 38 Гц ток достигал значения около 0,01 мкА, на частоте резонанса около 41 кГц ток достигал своего максимума около 10 мкА. Для реальных конструкций подобных устройств достичь частот вращения килогерцового диапазона невозможно. Поэтому стремятся либо увеличить частоту до оптимальной для работы МЭ элемента, либо снизить резонансную частоту МЭ элемента до минимально возможной. Снижение резонансной частоты возможно с увеличением длины МЭ элемента или возбуждением в нём колебаний на частоте изгибного резонанса, частота которых может быть ниже 1 кГц.

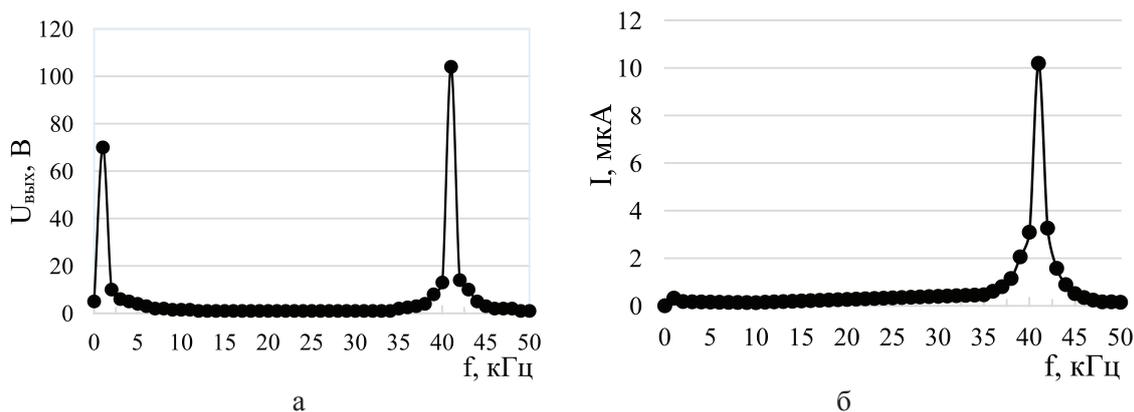


Рис. 3. Характеристика МЭ элемента в зависимости от частоты: а – выходное напряжение, б – выходной ток

Также отметим, что МЭ коэффициент сильно зависит от наличия постоянного магнитного поля, и оптимальным в данном случае является поле величиной около 65 Э, при этом МЭ коэффициент достигает значения 1,32 В/(см·Э).

Значение выходной мощности определяется как произведение напряжения на ток. На рис. 4 показана характеристика выходного значения тока МЭ элемента на частоте 38 Гц при подмагничивающем поле 65 Э в диапазоне переменных магнитных полей от 0 до 20 Э. Максимум мощности при подмагничивающем поле 65 Э и переменном магнитном поле 1 Э составил на частоте резонанса около 0,55 мВт. В то же время в области резонанса при тех же условиях значение выходной мощности составило около 0,55 мкВт. Если величину переменного магнитного поля увеличить до 20 Э, то выходная мощность на частоте 38 Гц составит 0,04 мкВт.

В конструкции макета устройства использовался нерезонансный низкочастотный МЭ эффект. Резонансный эффект об-

ладает несомненным преимуществом по выходной мощности, и его конструктивная реализация планируется в будущем. Для применения резонансного эффекта необходимо уменьшить резонансную частоту, что возможно, если использовать изгибные колебания [7] или изменить геометрические размеры МЭ элементов. Тем не менее исследование конструкции устройства с использованием низкочастотного МЭ эффекта представляет значительный интерес для проектирования устройств сбора энергии.

#### Измерение характеристик генератора

В макете устройства было использовано восемь МЭ элементов, соединённых по два элемента последовательно в четыре группы. Элементы были сгруппированы по два для увеличения выходного напряжения. При соединении МЭ элементов попарно необходимо учитывать их поляризацию. Таким образом, полученные четыре группы элементов далее соединялись с диодными

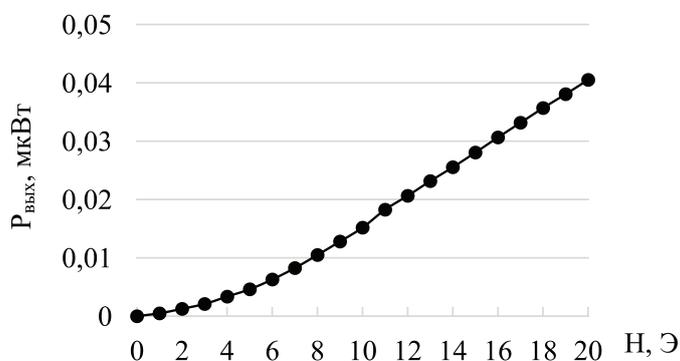


Рис. 4. Характеристика выходной мощности МЭ элемента в зависимости от амплитуды переменного магнитного поля

мостами. Затем выпрямленное напряжение объединялось и проводились измерения выходных характеристик устройства. При частоте переменного магнитного поля около 38 Гц на выходе устройства наблюдалось 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. Режим работы устройства нерезонансный. На рис. 5 показана осциллограмма на выходе устройства.

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. Разработанное устройство может быть применено в конструкциях ветро-электрогенераторных установок, гидрогенераторах, турбогенераторах и др. электрогенерирующей аппаратуре.

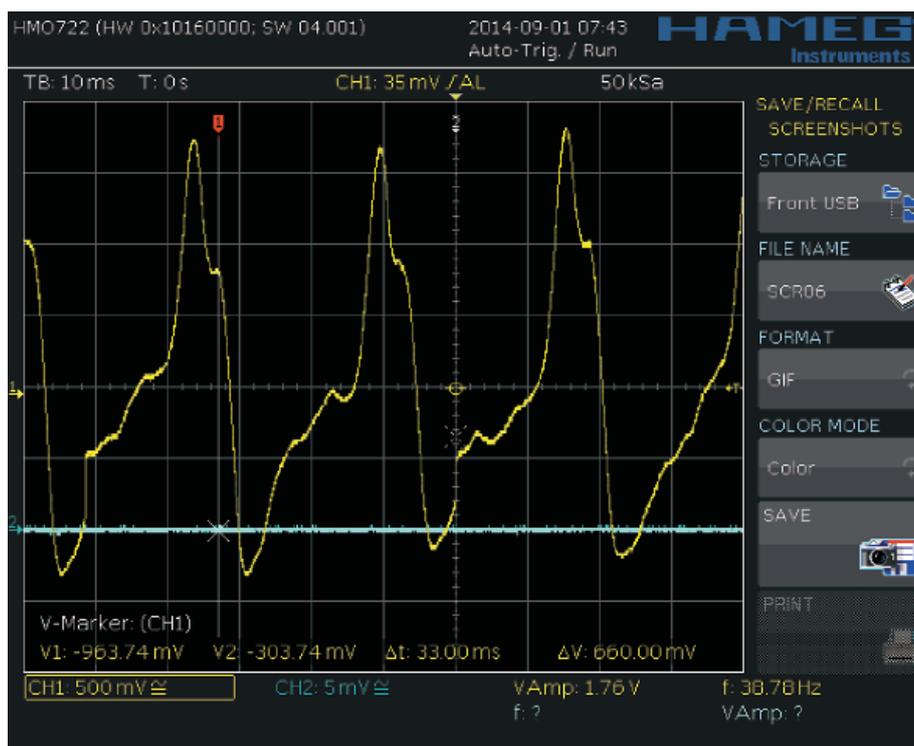


Рис. 5. Осциллограмма выходного напряжения МЭ устройства сбора энергии

По известному МЭ коэффициенту для материала, определённому экспериментально либо теоретически, можно вычислить и выходные напряжения для МЭ элементов:  $U = \alpha_{F,31} \cdot H_1 \cdot d$ , где  $d$  – это толщина МЭ элемента [5].

### Заключение

В работе приведены экспериментальные данные по применению МЭ эффекта для разработки устройства сбора энергии с применением магнитоэлектрических элементов. Предлагаемая конструкция может служить в качестве устройства сбора энергии. В устройстве в качестве источника энергии использованы МЭ элементы. Макет устройства в составе восьми МЭ элементов с размерами одного элемента  $40 \times 10 \times 0,5$  мм на

*Работа выполнена в рамках реализации гранта Российского научного фонда № 15-19-10036.*

### Список литературы

1. Бичурин М.И. и др. Магнитоэлектрические материалы. – М.: Академия естествознания, 2006. – 296 с.
2. Бичурин М.И., Петров Р.В., Соловьев И.Н., Соловьев А.Н. Исследование магнитоэлектрических сенсоров на основе пьезокерамики ЦТС и Метгласа // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 1; URL: [www.science-education.ru/101-5367](http://www.science-education.ru/101-5367).
3. М.И. Бичурин, В.М. Петров. Магнитоэлектрический эффект в магнитострикционно-пьезоэлектрических мультиферроиках // Физика низких температур. – 15/06/2010. – Т. 36, № 6. – С. 680–687.
4. Петров Р.В., Иванов Д.Н. Система сбора энергии с магнитоэлектрическим преобразователем // Вестн. Новг. гос. ун-та. Сер.: Техн. науки. – 2010. – № 55. – С. 42–44.

5. Bichurin M.I., Petrov V.M., and Priya S. Magnetolectric Multiferroic Composites // In: *Ferroelectrics – Physical Effects* // Ed. Mickaël Lallart. – InTech, 2011. – P. 277–302.

6. Bichurin M.I., Petrov V.M., Dong S., Cui X., Zhai J., Li J., Viehland D., Priya S. Dual Magnetic Field and Mechanical Vibrations Energy Harvesting System // *Engineered Multiferroics – Magnetolectric Interactions, Sensors and Devices*, (Mater. Res. Soc. Symp. Proc. Volume 1161E, Warrendale, PA, 2009).

7. Petrov V.M., Bichurin M.I., Srinivasan G., Laletin V.M., Petrov R.V. Bending Modes and Magnetolectric Effects in Asymmetric Ferromagnetic-Ferroelectric Structure // *Solid State Phenomena*. – 2012. – Vol. 190. – P. 281–284.

8. Shashank Priya, Jungho Ryu, Chee-Sung Park, Josiah Oliver, Jong-Jin Choi and Dong-Soo Park. Piezoelectric and Magnetolectric Thick Films for Fabricating Power Sources in Wireless Sensor Nodes // *Sensors*. – 2009. – № 9. – P. 6362–6384; doi:10.3390/s90806362.

9. Bedekar V., Bichurin M., Solovjev I. and Priya S. Multimodal Energy Harvesting System // *Proc. SPIE 8035, Energy Harvesting and Storage: Materials, Devices, and Applications II*, 80350T (May 17, 2011); doi:10.1117/12.884747.

### References

1. Bichurin M.I. et al. Magnitoelektricheskie materialy. *M.: Akademia estestvoznania*, 2006. 296 p.

2. Bichurin M.I., Petrov R.V., Solovjev I.N., Soloviov A.N. Issledovanie magnitoelektricheskikh sensorov na osnove piezokeramiki CTS i Metglasa. *Sovremennye problem nauki i obrazovaniya*. 2012. no. 1; URL: www.science-education.ru/101-5367.

3. Bichurin M.I., Petrov V.M. Magnitoelektricheskii effect v magnitostriktionno-piezoelektricheskikh multiferroikah. *Fizika nizkikh temperatur*. 15/06/2010. T. 36, no. 6. p. 680–687.

4. Petrov R.V., Ivanov D.N. Sistema sbora energii c magnitoelektricheskimi preobrazovatelem. *Vestnik NovSU. Ser.: Tech. nauki*. 2010. no. 55. pp. 42–44.

5. Bichurin M.I., Petrov V.M., and Priya S. Magnetolectric Multiferroic Composites. In: *Ferroelectrics Physical Effects* // Ed. Mickaël Lallart. InTech, 2011. pp. 277–302.

6. Bichurin M.I., Petrov V.M., Dong S., Cui X., Zhai J., Li J., Viehland D., Priya S. Dual Magnetic Field and Mechanical Vibrations Energy Harvesting System. *Engineered Multiferroics Magnetolectric Interactions, Sensors and Devices*, (Mater. Res. Soc. Symp. Proc. Volume 1161E, Warrendale, PA, 2009).

7. Petrov V.M., Bichurin M.I., Srinivasan G., Laletin V.M., Petrov R.V. Bending Modes and Magnetolectric Effects in Asymmetric Ferromagnetic-Ferroelectric Structure. *Solid State Phenomena* Vol. 190 (2012) pp. 281–284.

8. Shashank Priya, Jungho Ryu, Chee-Sung Park, Josiah Oliver, Jong-Jin Choi and Dong-Soo Park. Piezoelectric and Magnetolectric Thick Films for Fabricating Power Sources in Wireless Sensor Nodes. *Sensors* 2009, 9, 6362-6384; doi:10.3390/s90806362.

9. Bedekar V., Bichurin M., Solovjev I and Priya S. Multimodal Energy Harvesting System. *Proc. SPIE 8035, Energy Harvesting and Storage: Materials, Devices, and Applications II*, 80350T (May 17, 2011); doi:10.1117/12.884747.

### Рецензенты:

Захаров А.Ю., д.ф.-м.н., профессор, заведующий секцией кафедры общей и экспериментальной физики, ИЭИС НовГУ, г. Великий Новгород;

Селезнёв Б.И., д.т.н., профессор, директор, ИЭИС НовГУ, г. Великий Новгород.