

АККУМУЛИРОВАНИЕ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ИЗ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НЕ ТЕРЯТЬ НИЧЕГО

М.Гольцова

Проблема дефицита энергии наряду с появлением микросхем с чрезвычайно низким энергопотреблением, а также схем, способных собирать, управлять и сохранять энергию послужили стимулом к созданию нетрадиционных источников питания, преобразующих энергию окружающей среды в электрическую. И сегодня эта технология – горячая тема. Изготовители средств аккумуляирования энергии успешно доказывают возможность замены ими обычных батарей в системах, где применение последних вызывает проблемы: стоят дорого или опасны. Средства аккумуляирования энергии оказались перспективными для транспортной инфраструктуры, автоматизированных систем управления инженерным оборудованием зданий, беспроводных медицинских приложений, сенсорных сетей и т.п. В результате число устройств, питаемых аккумуляированной из окружающей среды энергией, растет "не о дням, а по часам".

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ АККУМУЛИРОВАНИЯ ЭНЕРГИИ ИЗ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Аккумуляирование или сбор энергии из окружающей среды подразумевает преобразование нереализуемой природой (свободной) энергии, которая теряется, в полезную электрическую энергию. Источниками свободной энергии являются:

- фотоны – свет, ИК- и РЧ-излучение;
- колебания, движения человека, ветер, водяные потоки;
- тепловое излучение – градиенты температуры;
- биохимическое воздействие – глюкоза, метаболические реакции.

Энергия, извлекаемая из окружающей среды, невелика, непостоянна и непредсказуема. Поэтому для сопряжения ее источника с вторичным источником мощности (по существу с накопителем энергии – батареей или конденсатором) применяется промежуточный компонент, который преобразует энергию в удобную для дальнейшей обработки форму. Типичное устройство аккумуляирования энергии из окружающей среды состоит из четырех блоков (рис.1):

- источника свободной энергии;

- схемы сбора энергии из окружающей среды и генерации электрического сигнала;
- преобразователя генерируемого сигнала в удобную для дальнейшей обработки форму, содержащего, как правило, датчик, регистрирующий поступающую в виде электрического сигнала собранную энергию, АЦП и маломощный микроконтроллер;
- маломощного трансивера.

Каждому блоку такого устройства присущи определенные недостатки, которые до последнего времени ограничивали экономическую целесообразность их применения. Дешевые и маломощные датчики и микроконтроллеры существуют уже достаточно давно. Сверхмаломощные трансиверы появились сравнительно недавно, но основной блок, сдерживающий широкое распространение систем преобразования энергии из окружающей среды – сам элемент сбора энергии. Существующие сегодня устройства представляют собой трехмерные структуры, содержащие до 30 или более элементов. Эффективность преобразования энергии мала. Но велик потребляемый ток преобразователя. Все это до последнего времени препятствовало созданию быстродействующих

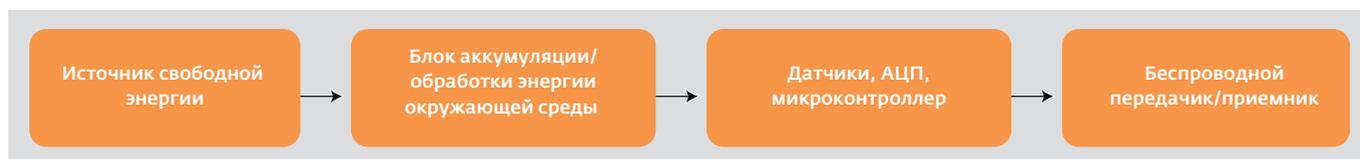


Рис.1. Основные модули типичной системы аккумулирования энергии из окружающей среды

высокоэффективных систем аккумулирования энергии из окружающей среды. Тем не менее, рынок этих устройств успешно развивается и растет.

РЫНОК СРЕДСТВ АККУМУЛИРОВАНИЯ ЭНЕРГИИ

По данным аналитической компании IDTechEX, разработкой систем аккумулирования энергии из окружающей среды в мире занимаются несколько сотен исследовательских организаций и компаний. Объем продаж таких систем в 2011 году составит 0,7 млрд. долл., причем большая часть придется на долю бытовой техники. В беспроводных датчиках в 2011 году найдут применение 1,6 млн. преобразователей энергии на сумму в 13,75 млн. долл. (рис.2). В 2021 году объем их продаж достигнет 4,4 млрд. долл. При этом будет продано 250 млн. датчиков, питаемых преобразователями энергии, средняя стоимость которых будет равна 6 долл. К этому времени преобразователи энергии можно будет найти

в самых разнообразных потребительских товарах, включая планшетные ПК, электронные книги и смартфоны.

Наибольшим спросом на рынке систем преобразования энергии пользуются солнечные батареи и электромеханические устройства преобразования кинетической энергии колебаний/движения. Вместе с тем растет применение и других типов средств аккумулирования энергии, позволяющих подводить питание к ранее недоступным системам. Так, Министерство энергетики США работает с автомобильными гигантами BMW и GM над проблемой преобразования тепла, выделяемого мотором, в питание электронных систем автомобиля. NASA намерена применить термоэлектронные преобразователи для питания планетоходов Марса, работающих в условиях полной темноты. Росту применения преобразователей энергии из окружающей среды способствуют и такие правительственные меры, как решение правительства Великобритании установить в каждом классе школы датчик угарного газа или стремление правительства США установить в автомобилях средства автоматического контроля давления автомобильных шин.

С ростом потребности в малогабаритных устройствах сбора энергии из окружающей среды для питания получающих все более широкое распространение беспроводных систем и сетей

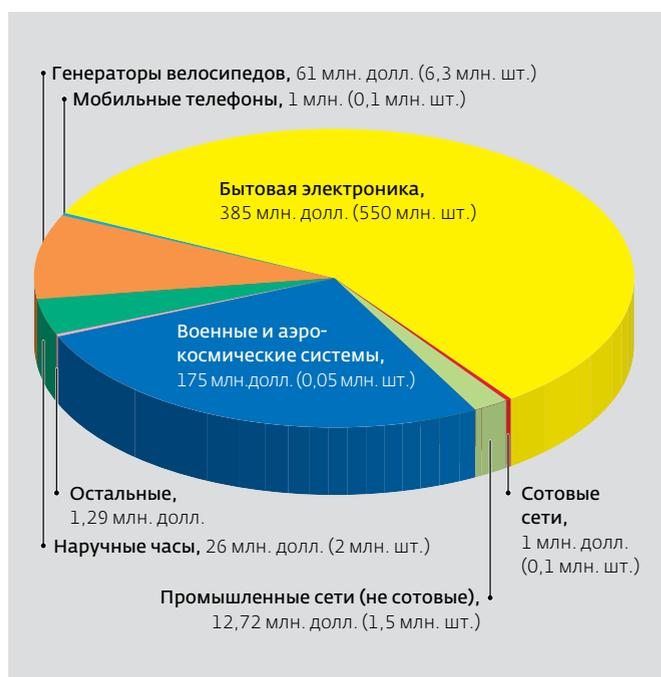


Рис.2. Структура рынка устройств аккумулирования энергии окружающей среды в 2011 году



Рис.3. ЭМ-преобразователь энергии PMG37

на рынке растет число устройств, выполненных по технологии микромашины обработки, или МЭМС-технологии. Основные компании, изготавливающие малогабаритные устройства – Siemens, Infineon, Ferro Solutions, Perpetium, а также такие организации, как IMEC, Фраунгоферовские институты.

Поскольку сегодня существуют разнообразные, зависящие от источника энергии, устройства аккумулирования, остановимся на достаточно широко распространенных устройствах аккумулирования кинетической энергии из окружающей среды.

УСТРОЙСТВА АККУМУЛИРОВАНИЯ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Как правило, преобразователь энергии колебаний содержит рамку, на которой с помощью пружины с коэффициентом упругости k крепится груз массой m . Рамка устанавливается на источнике колебаний. Основное свойство рамки – резонансное колебание, энергия которого равна $P(f) = 4\pi^2 m f^2 Y z_{\max}$, где Y – амплитуда колебаний, z_{\max} – максимальное смещение груза, ограниченное размерами рамки. Таким образом, чем больше амплитуда колебаний, тем больше выходная энергия.

Существуют три метода преобразования энергии колебания в электрическую:

- электростатический (ЭС), при котором измеряется напряжения конденсатора,



Рис.4. ЭМ-преобразователь энергии колебаний, полностью выполненный по МЭМС-технологии

обусловленное смещением одной из его обкладок под действием внешнего усилия;

- пьезоэлектрический (ПЭ), регистрирующий напряжение, которое возникает в результате деформации слоя пьезоэлектрика, нанесенного на стержень, к которому прикреплен груз, перемещаемый под действием кинетической энергии колеблющегося тела;
- электромагнитный (ЭМ) или индуктивный, при котором магнитное тело под действием внешней кинетической энергии перемещается в магнитном поле, вызывая изменение заряда магнитного потока и генерацию напряжения;
- магнитострикционный (МС), при котором изменение магнитного потока под воздействием кинетической энергии регистрируется многослойным магниторезистивным/пьезоэлектрическим, или магнитоэлектрическим (МЭ) преобразователем.

Если ЭС- и ПЭ-преобразователи могут быть изготовлены с помощью МЭМС-технологии, то для создания ЭМ-устройств технология микрообработки используется лишь частично. Это обусловлено сложностью интеграции магнитных материалов и получения катушек с нужным числом витков. В результате, хотя мощность, генерируемая ЭМ-преобразователями, достаточно большая, габариты их тоже не малы. Так, выходная мощность ЭМ-преобразователя PMG37 компании Perpetium (рис.3), источником энергии которого являются колебания необрессоренной массы движущегося железнодорожного вагона, достигает 90 мВт, выходное напряжение – до 10 В [2]. Но при этом диаметр и высота преобразователя равны 55 мм, масса – 655 г.

В то же время мощность, генерируемая ЭМ-микропреобразователем, впервые полностью изготовленным по МЭМС-технологии учеными школы электроники и компьютерной техники Университета Саутгемптона и отделения микросистем Университета Фрайбурга, составляла 46 мкВт (или ~30% колебательной энергии внешней среды) при его объеме всего 0,1 см³ [3]. Преобразователь содержит четыре магнита, укрепленных на подвижной консоли, которая перемещается в катушке индуктивности (ускорение 0,59 м/с при резонансной частоте 52 Гц) (рис.4). Размеры магнитов и свойства катушки оптимизированы для работы при низком уровне внешних колебаний. Разработка микропреобразователя частично финансировалась проектом ЕС по аккумулированию энергии колебаний

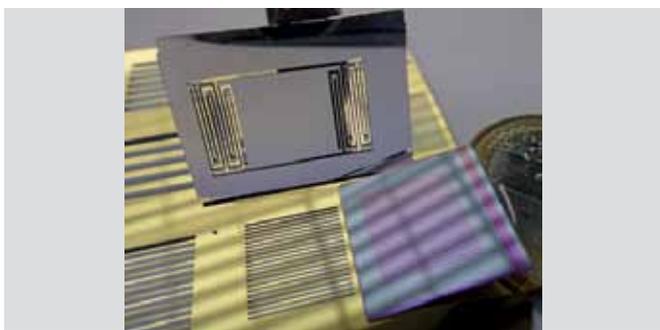


Рис.5. Структура ЭС-преобразователя: электрет на основе SiO_2 (нижний элемент лилового цвета слева), который монтируется на МЭМС сейсмическую массу (вертикальный элемент). Эта сборка затем крепится на расстоянии в несколько микрометров над стеклянной пластиной с электродами (нижний элемент желтого цвета с рисунком электродов) для формирования преобразователя

(Vibration Energy Scavenging, VIBES), проводившемся с января 2004 по май 2007 года.

Сегодня специалисты Университета Фрайбурга добились более высокой выходной мощности. Разработанный ими преобразователь, содержащий четыре катушки с проволоочной намоткой, которые в зависимости от требуемой мощности могут использоваться отдельно или объединяться друг с другом, четыре подвижных постоянных NdFeB-магнита и два кантилевера, способен подавать на 500-Ом нагрузку мощность в 422 мкВт. При этом эффективность аккумулирования энергии из окружающей среды составляет 55,5%. Объем преобразователя составляет 8 см³, масса – 12 г, т.е. прибор перспективен для применения в устройствах, требующих источники энергии малых габаритов и массы [4].

Благодаря изготовлению ЭС- и ПЭ-преобразователей по МЭМС-технологии объем многих устройств аккумулирования энергии из окружающей среды этого типа меньше 1 см³. ЭС-преобразователь, предложенный в Университете штата Джорджии, на основе конденсатора с емкостью, изменяемой в диапазоне 100–1 пФ, при колебаниях с периодом 15 мкс генерирует ток 40,8 мкА, энергию 569 пДж/цикл и среднюю мощность 38 мкВт [5].

Интерес представляет предложенный специалистами LETI (Лаборатория электронной и информационной технологии Комитета по атомной и альтернативной энергии Франции) электростатический МЭМС-генератор, способный извлекать

электрическую энергию из колебаний как малой, так и большой амплитуды. Для получения максимально возможной выходной мощности необходимо обеспечить оптимальный заряд конденсатора, позволяющего согласовывать механическое сопротивление источника колебаний и вход преобразователя. Поэтому в качестве диэлектрика использован разработанный в лаборатории электрет (полимер с фиксированным статическим зарядом) на основе оксида кремния, способный длительно сохранять свой заряд даже при размере электродов конденсатора менее 20 мкм. При изменении положения электрета по отношению к электродам изменяется и распределение электронов, и если к конденсатору присоединена нагрузка, перемещение электрета приведет к появлению электрического сигнала.

При колебании электрета массой менее 2 г на частоте 50 Гц выходное напряжение системы LETI составило 3 В, выходная мощность – ~10 мкВт/г сейсмической массы. Эффективность преобразования кинетической энергии в электрическую составила 60%. Таким образом, выходная мощность зависит в первую очередь не от преобразователя, а от вводимой кинетической энергии. Вот почему самый крупный элемент системы, на долю которого приходится 80% ее массы, – не преобразователь, а сейсмическая масса, требуемая для подачи на него большой кинетической энергии (рис.5).

Для дальнейшего увеличения диапазона частот и амплитуды колебаний преобразователя специалистами лаборатории разработана механическая пружина, на которую получен патент. Пружина ограничивает относительное смещение сейсмической массы без рассеяния энергии и обеспечивает постоянство относительного смещения электрета в широком диапазоне частот. Кроме того, в лаборатории ведется разработка

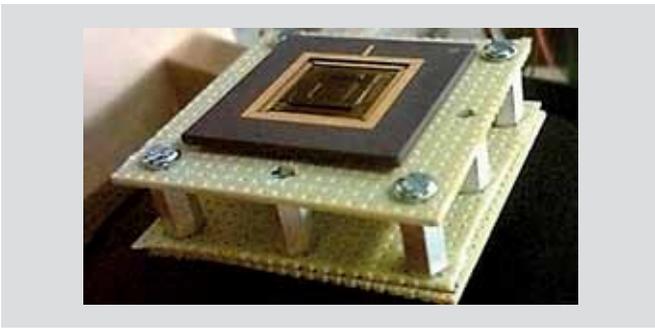


Рис.6. МЭМС ПЭ-преобразователь энергии МТИ

методов, которые позволяют создать ЭС-структуру, способную резонировать на любой частоте колебаний. Первый метод заключается в использовании пьезоэлектрического эффекта для изменения механических параметров структуры с тем, чтобы можно было согласовывать резонансную частоту преобразователя с изменяющейся частотой колебаний (например, при использовании преобразователя в движущемся автомобиле, поезде или самолете). Эксперименты показали, что резонансную частоту системы можно регулировать в 30%-ном диапазоне ее основного значения. Мощность, потребляемая цепью обратной связи, требуемой для автоматической подстройки резонансной частоты, оценивается в 5 мкВт.

Второй запатентованный метод заключается в усилении произвольного колебания путем синхронизации реакции механической системы с ускорением колебаний источника. Это обеспечит максимально возможное поглощение системой аккумулирования вводимой энергии колебаний. Для реализации этого метода при достижении максимальной скорости колебаний источника направление смещения сейсмической массы с помощью короткой реакции механизма упругого срабатывания изменяется. При каждом срабатывании это приводит к увеличению скорости смещения сейсмической массы в два раза по отношению к скорости колебания. Следовательно, увеличивается и кинетическая энергия сейсмической массы. При испытании этого метода для выполнения упругого срабатывания использовался пьезоэлектрический актюатор, что позволило увеличить относительное смещение сейсмической массы в шесть раз по сравнению с простой резонансной системой [6].

Аккумуляция энергии из окружающей среды с помощью пьезоэлектрических

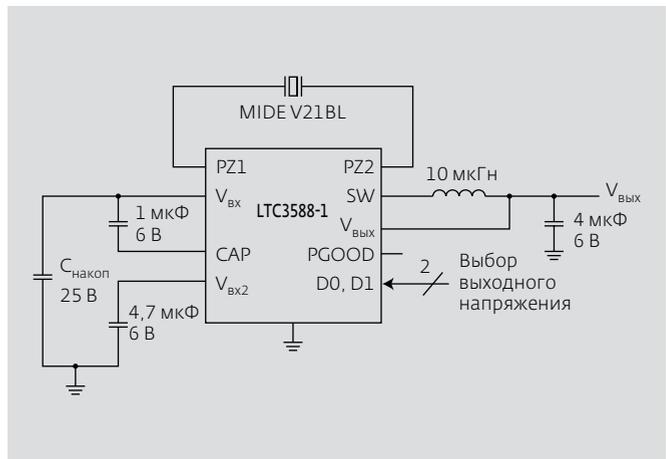


Рис.7. Источник питания на основе ПЭ-преобразователя MIDE V21BL

преобразователей – очень популярная технология, позволяющая генерировать мощность до нескольких десятков или даже сотен ватт (правда, при использовании преобразователей с несколькими кантилеверами и многослойным пьезоэлектриком). Поэтому интерес представляет разработанный учеными Массачусетского технологического института (МТИ) ПЭ МЭМС-аккумулятора, выходная мощность которого, по утверждению его создателей, на два порядка превышает этот параметр современных ПЭ-преобразователей аналогичного размера. Разработчики отказались от обычной структуры ПЭ-преобразователя, содержащей тонкий кантилевер с прикрепленной к нему пленкой пьезоэлектрика. Вместо нее предложена подобная мостовой схеме структура, укрепленная на двух концах микросхемы преобразователя. На мост осаждалась пленка титаната-цирконата свинца, в середине которой крепился груз (рис.6).

Испытания преобразователя показали, что он работает в широкой полосе низких частот. Согласно расчетам, прибор с одним слоем пьезоэлектрика может генерировать мощность в 45 мВт. При этом стоимость его будет низкой. Разработчики рассчитывают увеличить выходную мощность до 100 мВт, достаточную для питания беспроводной сети разумных датчиков, которые смогут бесконечно общаться друг с другом [7].

Важный компонент системы питания на основе устройств аккумулирования энергии из окружающей среды – электронная схема эффективного формирования сигнала на основе собранной энергии. И прорывом в этом направлении могут стать выпущенные компанией Linear

Technology микросхемы преобразования/передачи собранной энергии. Микросхема LTC3588-1, которая в основном предназначена для преобразования энергии пьезоэлектрического устройства аккумулирования в стабильное напряжение, содержит двухполупериодный выпрямитель с малыми потерями и высокоэффективный понижающий преобразователь (рис.7). В режиме блокировки пониженного напряжения с широким гистерезисом при сверхнизком токе (450 нА) микросхема заряжает внешний накопительный конденсатор до уровня энергии, пригодного для эффективного преобразования ее в выходное напряжение без прекращения зарядки накопительного конденсатора.

Входное напряжение микросхемы составляет 2,7-20 В, выходное напряжение, задаваемое выводами, – 1,8; 2,5; 3,3 или 3,6 В, что достаточно для питания беспроводных передатчиков или сенсоров. Выходной ток – до 100 мА, ток покоя – 950 нА. Для функционирования микросхемы требуется незначительное число внешних компонентов. Поставляется она в 10-выводных корпусах DFN размером 3×3 мм или MSOP-10 с пониженным тепловым сопротивлением.

Сегодня из трех методов аккумулирования кинетической энергии из окружающей среды наиболее предпочтителен пьезоэлектрический метод, благодаря компактной конфигурации преобразователей этого типа и возможности их реализации с помощью МЭМС-технологии. Вместе с тем, такие недостатки, как быстрое старение, деполяризация и хрупкость затрудняют их широкое применение (см. таблицу)

Это побудило разработчиков изучить возможность использования для сбора кинетической энергии эффекта Виллари магнитострикционного материала (МсМ), т.е. эффекта его

перемещения под воздействием механического напряжения, вызываемого колебанием. Внимание исследователей привлекают два имеющихся на рынке МсМ – Terfenol-D (кристаллический сплав тербия, диспрозия и железа) и Metglas 2605SC (аморфное металлическое стекло состава железо, бор, кремний и углерод). Благодаря гигантскому эффекту магнитострикции Terfenol-D в основном применяется для получения больших напряжений ПЭ-преобразователя.

Специалисты Университета Северной Каролины использовали МсМ Metglas 2605SC для создания нового типа преобразователя кинетической энергии из окружающей среды. Он содержит ламинат Metglas 2605SC (толщина одного слоя 18 мкм), нанесенный на медную пластину, вокруг которой намотана воспринимающая катушка (рис.8). Изгиб медной пластины под воздействием колебаний приводит к изменению намагниченности МсМ ламината, которое регистрируется воспринимающей катушкой и преобразуется в электрическую энергию. Чтобы

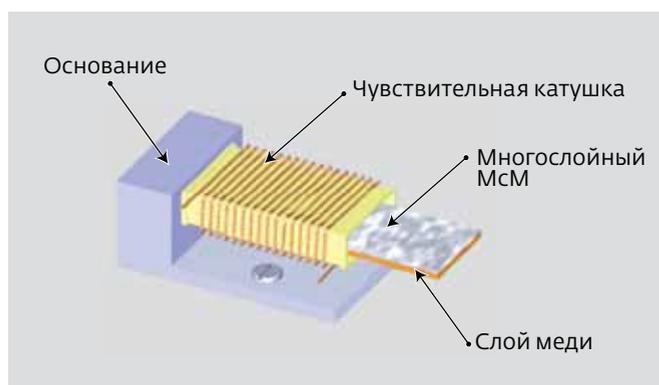


Рис.8. Образец МсМ-преобразователя кинетической энергии

Сравнение различных типов аккумуляторов кинетической энергии из окружающей среды

Тип прибора	Достоинства	Недостатки
Электромагнитный	Отсутствие надобности в разумном материале Отсутствие внешнего источника напряжения	Большие размеры, необходимость применения магнита и воспринимающей катушки Трудность выполнения по МЭМС-технологии Максимальное выходное напряжение 0,1 В
Электростатический	Отсутствие надобности в разумном материале Совместимость с МЭМС-технологией Выходное напряжение 2–10 В	Необходимость во внешнем источнике напряжения (для зарядки) Необходимость в механическом ограничении Емкостные характеристики
Пьезоэлектрический	Отсутствие надобности во внешнем источнике напряжения Выходное напряжение 2–10 В Компактная конфигурация Совместимость с МЭМС-технологией Высокий отклик кристаллического материала	Проблема деполяризации Хрупкость пленки пьезоэлектрика Плохая связь пьезопленки Ток утечки Высокое полное выходное сопротивление
Магнито-стрикционный	Сверхвысокий коэффициент связи $>0,9$ Отсутствие проблемы деполяризации Высокая гибкость Возможность аккумуляции энергии высокочастотных колебаний	Эффект нелинейности характеристик Наличие воспринимающей катушки Возможная потребность в магнитном поле смещения Трудность выполнения по МЭМС-технологии

исключить необходимость применения смещающего магнитного поля, а также уменьшить размеры преобразователя, МсМ ламинат закалялся в сильном магнитном поле, направленном перпендикулярно его оси деформации. Для реализации источника питания энергия, собранная преобразователем, накапливалась суперконденсатором емкостью 3 Ф и размером 25×35 мм. При зарядке конденсатора средняя мощность и плотность мощности достигали 575 мкВт и 606 мкВт/см³, соответственно.

Сейчас усилия разработчиков сосредоточены на совершенствовании преобразователя за счет:

- увеличения толщины слоя ламината с тем, чтобы сократить число его слоев, уменьшить потери, вносимые используемым для крепления на пластине адгезивом и улучшить характеристики прибора;

- уменьшения размеров воспринимающих катушек благодаря изготовлению их по МЭМС-технологии;
- определения истинного значения коэффициента преобразования.

Отмечается, что работы университета финансировались Национальным научным фондом США [9].

В последнее время интерес разработчиков устройств аккумуляции энергии из окружающей среды вызывает полученный в 1998 году специалистами ВВС магнито-стрикционный материал – галфенол (от названия входящих в него материалов – галлия и железа, ferrum). Галфенол – прочный и вместе с тем податливый материал, не вызывающий проблем при обработке и использовании. Его можно ковать и штамповать, сваривать с другими материалами, содержащими железо, он выдерживает температуру до 700°C, т.е.

может быть использован для создания устройств, работающих в средах со значительными механическими колебаниями и в широком диапазоне температур. Галфенол уже находит применение при создании преобразователей кинетической энергии. В конце 2010 года ученый Университета Каназава (Япония) Тошиюки Уэно сообщил о разработке миниатюрного преобразователя, выходная мощность которого достигала 1,56 мВт при частоте колебаний 357 Гц (плотность мощности ~ 22 мВт/см³), что примерно в 20 раз больше, чем у современных преобразователей кинетической энергии колебаний [10].

Интерес к преобразователям кинетической энергии колебаний проявляют и первооткрыватели галфенола, рассматривающие возможность создания одно-, двух- и трехмерных устройств на его основе для аккумуляции энергии, возбуждаемой движущимся кораблем.

* * *

Нетрадиционные источники питания электронных систем позволяют заряжать или заменять батареи, а также работать с ними совместно. Применение аккумуляторов энергии из окружающей среды позволит отказаться от проводов для передачи электрических сигналов или подачи питания электронным и электрическим системам. Они найдут широкое применение для питания беспроводных маломощных сенсорных сетей, контролируемых и оптимизирующих сложные промышленные процессы, а также удаленные комплексы. Энергия, теряемая при движении, непогоде или производственным оборудованием может быть собрана и использована.

ЛИТЕРАТУРА

- Energy Harvesting and Storage for Electronic Devices 2011-2021. – www.idtechex.com/research/reports/energy-harvesting-and-storage-for-electronic-devices-2011-2021-000270.asp
- PMG37 Vibration Energy Harvester Technical Datasheet. – <http://perpetuum.isonlinehere.com/resource/PMG37%20-%20Technical%20Flyer%20Iss%20C.pdf>
- Bouendeu E., Greiner A., Smith P.J., Korvink J.G.** A Low-Cost Electromagnetic Generator for Vibration Energy Harvesting. – www.mendeley.com/research/a-micro-electromagnetic-generator-for-vibration-energy-harvesting/
- Bouendeu E., Greiner A., Smith P.J., Korvink J.G.** A Low-Cost Electromagnetic Generator for Vibration Energy Harvesting. – ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=5483175
- Torres E.O., and Rincón-Mora G.A.** Electrostatic Energy Harvester and Li-Ion Charger Circuit for Micro-Scale Applications. – users.ece.gatech.edu/rincon-mora/publications/journals/mwscas06_harvestckt.pdf
- Despesse G.** Self-adaptive MEMS vibration energy harvester targets low frequencies. – www.eetimes.com/design/microcontroller-mcu/4214488/Self-adaptive-MEMS-vibration-energy-harvester-targets-low-frequencies.
- MIT researchers build a bridge to better energy harvesting MEMS device. – <http://www.gizmag.com/mit-mems-device/19856>.
- Piezoelectric Energy Harvesting Power Supply. – www.linear.com/docs/Datasheet/35881fa.pdf
- <http://www.scribd.com/doc/37418182/LTC3588-1-Overview>
- Wang L., Yuan F.G.** Energy harvesting by magnetostrictive material. – www.mae.ncsu.edu/ssml/publication/Journals/Wang_SMS_2008.pdf
- Galfenol-based kinetic button battery boasts high energy density. – electronics.eetimes.com/en/galfenol-based-kinetic-button-battery-boasts-high-energy-density.html?cmp_id=7&news_id=222905236