

**ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОЙ ЕМКОСТИ ЛИТИЙ-ИОННОЙ БАТАРЕИ
КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА БЕЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДАТЧИКА ТОКА**

М. М. ХАНДОРИН, В. Г. БУКРЕЕВ

*Научно-производственный центр „Полюс“, 634050, Томск, Россия**E-mail: info@polus-tomsk.ru*

Представлен алгоритм оценки степени заряженности литий-ионной аккумуляторной батареи космического аппарата без использования датчика тока. Показано, что на основе модели степени заряженности аккумулятора может быть рассчитан средний ток, протекающий через батарею за период разряда. Входными данными для алгоритма являются оценка среднего напряжения аккумулятора за период от момента начала разряда до текущего момента времени и напряжение, измеренное напряжением аккумуляторов. Вычисленный средний ток разряда позволяет рассчитать отданную и оставшуюся емкость батареи. Проверка точности алгоритма выполнена на открытых наборах данных NASA data repository. Погрешность оценки степени заряженности литий-ионной аккумуляторной батареи составила от 2,2 до 11 %.

Ключевые слова: литий-ионный аккумулятор, счетчик ампер-часов, степень заряженности, остаточная емкость, внутреннее сопротивление, микроконтроллер

Введение. Задача оценки остаточной емкости литий-ионных аккумуляторных батарей (ЛИАБ) становится все более актуальной при разработке современных приборов контроля и управления состоянием одного из основных источников энергии космических аппаратов (КА). Знание текущей емкости батареи позволяет более качественно планировать работу КА при прохождении теневых участков орбиты и прогнозировать основные характеристики системы электропитания аппарата после гарантийного срока его эксплуатации. Так, достоверная информация о степени заряженности (State of Charge, SOC) батареи имеет критически важное значение при выполнении работ в аварийных ситуациях и дефиците энергии на борту КА.

В настоящее время известны различные способы решения этой задачи, некоторые из них представлены в таблице [1—8].

Название метода или алгоритма	Примерная точность оценки SOC ЛИАБ, %	Особенности метода
Счетчик ампер-часов	От 3 (не может быть выше точности измерения текущего значения тока) до 20 (без калибровки)	Не учитывает саморазряд батареи. Требует калибровки по напряжению. Требует точного измерения тока разряда
Алгоритм на основе модели Тевенина с подстраиваемыми параметрами	7—8	Требует сходимости вычислительных процедур. Требует точного измерения тока разряда
Фильтр Калмана с использованием модели Тевенина	5	Требует знания характеристик измеряемых токов и напряжений как стохастических процессов. Требует точного измерения тока разряда
Фильтр Калмана с использованием DP-модели	3	Требует знания характеристик измеряемых токов и напряжений как стохастических процессов. Требует точного измерения тока разряда
Нейронная сеть	1	Требует обучения на значительном количестве экспериментальных данных. Высокая сложность реализации алгоритмов бортовым компьютером КА в режиме реального времени. Требует точного измерения тока разряда, особенно при обучении

Компоновка КА часто не предполагает прокладки через блок контроля и управления ЛИАБ силовых цепей батареи, что затрудняет измерение тока, протекающего через нее. Общий недостаток приведенных выше методов — необходимость: измерения тока, протекающего через батарею. Кроме того, схемные решения для измерения тока батареи обеспечивают ограниченную степень отказоустойчивости при длительных сроках эксплуатации КА, в частности, измерительный шунт, как правило, является критическим элементом, который не может быть зарезервирован.

Метод и алгоритм оценки степени заряженности аккумулятора. Рассмотрим вариант оценивания степени заряженности литий-ионного аккумулятора (ЛИА) в рамках функционального исполнения измерительной части прибора контроля и защиты ЛИАБ. Аппаратно-программная реализация измерителя напряжений и температуры аккумуляторов предполагает использование одного аналого-цифрового преобразователя (АЦП) с переключающим мультиплексором входных аналоговых сигналов. Измерение тока ЛИАБ осуществляется отдельным АЦП с входным датчиком тока, который представляет собой гальванически развязанный резистивный шунт.

Наименее вычислительно затратным способом оценки емкости батареи является счетчик ампер-часов, который описывается формулой

$$Q(t) = Q_0 - \int_{t_0}^t i_p(t) dt, \quad (1)$$

где Q_0 — полная (паспортная) емкость батареи; t_0 — начальный момент времени процесса разряда ЛИАБ, который определяется при коммутации нагрузки; $i_p(t)$ — мгновенные значения разрядного тока батареи.

Степень заряженности аккумулятора и ЛИАБ в целом можно определить по следующему уравнению:

$$\text{SOC}(t) = \frac{Q_0 - \int_{t_0}^t i_p(t) dt}{Q_0}. \quad (2)$$

При реализации вычислительных алгоритмов в цифровых устройствах, как правило, применяется дискретное интегрирование. Тогда степень заряженности SOC на n -м интервале времени при постоянной длительности Δt дискретности:

$$\text{SOC}_n = \frac{Q_0 - \sum_{i=0}^n I_i \cdot \Delta t}{Q_0}, \quad (3)$$

где i — номер измерительного такта.

Среднее значение измеряемого тока I_{cp} можно определить из соотношения:

$$I_{\text{cp}} = \frac{\sum_{i=0}^n I_i}{n},$$

С учетом равенства $\sum_{i=0}^n I_i = I_{\text{cp}} n$ уравнение (3) записывается следующим образом:

$$\text{SOC}_n = \frac{Q_0 - I_{\text{cp}} n \cdot \Delta t}{Q_0}. \quad (4)$$

Из формулы (4) следует, что для оценки степени заряженности $\hat{S}OC_n$ достаточно вычислить среднее значение \hat{I}_{cp} разрядного тока на основе математической модели аккумулятора и его текущего напряжения.

Для статических режимов работы аккумулятора в качестве адекватной модели можно использовать уравнение его внутреннего сопротивления, позволяющее записать выходное напряжение [9]:

$$\hat{U} = \hat{E}_0 - R_0 \hat{I}, \quad (5)$$

где \hat{E}_0 — ЭДС аккумулятора, В; R_0 — внутреннее сопротивление, зависящее от конструкции аккумулятора, Ом; \hat{I} — протекающий разрядный ток.

Для алгоритма вычисления (5) в дискретной форме среднее значение напряжения аккумулятора при условии стационарности значения активного сопротивления R_0 составит:

$$\hat{U}_{cp} = \frac{\sum_{i=0}^N \hat{U}_i}{N} = \frac{\sum_{i=0}^N \hat{E}_{0i}}{N} - \frac{\sum_{i=0}^N \hat{I}_i R_0}{N} = \hat{E}_{0cp} - R_0 \hat{I}_{cp}, \quad (6)$$

где \hat{E}_{0cp} — среднее значение ЭДС аккумулятора.

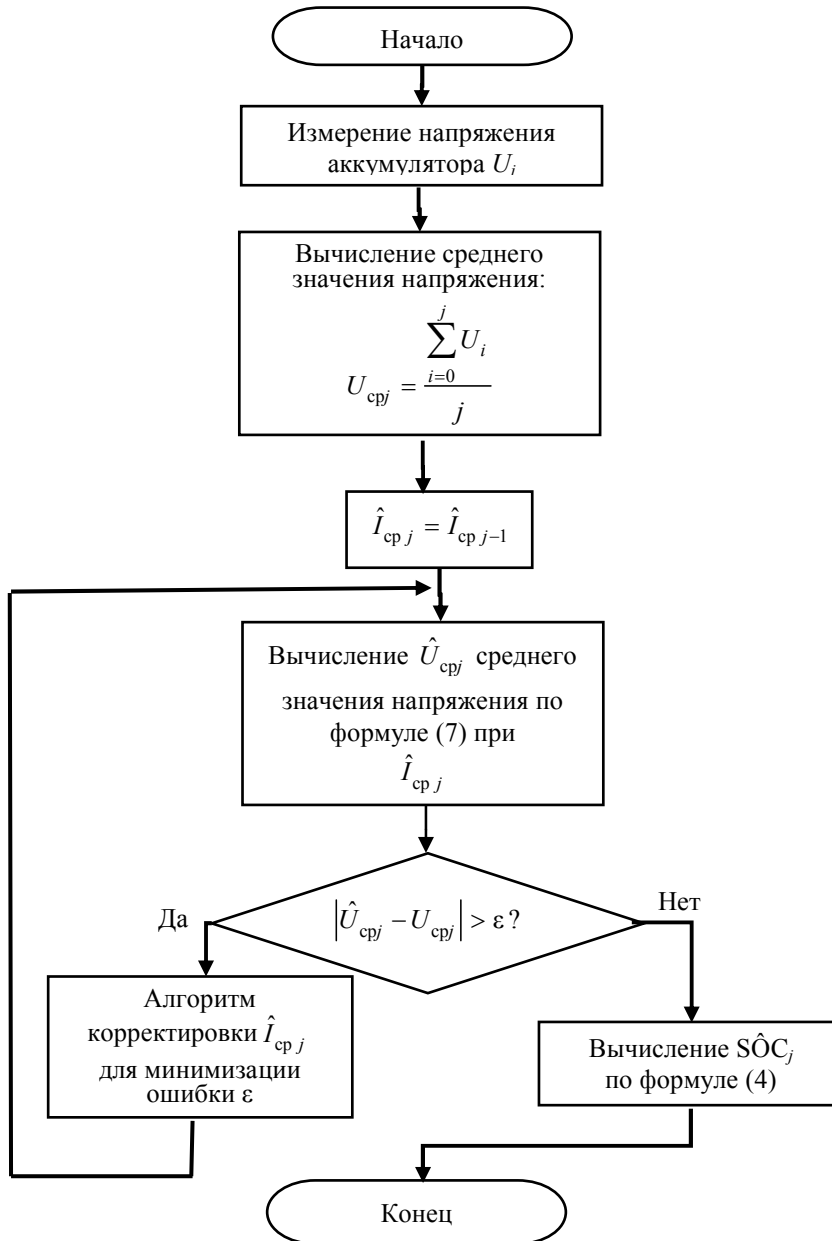
Очевидно, что непосредственное вычисление по модели аккумулятора среднего тока \hat{I}_{cp} из выражения (6) невозможно вследствие неизвестного среднего значения ЭДС \hat{E}_{0cp} . Если время с момента начала цикла разряда известно, среднее напряжение аккумулятора \hat{U}_{cp} может быть вычислено, исходя из предполагаемого значения среднего тока \hat{I}_{cp} :

$$\begin{aligned} SOC_i &= \frac{Q_0 - \hat{I}_{cp}(i \cdot \Delta t)}{Q_0}; \\ \hat{U}_{cp} &= \frac{\sum_{i=0}^N \hat{E}_{0i}(SOC_i)}{N} - R_0 \hat{I}_{cp}. \end{aligned} \quad (7)$$

Способ определения среднего разрядного тока \hat{I}_{cp} аккумулятора базируется на известном в теории оценивания неизмеряемых переменных состояния сложных объектов методе адаптивной перенастраиваемой модели (Model Reference Adaptive Control, MRAC) [9]. Применительно к рассматриваемому случаю основой алгоритма оценки среднего тока \hat{I}_{cp} является условие минимизации ошибки между измеряемым напряжением U_{cp} аккумулятора и значением напряжения \hat{U}_{cp} , вычисленным по модели. Работоспособность и эффективность такого подхода для изучения характеристик ЛИАБ КА исследованы авторами статьи в публикациях [8, 10—12].

Проверка точности оценки степени заряженности аккумулятора. Блок-схема полученного алгоритма оценки степени заряженности ЛИА, реализованного в математическом пакете Matlab, представлена на рис. 1. В качестве исходных значений тока и напряжения аккумулятора использовались экспериментальные данные разряда реальных аккумуляторов типа 18650 с сайта NASA data repository [13]. Такие наборы данных часто применяются для проверки точности алгоритмов изучения свойств аккумуляторов, что позволяет получить со-

поставимые результаты [14]. Каждый набор содержит два цикла разряда аккумулятора фиксированным током 40 мА и 2 А. Первый набор данных позволяет построить зависимость ЭДС аккумулятора E_0 , второй — оценить внутреннее сопротивление.



Модель аккумулятора и алгоритм оценки параметров были реализованы в виде кода на языке Matlab. Далее выполнялись прогон алгоритма на 40 циклах разряда аккумулятора и сравнение оцененного значения $\hat{S}OC$ в каждый момент времени с показаниями эталонного счетчика ампер-часов. На каждом цикле определялось максимальное значение погрешности. Ток нагрузки аккумуляторов носит случайный характер (рис. 2, а), что позволяет наиболее объективно оценить точность вычислений степени заряженности. На рис. 2, б сравниваются результаты оценки $\hat{S}OC$ (пунктир) с данными эталонного счетчика ампер-часов (сплошная кривая) для сорокового цикла разряда.

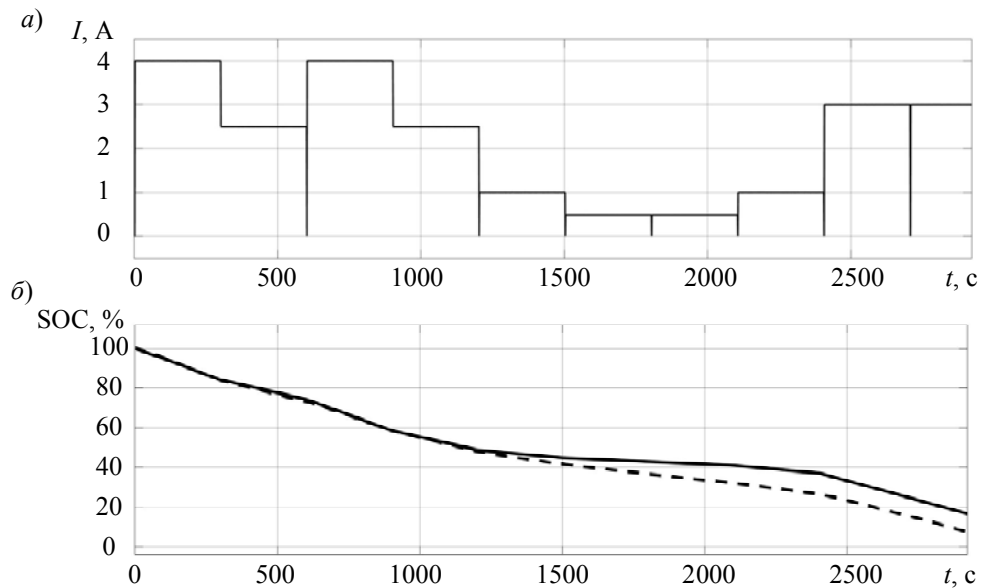


Рис. 2

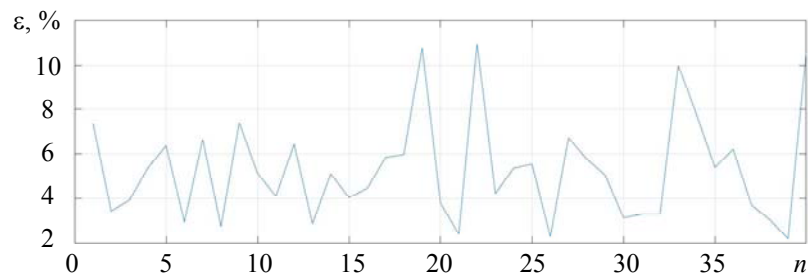


Рис. 3

Как следует из рис. 3, максимальное значение ошибки оценки степени заряженности аккумулятора находится в пределах от 2,2 до 11 % (в зависимости от номера цикла разряда).

Заключение. Математическое моделирование показало, что разработанный алгоритм оценки степени заряженности батареи обладает приемлемой для практического применения в блоках контроля и управления ЛИАБ КА точностью (погрешность не превышает 11 %) при отсутствии в них датчиков тока. Это позволяет применять его, когда прокладка силовых цепей через блок контроля и управления ЛИАБ не предполагается. При этом нет необходимости вводить дополнительные измерительные преобразователи тока в другие устройства системы электропитания, что повышает ее надежность.

Применение алгоритма в блоках электроники, где присутствует датчик тока, позволяет увеличить их функциональный резерв и отслеживать параметрические отказы измерительного канала или изменения параметров ЛИАБ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lee J., Nam O., Cho B. Li-ion battery SOC estimation method based on the reduced order extended Kalman filtering // J. Power Sources. 2007. N 174. P. 9—15.
2. Zhang C. et al. Estimation of state of charge of lithium-ion batteries used in HEV using robust extended Kalman filtering // Energies. 2012. N 5. P. 1098—1115.
3. Yu Z., Huai R., Xiao L. State-of-Charge Estimation for Lithium-Ion Batteries Using a Kalman Filter Based on Local Linearization // Energies. 2015. N 8. P. 7854—7873. DOI:10.3390/en8087854.
4. Sun F. et al. Adaptive unscented Kalman filtering for state of charge estimation of a lithium-ion battery for electric vehicles // Energies. 2011. N 36. P. 3531—3540.
5. He H. et al. State-of-charge estimation of the lithium-ion battery using an adaptive extended Kalman filter based on an improved Thevenin model // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2011. N 60. P. 1461—1469.

6. Mastali M. et al. Battery state of the charge estimation using Kalman filtering // *J. Power Sources*. 2013. N 239. P. 294—307.
7. Chang W. Y. State of charge estimation for LiFePO4 battery using artificial neural network // *International Review of Electrical Engineering*. 2012. Vol. 7, N 5. P. 5800—5874.
8. Хандорин М. М., Букреев В. Г. Экспериментальная проверка алгоритма оценки остаточной емкости литий-ионной аккумуляторной батареи для применения на космическом аппарате // *Авиакосмическое приборостроение*. 2017. № 3. С. 45—55.
9. He H., Xiong R., Fan J. Evaluation of Lithium-Ion Battery Equivalent Circuit Models for State of Charge Estimation by an Experimental Approach // *Energies*. 2011. N 4. P. 582—598.
10. Хандорин М. М., Букреев В. Г. Оценка остаточной емкости литий-ионного аккумулятора на основе эталонной модели // *Вестник Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та им. акад. М.Ф. Решетнева*. 2014. № 1(53). С. 94—97.
11. Хандорин М. М., Букреев В. Г. Оценка остаточной емкости литий-ионного аккумулятора в режиме реального времени // *Электрохимическая энергетика*. 2014. Т. 14, № 2. С. 65—69.
12. Хандорин М. М., Букреев В. Г. Методика оценки остаточной емкости литий-ионной аккумуляторной батареи // *Докл. ТУСУР*. 2017. Т. 21, № 2. С. 120—122.
13. Bole B., Kulkarni C., Daigle M. Randomized Battery Usage Data Set. NASA Ames Prognostics Data Repository. NASA Ames Research Center, Moffett Field, CA [Электронный ресурс]: <<http://ti.arc.nasa.gov/project/prognostic-data-repository>> (дата обращения: 21.05.2020).
14. Kim M. et al. State of Charge Estimation for Lithium Ion Battery Based on Reinforcement Learning // *IFAC-PapersOnLine*. 2018. Vol. 51, is. 28. P. 404—408.

Сведения об авторах

- Михаил Михайлович Хандорин** — канд. техн. наук; АО «НПЦ „Полус“», отдел электроники; старший научный сотрудник; E-mail: info@polus-tomsk.ru
- Виктор Григорьевич Букреев** — д-р техн. наук, профессор; АО «НПЦ „Полус“», отдел электроники; ведущий научный сотрудник; E-mail: info@polus-tomsk.ru

Поступила в редакцию
18.03.2021 г.

Ссылка для цитирования: Хандорин М. М., Букреев В. Г. Оценка остаточной емкости литий-ионной батареи космического аппарата без использования датчика тока // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2021. Т. 64, № 8. С. 649—655.

ESTIMATION OF THE RESIDUAL CAPACITY OF THE SPACECRAFT LITHIUM-ION BATTERY WITHOUT USING A CURRENT SENSOR

M. M. Khandorin, V. G. Bukreev

JSC Research and Production Center „Polus“, 634050, Tomsk, Russia
E-mail: info@polus-tomsk.ru

An algorithm of spacecraft lithium-ion battery state of charge estimation without current sensor is presented. It is shown that average current flowing through the battery over the discharge period may be estimated based on a model of battery state of charge. The input data for the algorithm are an estimate of the average battery voltage for the period from the beginning of the discharge to the current time and the measured voltage of the batteries. The calculated average discharge current makes it possible to calculate the given and remaining capacity of the battery. The algorithm accuracy check is performed using the NASA randomized battery usage data set. The error in assessing the degree of charge of a lithium-ion storage battery comprises from 2.2 to 11%.

Keywords: lithium-ion battery, integrating ampere-hour counter, state of charge, remaining capacity, internal resistance, microcontroller

REFERENCES

1. Lee J., Nam O., Cho B. *J. Power Sources*, 2007, no. 174, pp. 9—15.
2. Zhang C. et al. *Energies*, 2012, no. 5, pp. 1098—1115.
3. Yu Z., Huai R., Xiao L. *Energies*, 2015, no. 8, pp. 7854—7873, DOI:10.3390/en8087854.

4. Sun F. et al. *Energies*, 2011, no. 36, pp. 3531–3540.
5. He H. et al. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2011, no. 60, pp. 1461–1469.
6. Mastali M. et al. *J. Power Sources*, 2013, no. 239, pp. 294–307.
7. Chang W.Y. *International Review of Electrical Engineering*, 2012, no. 5(7), pp. 5800–5874.
8. Khandorin M.M., Bukreev V.G. *Aerospace Instrument-Making*, 2017, no. 3, pp. 45–55. (in Russ.)
9. He H., Xiong R., Fan J. *Energies*, 2011, no. 4, pp. 582–598.
10. Khandorin M.M., Bukreev V.G. *Siberian Aerospace Journal*, 2014, no. 1(53), pp. 94–97. (in Russ.)
11. Khandorin M.M. Bukreev V.G. *Electrochemical Energetics*, 2014, no. 2(14), pp. 65–69. (in Russ.)
12. Khandorin M.M. Bukreev V.G. *Proceedings of the TUSUR University*. 2017, no. 2(21), pp. 120–122. (in Russ.)
13. Bole B., Kulkarni C., Daigle M. *Randomized Battery Usage Data Set. NASA Ames Prognostics Data Repository*, NASA Ames Research Center, Moffett Field, CA, <http://ti.arc.nasa.gov/project/prognostic-data-repository>.
14. Kim M. et al. *IFAC-PapersOnLine*, 2018, no. 28(51), pp. 404–408.

Data on authors

- Mikhail M. Khandorin** — PhD; JSC Research and Production Center „Polus“, Department of Electronics; Senior Researcher; E-mail: info@polus-tomsk.ru
- Viktor G. Bukreev** — Dr. Sci., Professor; JSC Research and Production Center „Polus“, Department of Electronics; Leading Researcher; E-mail: info@polus-tomsk.ru

For citation: Khandorin M. M., Bukreev V. G. Estimation of the residual capacity of the spacecraft lithium-ion battery without using a current sensor. *Journal of Instrument Engineering*. 2021. Vol. 64, N 8. P. 649–655 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-8-649-655