

# Измерение ёмкости аккумуляторов

Боб Золло, Keysight Technologies, Inc.

**В статье пойдёт речь об ёмкости аккумуляторов и её измерении. Приведён пример определения погрешности измерений ёмкости литий-ионных аккумуляторов.**

Всех пользователей – от владельцев сотовых телефонов до водителей электромобилей – заботит время работы аккумулятора. Разработчики систем пытаются максимально продлить время до следующего заряда, используя для этого два способа. Один заключается в разработке систем с малым энергопотреблением, что продлевает время работы от аккумулятора, второй – в увеличении максимальной энергии, доступной системе с автономным питанием. Чтобы максимально увеличить запас энергии, содержащейся в батарее, можно использовать батарею большего размера или взять небольшую батарею большей ёмкости. Поскольку системы с автономным питанием, как правило, являются портативными, вес и размер являются для них очень важными параметрами, а значит, применение большой батареи противоречит требованию малого размера и веса.

Создавая батарею, надо стараться обеспечить ей как можно большую ёмкость. Аккумуляторная батарея состоит из отдельных элементов, включённых последовательно (для повышения напряжения) и параллельно (для увеличения тока). Таким образом, батареи большой ёмкости строятся из элементов большой ёмкости. Сегодня самыми популярными аккумуляторами для большинства устройств с автономным питанием являются литий-ионные аккумуляторы, обладающие превосходным сочетанием размера, веса, нагрузочной способности, ёмкости и стоимости.

## Ёмкость литий-ионного аккумулятора

Ёмкость литий-ионных, как и любых других аккумуляторов, измеряется в ампер-часах (А•ч). Для справки: один ампер-час означает, что такой аккумулятор может давать ток один ампер в течение одного часа. Таким образом, ампер-часы представляют собой произведение тока в амперах на время работы в часах. Аналогичным образом, 1 А•ч означает также, что аккумулятор может отдавать ток 2 А в течение получаса или ток 0,25 А в течение четырёх часов. На самом деле ёмкость в ампер-часах является мерой запасённых кулонов. Если рассмотреть единицы измерения, входящие в ампер-часы, то можно увидеть, что один ампер равен одному кулону в секунду (Кл/с), т.е. если умножить амперы на время, то получатся кулоны. Учитывая, что один час состоит из 3600 с, можно посчитать, что 1 А•ч равен 3600 А•с, или 3600 Кл/с × секунды, что равно 3600 Кл сохранённого в аккумуляторе заряда. Заметим, что ёмкость маленьких аккумуляторов может измеряться в миллиампер-часах (мА•ч). Например, типичный литий-ионный аккумулятор формата 18650 имеет ёмкость примерно 3 А•ч, или 3000 мА•ч.

Ёмкость аккумулятора можно также измерить в ватт-часах (Вт•ч), она является мерой сохранённой энергии. Если рассмотреть единицы измерения, то один ватт равен одному джоулю в секунду (Дж/с), то есть, если умножить ватты на время, то получатся джоули. Учитывая, что один час состоит из 3600 с, можно посчитать, что 1 Вт•ч равен 3600 Вт•с, или 3600 Дж/с•с, что даёт 3600 Дж сохранённой в аккумуляторе энергии. Впрочем, чаще всего ёмкость литий-ионных аккумуляторов измеряют в единицах заряда или в ампер-часах. Далее в статье будут использоваться исключительно ампер-часы.

Чтобы измерить ёмкость в ампер-часах, сначала нужно полностью зарядить аккумулятор. Самый простой способ измерения ёмкости заключается в полном разряде аккумулятора заданным током X ампер. Аккумулятор считается разряженным, когда его напряжение достигает конечного напряжения разряда. На практике нужно просто подключить к аккумулятору токовую нагрузку в X ампер и запустить часы. Чтобы быть точно уверенным в потребляемом токе, не стоит полагаться на точность установки токовой нагрузки. Вместо этого нужно измерить ток, потребляемый нагрузкой. Этот ток назовём измеренным током X ампер. Также непрерывно измеряется напряжение на аккумуляторе. Когда напряжение достигнет значения конечного напряжения разряда, часы останавливаются. Допустим, что разряд занял T часов (см. рис. 1).

Линия на верхнем графике показывает зависимость напряжения от времени. Она начинается при полностью заряженном аккумуляторе и тянется, пока не будет достигнуто конечное напряжение разряда. В течение всего разряда ток остаётся постоянным. Измеренное время равно времени разряда. Ёмкость аккумулятора определяется площадью под кривой разряда.

На нижнем графике показана зависимость тока от времени. Просто умножив постоянное значение тока X ампер на измеренное время T, в результате получим измеренную ёмкость X × T (А•ч). Площадь под графиком зависимости тока от времени и есть ёмкость аккумулятора. В этом простом графике измерения кривая зависимости тока от времени вовсе не кривая, а на самом деле прямая линия,

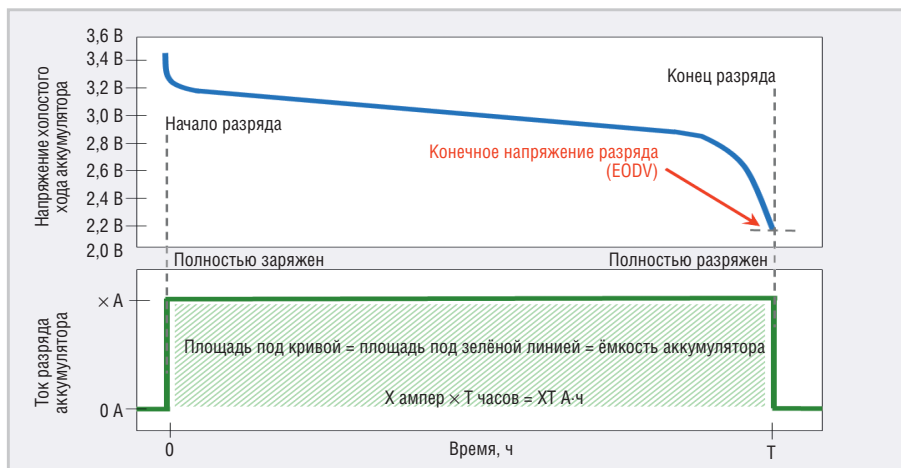


Рис. 1. Профиль разряда литий-ионного аккумулятора



Рис. 2. Производительная система питания Keysight

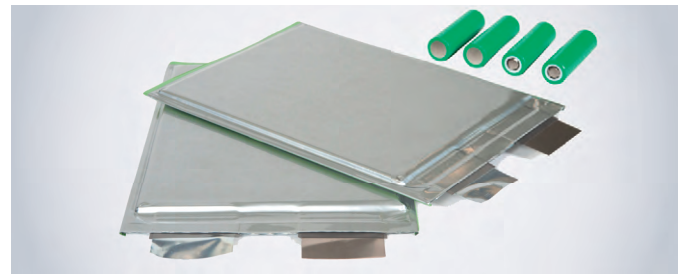


Рис. 3. Большие прямоугольные литий-ионные аккумуляторы

поэтому расчёт площади под кривой сведется к простому умножению  $X \times T$ .

### ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ЁМКОСТИ

В приведённом выше примере измерялись три параметра: ток, время и напряжение.

Время можно измерить с очень высокой точностью, поэтому погрешность измерения времени, скорее всего, не окажет большого отрицательного влияния на измерение ёмкости.

Погрешность измерения напряжения важна, поскольку часы останавливаются по измеренному значению напряжения. Если точность измерения напряжения невелика, то часы могут остановиться слишком рано, что даст заниженное значение ёмкости. И, наоборот, низкая точность измерения напряжения может привести к тому, что часы остановятся слишком поздно, что даст завышенное значение ёмкости. Однако напряжение аккумулятора меняется медленно, поэтому погрешность его измерения можно снизить, увеличив время интегрирования цифрового мультиметра для снижения шума, который может повлиять на точность измерения напряжения. Поскольку напряжение меняется медленно, можно спокойно использовать большее время интегрирования.

Точность измерения тока является основным фактором, определяющим погрешность измерения ёмкости в ампер-часах. Низкая точность измерения тока приведёт к неправильному измерению ёмкости. Для того чтобы правильно оценить качество измерения ёмкости, необходимо рассмотреть характеристики выполняемого измерения тока.

### ПРИМЕР ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ЁМКОСТИ

При измерении ёмкости возникает погрешность, которая выражается в процентах от измеренной ёмкости

плюс смещение в миллиампер-часах на каждый час измерения.

Рассмотрим пример измерения ёмкости с помощью источника питания Keysight N7950A мощностью 1000 Вт с номинальным выходным напряжением 9 В и током  $\pm 100$  А (см. рис. 2).

Производительная система питания Keysight относится к семейству источников питания постоянного тока, состоящему из 24 моделей мощностью 1000 Вт (вверху) и 2000 Вт (внизу). Эти источники питания могут подавать питание и выступать в роли нагрузки постоянного тока, обеспечивая лучшую в своём классе точность измерения тока. Подробную информацию можно изучить на странице [www.keysight.com/find/APS](http://www.keysight.com/find/APS).

Этот источник является 2-квadrантным, то есть он может подавать ток (выходной ток до +100 А) и потреблять ток (входной ток до -100 А). Это предоставляет возможность использовать его для заряда и разряда аккумуляторов. Разряжая аккумулятор (или потребляя ток), он выступает в роли электронной нагрузки постоянного тока и может использоваться для измерения ёмкости аккумулятора по описанному выше алгоритму. Далее в статье этот 2-квadrантный источник питания будет называться электронной нагрузкой, поскольку он будет использоваться в этом качестве для разряда аккумулятора и измерения его ёмкости.

Продолжаем рассмотрение примера. Далее измеряется ёмкость большого аккумулятора, от которого будет потребляться постоянный ток 5 А. На рисунке 3 показан большой аккумулятор прямоугольной формы с ёмкостью порядка 10 А·ч или более.

Большие прямоугольные литий-ионные аккумуляторы разработаны для применения в электромобилях. Они имеют ёмкость от 10 до 40 А·ч и более. Для сравнения: в правом верхнем углу показаны обычные цилиндрические аккумуляторы формата 18650 (см. рис. 3).

Согласно спецификациям, погрешность измерения тока источника

N7950A составляет 0,05% + 3 мА в диапазоне от 0 до 10 А. Как было сказано выше, неважно какой постоянный ток установлен, поскольку будет точно измеряться ток, потребляемый от аккумулятора. Кроме того, N7950A имеет погрешность измерения времени 0,01%.

Для определения погрешности измерения ёмкости нужно сложить пропорциональную составляющую погрешности измерения тока – 0,05% с погрешностью измерения времени – 0,01%. В результате пропорциональная составляющая погрешности измерения ёмкости будет равна 0,06% от измеренной ёмкости. Итак, если измеряется ёмкость 10 А·ч, то погрешность 0,06% даст значение ошибки  $(0,06\% \times 10 \text{ А} \cdot \text{ч}) = 6 \text{ мА} \cdot \text{ч}$ .

Теперь рассмотрим постоянную составляющую погрешности. В нижнем диапазоне APS имеет погрешность смещения 3 мА. Это значит, что в течение всего времени интегрирования может присутствовать погрешность 3 мА. В результате это даст погрешность 3 мА·ч за каждый час измерения. Переведя эту величину в более простую для расчётов форму, получим погрешность 0,833 мкА·ч на каждую секунду измерения.

Итак, подведём итог:

- электронная нагрузка имеет погрешность измерения тока 0,05% + 3 мА;
- электронная нагрузка имеет погрешность измерения ёмкости 0,06% + 0,833 мкА·ч/с;
- ток 10 А измеряется в течение 1 ч, поскольку один час требуется аккумулятору для достижения конечного напряжения разряда, после чего измерение ёмкости прекращается (это даст ёмкость 10 А·ч);
- пропорциональная составляющая погрешности ёмкости равна 0,06% от 10 А·ч, или 6 мА·ч;
- смещение ёмкости составляет  $0,833 \text{ мкА} \cdot \text{ч/с} \times 3600 \text{ с} = 3 \text{ мА} \cdot \text{ч}$ ;
- суммарная погрешность измерения ёмкости будет равна  $6 \text{ мА} \cdot \text{ч} + 3 \text{ мА} \cdot \text{ч} = 12 \text{ мА} \cdot \text{ч}$  для измеренной ёмкости 10 А·ч в течение одного часа.

