

## АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ ОСВОЕНИЕ "ДАРОВОЙ" ЭНЕРГИИ

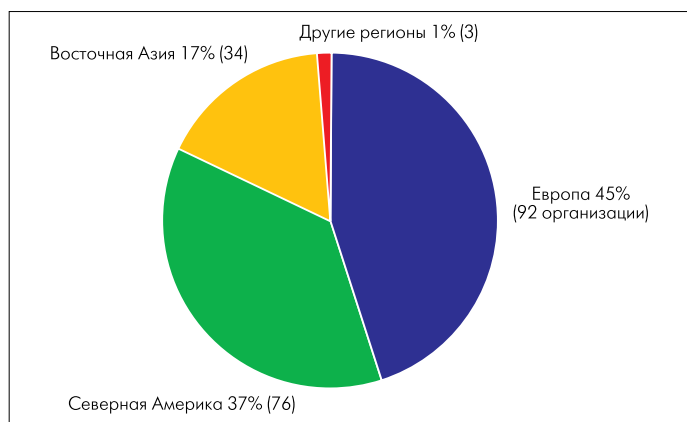
Альтернативные источники энергии в виде ветряных и водяных мельниц существуют столетия (правда, служат они для получения большой мощности, или "макроэнергии"). За последнее время сформировался небольшой, но быстро развивающийся сегмент рынка систем освоения микроэнергии из окружающей среды (Energy Harvesting). Средства "даровой" энергии, как иногда называют такие системы, позволяют получать практически неиссякаемые "зеленые" источники энергопитания. И как таковые, они способствуют решению одной из основных задач, стоящих перед конструкторами электронных систем, — созданию непрерывно работающего, по возможности без батарей, устройства (безбатарейное питание). Несколько лет назад идея получения микроэнергии из окружающей среды считалась научным курьезом. Но разработка электронных систем со сверхнизким энергопотреблением неожиданно привела к выходу технологии Energy Harvesting за пределы лабораторий. И сегодня в числе 10 основных перспективных направлений развития современной электроники называют и технологию Energy Harvesting\*.

Технология преобразования энергии окружающей среды в электрическую рассматривается как "безбатарейная" технология, обеспечивающая электрическое питание систем, в которых применение батарей затруднено. Эта технология перспективна для питания приборов, которые должны непрерывно работать без замены источника питания в течение десятилетий, а также беспроводных датчиков, переключателей, разнообразных электронных устройств — от гаджетов до портативных компьютеров и печатных электронных схем. Вместе с тем схемы освоения энергии окружающей среды могут выполнять функции дополнительного источника питания при использовании совместно с микробатареями, позволяя накапливать энергию при питании системы от батареи и отдавать ее при необходимости.

\* М.Гольцова. Электроника 2010 года. Технологии, за которыми надо следить. — Наст. номер, с.90.

В.Майская

Технология Energy Harvesting развивается уже несколько лет, но только сейчас появилась возможность ее коммерческой реализации. Это обусловлено, во-первых, тем, что каждое новое поколение микросхем потребляет все меньше энергии. Так, по оценкам компании Texas Instruments, подобно закону Мура, но с обратным знаком, потребляемая мощность цифровых микросхем каждые 18 месяцев уменьшается в два раза. Во-вторых, развитие технологии беспроводных сетей привело к появлению систем и протоколов радиосвязи, обеспечивающих передачу все большего объема информации при все меньшей потребляемой мощности. И, наконец, существенно расширились возможности разнообразных устройств освоения энергии окружающей среды. Первоначально потребность в источниках энергии, "добываемой" из окружающей среды, возникла в Европе при реализации беспроводных средств автоматизации и управления системами зданий. Возможности этой технологии были оценены в Северной Америке. И сейчас, как показали данные опроса более 200 организаций 22 стран, опубликованные консультативной компанией IDTechEx (Великобритания), разработки в области технологии Energy Harvesting в основном сосредоточены в Европе и Северной Америке. На эту работу значительные средства отчисляют также и некоторые крупные организации стран Восточной Азии (рис.1). Правительство Германии, отдавая должное освоению энергии окружающей среды, ввело пункт, посвященный этой проблеме, в исследовательскую программу "Автономные микросистемы", на которую планируется ассигновать ~685 млн. долл. В целом в мире около 500 организаций разрабатывают или уже применяют системы освоения энергии окружающей среды, отличные от фотовольтаических. Однако и большинство новых фотовольтаических устройств, разрабатываемых 650 организациями мира, очевидно, также найдут применение в системах освоения энергии окружающей среды. Сегодня основной вопрос заключается в том, найдет ли эта технология применение в таких перспективных и популярных системах, как беспроводные портативные системы, медицинские приборы, средства контроля условий окружающей среды, контроля состояния автомобильных систем и т.п. Или же она по-



**Рис. 1. Распределение работ в области Energy Harvesting технологии**

прежнему будет предназначена для изделий, ориентированных на небольшие специализированные сегменты рынка. По мнению аналитической компании Darnell Group (США), изучающей рынок средств освоения энергии окружающей среды с 2005 года, в 2009–2010 годы следует ожидать перехода технологии Energy Harvesting из стадии "новичка" на рынке в стадию роста продаж. Это мнение основано на том факте, что в 2009 году компания EnOcean выпустила на рынок третье поколение изделий этого класса. Первое поколение средств освоения энергии окружающей среды компания представила в 2002 году. На 22-й международной выставке электронных компонентов, систем и приложений Electronica-2006 (Мюнхен) уже многие европейские компании демонстрировали первые Energy Harvesting продукты. В ноябре 2009 года Союз производителей средств освоения энергии окружающей среды, сформированный компанией EnOcean, опубликовал стандарт на Energy Harvesting технологию. В Союз входят более 70 компаний, разрабатывающих беспроводные датчики и устройства управления, способные функционировать без батарей. В середине 2009 года и ZigBee Alliance, международная некоммерческая отраслевая ассоциация, продвигающая открытый стандарт беспроводных сетей для автоматизации жилых, офисных и промышленных помещений, объявила о намерении выпустить стандарт ZigBee Green Power на приборы с собственными источниками питания на основе технологии Energy Harvesting. Эти приборы смогут беспрепятственно устанавливать связь друг с другом в сетях стандарта ZigBee и ZigBee Pro.

И действительно, по оценкам компании IDTechEx, продажи систем освоения энергии окружающей среды за период 2009–2019 годы увеличатся с 611 млн. до более 4 млрд. долл. При этом в 2009 году 67% этих систем использовалось в бытовой технике, в 2019-м их доля в этом секторе рынка составит 75%. Движущая сила развития технологии Energy Harvesting – беспроводные сенсорные сети. По данным компании Darnell Group, в 2013 году в беспроводных сенсорных сетях будут реализованы примерно 164 млн. систем Energy Harvesting, что соответствует среднегодовому темпу роста ~65%. Вот почему создаваемые

сегодня системы освоения энергии окружающей среды в основном предназначены для такого применения.

## УСТРОЙСТВА СБОРА И ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

В природе существует бесконечное число источников энергии, и сейчас появляется все больше публикаций о создании сложных эзотерических систем. Но пока перспективные методы Energy Harvesting основаны на преобразовании в "полезную" энергию светового излучения, кинетической энергии (в основном генерируемой пьезоэлектрическими элементами или гибкими эластомерами) и энергии, возникающей при разности температур источника тепла и среды. Это объясняется малыми габаритами таких систем и, следовательно, достаточно большой удельной энергией в пересчете на их объем. Кроме того, эти системы характеризуются высокой эффективностью (до 60%), малой стоимостью в пересчете на вырабатываемую мощность и продолжительным сроком жизни.

Электрическую энергию можно "извлекать" и из ВЧ-излучения, хотя пока она значительно меньше, чем энергия, получаемая с помощью указанных трех методов. Значения выходной энергии систем, в которых используется один из этих методов, в зависимости от эффективности преобразования, размера системы и среды освоения могут отличаться на несколько порядков. Так, согласно оценкам компании Texas Instruments, четыре метода позволяют получать следующие уровни энергии (мкВт/см<sup>2</sup>):

Вибрации/перемещения человека (в герцевом диапазоне).....	4
промышленных систем (в килогерцевом диапазоне).....	800
Изменение температуры человека.....	60
промышленных систем.....	1–10
Световое излучение наружное.....	10000
в помещении.....	100
ВЧ-излучение GSM (900 МГц).....	0,1
WiFi (2,4 ГГц).....	0,001

**Кремниевая солнечная батарея** – наиболее известный преобразователь – позволяет в среднем получать напряжение ~0,6 В. Ее средняя эффективность преобразования составляет ~10–25% (максимальное значение – 41%). Коэффициент полезной мощности (отношение полученной средней мощности к мощности, которая может быть получена при постоянном преобразовании солнечной энергии) равен 15–20%. Ток, генерируемый солнечной батареей, пропорционален интенсивности падающего света. Для увеличения тока солнечные батареи можно соединять параллельно, что не вызывает затруднений. Но последовательное их соединение для увеличения напряжения проблематично.

Перспективны и солнечные батареи, выполненные на органических материалах и оптоволоконна на основе сенсibilизированных красителей (Dye-sensitized solar cells, DSSC). Хотя срок их службы составляет всего от одного до пяти лет, они

дешевы, прозрачны, работают при низких уровнях освещенности. К тому же их изготавливают путем печати на подложки большой площади. Такие солнечные батареи могут успешно применяться в системах питания устройств со средним сроком службы: медицинских приборах одноразового действия, торговых бирках, электронных этикетках.

Разработаны солнечные батареи со сроком службы до 20 лет – на основе нанокремния, диселенида меди-индия-галлия, а также тонкопленочные на основе теллурида кадмия.

В последнее время появляются новые типы миниатюрных солнечных батарей, которые отличаются от традиционных кремниевых элементов. Ряд компаний, в том числе Konarka Technologies (США) и Sony изучают возможность создания фотоэлектрических элементов, преобразующих в электрический ток энергию УФ- и ИК-излучений. В Институте перспективной промышленной науки и технологии Японии (Advanced Industrial Science and Technology, ASIT) разработаны гибкие прозрачные пленочные солнечные элементы на основе производной фулерена.

**Устройства освоения кинетической энергии** демонстрируют неограниченные возможности получения энергии из ничего. Существуют три основных типа источников вибрации:

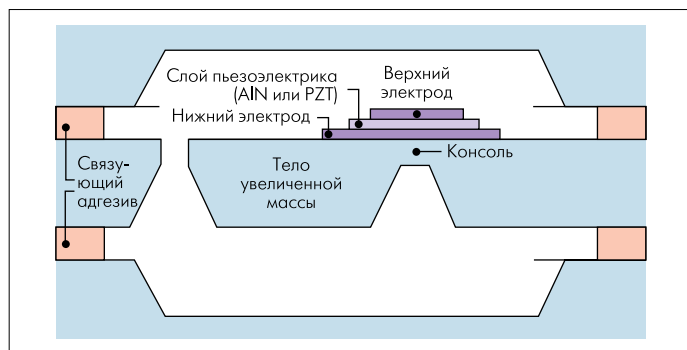
- промышленные, характеризуемые вибрацией на "фиксированной частоте" электродвигателей переменного тока и насосов, работающих от электросети с частотой 50 (европейские страны) или 60 Гц (США). Это допускает освоение механической энергии в узком диапазоне частот;
- структурные, при которых амплитуда колебаний (смещение) и значение ускорения  $g$  меньше, чем у остальных двух источников колебаний;
- транспортные устройства, амплитуда колебаний которых и значение ускорения достаточно велики, но велика и доля случайных колебаний, вызываемых ямами/неровностями дороги, .

Устройства освоения кинетической энергии преобразуют энергию перемещений и вибраций в электрическую энергию с помощью электрического, магнитного полей или пьезоэлектрического эффекта. В основе электростатического (емкостного) метода освоения энергии лежит эффект изменения емкости МЭМС-конденсатора в результате изменения расстояния между его обмотками под действием вибрации. Основное достоинство таких источников энергии – совместимость с технологией изготовления микросхем. Плотность мощности, получаемая с помощью этого метода, средняя.

Действие электромагнитного преобразователя основано на перемещении в магнитном поле катушки индуктивности, присоединенной к колеблющейся консоли, что приводит к генерации импульса напряжения малой амплитуды. Электромагнитные преобразователи используются в системах освоения энергии окружающей среды компании EnOcean.

Электромагнитным преобразователям энергии вибрации или перемещения отдает предпочтение и компания Perpetuum (Великобритания). Компания считает такие преобразователи высоконадежными. К тому же, они изготавливаются по хорошо отработанной технологии, не требующей применения новых "экзотических" материалов. В микрогенераторах семейства PMG, предназначенных для источников питания чувствительных элементов беспроводных сенсорных сетей, используются запатентованные магнитные схемы, связанные с механическими резонаторами. Первые микрогенераторы серии PMG17 компании предназначены для освоения энергии вибрации электродвигателей переменного тока машинного оборудования на двойной частоте электросети, т.е. на 100 Гц при 50-Гц сети и 120 Гц при 60-Гц сети. Важное достоинство преобразователя PMG17 – высокая эффективность: при вибрации 50-Гц электродвигателя со среднеквадратическим значением ускорения 0,025g минимальное значение генерируемой мощности в полосе 2 Гц составляет 0,5 мВт. Генерируемая мощность устройства, рассчитанного на освоение энергии вибрации 60-Гц электродвигателя, при ускорении 0,025g и частоте 120 Гц составляет 1 мВт, при том же ускорении и частоте 119 Гц – 0,6 мВт и при ускорении 0,05g и частоте 122 Гц – 1 мВт. Диапазон рабочих температур микрогенератора составляет -40...85°C, расчетное среднее время наработки на отказ – 440 лет (!). PMG17 отвечает требованиям сертификата взрывобезопасности ATEX и может применяться для питания сенсорных сетей, микропроцессоров и трансиверов стандарта 802.15.4, устанавливаемых в опасных газовых, химических и нефтехимических средах. В 2009 году компания выпустила третье поколение микрогенераторов – серию PMG37 в корпусе из нержавеющей стали со сварным уплотнением. Их выходная мощность составляет 1–90 мВт, выходное напряжение достигает 10 В.

Но пока чаще всего для преобразования энергии вибрации или перемещения применяются пьезодатчики. Как правило, в системах, работающих на основе этого метода, используется исполнительный механизм в виде консоли с чувствительной массой на ее конце. Так, пьезоэлектрический генератор электрической энергии, созданный в бельгийском Межвузовском центре микроэлектроники (Interuniversity Microelectronics Centre, IMEC), представляет собой пьезоэлектрический конденсатор, расположенный на консоли под которой в ее конце находится тело достаточно большой массы (рис.2). Один электрод конденсатора изготовлен из платины, второй – из алюминия. Материал диэлектрика – нитрид алюминия, AlN (в первоначальном образце использовался цирконат-титанат свинца, PZT), благодаря чему процесс изготовления генератора микроэнергии совместим с полупроводниковой технологией. Кроме того, скорость осаждения AlN в три раза выше, чем у цирконата-титаната свинца, и контроль композиции не представляет собой проблему, поскольку нитрид алюминия отли-



**Рис.2. Структура пьезоэлектрического генератора электрической энергии Межвузовского центра микроэлектроники**

чается стехиометрическим составом. При вибрации консоли тело чувствительной массы приводит к растяжению пьезоэлектрика и генерации напряжения. Выходная мощность экспериментального преобразователя энергии вибрации в электрическую энергию составляет 60 мкВт при вибрациях с ускорением 2g на собственной частоте 500 Гц, соответствующей частоте колебаний промышленного оборудования и автомобильных шин. Следует отметить, что основная проблема преобразователей энергии вибрации — высокая чувствительность генерируемой мощности к собственной частоте.

Выходная энергия преобразователя при работе на собственной частоте может превышать энергию, получаемую при значениях частоты колебаний, отличных от собственной частоты, в 200 раз. Вот почему компании, создающие устройства освоения энергии вибрации, совместно с заказчиками активно работают над тем, чтобы их изделия как можно точнее соответствовали собственной частоте систем, в которых они будут использованы. В декабре 2009 года IMEC объявил о создании пьезоэлектрического преобразователя, способного генерировать мощность до 85 мкВт. Преобразователь состоит из кремниевоего тела, свободно укрепленного на консоли из нитрида алюминия. Путем изменения размеров консоли и кремниевоего тела можно регулировать собственную частоту пьезоэлектрического преобразователя в диапазоне 150–1200 Гц. Преобразователь характеризуется высокой выходной мощностью, достигаемой благодаря разработанному процессу герметизации на уровне пластины. Разработчики установили, что выходную мощность преобразователя можно существенно увеличить при герметизации его в вакууме. Суть трехэтапного процесса, разработанного IMEC, заключается в нанесении на стеклянные крышки адгезива, вакуумно-связанного с двумя сторонами обработанной пластины, и в последующем разделении пластины на кристаллы. Пьезоэлектрическое устройство освоения энергии вибрации было подключено к температурному датчику, потребляемая мощность которого было снижена с 1,5 мВт до  $\pm 10$  мкВт. При возбуждении колебаний на частоте 353 Гц и ускорении 0,64g система генерировала энергию, достаточную для питания датчика и передачи данных измерений базой станции каждые 15 с.

Чтобы снизить зависимость чувствительности преобразователей от собственной частоты, ряд компаний разрабатывают собственные пьезоэлектрики. Так, компания Advanced Cerametrics (ACI), США, разработала пьезоэлектрик на основе углеродного волокна, полученного карбонизацией гидратцеллюлозного волокна. Его исходным материалом служит целлюлоза, растворенная в едком натрии и воде. Раствор смешивается с пастообразной смесью пьезоэлектрической керамики и скручивается в 10-мкм волокна, которые затем отжигаются. Преобразователь на основе таких пьезоэлектрических волокон, названных Vimorph, может генерировать напряжение с полным размахом 400 В (некоторые преобразователи на базе таких волокон генерировали напряжение до 4000 В). При вибрации с частотой 30 Гц для получения энергии в 1 Дж требуется 13 с.

Компания Mide Technologies для упрочнения преобразователя герметизирует пьезоэлектрическую консоль, на конце которой укреплен чувствительная масса, каптоном (полимерной пленкой фирмы DuPont).

В системах микрогенераторов компании AdaptivEnergy (США) для возбуждения тока при воздействии вибрации применяется упрочненный ламинированный пьезодатчик (Ruggedized Laminated Piezo, RLP). Датчик выполнен на основе тонкой пластины из нержавеющей стали, на две стороны которой с помощью разработанного компанией полиимидного связующего вещества нанесен пьезоэлектрик (титанат-цирконат свинца). На внешнюю поверхность пьезоэлектрика также наносится связующее вещество для удержания пластины на керамической подложке. Состав полиимидного связующего вещества подбирается так, чтобы при охлаждении структуры после присоединения пьезоэлектрика усадка стальной пластины и керамики была больше, чем пьезоэлектрика. Это приводит к упрочнению пьезоэлектрика, что не только позволяет получить большое выходное напряжение преобразователя, но и увеличить размах при перемещении консоли и ослабить разрушение керамики при растяжении. На конце RLP-пластины крепится тело определенной массы, которое и обеспечивает перемещение пластины при воздействии вибрации. Метод крепления позволяет изме-



нять длину консоли и тем самым регулировать точность частотной настройки в пределах 2–3 Гц.

Системы освоения кинетической энергии позволяют получать значения напряжения от нескольких вольт до 1 кВ (преобразователи на основе пьезоэлектрических элементов). Эффективность преобразователей кинетической энергии составляет 25–50%.

**Системы освоения тепловой энергии** функционируют на основе эффекта Зеебека, согласно которому при разнице температур двух различных металлов или полупроводников возможно возбуждение электрического поля. Термоэлектрический генератор (ТЭГ) состоит из соединенных последовательно термопар с параллельными температурными полями. Значение возбуждаемого напряжения зависит от размера ТЭГа, температуры окружающей среды и, если преобразуется тепловая энергия человека, от его обмена веществ. До последнего времени выходная мощность ТЭГа была невелика. Но последние работы молодой компании Thermo-Life Energy (США) позволили с помощью преобразователя диаметром 9,3 мм, толщиной 1,4 мм и массой 0,23 г, состоящего из более чем 5 тыс. тонкопленочных термопар, получить мощность 135 мкВт (напряжение 5,5 В, ток ~25мкА) при разности температур 10К. В принципе преобразователь рассчитан на работу при разнице температуры термопар до 100К. Компания считает одним из основных применений преобразователя – системы освоения тепловой энергии человека.

**Система освоения энергии ВЧ-излучения** компании Intel выполнена на основе беспроводного преобразователя радиочастотной энергии окружающей среды WARP (Wireless Ambient Radio Power). Система смогла "собрать" мощность в 60 мВт из ВЧ-сигнала мощностью 960 кВт в диапазоне 674–580 МГц, излучаемого телебашней, находящейся от нее на расстоянии 4 км. Опытная система, содержащая преобразователь энергии ВЧ-излучения, выполненный на печатной плате размером 50×100 мм, была присоединена к антенне обычного приемника, предназначенного для приема телевизионных передач, и укреплена на балконе лаборатории компании в Сэтле.

Таким образом, современные средства преобразования энергии позволяют получать достаточную мощность для пи-

тания устройств со сверхмалым энергопотреблением. Общее свойство различных типов средств освоения энергии окружающей среды – генерация электрической энергии, значение которой не постоянно. Это требует применения в источнике питания на основе технологии Energy Harvesting еще одного ключевого блока – схемы управления энергопотреблением. Эта схема независимо от электрического сигнала преобразователя должна обеспечивать на выходе напряжение неизменного значения, требуемого для питания электронного устройства (обычно 1,3–5 В).

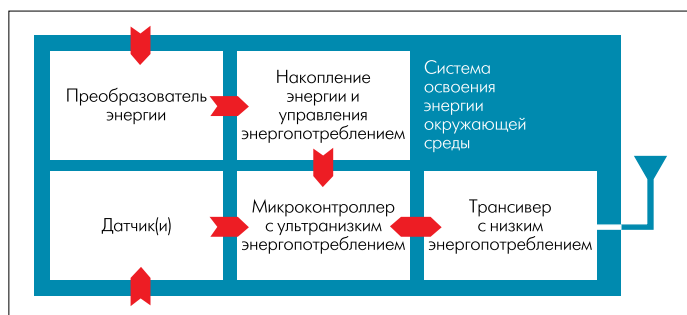
Во многих системах освоения энергии окружающей среды проблема непостоянного значения выходной мощности, особенно при преобразовании механических прерывистых перемещений, решается путем применения в схеме управления энергопотреблением устройства накопления и хранения энергии (энергетического буфера). Чтобы выполнять требования, предъявляемые различными устройствами к системе освоения энергии окружающей среды, буфер должен иметь следующие свойства:

- малые утечки (саморазрядку);
- неограниченную емкость;
- малые геометрические размеры;
- отсутствие необходимости преобразования энергии;
- возможность эффективного сбора и отдачи энергии.

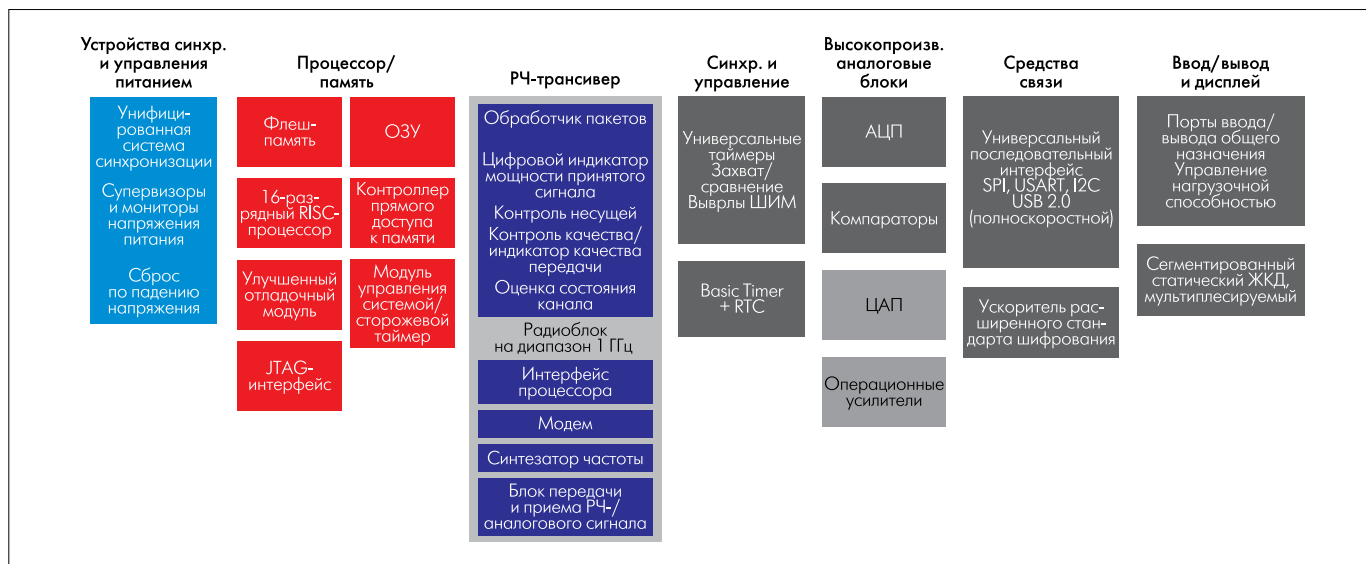
Устройство накопления энергии позволяет также использовать хранимую энергию для обеспечения бесперебойной работы питаемой системы при отключении основного источника питания. Для накопления и хранения энергии можно использовать суперконденсаторы\*. Правда, сегодня, если требуется достаточно большая накопленная энергия, предпочтение отдается ультрамалогобаритным перезаряжаемым батареям (большой частью тонкопленочным литиевым элементам, сопоставимым по размерам с микросхемой), которые способны питать систему продолжительное время, а, возможно, и весь срок ее службы.

Таким образом, система освоения энергии окружающей среды состоит из трех основных блоков – собственно преобразователя, схемы управления электропитанием и схемы накопления полученной электрической энергии для дальнейшего ее использования (рис.3). При этом, хотя остальные компоненты системы зависят от назначения устройства, в котором она используется, они, как правило, идентичны компонентам системы, предназначенной для питания датчиков беспроводных сенсорных сетей. Поскольку системы освоения энергии окружающей среды не привязаны к электрической сети, они представляют собой полностью автономные системы. Как правило, такие системы работают в трех режимах: сбора данных, их передачи и ожидания. Мощность, потребляемая в каждом режиме, различна: в режиме ожидания она составляет несколь-

\* Шурыгина В. Суперконденсаторы. Размеры меньше, мощность выше. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2009, №7, с.10–20.



**Рис.3. Блок-схема системы освоения энергии светового излучения, разности температур, механической энергии, ВЧ-излучения**



**Рис.4. Блок-схема платформы CC430**

ко микроватт, в режиме преобразования – несколько десятков милливольт, в режиме передачи – несколько сотен милливольт.

### НИЗКОВОЛЬТНЫЕ КОМПОНЕНТЫ СИСТЕМ ОСВОЕНИЯ ЭНЕРГИИ

Сегодня большое внимание уделяется не только расширению типов преобразователей систем освоения энергии окружающей среды. Интерес вызывают и другие ее элементы, в первую очередь – схемы управления энергопитанием, способные работать при пониженных значениях напряжения питания.

Сердце системы освоения энергии окружающей среды – микропроцессор. И здесь особо перспективны микропроцессоры семейства MSP430 компании Texas Instruments с низким энергопотреблением. Выпущенные в середине 2008 года 16-разрядные микропроцессоры пятого поколения этого семейства – серии MSP430F5xx – еще один большой шаг компании к достижению высоких характеристик: 12 МГц при напряжении питания 1,8 В и потребляемом токе в активном режиме 160 мкА/МГц. В режиме ожидания потребляемый ток составляет 1,5 мкА/МГц, в режиме сохранения данных в ОЗУ – 0,1 мкА. Микропроцессоры этой серии содержат флеш-память и ОЗУ объемом до 256 Кбайт и 16 Кбайт соответственно, а также расширенный набор периферийных устройств, таких как радиочастотный трансивер, полноскоростной USB 2.0, энкриптор, ЖКИ-интерфейс. В периферийные устройства также входят 16-разрядный АЦП, маломощные компараторы с высокой производительностью даже при передаче РЧ-сигналов, не потребляющие энергию в нерабочем режиме, а также встроенный ускоритель расширенного стандарта шифрования (AES) для обеспечения высокого уровня защиты данных, передаваемых по каналу беспроводной связи. Встроенный контроллер ЖК-дисплея позволяет снизить стоимость и уменьшить размеры систем с такими дисплеями. По системе команд и отладочных средств

микропроцессоры серии MSP430F5xx совместимы с микропроцессорами семейства предыдущих поколений.

Чтобы полностью реализовать возможности процессора новой серии MSP430F5xx, компания объединила его в однокристальной платформе CC430 с радиочастотным трансивером CC1101, рассчитанным на частоту до 1 ГГц (рис.4). Трансивер работает на частотах 315, 433, 868 и 915 МГц, соответствующих стандартам ISM и SRD. Чувствительность его составляет -111 дБмВт при скорости передачи 1,2 Кбод и частоте 868 МГц. При этом потребляемый ток в режиме приема равен 14,7 мА. Разброс скоростей передачи пакетов – 1%. Применение платформы CC430 позволяет на 50% уменьшить площадь печатной платы, занимаемую системой освоения энергии, и тем самым расширить ее применение в разнообразных устройствах беспроводной связи.

Но и другие компании активно совершенствуют компоненты систем освоения энергии окружающей среды. Так, компания Freescale Semiconductor недавно выпустила преобразователь постоянного тока, способный работать при напряжении питания 320 мВ, которое обеспечивает один солнечный элемент без дополнительной поддержки.

До 80% энергии, вырабатываемой системой освоения энергии окружающей среды, может теряться при включении транзистора схемы управления энергопитанием. Для решения этой проблемы компания Analog Liner Devices (ALD) разработала модуль управления энергопотреблением, способный функционировать при напряжении на входе менее 100 мВ и повысить его до 4 В на выходе. Модуль выполнен на вентиляционной матрице МОП полевых транзисторов с нулевым пороговым напряжением, изготовленных по запатентованной компанией технологии EPAD (Electrically Programmable Analog Device, электрически программируемых аналоговых приборов). На утопленные плавающие затворы транзисторов подается напряжение -0,7 В. При подаче на вход транзистора небольшо-

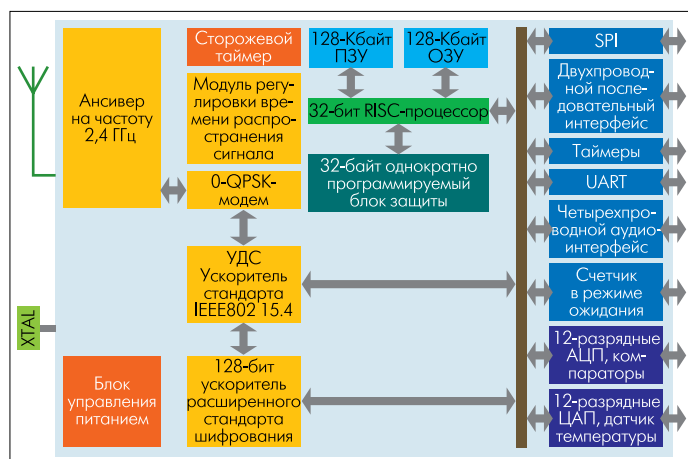


Рис.5. Блок-схема микроконтроллера JN5148

го напряжения к нему добавляется смещение плавающего затвора, и в итоге полное напряжение на входе превышает 0,7 В, требуемых для его включения. Компания предполагала выпустить новый модуль в третьем квартале 2009 года.

Микроконтроллер, предназначенный для беспроводных сетей и способный выполнять многочисленные пакетные передачи при подаче энергии в 100 мкДж, "собираемой" при срабатывании электромеханического переключателя, выпустила компания Jennic (Великобритания). Микроконтроллер JN5148 выполнен на основе ядра 32-разрядного RISC-процессора, характеризующегося высокой эффективностью кодирования с использованием команд переменной длины, многокаскадной конвейерной обработкой команд, малой потребляемой мощностью и возможностью работы в режиме программируемой частоты синхронизации. Тактовая частота микроконтроллера может программироваться в диапазоне 4–32 МГц, что позволяет выбирать оптимальное для каждой задачи соотношение потребляемая мощность/производительность. В контроллер заложены стеки протоколов ZigBee PRO, 6LoWPAN и JenNet, основанные на стандарте IEEE 802.15.4. Входящий в микросхему трансивер стандарта IEEE 802.15.4 рассчитан на частоту 2,4 ГГц. Его чувствительность составляет -95 дБмВт. Кроме того, микросхема содержит постоянную и оперативную память емкостью 128 Кбайт каждая и большой набор аналоговых и периферийных устройств (в том числе четыре 12-разрядных АЦП, два 12-разрядных ЦАП, два компаратора, три 16-разрядных таймера/счетчика, два UART, SPI, I2C). В число периферийных устройств входят также импульсные счетчики с малой потребляемой мощностью, работающие в режиме ожидания, и уникальный модуль регулировки времени распространения сигнала, обеспечивающий точную подачу сигнала в беспроводных сенсорных сетях (рис.5). Бюджет радиоканала в 98 дБ позволяет передавать данные в помещении на расстояние до 50 м. Ток, потребляемый в режиме приема, составляет 18 мА, в режиме передачи – 15 мА, в режиме ожидания – 0,12 мкА.

Интерес представляют и работы университета штата Канзас по преобразованию созданной при поддержке NASA

КМОП-микросхемы трансивера системы освоения энергии окружающей среды, предназначенной для питания беспроводных сенсорных сетей космического корабля, направляемого на Марс. Микросхема, содержащая передатчик и супергетеродинный приемник, работает в частотном диапазоне 390–450 МГц. Выходная мощность ее равна 100 мВт. Несущая частота составляет 400 МГц, скорость передачи данных – 256 Кбит/с, скорость приема – 2–8 Кбит/с. Поскольку микросхема первоначально предназначалась для работы в атмосфере Марса, отличающейся высокой радиоактивностью и низкой температурой, она была изготовлена по технологии кремний на сапфире компании Peregrine, обеспечивающей высокую радиационную стойкость. Разработчики надеются модернизировать микросхему с тем, чтобы обеспечить ее работу в наземных системах на частотах от 151 МГц до 2,4 ГГц.

Таким образом, сегодня в наличии имеются все компоненты, необходимые для создания источников питания на основе систем освоения энергии окружающей среды. Так что же достигнуто к настоящему времени?

### СИСТЕМЫ ОСВОЕНИЯ ЭНЕРГИИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Каждая новая технология нуждается в крупных рынках сбыта создаваемых с ее помощью изделий. Каковы же сегодня самые доходные и востребованные области применения источников питания на основе технологии Energy Harvesting? Сейчас это в основном беспроводные сенсорные сети, различные устройства "умных" строений, средства радиоидентификации, имплантируемые медицинские приборы.

Крупным производителем систем освоения энергии окружающей среды является компания EpOcean, – ее системы установлены в примерно 100 тыс. зданий мира. Только в новом здании в Мадриде в начале 2009 года компания смонтировала беспроводную и безаккумуляторную систему, содержащую 4200 регуляторов осветительных устройств, датчиков занятости помещения и уровня освещенности в дневное время. Все элементы системы питают источники на основе устройств освоения энергии механического перемещения переключателей компании.

При нажатии кнопки пульта управления системы (с силой 7 Н) перемещение ее на расстояние в 1,8 мм приводит к генерации электрической энергии, которая переводит в рабочий режим разработанный компанией передатчик на частоте 868,3 МГц и выходную мощность 10 мВт. Передатчик посылает закодированное радиосообщение, вызывающее включение или отключение соответствующего светильника. В систему входит и приемник на ту же частоту с чувствительностью -95 дБмВт, способный принимать сигналы до 30 передатчиков компании EpOcean серий PTM и STM. Система устраняет необходимость прокладывать кабель от выключателя к светильнику или контроллеру, что делает электроосветительную систему здания более гибкой, сокращает время и затраты на ее

монтаж, а также обеспечивает удобное расположение выключателя независимо от конструкции здания. Благодаря автоматическому управлению светильниками здания затраты на его освещение сократились на 40%. Кроме того, было сэкономлено более 30 км кабеля и 42000 батарей.

Компания Shell в течение года испытывала возможность применения микрогенератора PMG17 компании Perpetuum для питания устройств передачи данных 18 датчиков, регистрирующих условия работы шести электродвигателей оборудования газогенераторной станции в Норвегии. Микрогенератор работал совместно со схемой управления электропитанием, в которую входил двухэлементный суперконденсатор компании CAP-XX, предназначенный для накопления и последующего использования энергии, освоенной микрогенератором. Большая емкость (140 мФ) и малое эквивалентное сопротивление (120 мОм) суперконденсатора позволили обеспечить энергию в 63 Вт, необходимую для передачи за 1 с данных сети стандарта IEEE 802.15.4 (Zigbee) и 802.11 (WLAN).

В середине 2008 года компания AdaptivEnergy представила модуль освоения энергии вибрации Joule-Thief ("похититель джоулей"), позволяющий получать на выходе постоянное напряжение в 3,6 В. Два основных блока модуля – RLP-преобразователь энергии и электронный блок сбора и обработки энергии (Energy Key). При воздействии вибрации



**Рис.6. RLP-микрогенератор напряжения модуля Joule-Thief**

с ускорением 1,5–2g RLP-преобразователь может генерировать синусоидальное напряжение в 100–200 В. Такое напряжение не нужно разработчикам систем беспроводных сенсорных сетей. Поэтому это напряжение по четырем медным выводам (двум – заземления и двум –питания) подается на схему Energy Key. С входящих в схему двух последовательно соединенных танталовых конденсаторов снимается выходное напряжение в 3,6 В (рис.6). Блок Energy Key может содержать различные конденсаторы или аккумуляторы, позволяющие накапливать энергию от 1,4 до 430 мДж в зависимости от тре-



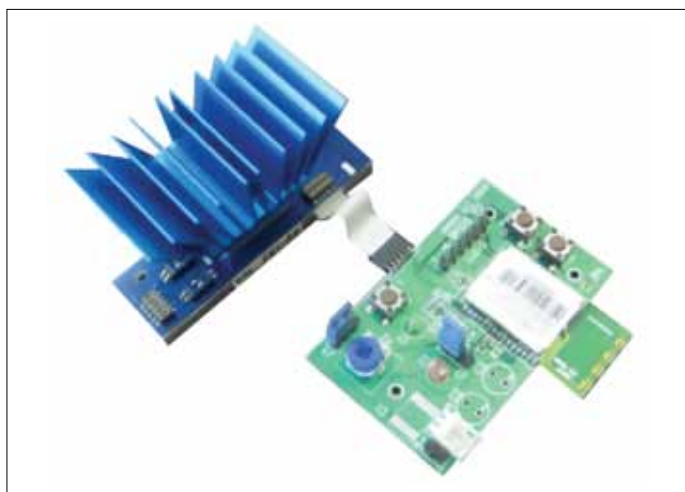


Рис.7. Модуль термоэлектрического генератора TE-Power NODE

бований потребителя. КПД блока составляет 62%. Дополняет преобразователь энергии и блок сбора чипсет, содержащий микроконтроллер MSP430 и РЧ-трансивер CC2500 компании Texas Instruments, питаемые генерируемой модулем энергией и поддерживающие обработку и передачу данных. Работа модуля оценивалась с помощью поставляемого компанией AdaptivEnergy набора инструментальных средств проектирования, в который входят плата с датчиками освещенности, атмосферного давления и температуры, а также ВЧ-интерфейс отладочного набора для микроконтроллера. Проверка показала, что за несколько секунд энергия, накапливаемая конденсаторами, достигала 3,9 мДж, и датчики начали пересылать данные ноутбуку каждые 1,4 с.

Модуль Joule-Thief предназначен для питания беспроводных сенсорных сетей на основе популярных современных протоколов систем связи.

Чипсет, в который входят микроконтроллер MSP430, трансивер CC25xx и eZ430-RF2500 USB-модуль приемника, использован и в модуле термоэлектрического генератора TE-Power NODE компании Micropelt (Германия). Генератор предназначен для питания беспроводной сенсорной системы. Модуль выполнен на алюминиевом основании размером 60×27 мм, на котором смонтирован термоэлектрический генератор компании MPG-D751. Поверх генератора крепится алюминиевый цоколь, на котором могут быть размещены различные теплоотводы (рис.7). Как указывалось ранее, ТЭГ с помощью многочисленных пар разнополярных термоэлектрических тонкопленочных ветвей преобразует разность температур в электрический сигнал. Ветви термоэлемента выполнены из соединений висмута, сурьмы, теллура и селена и обеспечивают оптимальную эффективность при рабочих температурах от близких к комнатной до 200°C. Разработанный компанией процесс позволяет формировать до 100 МЭМС-ветвей на площади в 1 мм<sup>2</sup>. В результате в соответствии с законом Зеебека генерируемое выходное напряжение ТЭГ такой площади составляет 1,4 В при раз-

ности температур в 10°C. Площадь ТЭГ серии MPG-D751 составляет ~8 и 14 мм<sup>2</sup>, высота – 1,1 мм.

В модуле TE-Power NODE напряжение ТЭГ с помощью повышающего DC-DC-преобразователя преобразуется в постоянное напряжение, равное 2,4 В, предназначенное для зарядки конденсатора емкостью 100 мкФ. При разности температур модуля и окружающей среды всего в 10°C генерируемая энергия достаточна для того, чтобы каждую секунду передавать ноутбуку 10 байт данных сенсоров.

Нельзя не отметить и пока необычные средства освоения энергии окружающей среды.

### НЕОБЫЧНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

Исследования ученых Вашингтонского университета показали возможность извлечения у деревьев энергии, достаточной для питания маломощного сенсора. Ранее специалисты Массачусетского университета технологии показали, что при размещении одного электрода в дереве, а второго – в окружающей почве можно получить напряжение до 200 мВ. Генерацию энергии обеспечивает разница кислотного баланса дерева и почвы. Ученые Вашингтонского университета установили, что наибольшее напряжение можно собрать у большелистного клена. Ими создана система, работающая при напряжении, генерируемом преобразователем биоэнергии, и позволяющая получать на выходе напряжение в 1,1 В. Чтобы периодически выводить генератор биоэнергии из спящего состояния, разработан генератор тактовых импульсов, потребляющий мощность всего в 1 нВт с интервалом включения несколько секунд.

Конечно, источники питания на основе биоэнергии деревьев не смогут конкурировать с рассмотренными источниками. Но все же они могут оказаться весьма перспективными для питания сенсорных сетей, предназначенных для контроля климатических условий, особенно для определения наиболее пожароопасных лесных областей. Эти возможности реализованы компанией Voltree Power (США), которая на основе запатентованной технологии, в июне 2009 года успешно провела испытания сенсорной сети контроля климатических условий (Climate Sensor Network), питаемой энергией, извлекаемой у деревьев. Система сети помимо сенсоров и биопреобразователей содержит маломощные трансиверы и GPS-приемники. В сентябре компания заключила контракт с Лесной службой США на развертывание пяти сенсорных сетевых систем для сбора данных о силе и направлении ветра, влажности и температуре. Эти данные должны пересылаться пожарным службам.

Компания Green Ocean Energy (Великобритания) разработала две системы освоения энергии океанских волн – Ocean Treader и Wave Treader, – которые планируется использовать в водах Северной Атлантики. Система Ocean Treader состоит из передней и задней лопастей с воздушной камерой плавучести и центрального столбовидного буя

(рис.8). Она располагается в океане на расстоянии 1,5–3 км от берега. В состоянии дрейфа на поверхности океана под действием приливных сил волн лопасти и буй последовательно перемещаются вверх, приводя в действие встроенный в систему гидравлический генератор, который, в свою очередь, запускает электрогенератор. Электроэнергия передается на берег через подводные кабели. Такая система позволяет вырабатывать до 500 кВт электроэнергии (что достаточно для питания 125 домов), 30 таких систем смогут поставлять 15 МВт электроэнергии.

Система Wave Treader работает по такому же принципу и имеет ту же конструкцию, что и Ocean Treader. Предназначена она для установки наводного ветрогенератора и крепится на его основании.

Программное обеспечение для этих устройств преобразования энергии устойчивых океанских волн в электрическую предоставила компания ANSYS Inc. Для дальнейшего развития технологии волновой энергетики компания Green Ocean Energy получила от Шотландского фонда финансирования инноваций (Scottish Enterprise Seed Fund) субсидию в 100 тыс. фунтов стерлингов.

Существует еще множество необычных систем освоения энергии дождевых капель, удара, движения человека



**Рис.8. Система освоения энергии океанских волн Ocean Treader**

и т.п. Но пока технология Energy Harvesting сталкивается с большими проблемами, в первую очередь с отсутствием необходимых стандартов, слабым участием в ее разработке крупных изготовителей датчиков, скептицизмом или полным пренебрежением ею. И хотя еще многие инженеры не верят в возможность освоения энергии окружающей среды, эта технология уже существует, и ею можно пользоваться. Правда, для реализации технологии Energy Harvesting необходим другой образ мышления. Пока от системы Energy Harvesting нельзя получить энергию, достаточную для питания ноутбука или блендера. Но все впереди. Наступит день, когда устройства преобразования энергии окружающей среды будут применяться в бытовой электронике. ○