

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ СТЕПЕНИ ЗАРЯЖЕННОСТИ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ

А.И. Груздев

Рассмотрены методические подходы к определению в реальном масштабе времени степени заряженности литий-ионных аккумуляторных батарей, длительно эксплуатирующихся без проведения технического обслуживания и ремонтно-восстановительных работ. Проведён сравнительный анализ аппаратных и методических погрешностей вольтметрического и кулонометрического методов определения их текущей ёмкости. Показано, что в последнем случае необходима регулярная тарировка счётчика ампер-часов, для которой могут быть использованы сигналы срабатывания виртуальных датчиков предельного напряжения разряда или предельного напряжения заряда единичных аккумуляторов или батареи в целом, поступающие от системы контроля и управления её работой. Более простой в аппаратной реализации вольтметрический метод, использующий для определения степени заряженности только результаты измерений напряжения и температуры батареи, целесообразно использовать в системах электроснабжения, алгоритм функционирования которых позволяет производить измерения напряжения батареи без протекания тока. В обоих методах необходимо учитывать снижение номинальной ёмкости, происходящего из-за деградации аккумуляторов при длительной эксплуатации аккумуляторных батарей.

Ключевые слова: аккумуляторная батарея, литий-ионный аккумулятор, степень заряженности, математическая модель.

Одним из важнейших параметров, характеризующих состояние аккумуляторной батареи (АБ), является степень заряженности или состояние заряда (state of charge) (SOC). Этот параметр обычно определяется в процентах согласно выражения:

$$\text{SOC} = C_{\text{тек}} / C_{\text{ном}} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где: $C_{\text{тек}}$ – текущее значение ёмкости (заряда) АБ, $C_{\text{ном}}$ – её номинальная ёмкость, определяемая как значение разрядной ёмкости, полученное в зарядно-разрядном цикле, проведённом в номинальном режиме в нормальных условиях в полном рабочем окне напряжений. На практике оценку степени заряженности АБ обычно производят не в относительных, а в абсолютных единицах – в ампер-часах или ампер-секундах, используя для этого непосредственно параметр $C_{\text{тек}}$.

Только прервав работу батареи и проведя на стенде разряд АБ в нормальных условиях номинальным током $I_{p,n}$ можно определить точное (фактическое) значение $C_{\text{тек}}$ по формуле:

$$C_{\text{тек}} = I_{p,n} t_{\text{разр}}, \quad (2)$$

где $t_{\text{разр}}$ – время разряда батареи до минимального значения рабочего напряжения.

Для практического использования такой метод неприемлем, так как при работе АБ необходимо иметь оценку $C_{\text{тек}}$ в режиме реального времени [1]. Наиболее важно это для батарей, которые длительно эксплуатируются без проведения технического обслуживания и ремонтно-восстановительных работ (например, в составе космических аппаратов). Без знания этого параметра невозможно правильно оценить имеющийся в батарее запас энергии и обеспечить в системе электроснабжения (СЭС) эффективное и безопасное управления потоками энергии.

Для батарей на основе герметичных аккумуляторов, не имеющих встроенных датчиков степени заряженности, для оценки $C_{\text{тек}}$ могут использоваться три метода:

1. Вольтметрический метод, в котором $C_{\text{тек}}$ определяется косвенным путём через параметр SOC из измерений напряжения АБ и сравнения полученных значений с типовой разрядной кривой.

2. Кулонометрический метод, использующий непосредственный контроль изменения электрического заряда в процессе работы АБ с помощью счётчика ампер-часов.

3. Импедансометрический метод, в котором аналогично вольтметрическому методу $C_{\text{тек}}$ определяется косвенным путём из сравнения измеренных значений импеданса с типовой зависимостью этого параметра от SOC.

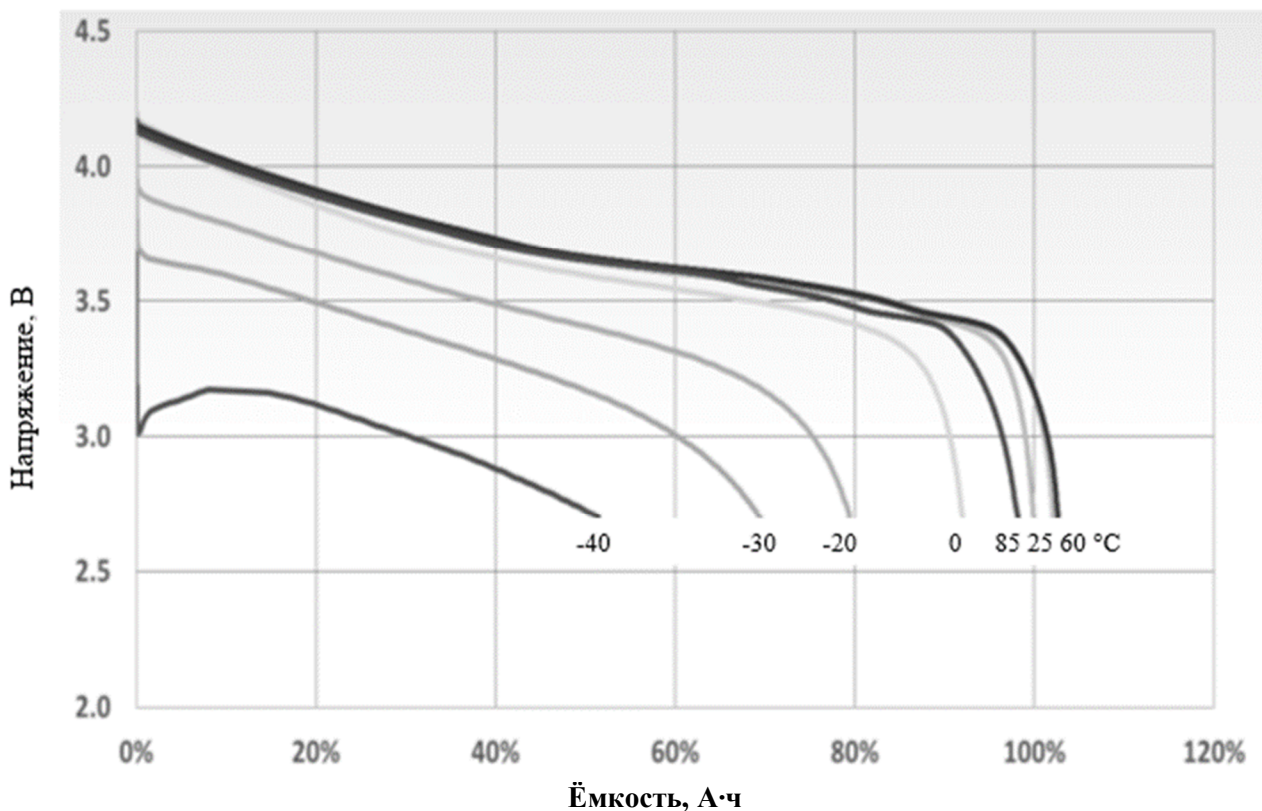
На практике из-за сложной аппаратной и методической реализации, и как следствие низкой точности оценки степени заряженности, последний метод разработчики СЭС используют редко, предпочитая определять $C_{\text{тек}}$ вольтметрическим или кулонометрическим методами.

Каждый из этих методов имеет свои достоинства и ограничения. Проведём оценку погрешности определения $C_{\text{тек}}$ исходя из следующих допущений:

1. Батарея состоит из литий-ионных аккумуляторов, имеющих:

- а) одинаковые электрические параметры;
- б) саморазряд за 1 месяц 5 % от $C_{\text{ном}}$;
- в) КПД заряда по току 100 %;
- г) разрядные характеристики, изображённые на рис. 1.

2. Аккумуляторная батарея остаётся полностью сбалансирована (напряжения всех аккумуляторов одинаковы) в процессе циклирования.



Зависимость напряжения литий-ионного аккумулятора от глубины разряда при различных температурах [2]

3. Погрешность измерения напряжения во всех методиках определения $C_{\text{тек}}$ составляет $\pm 0,1\%$ от максимального значения измеряемого диапазона.

В общем случае погрешность определения текущей ёмкости складывается из погрешности, определяемой точностью измерения параметров используемых аппаратных средств, и методической погрешности.

В вольтметрическом методе в соответствии с выражением (1) значения $C_{\text{тек}}$ рассчитываются по формуле:

$$C_{\text{тек}} = C_{\text{ном}} \cdot \text{SOC} / 100. \quad (3)$$

Значение SOC определяется по величине текущего значения напряжения единичного аккумулятора $U_{\text{ак}}$ или АБ в целом. В первом приближении, не учитывая возможность протекания на электродах побочных электрохимических процессов, напряжение $U_{\text{ак}}$ при разряде зависит от величины электродвижущей силы ЭДС, являющейся функцией SOC и температуры T , а также внутреннего сопротивления $R_{\text{вн}}$ и тока I , протекающего через аккумулятор:

$$\begin{aligned} U_{\text{ак}} &= \text{ЭДС} - R_{\text{вн}} I; \\ \text{ЭДС} &= f(\text{SOC}, T). \end{aligned} \quad (4)$$

Обычно за величину ЭДС на практике принимается напряжение разомкнутой цепи $U_{\text{р.ц}}$. Если измерения напряжения производятся при разомкнутой внешней цепи или в условиях отсутствия тока через АБ, то:

$$U_{\text{ак}} \approx U_{\text{р.ц}} = f(\text{SOC}, T).$$

В соответствии с допущением 1 зависимость напряжения аккумуляторов от температуры при разряде в условиях положительных температур незначительна (см. рис. 1). Следовательно, зная зависимость напряжения от SOC по измеренным значениям напряжения, можно однозначно определить величину SOC аккумулятора и АБ в целом. Если в выражении (3) $C_{\text{ном}}$ рассматривать как константу, то погрешность определения степени заряженности $\Delta C_{\text{тек}}$ связана только с точностью оценки SOC АБ. Согласно рисунку, изменение напряжения единичного аккумулятора в рабочем диапазоне изменения SOC от 100 до 10 % составляет порядка 800 мВ. Соответственно с учётом принятого допу-

шения 3 о погрешности определения напряжения в этом диапазоне (± 4 мВ) аппаратная погрешность определения SOC составит:

$$\Delta \text{SOC} \approx (100 - 10) \% / 800 \text{ мВ} \cdot 4 \text{ мВ} = \pm 0,45 \%$$

Для аккумуляторов с катодом на основе литированного фосфата железа изменение напряжения в рабочем диапазоне изменения SOC в 2 – 3 раза меньше, что в соответствующее количество раз увеличивает погрешность определения величины SOC для этого типа аккумуляторов.

Однако, не во всех практических применениях можно организовать измерение напряжения без протекания тока через АБ. Если реализовать такой режим работы АБ невозможно, алгоритм расчёта SOC должен предусматривать корректировку измеренных значений напряжения в соответствии с математической моделью АБ, учитывающей в соответствии с выражением (4) наряду с ЭДС и падение напряжения на внутреннем сопротивлении $R_{\text{вн}}$ АБ [3]. В общем случае внутреннее сопротивление зависит от степени заряженности SOC, температуры T , фактической наработки t , а также протекающего тока I :

$$R_{\text{вн}} = f(\text{SOC}, T, t, I).$$

Очевидно, что точность определения SOC при использовании в расчётах значения напряжения, скорректированного в соответствии с математической моделью, учитывающей приведённые выше зависимости, снизится многократно.

Кроме того, существенную погрешность в определение $C_{\text{тек}}$ вольтометрическим методом при длительной эксплуатации АБ будет вносить старение аккумуляторов: их номинальная ёмкость $C_{\text{ном}}$ снижается, и её значение при расчётах также должно корректироваться. При этом необходимо отметить, что учесть снижение $C_{\text{ном}}$ в рамках вольтометрического метода определения $C_{\text{тек}}$, базирующегося только на измерениях напряжения АБ, принципиально невозможно. Для этого необходимо дополнительно использовать счётчик ампер-часов.

В кулонометрическом методе, использующем счётчик ампер-часов, $C_{\text{тек}}$ равна величине его ёмкости $C_{\text{счёт}}$, которая, как правило, определяется по формуле:

$$C_{\text{тек}} = C_{\text{счёт}} = Q_{\text{нач}} + Q_{\text{зар}} - Q_{\text{разр}}, \quad (5)$$

где $Q_{\text{нач}}$ – начальная ёмкость (электрический заряд) АБ; $Q_{\text{зар}} = \int I_{\text{зар}} dt_{\text{зар}}$ – ёмкость (электрический

заряд), полученная при заряде; $Q_{\text{разр}} = \int I_{\text{разр}} dt_{\text{разр}}$ – ёмкость (электрический заряд), отданная при разряде.

В общем случае погрешность определения $\Delta C_{\text{тек}}$ складывается из аппаратной погрешности и методической погрешности. Аппаратная погрешность вычисления электрического заряда Q в основном определяются погрешностью измерения тока через АБ, которая в свою очередь складывается из погрешности датчика тока и погрешности измерителя выходного сигнала датчика – измерителя напряжения. Если пренебречь погрешностью датчика тока, приняв её значение ниже $\pm 0,01\%$, в соответствии с формулой (2) и допущением 3 погрешность определения $C_{\text{тек}}$ постоянна и равна:

$$\Delta C_{\text{тек}} \approx 3 \cdot 0,1\% = \pm 0,3 \%$$

Однако, рассчитанное значение не учитывает методическую погрешность, обусловленную тем, что в формуле (5) не отражены электрохимические процессы, происходящие в аккумуляторах при циклировании АБ. В частности, она не учитывает:

- 1) КПД цикла заряд/разряд по току (КПД_{з.т});
- 2) потери заряда $Q_{\text{пот}}$, имеющие как восполнимый характер (саморазряд аккумуляторов $Q_{\text{с.р}}$) за счёт токов утечек внутри аккумуляторов и по внутренним цепям АБ), так и невосполнимый характер за счёт деградации внутренней структуры аккумуляторов $Q_{\text{дегр}}$.

С учётом сказанного выше формула для вычисления $C_{\text{тек}}$ принимает вид:

$$C_{\text{тек}} = Q_{\text{нач}} + Q_{\text{зар}} \cdot \text{КПД}_{\text{з.т}} - Q_{\text{разр}} - Q_{\text{с.р}} - Q_{\text{дегр}}.$$

В рамках используемых допущений, для литий-ионных аккумуляторов КПД_{з.т} = 100 % [4] и не оказывает влияние на точность определения $C_{\text{тек}}$. Однако, для других типов аккумуляторов КПД_{з.т} может быть ниже на 10 – 20 %, что без коррекции значений счётчика ампер-часов программными средствами приведёт к недопустимо большой ошибке в расчётах $C_{\text{тек}}$ уже через несколько циклов.

Существенную ошибку в определение $C_{\text{тек}}$ может оказать саморазряд и деградация аккумуляторов. В рамках принятых допущений по величине саморазряда без соответствующей коррекции определяемые значения $C_{\text{тек}}$ окажутся завышенными на 10 – 15 % уже через несколько месяцев. Так как скорость саморазряда аккумуляторов зависит от многих, как внешних, так и внутренних факторов, и может значительно изменяться в процессе их

жизненного цикла, в общем случае простое введение в алгоритм расчёта некоторого фиксированного значения $Q_{с.р.}$, определённого на этапе изготовления АБ, не может полностью исключить связанную с саморазрядом методическую погрешность, а позволяет только её уменьшить.

Соответственно погрешность определения $C_{тек}$ неизбежно увеличивается в процессе циклирования АБ и относительно быстро становится недопустимо большой без регулярной тарировки счётчика ампер-часов. Для его тарировки могут быть использованы сигналы срабатывания виртуальных датчиков предельного напряжения разряда или предельного напряжения заряда единичных аккумуляторов или АБ в целом, поступающие от системы контроля и управления АБ. При эксплуатации АБ на низкоорбитальных космических аппаратах организация регулярного получения таких сигналов для корректировки счётчика ампер-часов в штатном режиме работы может быть затруднена из-за малой глубины циклирования АБ.

По сигналу срабатывания датчика предельного напряжения разряда счётчик ампер-часов должен обнуляться и:

$$C_{тек} = 0 \text{ А}\cdot\text{ч.}$$

Соответственно по сигналу срабатывания датчика предельного напряжения заряда в него должно вводиться значение номинальной ёмкости АБ:

$$C_{тек} = C_{ном.}$$

Однако необходимо учитывать, что, хотя вклад связанных с процессами старения АБ необратимых потерь заряда $Q_{дегр}$ в методическую погрешность определения $C_{тек}$ существенно ниже вклада погрешности, связанной с саморазрядом АБ, он неизбежно будет проявляться при относительно длительной эксплуатации АБ. Соответственно для АБ, работающих в космических аппаратах со сроком активного существования (САС) более одного года, его влияние необходимо учитывать, так как невосполнимые потери заряда $Q_{дегр}$ могут в конце САС достигать 30 – 50% от $C_{ном.}$, определённой в начале её эксплуатации. При этом параметр $Q_{дегр}$ можно рассматривать как величину снижения номинальной ёмкости $\Delta C_{ном.}$ и, соответственно, по сигналу срабатывания датчика предельного напряжения заряда в счётчик ампер-часов должно вводиться значение:

$$C_{тек} = C_{ном.} - Q_{дегр} = C_{ном.} - \Delta C_{ном.}$$

К сожалению, на этапе изготовления литий-ионной АБ дать точный прогноз динамики изменения потерь заряда $Q_{дегр}$ в процессе её эксплуатации очень сложно, так как получение необходимой для этого информации связано с трудоёмкими многолетними (5 и более лет) ресурсными испытаниями аккумуляторов в составе батареи. За этот период происходит совершенствование технологии производства аккумуляторов, в том числе оптимизация режимов изготовления и переход на новые марки и типы материалов, которые могут привести к существенному изменению свойств аккумуляторов, в том числе и динамики деградационных процессов.

Единственной реальной возможностью для определения фактического значения номинальной ёмкости АБ является выполнение цикла полного заряда и последующего полного разряда АБ, желательно номинальными токами в нормальных условиях по температуре. Обычно выполнение такой процедуры не может быть осуществлено в штатном режиме эксплуатации АБ и требует кроме наличия аппаратных средств для проведения полного зарядно/разрядного цикла ещё и перевод АБ в режим технического обслуживания.

Выводы

1. Более простой в аппаратной реализации вольтметрический метод, использующий для определения степени заряженности только результаты измерений напряжения и температуры АБ, целесообразно использовать в системах электроснабжения, алгоритм функционирования которых позволяет производить измерения напряжения батареи без протекания тока.

2. В противном случае для повышения точности определения текущей ёмкости АБ необходима корректировка измеренных значений напряжения на основе данных о величине протекающего тока и рассчитанных с использованием математической модели батареи значений её внутреннего сопротивления.

3. Кулонометрический метод, использующий для определения $C_{тек}$ счётчик ампер-часов, требует его регулярной тарировки из-за наличия накапливающейся методической погрешности, обусловленной саморазрядом аккумуляторов. Для тарировки счётчика ампер-часов могут быть использованы сигналы виртуальных датчиков предельного напряжения разряда и предельного напряжения заряда.

4. При длительной эксплуатации аккумуляторной батареи оба рассмотренных метода в расчётах $C_{тек}$ требуют коррекции значения номинальной ём-

кости батареи, снижающегося из-за деграционных процессов в аккумуляторах. Коррекция $C_{ном}$ может быть проведена только по счётчику ампер-часов при выполнении цикла полного заряда и последующего полного разряда АБ, который обычно реализуется в режиме её технического обслуживания.

Литература

1. Груздев А. И. Инновационные электрические накопители на базе литиевых источников тока для мобильных

и стационарных применений // Инновации. – 2014. – № 3 (185). – С. 12 – 20.

2. Dr Peres J.-P. Innovative battery solutions: “xc” and “xtd” electrochemistries // Saft. – 2014, November.

3. Davide Andrea. Battery management systems for large lithium-ion battery packs. ISBN-13 978-1-60807. – Artech House Publishers, 2010. – 275 p.

4. Кедринский И. А., Яковлев В. Г. Li-ионные аккумуляторы / И. А. Кедринский, В. Г. Яковлев. – Красноярск : ИПК «Платина», 2002. – 266 с.

Поступила в редакцию 16. 07. 2015

*Александр Иванович Груздев, главный конструктор НПЦ
«Системы электроснабжения на основе накопителей электрической энергии»,
канд. физ.-мат. наук,
т. (495) 366-20-38, e-mail: a_gruzdev@mail.ru.*

METHODOLOGICAL APPROACHES TOWARDS THE EVALUATION OF THE LI-ION STORAGE BATTERY STATE OF CHARGE

A.I. Gruzdev

This article revises methodological approaches towards the real-time determination of the state of charge of Li-ion storage batteries that have been continuously operated without proper maintenance and repair works. Comparative analysis has been performed regarding the instrumental and method errors of the voltametric and coulometric methods of determining its current capacity. It has been demonstrated that frequent coulomb-meter calibration procedure is required in the last case, that may be performed by using actuating signals of the discharge limit voltage sensors or the charge limit voltage sensors (of singular cells or the entire battery) which are transmitted from the battery monitoring and control system. It is more appropriate to apply an easier (in terms of hardware implementation) voltametric method which only uses battery temperature measurement results to determine its state of charge, in power supply systems with the operation algorithm that allows to perform battery voltage measurement procedures with no current flow. Nominal capacity fade occurring due to cell degradation under continuous operation must be considered in both methods.

Key words: storage battery, Li-ion cells, state of charge, numerical scheme.

List of Reference

1. Gruzdev A. I. Innovative electric power storage devices based on the lithium current source for portable and fixed applications // Innovations. – 2014. – № 3 (185). – Pp. 12 – 20.

2. Dr Peres J.-P. Innovative battery solutions: “xc” and “xtd” electrochemistries // Saft. – 2014, November.

3. Davide Andrea. Battery management systems for large lithium-ion battery packs. ISBN-13 978-1-60807. – Artech House Publishers, 2010. – 275 p.

4. Kedrinskiy I. A., Yakovlev V. G., Li-ion cells / I. A. Kedrinskiy, V. G. Yakovlev. – Krasnoyarsk: ‘Platina’ Publishing and Printing Complex, 2002. – 266 p.

*Aleksandr Ivanovich Gruzdev, Ph. D. (Tech.),
Chief designer of the Scientific and Production Centre
‘Power supply systems based on the power storage devices’.
Tel.: (495) 366-20-38, e-mail: a_gruzdev@mail.ru.*