УДК 621.355: 519.713

А.А. Брянцев, В.Г. Букреев, А.А. Шилин

Методика определения параметров динамической модели литий-ионного аккумулятора

Рассмотрены методика и алгоритм определения параметров динамической модели литий-ионного аккумулятора. Модель основана на комбинации моделей Тевенина и Шеферда, создана для исследования и построения характеристик заряда-разряда литий-ионного аккумулятора. Результаты моделирования отражают высокую адекватность алгоритма на тестовом примере в Simulink Matlab и экспериментальных данных. Разработанный алгоритм используется при создании имитатора литий-ионной аккумуляторной батареи космического аппарата.

Ключевые слова: модель литий-ионного аккумулятора, схема замещения Тевенина, алгоритм определения параметров модели.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-4-96-101

Использование литий-ионных аккумуляторных батарей (ЛИАБ) для космических аппаратов (КА) предполагает создание специализированного устройства – имитатора батарей с функцией тестирования преобразующей аппаратуры системы электропитания КА [1, 2]. На этапе определения режимов работы имитаторов применяются методы физического, имитационного и компьютерного моделирования [3, 4].

Следует отметить, что основным недостаток промышленно выпускаемых имитаторов ЛИАБ – это отсутствие в его структуре отдельно представленного имитатора аккумулятора [5].

Реализация имитатора каждого литий-ионного аккумулятора (ЛИА) позволит расширить функциональные свойства имитатора всей батареи [6, 7].

В статье рассмотрена модель ЛИА, основанная на комбинации моделей Тевенина и Шеферда, позволяющая формировать динамические процессы в аккумуляторе.

Краткое описание алгоритма определения параметров модели Шеферда

Алгоритм определения параметров модели Шеферда подробно описан авторами в публикации [8], здесь же приведем лишь краткие сведения.

Стационарной моделью ЛИА в режимах заряда-разряда является модель выходного $U_{\text{вых}}(t)$ напряжения, которая описывается уравнением

$$U_{\text{вых}}(t) = E(t) \pm R_0 i(t), \quad (1)$$

где $E(t)$ – ЭДС аккумулятора, В; $i(t)$ – ток заряда-разряда аккумулятора, А; R_0 – постоянное сопротивление аккумулятора, Ом.

Для определения $E(t)$ воспользуемся моделью Шеферда

$$E(t) = E_0 - K \frac{Q_{\text{max}}}{Q_{\text{max}} - Q_{\Sigma}(t)} + A e^{(-B Q_{\Sigma}(t))}, \quad (2)$$

где E_0 – максимальное напряжение аккумулятора, В; K – поляризационная составляющая, В; Q_{max} – полная емкость аккумулятора, А·ч; $Q_{\Sigma}(t)$ – заряд, полученный аккумулятором за время t , А·ч; A – экспоненциальная составляющая, В; B – инверсная экспоненциальная составляющая, А·ч⁻¹.

В режиме заряда аккумулятора уравнение (1) принимает вид:

$$U_{\text{вых}}(t) = E_0 - K \frac{Q_{\text{max}}}{Q_{\text{max}} - Q_{\Sigma}(t)} + A e^{(-B Q_{\Sigma}(t))} + R_0 i(t). \quad (3)$$

Для определения значений параметров в выражении (3) необходимо воспользоваться данными производителя аккумуляторной батареи или провести экспериментальные исследования, позволяющие предоставить параметры ЛИА [8].

Алгоритм определения параметров модели Шеферда и непосредственно модель ЛИА были проверены на тестовых примерах при помощи программы Simulink Matlab. Установлено, что максимальная погрешность предложенной модели ЛИА не превышает $\pm 1\%$ с данными имитационной модели VL48E на всей зарядно-разрядной характеристике аккумулятора.

Описание алгоритма определения параметров динамической модели ЛИА

Для построения динамической модели ЛИА воспользуемся моделью Тевенина [9], включающей внутренний импеданс батареи, активное сопротивление электролита и электродов, а также электрохимические емкости. Модель аккумулятора составляется по схеме замещения (рис. 1) и описывается уравнениями

$$\begin{cases} \frac{dU_p}{dt} = \frac{i(t)}{C_p(t)} - \frac{U_p(t)}{R_p(t)C_p(t)}, \\ U_{\text{вых}}(t) = E(t) \pm R_0 i(t) + U_p(t), \end{cases} \quad (4)$$

где $U_p(t)$, $R_p(t)$, $C_p(t)$ – соответственно эквивалентное напряжение, сопротивление и емкость аккумулятора.

Используя уравнение (4), можно записать систему уравнений:

$$U_p(t) = \int_{t_0}^t \left[\frac{1}{C_p(t)} \cdot i(t) - \frac{1}{\tau_{(it)}(t)} U_p(t) \right] dt, \quad (5)$$

$$\tau_{(it)}(t) = \frac{E_0 - K \frac{Q_{\max}}{Q_{\max} - Q_{\Sigma}(t)} + Ae^{(-BQ_{\Sigma}(t))}}{\frac{dU_p(t)}{dt}} - \frac{U_{\text{ВЫХ}}(t)}{\frac{dU_p(t)}{dt}}, \quad (6)$$

$$\tau_{(it)}(t) = R_p(t) \cdot C_p(t), \quad (7)$$

$$C_p(t) = \frac{\tau_{(it)}(t)}{R_p(t)}, \quad (8)$$

$$R_p(t) = \frac{R_0(t)}{2}, \quad (9)$$

где $\tau_{(it)}(t)$ – постоянная времени, с.

Рис. 1. Схема замещения аккумулятора по модели Тевенина

Недостаток модели Тевенина заключается в необходимости вычисления не менее 40 переменных [10], что затрудняет построение динамической модели ЛИАБ в реальном масштабе времени.

Исследование выявило, что $R_p(t)$ и $C_p(t)$ незначительно изменяются на всем диапазоне цикла заряда-разряда аккумулятора [11, 12].

Объединяя выражения (3) и (4), запишем систему уравнений, описывающих динамические процессы в аккумуляторе:

$$\begin{cases} \frac{dU_p}{dt} = \frac{i(t)}{C_p^*} - \frac{U_p(t)}{R_p^* C_p^*}, \\ U_{\text{ВЫХ}}(t) = E_0 - K \frac{Q_{\max}}{Q_{\max} - Q_{\Sigma}(t)} + Ae^{(-BQ_{\Sigma}(t))} \pm R_0 i(t) + U_p(t), \end{cases} \quad (10)$$

где R_p^* , C_p^* – соответственно фиксированные эквивалентные поляризационные сопротивление и емкость.

Данная модифицированная модель (10) обладает вычислительным преимуществом, для построения динамической модели ЛИА необходимо использовать не более 5 переменных.

Описание имитационной динамической модели ЛИА в среде Simulink Matlab

Описание модели в среде Simulink Matlab и реализация структуры «имитационная модель ЛИА – имитационная модель VL48E [13] – система управления – система диагностирования» были ранее представлены авторами [8], здесь же приведем лишь сведения с реализацией выражения (10).

После определения параметров имитационной модели ЛИА проверяется ее адекватность в резуль-

тате сравнения соответствующих характеристик, полученных на имитационной модели VL48E.

В результате моделирования установлено, что погрешность напряжения имитационной модели ЛИА в динамическом режиме не превышает $\pm 2\%$ на всей зарядной и разрядной характеристике. Имитационная модель аккумулятора VL48E имеет погрешность, не превышающую $\pm 5\%$ по сравнению с экспериментальными данными [14].

Методика и алгоритм определения параметров динамической модели ЛИА

Алгоритм определения параметров базируется на ранее опубликованном материале авторами [8]. При этом существенным изменением, сделанным в настоящей работе, является обновление параметров модифицированной модели (10) в каждом цикле измерений, что иллюстрируется блок-схемой (рис. 2).

Алгоритм использует данные, предоставленные производителями ЛИА или сформированные экспериментальным путем, и включает следующие вычислительные операции:

- 1) рассчитываются необходимые коэффициенты для модели (10);
- 2) определяется направление тока $i(t)$ для построения модели заряда или разряда;
- 3) определяется заряд $Q_{\Sigma}(t)$, полученный или отданный аккумулятором за время t ;
- 4) определяется выходное $U_{\text{ВЫХ}}(t)$ напряжение по формуле (10) и минимизируется разница $\Delta U_{\text{ВЫХ}}(t)$ модели и значений, полученных из данных производителя ЛИАБ путем подстройки ее параметров методом градиентного спуска;
- 5) корректируются значения параметров $U_{\text{ном}}$, $U_{\text{экр}}$, $Q_{\text{ном}}$, $Q_{\text{экр}}$;
- 6) операции 1 – 4 повторяются до момента достижения имитации полного заряда или разряда аккумулятора.

Оценка точности алгоритма определения параметров динамической модели выполняется путем компьютерного моделирования в среде Simulink Matlab. В результате исследований установлено, что погрешность определения параметров динамической модели ЛИА не превышает $\pm 2\%$ на всей разрядной характеристике и $\pm 0,7\%$ на всей зарядной характеристике аккумулятора.

Оценка влияния систематической погрешности на точность работы алгоритмов показала, что наибольшее влияние оказывает неточность определения параметров R_0 , $Q_{\max}$.

Применение разработанного алгоритма определения параметров динамических моделей аккумулятора можно использовать при создании его имитатора с возможностью воспроизведения динамических характеристик.

При этом для создания имитатора ЛИАБ предполагается использовать систему из необходимого числа имитаторов аккумулятора.

Рис. 2. Блок-схема алгоритма определения параметров динамической модели ЛИА

Описание экспериментальной установки и результаты проведения эксперимента

Структура и характеристики экспериментальной установки в полной мере представлены в работе [15], предназначенной для проведения экспериментальных исследований с ЛИА типа ЛИГП-10, которая адаптирована для работы с батареей 8ЛИ40 и выполняет следующие функции:

- 1) измерение напряжения ячеек АБ;
- 2) измерение текущего тока;
- 3) заряд АБ током до 7,5 А;
- 4) разряд АБ при помощи имитатора нагрузки током до 10 А.

На основании полученных экспериментальных данных разработана имитационная модель 8ЛИ40 в программной среде Simulink Matlab и проверена адекватность алгоритма определения параметров динамической модели ЛИА.

Для построения структуры «система с экспериментальными данными – имитационная модель батареи – имитационная модель аккумуляторов – система управления – система визуализации» (рис. 3) воспользуемся компонентами пакета Simulink Library Browser. Входные и выходные сигналы данной структуры для батареи 8ЛИ40АБ и аккумулятора 8ЛИ40АК являются информационными.

Полученные экспериментальные данные батареи 8ЛИ40 в программной среде Simulink Matlab задаются в виде моделирующих компонентов «From Workspace» блоком № 1, в котором отображаются задание протекающего тока $i(t)$, напряжение аккумуляторов и напряжение батареи. В блоке № 2 реализована имитационная модель батареи путем агрегирования аккумуляторов (рис. 4).

Рис. 3. Структура имитационной модели батареи 8ЛИ40АБ в программной среде Simulink Matlab: блок № 1 – экспериментальные данные; блок № 2 – имитационная модель батареи; блок № 3 – проверка на адекватность; блок № 4 – визуализации данных

В блоке № 3 после определения параметров модели аккумулятора блоком № 2.1 модель батареи (блок № 2) проверяется на адекватность в результате сравнения соответствующих характеристик, полученных экспериментальным путем блока № 1.

Рис. 4. Имитационные модели батареи 8ЛИ40АБ и её аккумуляторов

На рис. 5 приведены результаты как имитационного моделирования напряжений восьми аккумуляторов 8ЛИ40АК с разбросом параметров в сравнении с напряжением модели восьми аккумуляторов 8ЛИ40АК (см. рис. 5, б), так и результаты имитационного моделирования результирующего напряжения батареи аккумуляторов 80ЛИ40АБ, агрегированной блоком № 2.1, в сравнении с напряжением батареи 80ЛИ40АБ (см. рис. 5, в), в процессе заряда выбранным (см. рис. 5, а) профилем тока $i(t)$.

По результатам моделирования создано восемь имитационных моделей аккумуляторов 8ЛИ40АК с индивидуальными параметрами $E(t)$ и R_0 для каждого.

Погрешность характеристик имитационной модели аккумулятора 8ЛИ40АК не превышает $\pm 2\%$, модель батареи 8ЛИ40АБ не превышает $\pm 1\%$ на всем диапазоне цикла заряда.

Заключение

1. Предложен алгоритм определения параметров динамической модели ЛИА, отличающийся тем, что параметры динамической модели ЛИА формируются по экспериментальным данным или данным, предоставленным производителем ЛИА. Разработанная модель ЛИА была проверена на тестовой модели VL48E при помощи программы Simulink Matlab. Погрешность алгоритма определения параметров динамической модели ЛИА не превышает $\pm 2\%$ на разрядной и $\pm 0,7\%$ на зарядной характеристиках аккумулятора. Определяющее влияние систематической погрешности на точность работы алгоритмов оказывает неточность определения параметров R_0 , $Q_{\max}$.

2. На основе предложенной модели аккумулятора был разработан алгоритм, позволяющий повысить точность определения параметров батареи за счет агрегирования моделей каждого аккумулятора, а также определить техническое состояние аккумуляторов по изменению тока задания $i(t)$. При помощи программы Simulink Matlab предложенный алгоритм был проверен на адекватность. Установлено, что воспроизведение параметров ЛИА возможно с погрешностью не более $\pm 2\%$.

Рис. 5. Зависимости тока задания – а; напряжения аккумуляторов – б; напряжение батареи – в в режиме заряда

3. Предложен алгоритм создания имитационной модели батареи 8ЛИ40АБ на базе экспериментальных данных в режиме заряда. В результате модели-

рования установлено, что погрешность напряжения имитационной модели аккумулятора 8ЛИ40АК в динамическом режиме не превышает $\pm 2\%$, а модели батареи 8ЛИ40АБ не превышает $\pm 1\%$.

Литература

1. Baker K. Modeling Stationary Lithium-Ion Batteries for Optimization and Predictive Control / K. Baker, Y. Shi, D. Christensen // IEEE Power and Energy Conference Champaign. – 2017. – P. 1–7.
2. He H. Evaluation of Lithium-Ion Battery Equivalent Circuit Models For State of Charge Estimation by an Experimental Approach / H. He, R. Xiong, J. Fan // Energies. – 2011. – No. 4. – P. 582–598.
3. He H. Comparison study on the battery models used for the energy management of batteries in electric vehicles / H. He, R. Xiong, H. Guo, S. Li // Energies. – 2012. – P. 113–121.
4. Ramadesigan V. Modeling and simulation of lithium-ion batteries from a systems engineering perspective // Journal of The Electrochemical Society. – 2012. – Vol. 159, No. 3. – P. 31–45.
5. Li S. Study of battery modeling using mathematical and circuit oriented / S. Li, B. Ke // IEEE Power and Energy Society General Meeting. – 2011. – P. 1–8.
6. Имитатор литий-ионного аккумулятора с рекуперацией энергии / А.А. Брянцев, А.Н. Ильин, Л.А. Качин, В.Г. Букреев // Электронные и электромеханические системы и устройства: сб. науч. трудов НПП «Полус». – Томск: Изд-во Том. политех. ун-та, 2016. – С. 40–42.
7. Пат. RU 165 168 U1, МПК H01M 10/42 (2006.01), H02J 7/00 (2006.01). Имитатор литий-ионного аккумулятора / А.А. Брянцев (RU), А.Н. Ильин (RU), В.М. Попов (RU), Л.А. Качин (RU). – № 2015153649/07; заявл. 14.12.2015; опубл. 10.10.2016. – Бюл. № 28. – 6 с.
8. Брянцев А.А. Алгоритм определения параметров модели Шеферда для построения имитатора литий-ионного аккумулятора / А.А. Брянцев, В.Г. Букреев // Доклады ТУСУР. – 2019. – Т. 22, № 1. – С. 95–99.
9. Distributed MPC for efficient coordination of storage and renewable energy sources across control areas / K. Baker, J. Guo, G. Hug, X. Li // IEEE Transaction on Smart Grid. – 2016. – Vol. 7. – P. 992–1001.
10. 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.
11. Optimal home energy management system with mixed types of loads / C. Zhao, S. Dong, F. Li, Y. Song // CSEE Journal of Power and Energy Systems. – 2015. – Vol. 1. – P. 29–37.
12. Xi J. Optimal energy management strategy for battery powered electric vehicles / J. Xi, M. Li, M. Xu // Applied Energy. – 2014. – P. 332–341.
13. Rechargeable lithium-ion battery VL48E – high energy space cell // DataSheet. – Doc № 54058-2-0907–2007.
14. Lithium iron phosphate based battery – Assessment of the aging parameters and development of cycle life model / N. Omar, M.A. Monem, Y. Firouz, J. Salminen, J. Smekens, O. Hegazy, H. Gualous, G. Mulder, P. Van den Bossche, T. Coosemans, J. Van Mierlo // Applied Energy. – 2014. – Vol. 113. – P. 1575–1585.
15. Хандорин М.М. Экспериментальная проверка алгоритма оценки остаточной емкости литий-ионной аккумуляторной батареи для применения на космических аппаратах / М.М. Хандорин, В.Г. Букреев // Авиакосмическое приборостроение. – 2017. – № 3. – С. 45–55.

Брянцев Андрей Анатольевич

Аспирант Инженерной школы энергетики (ИШЭ) Национального политехнического университета (НИ ТПУ) Ленина пр-т, 30, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-923-421-11-93
Эл. почта: aa_bryantsev@mail.ru

Букреев Виктор Григорьевич

Д-р техн. наук, профессор ИШЭ НИ ТПУ Ленина пр-т, 30, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9861-9765>
Тел.: +7-913-854-21-96
Эл. почта: bukreev@tpu.ru

Шилин Александр Анатольевич

Д-р техн. наук, профессор ИШЭ
отд. электроэнергетики и электротехники (ОЭЭ) НИ ТПУ Ленина пр-т, д. 30, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0002-4761-7249
Тел.: +7-903-954-00-88
Эл. почта: shilin@tpu.ru

Bryantsev A.A., Bukreev V.G., Shilin A.A.

Parameter calculation method of the Lithium-Ion cells dynamic model

The methodology and algorithm for determining the parameters of a dynamic model of a lithium-ion cells are considered. The model is based on a combination of the Thevenin and Shepherd models, created to study and construct the characteristics of the charge-discharge characteristics of a lithium-ion cells. The simulation results reflect the high adequacy of the algorithm on a test example in Simulink Matlab and experimental data. The developed algorithm is used to create a simulator of a lithium-ion cells of a spacecraft.

Keywords: lithium-ion cell model, Thevenin equivalent circuit, parameter calculation model.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-4-96-101

References

1. Baker K., Shi Y., Christensen D. Modeling Stationary Lithium-Ion Batteries for Optimization and Predictive Control. *IEEE Power and Energy Conference Champaign*, 2017, pp. 1–7.
2. 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, no. 4, pp. 582–598.
3. He H., Xiong R., Guo H., Li S. Comparison study on the battery models used for the energy management of batteries in electric vehicles. *Energies*, 2012, pp. 113–121.
4. Ramadesigan V. Modeling and simulation of lithium-ion batteries from a systems engineering perspective. *Journal of The Electrochemical Society*, 2012, vol. 159, no. 3, pp. 31–45.
5. Li S., Ke B. Study of battery modeling using mathematical and circuit oriented. *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2011, pp. 1–8.
6. Bryantsev A.A., Ilin A.N., Kachin L. A., Bukreev V.G. [Simulator Lithium-Ion Batteries with Recovery Energy]. *Electronic and electromechanical systems and devices: Proc. of scient. papers SRC «Polus», Tomsk*, 2016, pp. 40–42 (in Russ.).
7. Pat. RU 165 168 U1, МПК H01M 10/42 (2006.01), H02J 7/00 (2006.01). Bryantsev A.A. (RU), Ilin A.N. (RU), Popov V.M. (RU), Kachin L.A. (RU). [Simulator of the Lithium-Ion cell]. № 2015153649/07, decl. 14 Dec. 2015, publ. 10 Oct. 2016, Bull. no 28, 6 p. (in Russ.).

8. Bryantsev A.A., Bukreev V.G. [Shepherd algorithm to determine model parameters when constructing simulator of the Lithium-Ion cells]. *Proceedings of TUSUR University. Tomsk: Publishing house Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*, 2019, vol. 22, no. 1, pp. 95–99 (in Russ.).

9. Baker K., Guo J., Hug G., Li X. Distributed MPC for efficient coordination of storage and renewable energy sources across control areas. *IEEE Transaction on Smart Grid*, 2016, vol. 7, pp. 992–1001.

10. Khandorin M.M., Bukreev V.G. [Lithium-ion battery capacity estimation at the real-time]. *Electrochemical energetics*, 2014, vol. 14, no. 2, pp. 65–69 (in Russ.).

11. Zhao C., Dong S., Li F., Song Y. Optimal home energy management system with mixed types of loads. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2015, vol. 1, pp. 29–37.

12. Xi J., Li M., Xu M. Optimal energy management strategy for battery powered electric vehicles. *Appl. Energy*, 2014, pp. 332–341.

13. Rechargeable lithium-ion battery VL48E – high energy space cell. *DataSheet*, Doc no. 54058-2-0907–2007.

14. Omar N., Monem M.A., Firouz Y. et al. Lithium iron phosphate based battery – Assessment of the aging parameters and development of cycle life model. *Applied Energy*, 2014, vol. 113, pp. 1575–1585.

15. Khandorin M.M., Bukreev V.G. [Experimental verification of the algorithm for estimating the residual capacity of a lithium-ion rechargeable battery for use on spacecraft]. *Aerospace Instrumentation*, 2017, no. 3, pp. 45–55 (in Russ.).

Andrey A. Bryantsev

PhD student, School of Energy & Power Engineering,
National Research Tomsk Polytechnic University (TPU)
30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-923-421-11-93
Email: aa_bryantsev@mail.ru

Viktor G. Bukreev

Doctor of Engineering Science, Professor,
School of Energy & Power Engineering, TPU
30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9861-9765>
Phone: +7-913-854-21-96
Email: bukreev@tpu.ru

Aleksander A. Shilin

Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Power Engineering School, Department of Electric Power
and Electrical Engineering,
National Research Tomsk Polytechnic University
30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0002-4761-7249
Phone: +7-903-954-00-88
Email: shilin@tpu.ru