УДК 621.355: 519.713

М.М. Хандорин, В.Г. Букреев

Методика оценки остаточной емкости литий-ионной аккумуляторной батареи при изменении температуры аккумулятора

Дана методика оценки остаточной емкости при изменении температуры литий-ионной аккумуляторной батареи. Для описания процессов заряда-разряда использована модель Тевенина, учитывающая изменение температуры батареи. Представлены результаты экспериментальной проверки предложенной методики.

Ключевые слова: литий-ионный аккумулятор, модель Тевенина, сплайн-интерполяция, линейная интерполяция, микроконтроллер.

doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-2-120-122

В современной космической технике все шире применяются литий-ионные аккумуляторные батареи. Разработчиков космических аппаратов привлекают их высокая энергоемкость и длительный ресурс эксплуатации. Для прогнозирования достаточности запаса энергии на борту наиболее важны степень заряженности $SOC(t)$ (State of Charge), остаточная емкость $Q_1(t)$ в ампер-часах и коэффициент технической годности $SOH(t)$ (State of Health). Особенно это актуально для космических аппаратов с переменной электрической нагрузкой в течение сеанса, так как при изменении нагрузки в небольших пределах энергобаланс аппарата, как правило, может быть рассчитан заранее [1, 2].

Разработанная методика обладает низкой вычислительной сложностью и может применяться в том числе в системах электроснабжения малых космических аппаратов, аналогичных [3].

Краткое описание методики оценки остаточной емкости

Способ оценки остаточной емкости батареи был ранее описан авторами [4, 5], здесь приведем лишь краткие сведения.

Для оценки остаточной емкости аккумулятора используется модифицированная модель Тевенина [4, 6], записанная следующим образом:

$$\dot{U}_{ак}(t) = \frac{1}{\tau} (i_{ак}(t) R_S + E_0 - U_{ак}(t)), \quad (1)$$

где R_S и τ – полное внутреннее сопротивление и постоянная времени аккумулятора; E_0 – его ЭДС.

Определение параметров модели Тевенина на всей разрядной характеристике батареи проводится путем интерполяции данных параметров. В качестве узлов интерполяции используются фиксированные значения параметров в точках разрядной характеристики $SOC(t)$. Для интерполяции E_0 применяется кубический сплайн, в то же время интерполяция параметров R_S , τ основана на линейной функции. Отказ от применения кубического сплайна для интерполяции параметров R_S , τ связан с большим разбросом значений между узлами, что ведет к снижению точности и появлению недопустимой ошибки.

Вычисление степени заряженности в j -й момент времени базируется на выражении

$$\hat{SOC}_j = \hat{SOC}_{j-1} + k(U_{ак,j-1} - \hat{U}_{ак,j-1}), \quad (2)$$

где $U_{ак,j-1}$ – измеренное напряжение аккумулятора;

$\hat{U}_{ак,j-1}$ – оценка его напряжения на основе модели;

k – коэффициент пропорциональности, определяемый из соотношения

$$k = \frac{1}{10U_{\max}}, \quad (3)$$

где $U_{\max}$ – напряжение полностью заряженного аккумулятора.

Способ определения параметров модели аккумулятора по реакции на импульсное воздействие достаточно подробно описан в [4].

Для модели (1) используется линейная зависимость параметров E_0 , τ и полной емкости аккумулятора Q_0 от текущей температуры T . Температурная же зависимость полного сопротивления $R_S(t)$ представляется нелинейной функцией [7]

$$R_S(T) = R_S(T_{ref}) \exp \left(K_R \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right), \quad (4)$$

где T_{ref} – нормальная температура аккумулятора; K_R – коэффициент, определяемый на основе экспериментальных данных.

Вычисление K_R проводится по формуле

$$K_R = \frac{\ln \left(\frac{R_S(T_{\min})}{R_S(T_{ref})} \right)}{\frac{1}{T_{\min}} - \frac{1}{T_{ref}}}, \quad (5)$$

где $T_{\min}$ – минимально допустимая температура батареи.

Таким образом, для учета изменений характеристик батареи во всем температурном диапазоне достаточно определить параметры модели Тевенина при двух предельных значениях температуры.

Описание алгоритма вычисления параметров модели Тевенина с учетом температуры

Алгоритм оценки степени заряженности и остаточной емкости батареи в целом повторяет ранее опубликованный алгоритм [5]. При этом существенным изменением, сделанным в настоящей работе, является обновление параметров модели Тевенина в каждом цикле измерений с учетом текущей температуры батареи.

В памяти контроллера сохраняются параметры модели Тевенина при нормальной T_{ref} и при минимальной T_{min} температуре аккумулятора. Расчет параметров модели Тевенина для текущей температуры проводится в три этапа:

- вычисление коэффициентов линейных функций для параметров E_0 , τ , Q_0 ;
- вычисление коэффициента K_R по формуле (5);
- вычисление текущих значений $E_0(T)$, $\tau(T)$, $R_S(T)$, $Q_0(T)$.

Полученные значения параметров модели Тевенина используются в алгоритме оценки остаточной емкости батареи.

При нагрузке номинальным током батарея не может быть полностью разряжена, и часть емкости $Q_{\Delta}(I)$ не используется. Это происходит потому, что часть напряжения батареи падает на ее внутреннем сопротивлении R_S , и попытка продолжить разряд приведет к падению напряжения на ней ниже минимально допустимого уровня U_{min} . Для вычисления $Q_{\Delta}(I)$ применяется следующий алгоритм:

1) из уравнения (1) вычисляется напряжение батареи при текущем токе разряда для различных значений SOC ;

2) по полученным значениям выполняется бинарный поиск напряжения U_{min} для определения минимально возможной степени заряженности SOC_{min} с данным значением тока I ;

3) вычисляется $Q_{\Delta}(I)$ по формуле

$$Q_{\Delta} = SOC_{min} Q_0. \quad (6)$$

Обновление параметров модели при деградации

При изменении параметров аккумулятора в процессе эксплуатации параметры модели могут быть обновлены повторением полного цикла заряда-разряда или его части. В последнем случае зависимость $E_0(SOC)$ не обновляется, а определение степени заряженности для узлов $R_S(SOC)$, $\tau(SOC)$ происходит на основе измерения текущей ЭДС батареи.

Описание экспериментальной установки и методики проведения эксперимента

Структура и характеристики экспериментальной установки в полной мере представлены ранее [4]. При этом было модернизировано программное обеспечение микроконтроллера для обеспечения работы с моделями, учитывающими изменение температуры батареи.

Методика проведения эксперимента включает четыре этапа:

– вычисление параметров модели батареи при температуре $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$ путем измерения ее реакции на импульсное воздействие током;

– определение параметров модели батареи при температуре $0\text{ }^{\circ}\text{C}$;

– разряд батареи номинальным током при температуре $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$, при этом точность оценки степени заряженности определяется по эталонному счетчику ампер-часов. Такой температурный режим выбран для проверки точности алгоритмов интерполяции параметров;

– сбор статистической информации в течение семи циклов заряда-разряда батареи для проверки точности методики.

Результаты эксперимента

Оценка параметров модели батареи при высокой температуре завершилась в соответствии с ожидаемыми значениями. Оценка ее параметров при низкой температуре показала, что параметры R_S , τ невозможно интерполировать при помощи сплайн-функций, так как из-за больших перепадов R_S и τ между узлами интерполяции возникают броски в сплайн-функции.

Погрешность оценки остаточной емкости в начальный момент времени работы алгоритма незначительно превышает 10% (рис. 1, 2). По мере работы алгоритма погрешность снижается и остается на уровне 6%.

Рис. 1. Зависимость остаточной емкости батареи от времени (сплошной линией показана оценка по методике, пунктирной – оценка по эталонному счетчику ампер-часов)

Рис. 2. Погрешность оценки остаточной емкости батареи $\Delta Q_1(t)$

Для накопления статистики проведено несколько циклов заряда-разряда батареи, в ходе которых определялась погрешность оценки остаточной емкости.

сти и степени заряженности. Было произведено семь циклов заряда–разряда: один – при температуре минус 10 °С; один – при +38 °С; два – при +30 °С; один – при 0 °С; два – при +10 °С.

Вся разрядная характеристика батареи подразделялась на три участка по степени заряженности, на каждом из которых была рассчитана погрешность оценки $Q_1(t)$, приведенная к шкале (см. таблицу).

Погрешность оценки остаточной емкости $Q_1(t)$ по участкам разрядной характеристики

Интервал SOC	Среднеквадратическое отклонение, А·ч	Среднеквадратическое отклонение, %
1–0,8	1,6412	5,86
0,8–0,2	1,7074	6,09
0,2–0	1,5961	5,70

Заключение

В результате проведения экспериментов установлено, что погрешность оценки остаточной емкости батареи не превышает $\pm 10\%$ шкалы на всем протяжении разрядной характеристики. Таким образом, предложенная методика оценки остаточной емкости вполне работоспособна. Она позволяет учитывать текущий ток батареи и влияние температурного воздействия. Причины появления высокой погрешности оценки остаточной емкости в начальный момент времени являются предметом дальнейших исследований.

Литература

1. Романенко А.С. Энергобаланс в автономной системе электроснабжения с регулятором мощности на основе матричного преобразователя тока солнечной батареи / А.С. Романенко, А.В. Кобзев, В.Д. Семенов // Доклады ТУСУРа. – 2013. – № 4 (30). – С. 115–119.
2. Шиняков Ю.А. Энергетический анализ структурных схем систем электроснабжения автоматических космических аппаратов // Изв. Том. политехн. ун-та. – 2006. – Т. 309, № 8. – С. 152–155.
3. Романенко А.С. Модель автономной системы электроснабжения с секционированной солнечной батареей в пакете MatLab / А.С. Романенко, В.Д. Семенов // Доклады ТУСУРа. – 2011. – № 2 (24), ч. 1. – С. 269–274.
4. Хандорин М.М. Экспериментальная проверка алгоритма оценки остаточной емкости литий-ионной аккумуля

торной батареи для применения на космическом аппарате / М.М. Хандорин, В.Г. Букреев // Авиакосмическое приборостроение. – 2017. – № 3. – С. 45–55.

5. Хандорин М.М. Оценка остаточной емкости литий-ионного аккумулятора в режиме реального времени / М.М. Хандорин, В.Г. Букреев // Электрохимическая энергетика. – 2014. – Т. 14, № 2. – С. 65–69.

6. Hongwen H. Evaluation of Lithium-Ion Battery Equivalent Circuit Models for State of Charge Estimation by an Experimental Approach / H. Hongwen, X. Rui, F. Jinxin // Energies. – 2011. – № 4. – P. 58–598.

7. Saw L.H. Electro-thermal analysis of Lithium Iron Phosphate battery for electric vehicles / L.H. Saw, K. Soma-sundaram, Y. Ye et al. // Journal of Power Sources. – Vol. 249. – P. 231–238.

Хандорин Михаил Михайлович

Инженер-конструктор АО «НПП «Полус» (Томск), аспирант каф. ЭПЭО
Тел.: +7 (382-2) 55-46-94
Эл. почта: info@polus-tomsk.ru

Букреев Виктор Григорьевич

Д-р техн. наук, профессор каф. электропривода и электрооборудования (ЭПЭО) Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета (НИТПУ)
Тел.: +7-913-854-21-96
Эл. почта: bukreev@tpu.ru

Khandorin M.M., Bukreev V. G.

Method to estimate the available capacity of a Lithium-ion battery when the battery temperature changes

The article is devoted to the method used to evaluate the available capacity for spacecraft lithium-ion battery when the battery temperature changes. For the charge and discharge process description, when a battery temperature changes, the Thevenin model is used. The experimental test method result is presented.

Keywords: lithium-ion battery, Thevenin model, spline-interpolation, linear interpolation, microcontroller.