Беспроводные датчики IoT и проблемы малого времени работы от батарей

Беспроводные датчики должны в корне изменить подход к мониторингу параметров окружающей среды и промышленных установок. Сегодня проводное подключение датчиков сдерживает их широкое распространение. С появлением устройств с автономным питанием «Интернет вещей» (IoT) может стать реальностью — как только время работы от батарей окажется достаточно продолжительным, чтобы не беспокоить пользователя.

Карло КАНЦИАНИ (Carlo CANZIANI)

Распространенный способ снижения энергопотребления заключается в использовании импульсного режима работы устройства, в котором короткие периоды активности сменяются длительными периодами покоя. Инженеры стараются сделать периоды активности как можно короче, а периоды покоя как можно длиннее. Долгие годы инженеры борются за продление времени работы устройств с батарейным питанием. Необходимые для этого схемы измерения, включающие осциллографы, цифровые мультиметры, источники питания, токовые пробники и токоизмерительные шунты, очень сложны и не могут детально регистрировать динамическое изменение тока. Новые патентованные технологии безразрывного переключения диапазонов измерения тока в сочетании с долговременной регистрацией данных с высоким разрешением помогают инженерам за один измерительный цикл визуализировать потребляемый ток в диапазоне от наноампер до ампер и достичь исключительно длительного времени работы батарей в беспроводных датчиках и других устройствах с автономным питанием.

Беспроводные датчики дают существенные преимущества в таких приложениях, как мониторинг окружающей среды или контроль параметров оборудования на промышленных предприятиях, поскольку отсутствие проводных соединений позволяет использовать их во множестве ситуаций. В ближайшие годы с широким распространением «Интернета вещей» мы увидим взрывной рост новых применений беспроводных датчиков. Но одним из основных факторов, сдерживающих их распространение, является ограниченное время автономной работы подобных устройств. Если работоспособность беспроводного датчика полностью зависит от встроенной несъемной батареи, а батарея разрядилась, он становится просто ненужным мусором.

Разрабатывая беспроводные датчики с автономным питанием и стремясь заставить устройство функционировать в течение приемлемого времени, вы сталкиваетесь с многочисленными проблемами. Типичный подход заключается в том, чтобы расходовать энергию только на полезные операции, а затем переводить устройство в режим малого энергопотребления. Работу беспроводного датчика можно разделить на серию периодов активности, каждый из которых требует определенного уровня энергии в течение определенного интервала времени. К наиболее распространенным операциям относятся:

- Пробуждение, выполнение измерений и преобразование данных в сообщение.
- Включение ВЧ-усилителя, передача сообщения и отключение ВЧ-усилителя.
- В датчиках с двунаправленной передачей данных (передающих и принимающих): пробуждение, включение приемника, прием, обработка данных, выполнение описанных в сообщении операций и отключение питания.

Нетрудно заметить, что вклад в разрядку батареи вносят несколько операций.

Простейший способ продления времени работы от батареи заключается в увеличении размера и, следовательно, емкости батареи. Однако ваши заказчики рассчитывают, что датчик окажется маленьким и будет обладать хорошими характеристиками (сможет передавать много данных и иметь локальную систему их обработки). Ясно, что ожидания потребителей диаметрально противоположны простейшему решению.

Как инженеры оценивают время работы от батареи?

Как разработчик, вы должны идти на компромисс и стремиться к достижению баланса между размером батареи и функциональностью беспроводного датчика, чтобы получить максимально высокие характеристики от малой батареи при достаточно длительном сроке ее работы.

Процесс оптимизации начинается с формирования требований к энергопотреблению. И первым шагом на пути к измерению параметров устройства становится сбор данных о расходе энергии.

Батарея содержит определенный запас энергии, выражаемый в ватт-часах (Вт·ч), и обладает емкостью, выражаемой в амперчасах (А·ч). Если известна мощность, потребляемая устройством, то время работы от батареи можно рассчитать по формуле:

Время работы батареи (ч) = *Энергия батареи* (Вт·ч)/ *Средняя потребляемая мощность* (Вт).

С другой стороны, энергия батареи равна произведению номинального напряжения (В) на емкость батареи (А·ч). Номинальным напряжением считается эмпирически полученное среднее значение на кривой разряда батареи, корректно связывающее энергию батареи с ее емкостью. В соответствии с этим время работы батареи можно выразить и такой формулой:

Время работы батареи (ч) = *Емкость батареи* (А·ч)/ *Средний потребляемый ток* (А).

Однако в реальных условиях время работы батареи обычно оказывается меньше расчетного. Обычно это объясняют плохим качеством батареи. Впрочем, известные производители батарей могут предоставить детальные спецификации и пояснить, что среди батарей одного типа наблюдается разброс емкости в пределах 5–10%. Но даже при консервативной оценке емкости батареи время ее реальной работы все равно, как правило, оказывается меньше. Устройство перестает

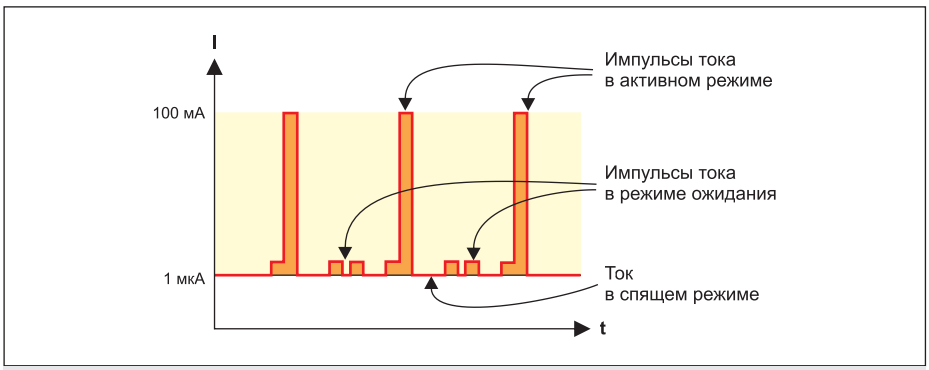

Рис. 1. Уровни потребляемого тока беспроводного датчика в трех основных режимах

работать раньше, чем ожидалось. Почему же это происходит? Может, мы неверно оценили расход энергии? Скорее всего, да. Давайте исследуем эту проблему.

Сложность измерения динамического энергопотребления

Для экономии энергии в устройствах с автономным питанием, таких как беспроводные датчики, подсистемы включаются лишь тогда, когда нужно. Инженеры проектируют устройство так, чтобы большую часть времени оно проводило в спящем режиме с минимальным потребляемым током. В спящем режиме функционируют только часы реального времени (таблица). Периодически устройство просыпается для выполнения измерений, а затем выполняет передачу данных в приемный узел (рис. 1).

В разных режимах работы потребляется разный ток, охватывающий широкий динамический диапазон от долей микроампер до 100 мА, что соответствует отношению порядка 1:1 000 000.

Традиционные методы измерения и их недостатки

Хорошо известный метод измерения тока заключается в использовании функции амперметра цифрового мультиметра. Точность измерения тока современных цифровых мультиметров достаточно высока, но эти характеристики указаны для фиксированных измерительных диапазонов и сравнительно статических уровней сигнала, что не соответствует режиму работы беспроводного датчика из-за динамического характера потребляемого тока.

Для измерения тока цифровой мультиметр включается последовательно между батареей и исследуемым устройством. Время от времени мы наблюдаем некоторую нестабильность показаний, вызванную активными циклами работы датчика или даже режимом передачи. Мы знаем, что мультиметр имеет несколько измерительных диапазонов и с помощью функции автоматического выбора диапазона может выбрать наилучший диапазон для достижения максимальной точности. Однако цифровой мультиметр не идеален. Функции автоматического выбора диапазона требуется некоторое время, чтобы переключить диапазон и стабилизировать результаты измерения. Автоматический выбор диапазона занимает обычно от 10 до 100 мс, а это превышает длительность режима передачи или активного режима датчика. Вот почему функцию автоматического выбора диапазона нужно отключить, и пользователь должен вручную выбирать наиболее подходящий диапазон.

Для измерения тока цифровой мультиметр использует шунт, включаемый в измеряемую цепь, и измеряет падение напряжения на этом шунте. Обычно для измерения малого тока выбирают малый диапазон с большим сопротивлением шунта, а для измерения большого тока — большой диапазон с малым сопротивлением шунта. В связи с падением напряжения на шунте к беспроводному датчику прикладывается не все напряжение батареи. На самых точных малых диапазонах для измерения тока спящего режима создается такое падение напряжения во время пиковых скачков тока, которое может даже вызвать сброс устройства. На практике мы пошли на компромисс и использовали большие диапазоны измеряемого тока, которые обеспечивают работоспособность устройства во время пиков потребления. Такой компромисс позволяет справляться с пиковым током и измерить ток спящего режима, но дорогой ценой. Поскольку погрешность прибора выражается в процентах от полной шкалы, это сильно влияет на измерение малых токов. В измерительном диапазоне 100 мА погрешность может достигать 0,005% (или 5 мкА), что дает погрешность 50% при измерении тока 10 мкА или погрешность 500% при измерении тока 1 мкА. А именно при таком уровне тока устройство проводит большую часть времени, и соответственно, такая погрешность оказывает значительное влияние на оценку времени работы от батареи.

После измерения малого тока, потребляемого датчиком в спящем режиме, мы должны измерить импульсы потребляемого тока в активном режиме и в режиме передачи. Измеряться должно как значение тока, так и время, в течение которого датчик работает в этом режиме. Для регистрации изменений сигналов во времени отлично подходят осциллографы. Однако нам нужно измерять ток на уровне десятков миллиампер, а токовые пробники плохо работают в этом диапазоне из-за ограниченной чувствительности и дрейфа. Хорошие токовые клещи имеют среднеквадратическое значение шума 2,5 мА и требуют частого повторения процедуры компенсации нуля. Токовые пробники измеряют электрическое поле вокруг провода, поэтому для повышения чувствительности нужно пропустить через них провод несколько раз, чтобы умножить магнитное поле и, следовательно, уровень сигнала. Такой прием позволяет немного улучшить измерение тока и регистрировать импульсы в режиме активности и в режиме передачи. Но даже во время активности и передачи уровень тока может меняться: импульсы тока выглядят как последовательность высоких и низких уровней. Для точного расчета среднего тока нужно экспортировать сигнал и проинтегрировать все измеренные точки для получения среднего значения.

Таблица. Типовые уровни тока и длительности режимов

Передача	20–100 мА	1–100 мс
Активность	100 мкА – 10 мА	10–100 мс
Сон	500 нА – 50 мкА	100 мс – несколько минут

Осциллографы отлично справляются с захватом одного пакета. Однако если мы хотим узнать, сколько раз активизировался датчик в заданный интервал времени и сколько раз он выполнял передачу, то измерения усложняются. Осциллографы легко справляются с измерениями за короткий промежуток времени, но датчики могут иметь рабочие циклы длительностью несколько минут или даже часов, что очень сложно захватить и измерить.

Инновации в области измерений

Источники питания/измерители (SMU) Keysight N6781A и N6785A для анализа тока, потребляемого от батарей, решают все проблемы традиционных измерений за счет двух инноваций: безразрывного переключения диапазонов измерения тока и долговременной непрерывной регистрации данных. Источник питания/измеритель представляет собой модуль, который можно использовать с низкопрофильной модульной системой питания Keysight N6700 или с анализатором питания постоянного тока N6705.

Безразрывное переключение диапазонов измерения тока — это патентованная технология, которая позволяет менять диапазон измерения, не нарушая стабильности выходного напряжения и не создавая провалов во время переключения диапазонов. Эта функция предназначена для измерения пиковых токов на больших диапазонах и токов спящего режима в диапазоне 1 мА, который имеет погрешность смещения 100 нА. Столь

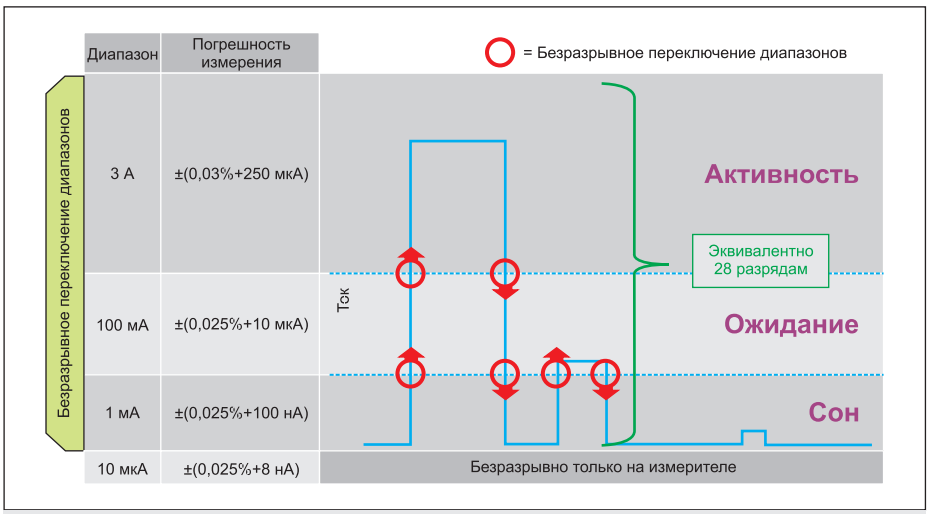

Рис. 2. Источник питания/измеритель Keysight N6781A позволяет выполнять точные измерения в широком диапазоне токов

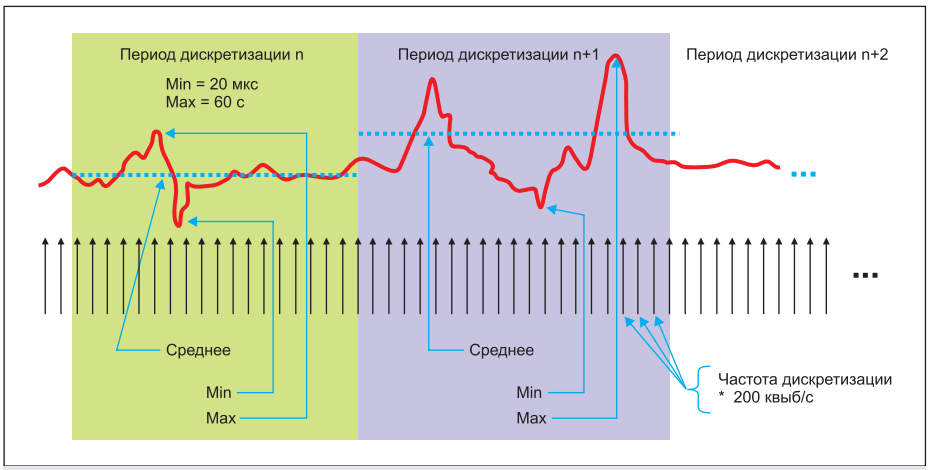

Рис. 3. Регистратор данных: все выборки интегрируются в последовательные периоды дискретизации. Ни одна выборка не теряется. В каждый период дискретизации определяются минимальные и максимальные значения

Рис. 4. Записанный потребляемый ток за 200 с работы позволяет по-новому взглянуть на динамику энергопотребления устройства

низкая погрешность смещения (100 нА, или 10% от 1 мкА, или 1% от 10 мкА) на порядки меньше погрешности традиционных цифровых мультиметров (рис. 2).

Функция безразрывного переключения диапазонов измеряемого тока используется двумя дигитайзерами, одновременно измеряющими напряжение и ток с частотой дискретизации 200 000 выб./с (с разрешением по времени 5 мкс). Оцифровку можно выполнять в течение 2 с и отображать с полным разрешением по времени или пропорционально увеличить время оцифровки за счет снижения разрешения. Однако для долговременных измерений встроенный регистратор данных модульного анализатора цепей питания Keysight N6705B интегрирует измерения, выполненные с частотой дискретизации 200 квыб./с, за указанный пользователем период интегрирования (от 20 мкс до 60 с) без потери выборок между периодами интегрирования. Поскольку регистратор данных работает непрерывно, все выборки попадают либо в один период интегрирования, либо в следующий — ни одна выборка не теряется. С помощью такого регистратора инженеры могут измерять ток и энергопотребление беспроводных датчиков за 1000 ч работы (рис. 3).

Для измерения тока спящего режима надо просто расставить маркеры и непосредственно прочесть их показания. Измерение, показанное на рис. 4, выполнено за один захват в течение большого периода времени. В результате мы получаем полную картину потребления тока, а также точное значение тока спящего режима — 599 нА.

Функция прокрутки и масштабирования позволяет увидеть уровень тока и время для каждого уровня мощности. Теперь можно увидеть и измерить детали, недоступные традиционным измерительным приборам. Хорошим примером являются последовательные импульсы, обозначенные на рис. 4 как «???». Программа выявила такой сюрприз: устройство потребляет ток импульсами с уровнем ~90 мкА в течение 500 мс, что соответствует среднему току 3,3 мкА. Если сложить этот ток с током спящего режима 599 нА, мы получим 730 нА, что на 22% больше, чем ожидалось. Подобные сюрпризы могут быть одной из причин превышения планируемого энергопотребления и сокращения времени работы от батареи до меньшего значения, чем ожидалось.

Стремясь оптимизировать энергопотребление беспроводных датчиков, инженеры должны уделять внимание даже мелким деталям. Знать количество энергии, затрачиваемое на отправку одного пакета информации, очень важно для того, чтобы сбалансировать ожидания пользователя в отношении времени работы от батареи и ответить на важные вопросы, такие как: «Как часто нужно отправлять информацию — раз в секунду, раз в 5 или раз в 10 секунд?» Инженеры могут точно оценить энергопотребление для

каждой версии микропрограммного обеспечения и проверить его за приемлемое время в ходе реальных измерений.

Простое измерение энергии

Энергия очень полезна для оценки времени работы от батареи, поскольку каждая операция потребляет определенную порцию энергии. Кроме того, можно сравнивать производительность устройств, выражая ее в джоулях на один бит переданной информации. Но специалисты редко используют энергетические показатели, так как их надо рассчитывать по напряжению, току и времени.

С помощью ПО управления и анализа Keysight 14585A можно непосредственно измерять энергию в джоулях. Например, энергию, потребляемую во время передачи пакета (рис. 5), захваченного в ходе синхронных измерений. Это одно из преимуществ наличия двух одновременно работающих дигитайзеров тока и напряжения, которые позволяют поточечно измерять энергию. Энергию в джоулях можно легко измерить между маркерами или пойти еще дальше, определив количество джоулей на один переданный бит.

Заключение

Инженеры, проектирующие устройства с автономным питанием для IoT, используют сложные методы управления энергопотреблением для продления времени работы от батареи. Традиционные методы измерения

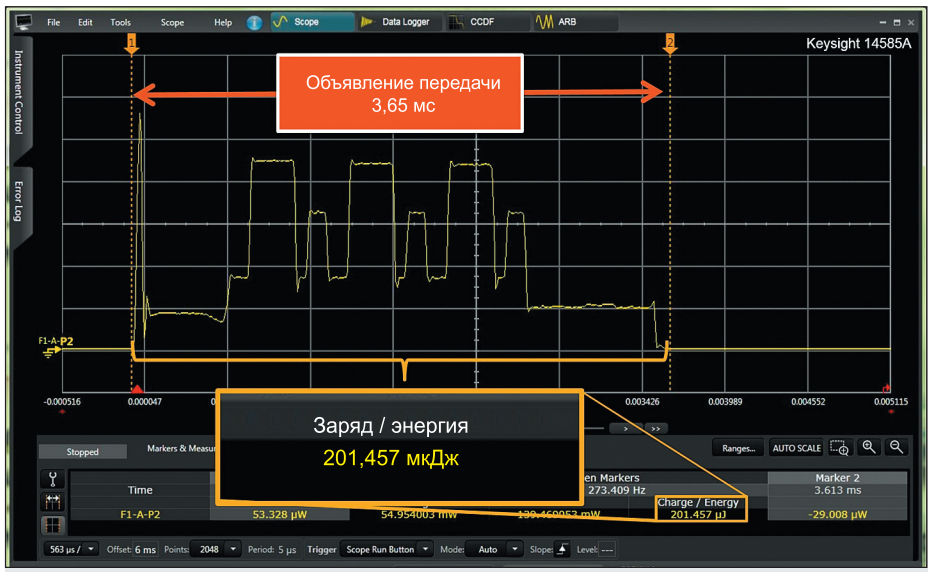

Рис. 5. С помощью ПО Keysight 14585A можно измерять энергию непосредственно в джоулях

сложны, занимают много времени и не обеспечивают точность, необходимую для оптимизации и проверки потребляемого тока, что зачастую приводит к недооценке энергопотребления устройства. Источники питания/измерители компании Keysight для анализа тока потребления от батарей предоставляют точные значения потребляемого тока за один измерительный цикл, что дает полное и детальное представление о потребляемом токе и энергии. Программное обеспечение для последующего анализа упрощает работу инженеров, предлагая визуальное представление с невиданной раньше детализацией.

С выпуском нового прибора семейства источников питания/измерителей Keysight N6785A возможности тестирования расширились до 80 Вт, а измеряемый ток — от единиц наноампер до 8 А. Эти новинки находят применение в тестировании широкого круга устройств — от смартфонов и планшетов до автомобильных контроллеров, беспроводных датчиков и чипсетов для IoT (www.keysight.com/find/N6781A-EU). ■