

**11**  
2007

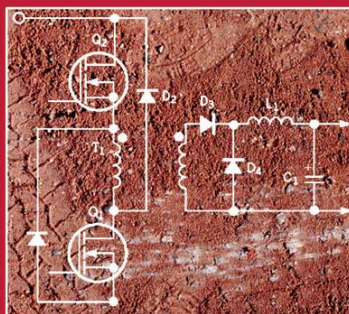
# ЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ

www.elcp.ru

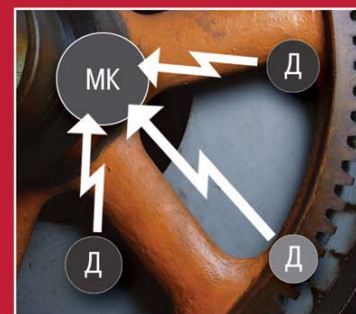
Тема номера: ЭЛЕКТРОПРИВОД



БЕНУА НИЛ, AGILENT:  
«СКОРОСТИ РАСТУТ –  
110 ГГц и 40 Гбит/с»  
с. 8



ДВА ТРАНЗИСТОРА  
УЛУЧШАЮТ  
КОММУТАЦИЮ  
с. 18



РЕВОЛЮЦИЯ В СИСТЕМАХ  
УПРАВЛЕНИЯ

с. 51

## В ФОКУСЕ — ЭЛЕКТРОПРИВОД ДЛЯ БЫТОВОЙ ТЕХНИКИ

с. 22—26



# БЕСПРОВОДНЫЕ ДАТЧИКИ С АВТОНОМНЫМ ПИТАНИЕМ

**Габриель Ринсин-Мора**, старший специалист,  
лаборатория аналоговых и силовых ИС IEEE

**Джастин Вогт**, специалист, лаборатория аналоговых и силовых ИС IEEE

**В статье описано одно из самых перспективных направлений развития электроники – создание сетей беспроводных датчиков с автономным питанием. Рассмотрены принципиальные трудности, возникающие при их разработке, и описаны способы их разрешения с использованием новейших технических решений.**

Распределенные сети беспроводных миниатюрных датчиков обещают стать для крупных систем тем же, чем стали для компьютеров и портативных устройств интегральные микросхемы, полностью изменив методы их изучения, разработки и управления. Например, в медицине такие датчики могут быть имплантированы в тело пациента для непрерывного контроля функционирования внутренних органов и обеспечения, при необходимости лечения. В промышленности такие системы могут быть использованы на больших площадях для контроля влажности, температуры и бесконечного числа других параметров и способны обеспечить предсказание состояния производственных систем и инициацию процедур самовосстановления системы. Использование датчиков в военной технике позволит получать такую жизненно важную информацию, как наличие мин, ядовитых веществ или источников электромагнитного излучения не только для немедленного предупреждения об опасности, но и для изучения поведения техники на поле боя. Это позволит разработчикам усовершенствовать следующие поколения военной техники.

Ключевыми элементами, позволяющими реализовать подобную технологию, являются обеспечение высокой плотности размещения и автономности датчиков за счет повышения степени интеграции (что включает в себя и миниатюризацию источников питания), использования высокоэффективных схем управления питанием, а также трансиверов, датчиков и остального схемного обрамления с микромощным энергопотреблением. Типичная структурная схема микродатчика с автономным питанием показана на рисунке 1.

## ИНТЕГРАЦИЯ

Первой проблемой, встающей перед разработчиком автономных датчиков, является интеграция в микросхему источника питания. Такой ИП должен содержать в малом объеме достаточно энергии, чтобы обеспечить его автономное функционирование в течение нескольких дней, месяцев или даже лет. Тонкопленочные литий-ионные аккумуляторные батареи довольно удобны и имеют приемлемую емкость, однако ее недостаточно для питания реального электронного устройства при приемлемых размерах. Разумной альтернативой представляются гибридные системы на основе микроэлектромеханических топливных элементов [1, 2], дополненных тонкопленочными LiIon-аккумуляторами. Управление таким гибридным источником требует систем управления источником питания, обеспечивающим разнонаправленную передачу энергии, как показано на рисунке 2. Здесь повышающий преобразователь с токовым управлением используется для преобразования напряжения 0,8...1,4 В, поступающего с двухъячеечного топливного элемента, в напряжение 2,7...4,2 В для подзарядки LiIon полимерной батареи,

а повышающий (или понижающий) преобразователь с управлением по напряжению обеспечивает питание остальной электроники беспроводного датчика. Запас энергии и пиковая нагрузочная способность такой системы все еще ограничена ее малыми размерами, что требует использования электроники с наименьшим энергопотреблением. Получение энергии от новых типов встраиваемых генераторов, использующих энергию окружающей среды – кинетическую, солнечную или тепловую, в потенциале может увеличить полный запас энергии в системе, но не пиковую нагрузочную способность, т.к. генераторы такого размера способны производить только единицы пикаджоулей энергии.

Интеграция антенн, датчиков и катушек индуктивности, входящих в схемы, показанные на рис. 1 и 2, также представляет собой сложную задачу. Эффективность антенн сильно связана с их геометрией и рабочей длиной волны: ее размер должен быть того же порядка или превышать длину волны. Типовые КМОП-устройства, однако, хорошо работают на частотах порядка 1 ГГц, что значительно меньше оптимального с точки зрения разработчика микроминиатюрных антенн, эффективно работающих в диапазоне около 50 ГГц. Для таких частот лучше всего использовать GaAs или SiGe-микросхемы, однако если антенна может обеспечить хоть сколько-

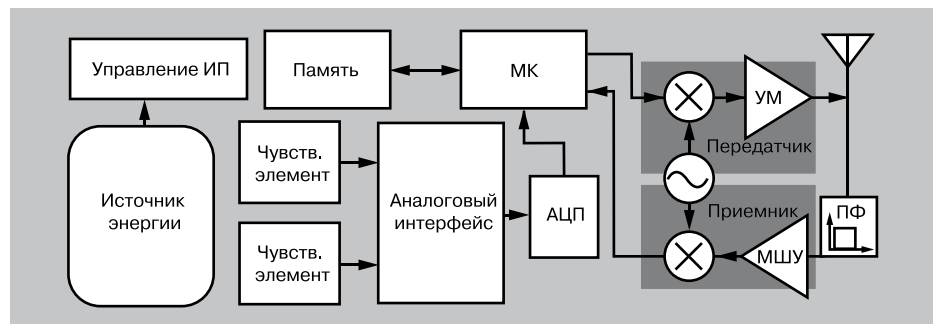


Рис. 1. Блок-схема беспроводного датчика с автономным питанием

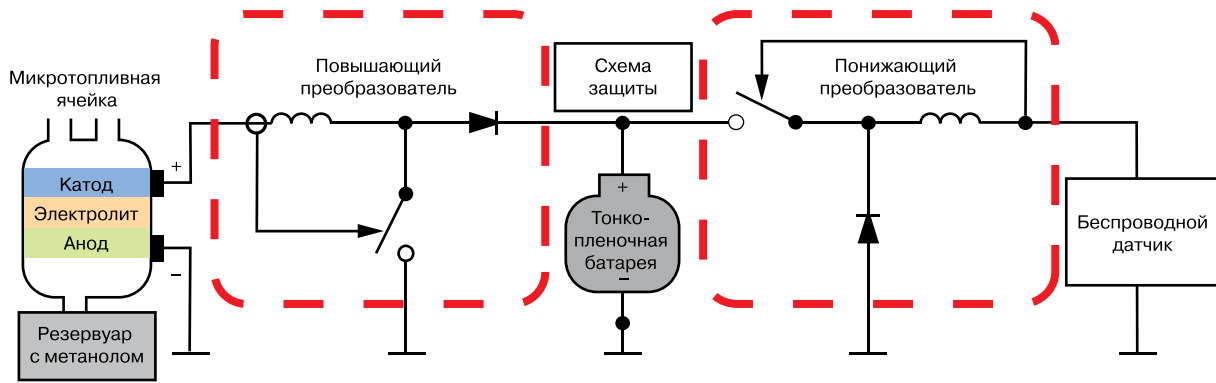


Рис. 2. Гибридный источник питания на основе MEMS-топливного элемента и LiIon-аккумулятора

нибудь приемлемую эффективность (скажем, немногим менее 10%), то лучше использовать обычные кремниевые КМОП-технологии, т.к. это поможет значительно уменьшить стоимость системы. Такая же проблема возникает при реализации дросселей, используемых в наиболее экономичных преобразователях питания: добротность катушек индуктивности в интегральном исполнении не превышает 5, а значения индуктивности — 100 нГ. К счастью, существуют отдельные дроссели с индуктивностью в единицы микрогенри, имеющие достаточно высокую добротность при размерах  $2 \times 2 \times 1$  мм, что позволяет использовать их в гибридных микросхемах. То же самое относится и к некоторым видам датчиков: хотя и существуют способы формирования на кристалле пьезоэлектрических и температурных сенсоров, при необходимости получения широкого температурного диапазона или высокой точности проще использовать внекристалльные датчики давления, влажности и т.д.

**УПРАВЛЕНИЕ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕМ**

Даже если удастся достичь теоретического максимума энергоотдачи встроенного источника питания — будь то топливный элемент, LiIon-батарея и даже атомный источник питания — миниатюрный его размер будет сильно ограничивать его абсолютную величину и пиковое значение энергопотребления, так что потребуются специальные методы построения схемы. Уменьшение потребляемой мощности, однако, ухудшает точность обработки сигнала, т.к. вызывает увеличение ошибок в усилителях с ООС (за счет меньшего петлевого усиления), сужения полосы пропускания (за счет уменьшения токов, перезаряжающих паразитные емкости) и уменьшения соотношения

сигнал/шум, а также других факторов. Следовательно, соответствующие меры для уменьшения энергопотребления должны предприниматься на всех уровнях — системном, схемном и компонентном.

Первой «линией обороны» является импульсный режим работы при выполнении заданных функций. Например, измерение температуры и влажности нет необходимости производить непрерывно, т.к. эти параметры меняются медленно, с миллисекундной или даже меньшей скоростью. При этом данные не нужно посылать одновременно с проведением измерений. Разнесение во времени процессов измерения параметра и передачи результата измерений уменьшает и среднюю, и пиковую потребляемую мощность. Следует помнить, что возможность использования такого режима определяется конкретным приложением.

Использование транзисторов в допороговых режимах (до отсечки) и общей ООС, а также последовательной обработки сигнала также улучшает соотношение потребляемая мощность/точность. В допороговом режиме МОП-транзисторы работают почти в инверсном режиме при минимальных токах, что подразумевает увеличение ошибок от разброса пороговых напряжений и суженную полосу пропускания (последнее является слабым ограничителем, т.к. требования к полосе пропускания при измерении температуры, влажности и т.п. достаточно низки). Кроме того, ухудшение точности отдельного беспроводного датчика может быть скомпенсировано как местной обратной связью, так и повышением плотности размещения датчиков.

Третьей линией обороны является уменьшение рабочих напряжений, т.к. потребляемая мощность прямо

пропорциональна этому напряжению. Это имеет смысл даже в режиме полного или частичного выключения системы, т.к. при этом уменьшаются токи утечки. Токи утечки могут составлять значительную часть общего потребления энергии из-за того, что рабочий цикл обычно длится намного менее периода ожидания. Понижение напряжения питания сужает динамический диапазон и уменьшает усиление, другими словами, приводит к снижению шумового порога, меньшей точности и большим временам переключения (за счет повышения паразитных емкостей) и, следовательно, к сужению полосы пропускания, увеличению занимаемого схемой места и увеличению тепловых шумов, что ведет к дальнейшему сужению динамического диапазона и ухудшению точности. В пределе с практической точки зрения система должна обеспечивать лишь тот уровень точности и полосу пропускания, которые требуются для данного приложения и не более того. Разработчики должны стремиться к максимально точному следованию запросам, предъявляемым этим самым приложением, и отказу от закладывания в схему избыточных параметров, т.е. отказу от проектирования «с запасом».

Однако до того, как разработчик начнет использовать все эти способы снижения энергопотребления, необходимо выявить все критические с точки зрения средней и пиковой энергоемкости узлы, т.к. именно они являются самым узким местом в системе. Очевидно, что их применение в редко используемых или маловажных узлах окажет малое влияние на время автономной работы. В большинстве портативных устройств критическими с точки зрения энергопотребления являются именно телеметрические задачи.

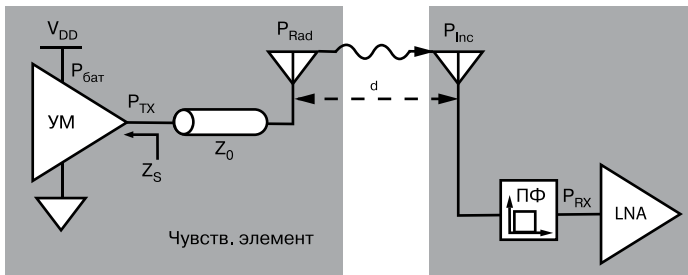


Рис. 3. Типичная схема передачи данных

**ТЕЛЕМЕТРИЯ**

Пиковая мощность, потребляемая от встроенного источника питания, максимальна при наличии в перечне функций системы телеметрической передачи информации. В частности, усилитель мощности должен направить достаточно энергии, чтобы приемная антенна и сам приемник обеспечили достаточное превышение уровня сигнала над уровнем шумов. В типичной беспроводной системе, показанной на рисунке 3, мощность источника питания P<sub>бат</sub> определяется потерями на пути распространения сигнала и необходимой мощностью на входе приемной антенны в соответствии со следующей формулой:

$$P_{ш} = P_{бат} \left( \frac{P_{прд}}{P_{бат}} \right) \left( \frac{P_{изл}}{P_{прд}} \right) \times \left( \frac{P_{вх}}{P_{изл}} \right) \left( \frac{P_{пр}}{P_{вх}} \right) = P_{бат} \eta_{прд} \times \eta_{ант} \eta_{изл} \eta_{пр.ант} \geq C/\text{Ш} \cdot P_{ш}$$

где P<sub>бат</sub>, P<sub>прд</sub>, P<sub>изл</sub>, P<sub>вх</sub> и P<sub>пр</sub> — мощности источника питания, усилителя передатчика, излученная мощность антенны передатчика, мощность на приемной антенне и на входе приемника соответственно, а η<sub>прд</sub>, η<sub>ант</sub>, η<sub>изл</sub> и η<sub>пр.ант</sub> — коэффициенты передачи передатчика, передающей антенны, среды распространения и приемной антенны. C/Ш — необходимое отношение сигнал/шум, а P<sub>ш</sub> — мощность шума, приведенная ко входу приемника. P<sub>ш</sub> = kΔf, где Δf — полоса частот сигнала (предполагается, что шум в полосе частоты сигнала аддитивный и имеет гауссовское распределение).

Коэффициент передачи среды распространения обратно пропорционален квадрату расстояния между антеннами

$$\eta_{изл} = \left( \frac{c}{4\pi df_c} \right)^2 (1 - |K|^2),$$

где c — скорость света, d — расстояние между антеннами, f<sub>c</sub> — несущая частота сигнала, а K — коэффициент отражения антенны.

В результате формула для расчета необходимой мощности источника питания принимает следующий вид:

$$P_{бат} = \frac{C/\text{Ш} \cdot k\Delta f}{\eta_{РА} \eta_{антTX} \left( \frac{c}{4\pi df_c} \right)^2 (1 - |K|^2) \eta_{антRX}}$$

То есть необходимая мощность прямо пропорциональна полосе пропускания, отношению сигнал/шум и квадратам несущей частоты и расстояния до приемной антенны, и обратно пропорциональна коэффициентам передачи усилителя и обеих антенн — передающей и приемной, что указывает на необходимость уменьшения до минимально возможных значений полосы пропускания, несущей частоты и дистанции передачи.

Протокол, используемый для кодирования и передачи данных, определяет набор требований к передающему тракту. Такие распространенные стандарты, как Bluetooth или ZigBee, ориентированы на мобильные устройства типа сотовых телефонов, требующих как малой потребляемой мощности, так и широкой полосы пропускания, и требуют источников питания по крайней мере милливаттной мощности. Беспроводные же датчики питаются источниками микроваттной мощности и при этом требуют гораздо более редкой передачи данных, что позволяет (и даже заставляет) использовать гораздо более узкополосные протоколы. Такие более простые, эффективные и узкополосные протоколы, как амплитудно- и

ВЕНТИЛЯТОРЫ  
EVERCOOL

Для охлаждения  
электронной  
аппаратуры

ЧИП  
ИНДУСТРИЯ

129110, г. Москва,  
ул. Гиляровского, д. 39

Тел.: +7(495) 780-95-07  
Факс: +7(495) 631-31-45

postavka@chipindustry.ru  
www.chipindustry.ru

частотно-манипулируемые сигналы, подходят для беспроводных датчиков гораздо больше [6, 7]. Они не передают никакой служебной информации. В результате значительно ослабляются требования к линейности УМ передатчика, что позволяет существенно упростить его архитектуру и перейти к значительно более эффективным ключевым режимам его работы (так называемого классы D, E или F).

В этих протоколах логический 0 и 1 кодируются отсутствием или наличием сигнала несущей при амплитудной манипуляции или передачей сигнала низкой или высокой частоты — при частотной. С точки зрения КПД и простоты схемы АМ-сигналы предпочтительней, однако они обеспечивают значительно меньшую помехоустойчивость по сравнению с частотной манипуляцией.

В конце концов оказывается, что ни запаса энергии в целом, ни возможностей пиковой отдачи ее не хватает для обеспечения непрерывной работы в течение длительного времени. Для решения этой проблемы необходимо организовывать периодическую работу беспроводного датчика и существенно ограничивать периоды активности передатчика. При этом необходимо стремиться к уменьшению до минимально возможных пределов необходимого отношения сигнал/шум, рабочей полосы частот, расстояния между датчиком и приемником (до 1...3 м) и несущей частоты (например, 900 МГц). При этом последнее требование входит в противоречие с требованием максимальной эффективности миниатюрных антенн. Кроме того, лучше

всего использовать как можно более простые протоколы передачи данных.

### РЕАЛЬНЫЕ ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ БЕСПРОВОДНЫХ ДАТЧИКОВ

Такие параметры с малой скоростью изменения, как температура и влажность, лучше всего соответствуют возможностям описанных выше микромощных телеметрических систем, т.к. не требуют постоянного контроля и позволяют использовать низкие скорости передачи данных. К таким задачам можно отнести и контроль работоспособности различного оборудования: исправности фильтров, уровня электромагнитного излучения или давления в шинах, т.к. и здесь скорость изменения контролируемого параметра невысока и позволяет работать со скоростями передачи порядка 10 Кбит/с и менее. При этом чисто контрольные функции представляются более удобными для реализации по сравнению с управленческими, т.к. не требуют организации двунаправленной передачи данных. Кроме того, представляется более рациональным использование большего числа короткодистантных беспроводных датчиков с микропотреблением, организованных в сеть с передачей информации на множество распределенных точек доступа или от узла к узлу, чем организация централизованной системы, что требует значительного увеличения дистанции между датчиком и приемником. Хотя сети беспроводных датчиков с автономным питанием, похоже, малоприменимы для передачи мультимедийных сигналов или выполнения управленческих функций (подобно сотовым

телефонам), однако их автономность и малые запросы к полосе рабочих частот позволяют контролировать большие пространства в течение более продолжительного времени, чем это возможно с помощью других систем при сегодняшнем уровне развития технологии.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Chen M. and Rincyn-Mora G. «A Self-Powered, Self-Sustaining System-on-Chip (SOC) Solution Powered from Hybrid Micro-Fuel Cells», 24th Army Science Conf., Orlando, FL, Nov. 28 – Dec. 2, 2004.
2. Torres E. and Rincyn-Mora G., «Electrostatic Energy Harvester and Li-Ion Charger for Micro-Scale Applications», IEEE Midwest Symposium on Circuits and Systems, San Juan, Puerto Rico, Aug 6–9, 2006.
3. Melly T. et al. «An Ultralow-Power UHF Transceiver Integrated in a Standard Digital CMOS Process: Transmitter», IEEE JSSC, Mar 2001, vol. 36, no. 3, pp. 467–472.
5. Yang H. and Sarpeshkar R., «A Time-Based Energy-Efficient Analog-to-Digital Converter», IEEE JSSC, vol. 40, no. 8, Aug 2005, pp. 1590-1601.
6. Iniewski K. et al. «Ultra-Low Power Circuit and System Design Trade-Offs for Smart Sensor Network Applications», ITI 3rd Int. Conf. on Information and Communications Technology, 2005, pp. 309–321.
7. Lin T., Kaiser W. and Pottie G. «Integrated Low-Power Communication System Design for Wireless Sensor Networks», IEEE Communications Magazine, vol. 42, no. 12, Dec 2004 pp. 142–150.

## ФОТОПРИЕМНИКИ И ФОТОДИОДНЫЕ СБОРКИ ОБЩЕГО И СПЕЦИАЛЬНОГО ПРИМЕНЕНИЯ

**Мы готовы рассмотреть Ваши оптоэлектронные задачи и предложить оригинальные конструктивные решения фотоприемных устройств с использованием микроэлектронных и гибридных технологий для изделий широкого и специального применения, обеспечив надлежащее качество в минимальные сроки**



**Россия: 194223,  
Санкт-Петербург, ул. Курчатова, 10;  
тел./факс: +7 812 552 93 36;  
e-mail: office\_mery@mery.spb.ru, www.mery.spb.ru**