

# ВЫБОР БАТАРЕИ ДЛЯ ВСТРАИВАЕМЫХ СИСТЕМ

КИТ ОДЛЭНД (KEITH ODLAND), Silicon Laboratories

*По мере усложнения систем и методов управления электропитанием усложняется задача выбора батареи, которая удовлетворяла бы статическим и динамическим требованиям. При выборе батареи учитывается ее химический состав, диапазон рабочих температур, максимальная нагрузка, КПД и экологические требования.*

Неперезаряжаемые батареи, или первичные источники питания, находят широкое применение в большинстве встраиваемых систем (см. табл. 1). К этой категории батарей относятся щелочные элементы, которые производители, как правило, изготавливают на основе диоксида марганца и цинковой пыли с едким кали в качестве электролита. Эта батарейная технология используется во многих стандартных приложениях, например, для питания детекторов дыма, персонального медицинского оборудования, портативных аудиоустройств и мощных импульсных ламп. Номинальное напряжение щелочного элемента составляет 1,5 В, а напряжение пробоя — 0,9 В.

К другому типу первичных источников питания относятся цинковые углеродные батареи — предшественники щелочных элементов, имеющие схожий химический состав. Эти батареи с низкими эксплуатационными характеристиками применяются в чувствительных к цене приложениях с небольшим КПД, например, в игрушках, будильниках и радиоприемниках. Номинальное напряжение этих элементов составляет 1,5 В, а напряжение пробоя — 0,9 В.

К третьему типу батарей относятся литиевые элементы, в маркировке которых используются обозначения BR или CR. Литиевые батареи BR выполнены в разных форм-факторах, но чаще всего они предлагаются в виде плоских круглых аккумуляторов. Производители, как правило, изготавливают их с помощью геля из монофторида углерода и литиевого сплава. Такой состав обладает хорошими параметрами при высоких температурах, а батареи характеризуются малым саморазрядом. Эти элементы применяются в системах с большими интервалами обслуживания и имеют относительно невысокое энергопотребление. К числу таких систем относятся водяные и газовые счетчики, теплораспределительные устройства, системы электронной оплаты и системы контроля давления воздуха в шинах. Номинальное напря-

жение этих элементов составляет 3 В, а напряжение пробоя — 2,2 В.

Как и в литиевых батареях BR, в качестве материала для анода в типе CR используется тот же литиевый сплав, а катод изготовлен из диоксида марганца. Этот материал снижает внутренний импеданс батареи. Как таковая батарея типа CR лучше подходит для генерации более высоких токов, чем элементы BR, за счет меньшего тока саморазряда и меньшей производительности при высоких температурах. К числу применений батарей CR относятся удаленный бесключевой доступ, радиочастотная идентификация (RFID) и часы. Номинальное напряжение этих элементов составляет 3 В, а напряжение пробоя — 2,2 В.

Литиево-тионилхлоридные батареи — относительно новые элементы, которые характеризуются чрезвычайно малой скоростью саморазряда, благодаря чему их срок службы составляет около 20 лет. Благодаря тому, что у этих батарей скорость разряда постоянна, их выходное напряжение остается относительно постоянным в течение всего срока службы. Производители этих устройств изготавливают их с использованием раствора тетрахлоралюмината лития в хлористом тиониле в качестве жидкого катода и цинко-

вого сплава — в качестве анода. Это более дорогостоящая технология, чем те, на основе которых изготовлены другие литиевые элементы. Литиево-тионилхлоридные батареи находят применение в системах с весьма продолжительным сроком службы, например, в водяных и газовых счетчиках, в промышленном оборудовании и военной технике. Этот тип источников питания практически не применяется в потребительской электронике. Номинальное напряжение элементов составляет 3,6 В, а напряжение пробоя — 2,2 В.

Воздушно-цинковые батареи характеризуются намного большей плотностью энергии, чем все рассмотренные типы. Батарея этого типа состоит из воздушного и цинкового электродов и электролита. Во время разрядки поступающий извне воздух с помощью катализатора образует в водном растворе электролита гидроксил-ионы, которые окисляют цинковый электрод. В ходе этой реакции высвобождаются электроны, образующие ток. Потребители знакомы, по большей части, с этим типом батарей, которые используются в слуховых аппаратах и фотокамерах. При этом батареи намного большего размера находят применение в навигационных системах. Срок хранения

Таблица 1. Наиболее распространенные типы батарей

Батарея	Анод (-)	Катод (+)	Номинальное напряжение, В	Плотность энергии, МДж/кг	Другие параметры
Щелочная	Цинковый	Диоксид марганца	1,5	0,5	Продолжительный срок хранения, используется в приложениях с высоким или средним потреблением
Углеродно-цинковая	Цинковый	Диоксид марганца	1,5	0,13	Экономичность при низком потреблении тока
Литиевая (BR)	Литиевый	Монофторид углерода	3	1,3	Широкий диапазон рабочих температур, высокий внутренний импеданс, низкий импульсный ток
Литиевая (CR)	Литиевый	Диоксид марганца	3	1	Хороший импульсный режим, стабильное напряжение при разряде
Литиево-тионилхлоридная	Литиевый	Оксид-дихлорид серы	3,6	1,04	Низкая скорость саморазряда, срок службы — до 20 лет
Воздушно-цинковая	Цинковый	Кислород	1,4	1,69	Высокая плотность энергии, срок службы — несколько недель или месяцев

таких устройств составляет несколько лет. Номинальное напряжение этих элементов составляет 1,4 В, а напряжение пробоя — 0,9 В.

### ПРИГОДНОСТЬ БАТАРЕЙ

При оценке пригодности батареи того или иного типа для конкретного приложения инженеры оценивают ряд параметров, к наиболее важным из которых относятся номинальное напряжение, емкость, плотность энергии, показатели саморазряда и динамические характеристики. Номинальное напряжение измеряется между положительным и отрицательным выводами батареи. Разработчики располагают батареи последовательными или параллельными группами, чтобы установить требуемый уровень напряжения или тока.

Системной единицей измерения емкости энергии батареи в СИ является джоуль (Дж), однако большинство производителей указывает этот параметр в мА·ч. Например, если емкость батареи равна 100 мА·ч, это означает, что она может питать нагрузку током 5 мА в течение 20 ч. Поскольку совокупная энергия батареи является функцией тока устройства и напряжения на его выводе, джоуль — наиболее подходящая единица измерения для сравнения батарей с разными химическими составами. Преобразовать миллиампер-часы в джоули можно с помощью следующего уравнения:  $E = 3,6CV_{\text{вых}}$ , где  $E$  — энергия батареи, Дж;  $C$  — ее емкость, мА·ч;  $V_{\text{вых}}$  — выходное напряжение, В.

Химический состав батареи определяет электрохимические реакции, обеспечивающие генерацию электрической энергии. Некоторые из этих реакций происходят с большей эффективностью, чем другие, что позволяет создавать батареи меньшего размера при тех же показателях емкости. Отношение размеров батареи к ее емкости определяет энергетическую плотность. Как правило, чем выше плотность энергии, тем дороже обходится технология изготовления батареи. Разработчики этих элементов стремятся найти оптимальное соотношение между стоимостью устройств и их энергетической плотностью.

Срок службы батарей не вечен. Даже если они не используются, в них идут электрохимические реакции, что со временем приводит к снижению емкости элементов. Этот естественный процесс характеризуется скоростью саморазряда. У щелочных батарей, как правило, срок службы составляет 7–10 лет. У литиевых батарей типов BR и CR срок службы равен 10–15 лет, а у литиевых тионилохлоридных элементов он достигает 20 лет. Скорость саморазряда и другие процессы старения,

приводящие к уменьшению срока службы батарей, в большой степени зависят от температуры и рабочих циклов. Изменения рабочего цикла батареи часто неблагоприятно сказываются на ее разрядной характеристике.

Динамические физические параметры также воздействуют на рабочие параметры батареи. Вариации температуры, выходного импеданса, рабочего цикла и энергопроизводительности влияют на условия нагрузки и, в конечном итоге, определяют выбор подходящего источника питания. Некоторые из этих вариаций являются эффектами первого порядка, и их нельзя не учитывать в расчетах.

Многие системы имеют широкую динамическую полосу пропускания по отношению к расходу мощности. Например, беспроводная сенсорная система, используемая для передачи показаний газовых или водяных счетчиков, потребляет несколько микроватт в спящем режиме, а в активном пиковом режиме — ватты. Это обстоятельство накладывает дополнительные требования к питанию от батареи или другого энергонакопительного устройства. Для решения такой задачи инженеры устанавливают конденсатор параллельно источнику питания, чтобы удовлетворить потребность в пиковой мощности. В этих случаях следует учитывать дополнительные проблемы, связанные со стоимостью конденсатора, его размером, схемой зарядки и утечками.

Кроме того, разработчики должны учитывать разрядные характеристики батарей, которые в значительной степени варьируют в зависимости от химического состава источников питания и профиля энергопотребления. Окружающие условия, в особенности температура, также сказываются на рабочих характеристиках батарей. При выборе этих источников питания следует также учесть соображения системного уровня, например, интервал, в течение которого происходит замена батарей, а также требования к напряжению питания системы. Кроме того, следует также обратить внимание на такие экологические требования как утилизация, токсичность материалов, входящих в состав источников питания, безопасность и условия поставки.

### ТРЕБОВАНИЯ

Как и в большинстве других случаев, разработчики должны взвесить ряд иногда противоречащих друг другу требований, чтобы наилучшим образом удовлетворить всем техническим условиям проекта. Рассмотрим в качестве иллюстрации следующий пример. Полицейские зачастую пользуются электрошокерами — оружием с электронным управлением. Эти устройства

обеспечивают разряд в тысячи вольт, который поражает нервную систему человека, лишая его сознания. В этой системе используется трансформатор, который повышает напряжение батареи в тысячи раз по сравнению с ее выходной величиной.

Разработчик может заменить трансформатор 30 тыс. последовательно соединенных щелочных батарей типа AAA. Эти устройства в совокупности создадут напряжение в 45 тыс. В, однако длина такого электрошокера составит 1,33 км, а вес — 360 кг. Кроме того, потребуется клавишный переключатель на 50 кВ. Этот вымышленный пример наглядно показывает, как современная электроника позволяет преодолевать естественные ограничения, обусловленные недостаточно эффективным химическим составом батарей.

Рассмотрим в качестве другого примера воздушно-цинковые батареи, которые продолжительное время применялись в слуховых аппаратах благодаря высокой емкости в 1,69 МДж/кг и способности обеспечивать высокие пиковые токи. Как правило, эти батареи служат меньше трех месяцев из-за ограниченных возможностей циклов электролитической реакции. Однако для этого приложения такой срок службы вполне достаточен, и у пользователя имеется возможность менять элементы ежемесячно.

Еще один параметр определяется химическим составом батареи — ее выходное напряжение, которое, как правило, составляет 1,4 В. Если, например, это значение вполне годится для низковольтных цепей слуховых аппаратов, то для многих стандартных встраиваемых систем потребуются дополнительно предусмотреть возможность питания от 1,4-В элемента.

К счастью, все большее число электронных устройств оснащается современными модулями управления питания, чтобы решить эти вопросы. Например, устройство со встроенным DC/DC-преобразователем повышает входное напряжение 1,4 В воздушно-цинковой или 1,5-В щелочной батареи до приемлемого для системы уровня.

Более того, программируемый повышающий преобразователь может изменить выходное напряжение в зависимости от потребности системы таким образом, чтобы энергия, поступающая от батареи к питаемому устройству, расходовалась эффективно в течение рабочего цикла. Такое функционирование позволяет разработчикам оптимизировать функционирование источника питания.

Например, рассмотрим двунаправленный беспроводной датчиковый узел в системе обеспечения безопасности дома. Датчик удара такой системы

отслеживает состояние целостности оконного стекла и периодически сообщает эти данные и данные о состоянии батареи на главный пульт управления. Для связи между датчиком и пультом используется протокол передачи/приема/уведомлений, что позволяет уменьшить число избыточных сообщений от сенсора. Большую часть времени он находится в режиме низкого потребления, обеспечивая максимальный срок службы батареи. В таблице 2 определены состояния этого датчика.

Система, устанавливающая факт проникновения в дом через разбитое оконное стекло, состоит из микроконтроллера со встроенным DC/DC-преобразователем, субгигагерцового радиопередатчика, пьезоэлектрического датчика удара и щелочной батареи (см. рис. 1). В отношении этой системы верны следующие допущения.

Во-первых, пьезоэлектрический датчик имеет собственный источник питания, который генерирует 3-В импульс при попытке разбить стекло. Этот сигнал запускает внешнее прерывание, которое пробуждает микроконтроллер. Во-вторых, ядро микроконтроллера управляется 1,8-В напряжением внутреннего регулятора. ОЗУ, блок управления питанием и часы реального времени работают при напряжении 0,9 В. Это значит, что источником питания микроконтроллера может быть щелочная батарея типа AAA. В-третьих, усилитель мощности в передающем блоке трансивера обеспечивает более высокую выходную мощность и эффективность, когда напряжение на шине усилителя приближается к максимальному значению на шине питания. Наконец, встроенный регулятор управляет маломощным усилителем, цепью приемника, контуром фазовой синхронизации и синтезатором. Минимальная величина напряжения равна 1,8 В.

Очевидно, что динамическая настройка напряжения батареи позволяет оптимизировать КПД и рабочие характеристики системы. Например, максимальный КПД передатчика достигается при рабочем напряжении 3 В. У щелочной батареи номинальное выходное напряжение составляет 1,5 В, поэтому при использовании встроенного повышающего DC/DC-преобразователя КПД системы достигает 90%. Однако встроенная функция регулирования ограничивает цепь приемника величиной 1,8 В. Подача 3-В питания при передаче данных приемником может снизить КПД встроенного низковольтного регулятора до 60%. В таком случае разумнее обеспечить динамическую коррекцию выходного напряжения DC/DC-преобразователя с 3 до 1,8 В,

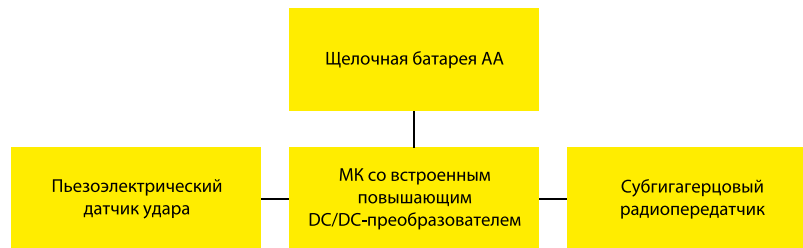


Рис. 1. Система обнаружения попытки проникновения в дом состоит из микроконтроллера со встроенным DC/DC-преобразователем, субгигагерцового радиопередатчика, пьезоэлектрического датчика удара и щелочной батареи

увеличив КПД во время приема данных сенсорным узлом.

Сравним систему, питающуюся от шины фиксированного напряжения литиевой батареи, с устройством, питающимся от щелочной батареи в динамическом режиме переключения. Очевидно, что потери на переключение в первом случае отсутствуют, а выходное напряжение равно 3 В. Кроме того, разработчику едва ли понадобится увеличить размер батареи, чтобы удовлетворить требованиям по обеспечению пикового тока, поскольку цена такого решения увеличится. В случае с щелочной батареей потери на переключение составят 10%.

В таблицах 3 и 4 показано, сколько требуется энергии от каждого элемента для беспроводного датчикового приложения. Продолжительность сна определяется вычитанием из 1 с суммарного времени, необходимого для совершения всех остальных операций. Обработка данных, их прием и передача происходят один раз в минуту. В таблице 3 представлены требования к 3-В 620-мА·ч литиевой батарее CR2450 ценой 62 цента, а в таблице 4 — требования к 1,5-В 1125-мА·ч щелочной бата-

рее типоразмера AAA ценой в 25 центов.

При таком профиле работы приложения батарея CR2450 прослужит около 4,33 лет. При том же профиле срок службы щелочной батареи AAA составит приблизительно 4,65 лет. Поскольку КПД щелочной батареи на 16% выше, срок ее службы на 7% больше, а стоимость — на 60% меньше. Это сравнение демонстрирует те преимущества, которые достигаются путем применения современных методов динамического преобразования энергии. Данные преимущества в значительной степени зависят от рабочего цикла функций. При увеличении продолжительности режима приема или рабочего цикла увеличиваются преимущества использования динамического метода эксплуатации щелочной батареи. Выходное напряжение DC/DC-преобразователя может достигать 3,3 В — на 0,3 В выше, чем у литиевой батареи.

Таким образом, у современных разработчиков появилось намного больше возможностей при выборе соответствующего источника питания для встраиваемой системы.

Таблица 2. Рабочие состояния датчика удара стекла

Состояние	Частота	Описание
Измерение	Запуск по событию	Пьезоэлектрический датчик удара, подключенный к интерфейсу системы ввода-вывода; система пробуждается при попытке разбить стекло
Передача данных	Один раз в минуту	Передача данных о состоянии датчика и батареи на панель управления
Прием данных	Один раз в минуту	Прием уведомлений с панели управления
Сон	Всё остальное время	Режим сна с малым потреблением энергии, функция часов в реальном времени и ввода-вывода данных

Таблица 3. Энергетические требования к литиевой батарее при регулировании фиксированного напряжения

Режим	Частота	Продолжительность, с	Ток, А	Напряжение, В	Потери на переключение, %	Энергия, Дж
Сон	60	$954,9 \cdot 10^{-3}$	$600 \cdot 10^{-9}$	3	0	$103,1 \cdot 10^{-6}$
Обработка	1	$100 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-3}$			$1,2 \cdot 10^{-6}$
Передача		$15 \cdot 10^{-3}$	$27 \cdot 10^{-3}$			$1,2 \cdot 10^{-6}$
Прием		$30 \cdot 10^{-3}$	$18 \cdot 10^{-3}$			$1,6 \cdot 10^{-3}$

Таблица 4. Энергетические требования к щелочной батарее при регулировании динамического напряжения

Режим	Частота	Продолжительность, с	Ток, А	Напряжение, В	Потери на переключение, %	Энергия, Дж
Сон	60	$954,9 \cdot 10^{-3}$	$600 \cdot 10^{-9}$	1,5	10	$51,6 \cdot 10^{-6}$
Обработка	1	$100 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-3}$	1,8		$800 \cdot 10^{-9}$
Передача		$15 \cdot 10^{-3}$	$27 \cdot 10^{-3}$	3		$1,4 \cdot 10^{-3}$
Прием		$30 \cdot 10^{-3}$	$18 \cdot 10^{-3}$	1,8		$1,1 \cdot 10^{-3}$