

# Energy Harvesting.

## Новый этап в развитии автономных устройств

Майкл УИТАКЕР (Michael WHITAKER)  
Илья БОЧАРНИКОВ  
ilya.bocharnikov@yeint.spb.ru

**Достижения в технологии производства маломощных устройств серьезно упростили жизнь разработчикам беспроводных сетей различного назначения: от простых автономных датчиков до сложных систем кондиционирования воздуха, управления ресурсами или промышленной автоматизации. Но даже самые продвинутые автономные устройства требуют регулярной замены батарей, процесса дорогостоящего и весьма трудоемкого. Лучшее решение для таких устройств — Energy Harvesting, преобразование энергии побочных механических, тепловых или электромагнитных воздействий окружающей среды в электрический ток, необходимый для питания устройства.**

### Введение

Как правило, электрическая энергия, получаемая из таких нестандартных источников, измеряется десятками микроватт, поэтому реализация подобных решений требует тщательного подхода к управлению энергоресурсами.

Один из наиболее распространенных видов внешних воздействий — это механическая вибрация. Ее источниками могут быть индустриальное оборудование, транспорт или движение потоков воздуха. Для преобразования этих сил в электрический ток обычно используются пьезоэлектрические элементы.

LTC3588-1 — новая микросхема от Linear Technology, предназначенная для управления процессами аккумуляции энергии, получаемой от пьезоэлемента, и эффективной передачи ее конечному устройству (рис. 1). Микросхема имеет встроенный мостовой выпрямитель с низкими потерями и синхронный импульсный DC/DC-преобразователь, оптимизированные для работы с высокоимпедансным

пьезоэлектрическим элементом, имеющим характерные значения тока порядка 10 мкА.

Из-за малой мощности пьезоэлектрического источника типичные значения тока, отдаваемого LTC3588-1 в нагрузку, значительно превосходят входной ток элемента. Это накладывает соответствующие ограничения на режим работы конечного устройства, использующего такой источник энергии. Большую часть времени оно должно находиться в режиме пониженного энергопотребления. Например, это может быть беспроводной датчик, включающийся через определенные интервалы времени для того, чтобы произвести измерения, передать данные и снова вернуться в энергосберегающий режим.

### Залог успешного решения — низкие токи покоя

Решающее значение при реализации устройств питания на базе альтернативных источников имеет достижение малых вели-

чин тока покоя, поскольку большую часть времени микросхема должна аккумулировать энергию, находясь в энергосберегающем режиме.

В LTC3588-1 реализована функция частичного отключения при падении уровня входного напряжения с гистерезисом, обеспечивающего потребление тока в этом состоянии менее 1 мкА. Микросхема находится в энергосберегающем режиме, позволяя тем временем заряду аккумулироваться во входном конденсаторе до тех пор, пока накопленной энергии не станет достаточно для ее эффективного преобразования встроенным синхронным DC/DC-конвертером. На рис. 2 показана зависимость тока покоя от входного напряжения в энергосберегающем режиме. Ток покоя монотонно возрастает по мере роста входного напряжения, но не превышает 700 нА, из чего следует, что даже очень малый источник тока способен

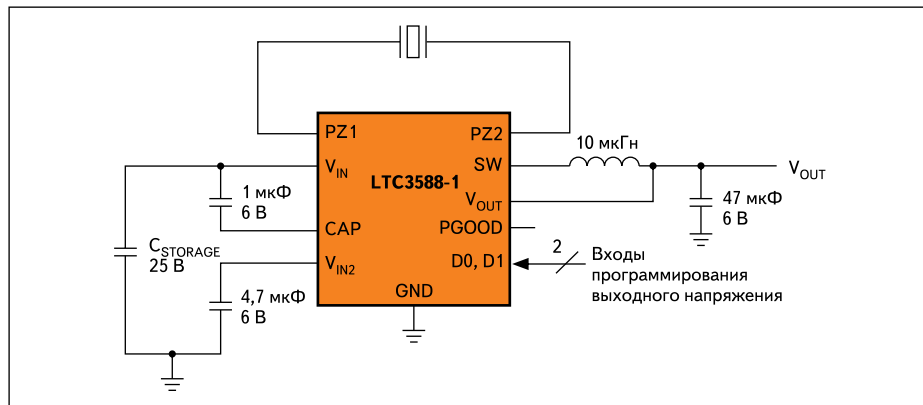


Рис. 1. Пьезоэлектрический источник питания

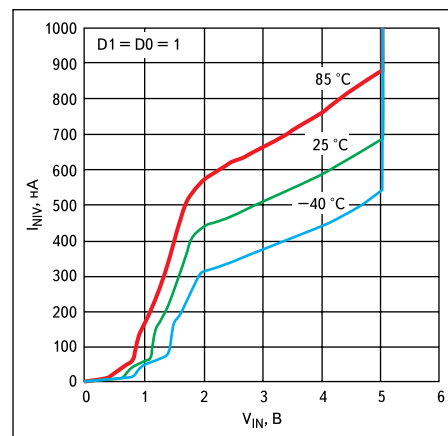


Рис. 2. Зависимость тока покоя в режиме пониженного энергопотребления при низком входном напряжении (undervoltage lockout)

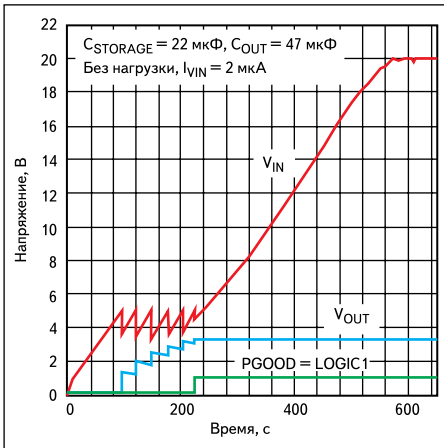


Рис. 3. Диаграммы напряжений на выводах LTC3588-1 при запуске источника

зарядить входную емкость до границы пробуждения преобразователя и обеспечить требуемый уровень напряжения на выходе. Зарядив до необходимого уровня выходную емкость, встроенный импульсный преобразователь отключается, при этом потери на входе и выходе минимальны. Например, при входном напряжении 4,5 В и требуемом значении на выходе суммарный ток покоя составляет всего 950 нА. Далее конвертор продолжает периодически включаться и отключаться, поддерживая должный уровень выходного напряжения. Минимальные значения токов покоя как в спящем режиме в промежутках между включениями встроенного DC/DC, так и при отключении устройства при низком напряжении на входе позволяют накапливать максимально возможное количество энергии во входной цепи даже при очень слабых токах пьезоэлектрика.

Когда входное напряжение достигает порога пробуждения, DC/DC-преобразователь включается и начинает передавать энергию из входного конденсатора на выходной. Контроль уровня выходного напряжения осуществляется через обратную связь с гистерезисом. Конвертор заряжает выходной конденсатор до величины, немного превышающей требуемое значение тока, через верхний ключ. При этом ток в катушке достигает 250 мА. Далее цепь замыкается через нижнее плечо, постепенно снижая ток до нуля. Такой алгоритм импульсного синхронного преобразования напряжения позволяет эффективно передавать энергию в выходную цепь. Если напряжение на входе падает ниже уровня границы отключения до того, как выходное напряжение достигнет требуемого уровня, DC/DC-конвертор выключается и не включается до тех пор, пока входное напряжение не превысит границы пробуждения. В этот период ток утечки по выводу *Vout* не превышает 90 нА, поэтому выходное напряжение практически не падает относительно достигнутого уровня. На рис. 3 показаны типичные характеристики на входе и выходе при запуске LTC3588-1 от источника тока в 2 мкА.

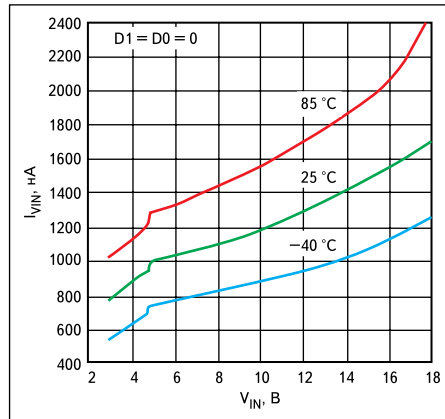


Рис. 4. Токи покоя при выключенном DC/DC-преобразователе и напряжении на выходе 1,8 В

Когда, наконец, DC/DC заряжает выходную емкость до заданного уровня и DC/DC отключается, мониторинг уровня выходного напряжения производится с помощью специального компаратора. В этом режиме ток в нагрузку поступает из выходного конденсатора. Когда выходное напряжение падает ниже допустимого минимума, DC/DC снова включается и процесс повторяется. Такой метод регулировки выходного напряжения с гистерезисом уменьшает потери, связанные с переключением транзисторов синхронного преобразователя, и позволяет добиться эффективности преобразования при небольших токах нагрузки.

В активном режиме DC/DC способен отдавать в нагрузку до 100 мА тока. Уровень выходного напряжения задается по двум выводам и имеет четыре возможных значения: 1,8, 2,5, 3,3 и 3,6 В, подходящие для питания микроконтроллеров, датчиков и беспроводных трансиверов. На рис. 4 продемонстрированы чрезвычайно низкие значения тока покоя при поддержании требуемого уровня выходного напряжения, обеспечивающие эффективную работу на небольших нагрузках. Несмотря на то, что потребляемый ток в активном режиме работы DC/DC значительно больше, чем в спящем режиме, он тем не менее пренебрежимо мал по отношению к току, отдаваемому в нагрузку: это обеспечивает высокую эффективность в широком диапазоне нагрузок (рис. 5).

DC/DC включается только тогда, когда во входном конденсаторе запасено достаточное количество энергии, и передает ее за короткие промежутки времени, которое гораздо меньше, чем время, затрачиваемое на аккумуляцию заряда входным конденсатором. При этом среднее значение потребляемого тока очень мало, что соответствует требованиям малоомощных альтернативных источников. Алгоритм подзарядки выходной емкости с управлением запуском DC/DC по обратной связи обеспечивает высокий КПД даже при малых нагрузках в 100 мкА и ниже. Зависимость КПД от тока нагрузки приведена на рис. 5.

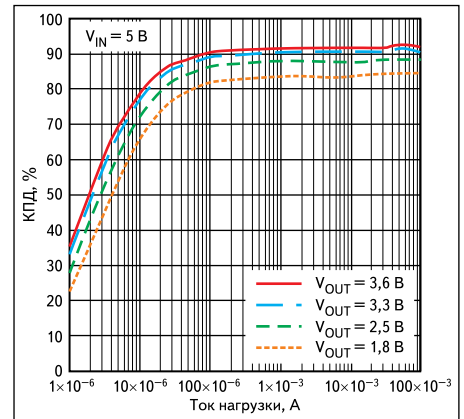


Рис. 5. График зависимости КПД от тока нагрузки

### Преобразование энергии вибрации

Пьезоэлектрический элемент преобразует механическую энергию, как правило, энергию вибрации, в напряжение (рис. 6). Пьезоэлектрические элементы могут изготавливаться из PZT-керамики (цирконата титаната свинца), PVDF (фторопласта) или других материалов. Керамический пьезоэлемент образует электрическое напряжение за счет движения диполей, вызываемого его механическим сжатием. Полимерные элементы содержат в себе длинные цепочки молекул, производящих подобный эффект при изгибании материала. Керамика обычно используется в тех случаях, когда ожидается прямое и сравнительно сильное механическое воздействие на элемент. Полимерные же элементы способны проявлять пьезоэлектрические свойства под действием меньших сил.

LTC3588 эффективно работает при входном напряжении до 20 В. При превышении этого значения срабатывает защитный шунт. Пьезоэлемент подключается к выводам PZ1 и PZ2 LTC3588, соединенным со встроенным мостовым выпрямителем. Выпрямленное напряжение заряжает входной конденсатор. Мост выполнен таким образом,

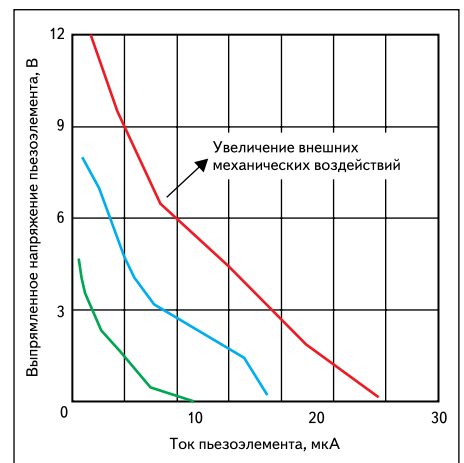


Рис. 6. Типичные характеристики пьезоэлектрического элемента T220-A4-503X

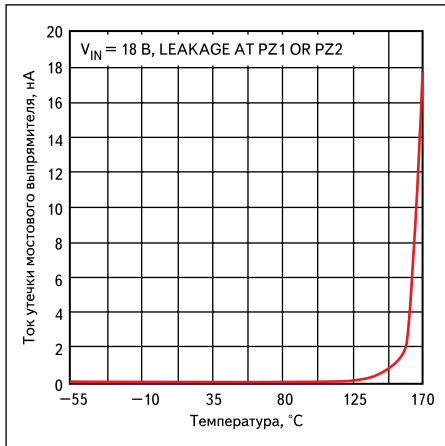


Рис. 7. Значения тока утечки встроенного мостового выпрямителя

что падение напряжения на нем при типичных для пьезоэлектрического элемента токах в 10 мкА составляет не более 400 мВ. Кроме того, обратный ток утечки моста не превышает 1 нА при температуре 125 °С при полосе частот более 1 МГц и способности проводить до 50 мА тока (рис. 7).

Для каждой конкретной задачи имеет смысл подбирать соответствующий пьезоэлемент. Различия в частоте и силе воздействий, а также в режиме потребления энергии конечным устройством заставляют серьезно подходить к выбору оптимального пьезоэлемента. Система же должна быть разработана так, чтобы выполнять задачу, затрачивая энергии не более, чем ее возможно выработать в данных условиях внешней среды. В некоторых случаях, напротив, оптимизация не требуется, и любое дополнительное количество энергии, полученной таким путем, уже само по себе является достаточным условием.

Дополнительные возможности для управления питанием предоставляет использование вывода PGOOD. PGOOD принимает высокий уровень, как только выходное напряжение впервые достигает требуемого значения, и остается в нем до тех пор, пока оно не опускается ниже 92% от установленного уровня. В некоторых случаях это может быть полезно, например, когда нужно мягко перевести конечное устройство в спящий режим. При этом уровень вывода PGOOD меняется при падении входного напряжения в последнюю очередь, когда сама микросхема LTC3588-1 (рис. 8) уже находится в режиме низкого энергопотребления из-за срабатывания схемы отключения при падении напряжения на входе, что позволит почерпнуть максимум из накопленной LTC3588-1 энергии.

### Комбинированное питание

Пьезоэлектрические источники могут служить заменой батарейного питания во многих устройствах. Однако зачастую интерес представляет реализация двойной цепи питания,

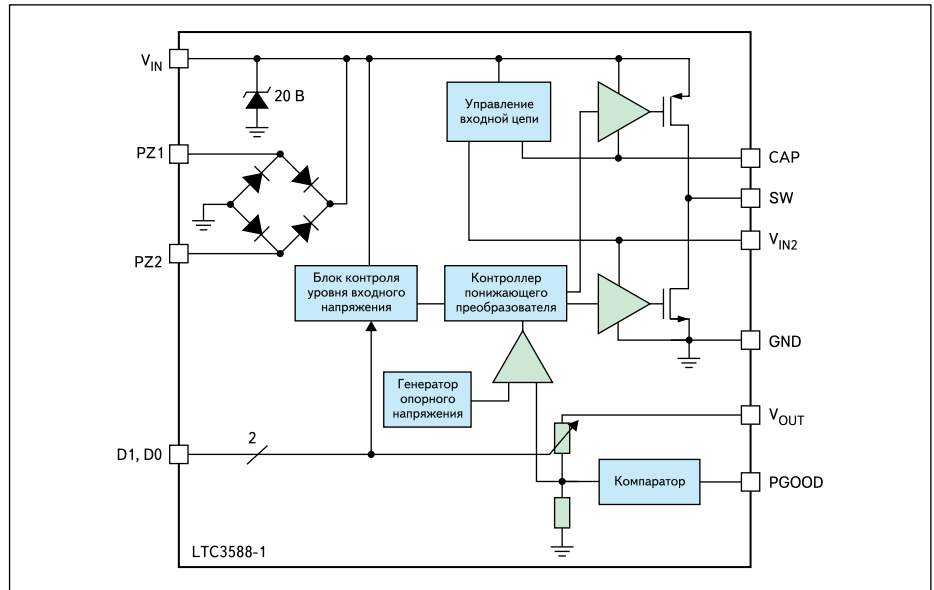


Рис. 8. Блок-диаграмма LTC3588-1

где основное питание за счет пьезоэлемента будет дополняться резервным от батареи. Такое решение не только обеспечивает большую надежность устройства, но и расширяет возможности его использования. Например, если такая схема реализована в портативной системе контроля местоположения. Когда объект движется, преобразованная энергия вибрации легко обеспечит устройство необходимой для работы мощностью. Но когда объект неподвижен долгое время, батарейное питание позволит прибору продолжать работу, передавая информацию о том, что устройство исправно и объект наблюдения все еще находится в указанном месте.

Схема включения LTC3588-1 с резервным батарейным питанием изображена на рис. 9. При зарядке входной емкости от пьезоэлемента через встроенный мостовой выпрямитель, последовательно включенный с батареей, диод предотвращает протекание обратного тока. На схеме изображен вариант с подключением 9-В батареи, однако возможно подключение целого блока из нескольких батарей. Основным ограничением здесь является

результатирующее напряжение блока, которое не должно быть выше 18 В, максимально допустимого напряжения от низкоимпедансного источника для LTC3588-1. При расчете подобных схем следует выбирать батарею таким образом, чтобы пиковые значения напряжений на пьезоэлементе превышали напряжение батареи. Иначе питание схемы будет непрерывно осуществляться только за счет батареи.

### Разнообразие решений

Помимо энергии пьезоэлектрических элементов, получаемой преобразованием энергии вибрации, LTC3588-1 способна работать и с другими источниками энергии. Характеристики встроенного мостового выпрямителя позволяют использовать широкий набор различных по свойствам источников. Например, на рис. 10 изображена схема преобразования излучения флуоресцентных ламп. Медные панели могут быть размещены над лампой на ее креплении для улавливания электромагнитного излучения трубки и передачи ее на LTC3588-1. Такие устройства

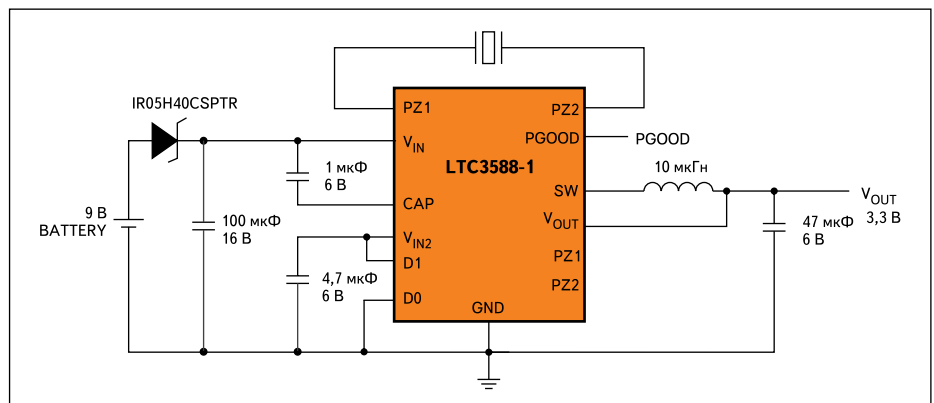


Рис. 9. Схема включения LTC3588-1 с резервным батарейным питанием

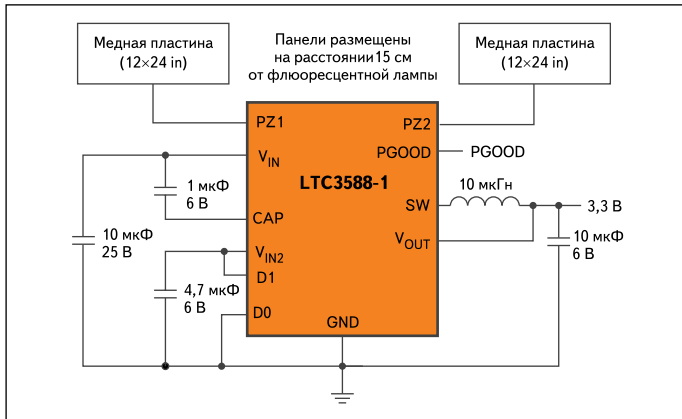


Рис. 10. Схема преобразователя энергии электромагнитного излучения

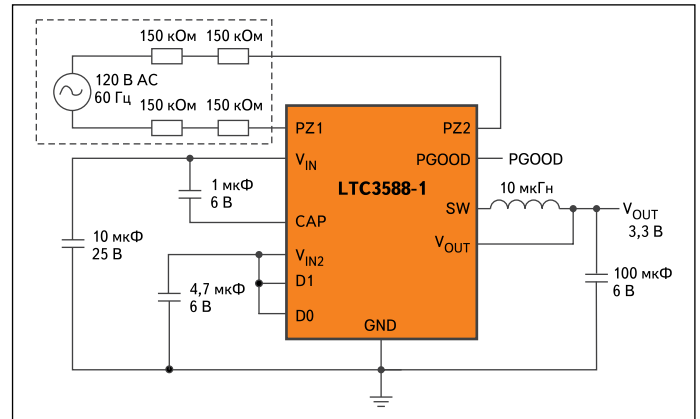


Рис. 11. Реализация источника постоянного напряжения 3,6 В, работающего от сети переменного тока

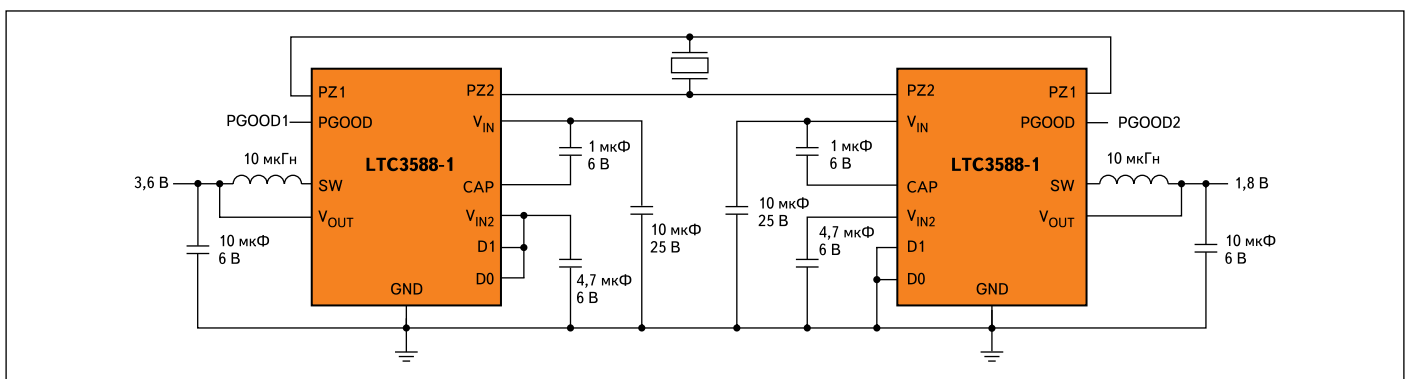


Рис. 12. Подключение двух LTC3588-1 к одному пьезоэлектрическому элементу

могут устанавливаться по всему зданию, обеспечивая питанием распределенную систему кондиционирования воздуха.

Другое полезное применение — реализация питания от сети переменного тока через ограничивающие резисторы, как показано на рис. 11. Это позволяет изготовить недорогие бестрансформаторные источники питания для простых приложений.

Кроме того, в качестве источника входной мощности для LTC3588-1 могут использоваться такие источники постоянного тока, как солнечные панели и термопары. В этом случае они подключаются к одному из выходов, PZ1 или PZ2. Возможно подключение нескольких панелей к общему входу с использованием блокирующих диодов. Таким образом, можно организовать систему с несколькими солнечными батареями, сориентированными в различных направлениях для обеспечения питания схемы в течение всего дня.

Многие системы требуют питания несколькими уровнями напряжения. Для процессора может быть необходимо 1,8 В, при этом беспроводной передатчик может питаться от 3,6 В. Такая схема может быть построена на базе одного пьезоэлемента с двумя подключенными к нему LTC3588-1 (рис. 12). Порядок использования ресурсов пьезоэлемента определяется уровнем выходного сигнала. Микросхема с меньшим его значе-

нием имеет меньший порог включения, соответственно при нарастании входного напряжения элемента первой входит в активный режим. Несмотря на то, что пьезоэлемент подключен к обоим микросхемам, входные емкости изолированы друг от друга диодным мостом. А так как работающий DC/DC-преобразователь уменьшает напряжение на своей входной емкости, пьезоэлектрический ток будет стремиться именно к этому источнику до тех пор, пока схема придет в равновесие. Такая конфигурация может быть расширена до нескольких микросхем. Ограничение: суммарный ток покоя не должен превышать ток пьезоэлемента.

LTC3588-1 — это решение для бурно развивающегося в настоящее время направления беспроводных сенсорных сетей. Уникальные характеристики позволяют эффективно использовать микроощные источники энергии для питания автономных устройств, существенно упрощая процесс развертывания сетей беспроводных датчиков и навсегда решая проблему питания удаленных элементов сети. ■

**Литература**

1. <http://www.yeint.ru/component/content/article/507>
2. [www.linear.com](http://www.linear.com)