

ИССЛЕДОВАНИЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛИТИЙ-ИОННОГО АККУМУЛЯТОРА

А.Г. Возмилов, vozmiag44@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1292-3975>
С.А. Панишев, panishef.serega@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2753-2341>
А.А. Лисов, lisov.andrey2013@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7282-8470>
Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Рассмотрены существующие способы математического моделирования литий-ионных аккумуляторов на основе формулы Шефферда, а также при помощи формул из общего курса физики. Для замера экспериментальных данных в автоматическом режиме была разработана специальная измерительная установка. Главным элементом установки является программируемая платформа на базе микропроцессора ATmega328p. Она управляет процессом, измеряет напряжение на аккумуляторе и передает данные на компьютер каждые 5 секунд через UART-интерфейс микропроцессора для последующего анализа. Далее на основе полученных данных была построена экспериментальная зависимость разряда аккумулятора постоянным током, в течение определённого промежутка времени, с последующим вычислением емкости данной батареи. Нагрузкой являются 20 резисторов, соединенных последовательно-параллельно для рассеивания тепловой мощности, выделяющейся на них при протекании электрического тока. Поскольку резисторы углеродные, имеющие прецизионный класс точности и нагрев не повышает температуру окружающей среды более чем на 10 градусов, то изменением их сопротивления можно пренебречь. Полученные значения использовались для реализации и проверки математической модели в среде для моделирования MATLAB/Simulink. Результаты проверки показали схожесть полученных значений с идеализированной моделью Шефферда, так как среднее квадратичное отклонение всех точек от данной модели составило 2,6 %.

Ключевые слова: литий-ионный аккумулятор, математическая модель, MATLAB/Simulink, снятие характеристик

Для цитирования: Возмилов А.Г., Панишев С.А., Лисов А.А. Исследование и математическое моделирование литий-ионного аккумулятора // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2022. Т. 22, № 2. С. 30–36. DOI: 10.14529/power220203

Original article
DOI: 10.14529/power220203

STUDY AND MATHEMATICAL MODELING OF A LITHIUM-ION BATTERY

A.G. Vozmilov, vozmiag44@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1292-3975>
S.A. Panishev, panishef.serega@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2753-2341>
A.A. Lisov, lisov.andrey2013@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7282-8470>
South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. This study considers existing methods of mathematical modeling of lithium-ion batteries based on the Shepherd formula, as well as using formulas from the general course of physics. In order to measure experimental data in automatic mode, a special measuring facility was developed, the main element of the setup is a programmable platform based on the ATmega328p microprocessor. It controls the process, measures the voltage on the battery and transmits data to the computer every 5 seconds via the UART interface of the microprocessor for further analysis. On the basis of the data obtained, an experimental dependence of the battery discharge by direct current over a certain period of time was built. This was followed by a calculation of battery capacity. The load is 20 resistors connected in series-parallel, in order to dissipate the thermal power released on them when an electric current flows. Since the resistors are carbon with precision accuracy class, heating does not raise ambient temperature by more than 10 degrees. Thus any change in their resistance can be neglected. The values obtained were used to implement and test the mathematical model in the MATLAB/Simulink simulation environment. The test results showed the similarity of the obtained values with the idealized Shepherd model, since the standard deviation of all points from this model was 2.6%.

Keywords: lithium-ion battery, mathematical model, MATLAB/Simulink, curves build

For citation: Vozmilov A.G., Panishev S.A., Lisov A.A. Study and mathematical modeling of a lithium-ion battery. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*. 2022;22(2):30–36. (In Russ.) DOI: 10.14529/power220203

Введение

Перезаряжаемые литий-ионные аккумуляторы в настоящее время широко используются в качестве эффективных накопителей энергии во многих носимых электронных устройствах, включая портативные телефоны, портативные компьютеры, КПК и электробритвы [1, 2]. В частности, плотность энергии у них намного выше, чем у конкурирующих аккумуляторных систем, таких как NiMH и NiCd [3].

Для многих приложений, таких как автомобили или системы хранения энергии, литий-ионные аккумуляторы должны работать на пределе производительности, чтобы обеспечить рентабельные решения. Эксплуатация вне этих пределов приводит к быстрому износу и может привести к неконтролируемому поведению [4, 5].

Существует множество различных подходов к динамическому моделированию батарей [6, 7], которые описывают динамическое поведение элементов, аккумуляторных модулей или полных аккумуляторных систем.

Методики определения параметров модели

Модель литий-ионного аккумулятора (ЛИА) является модель выходного $U_{\text{вых}}(t)$ напряжения [8, 9], составляется по схеме замещения (рис. 1) и описывается следующим уравнением

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

где $E(t)$ – ЭДС аккумулятора, В;

$i(t)$ – ток заряда/разряда аккумулятора, А;

R_0 – внутреннее сопротивление, Ом.

Более точной моделью ЛИА, описывающей процессы в аккумуляторе при изменении зарядно-разрядного тока, является модель Шеферда [10, 11]. Данное уравнение в режиме разряда аккумулятора выглядит следующим образом:

$$V_{\text{bat}} = E_0 - K \frac{Q}{Q + 0,1it} i_{\text{bat}} - K \frac{Q}{Q - it} + A \cdot e^{(-B \cdot it)} - R_0 \cdot i_{\text{bat}}, \quad (2)$$

где E_0 – максимальное напряжение аккумулятора, В;

R_0 – внутреннее сопротивление, Ом;

K – поляризационная составляющая, В;

A – экспоненциальная составляющая, В;

B – инверсная экспоненциальная составляющая, $\text{А} \cdot \text{ч}^{-1}$;

Q – полная емкость аккумулятора, $\text{А} \cdot \text{ч}$;

$it = \int i^* dt$, i^* – ток разряда аккумулятора, А.

Для определения значений параметров в выражении (2) необходимо воспользоваться экспериментальными данными ЛИА [12, 13]. Экспериментальными данными является зависимость напряжения батареи от емкости, представленной на рис. 2.

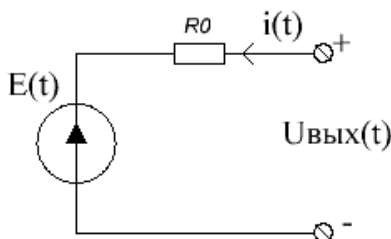


Рис. 1. Схема замещения аккумулятора
Fig. 1. Battery equivalent circuit

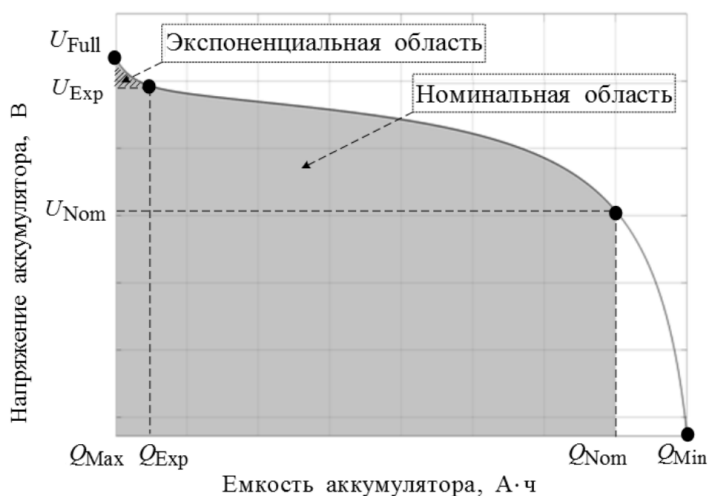


Рис. 2. Форма зависимости напряжения от емкости
Fig. 2. Voltage-capacitance waveform

Значения параметров определяются по следующим формулам:

$$A = U_{Full} - U_{Exp}; \quad (3)$$

$$B = \frac{3}{Q_{Exp}}; \quad (4)$$

$$K = \frac{(U_{Full} - U_{Nom} + A(e^{-B \cdot Q_{nom}} - 1)) \cdot (Q_{max} - Q_{nom})}{Q_{nom}}; \quad (5)$$

$$R_0 = U_{Nom} \frac{1 - \eta}{0,2 \cdot Q_{Nom}}; \quad (6)$$

$$E_0 = U_{Full} + K - A + R_0 \cdot i_{bat}, \quad (7)$$

где U_{Full} – максимально допустимое напряжение аккумулятора, В;

U_{Exp} – экспоненциальное напряжение аккумулятора, В;

U_{Nom} – номинальное напряжение аккумулятора, В;

Q_{Nom} – номинальная емкость аккумулятора, А·ч;

Q_{Min} – минимальная емкость аккумулятора, А·ч;
 η – КПД аккумулятора, %.

Экспериментальная установка

Для снятия экспериментальных данных напряжения на литий-ионном элементе с течением времени была разработана специализированная измерительная установка, её принципиальная схема представлена на рис. 3.

Главным элементом установки является программируемая платформа на базе микропроцессора ATmega328p (U1). Она управляет процессом, измеряет напряжение на аккумуляторе и передает данные на компьютер (ПК) каждые 5 секунд через UART-интерфейс микропроцессора для последующего анализа. Процессор на основе измеренного значения напряжения считает ток разряда АКБ по закону Ома. Внешний вид установки представлен на рис. 4.

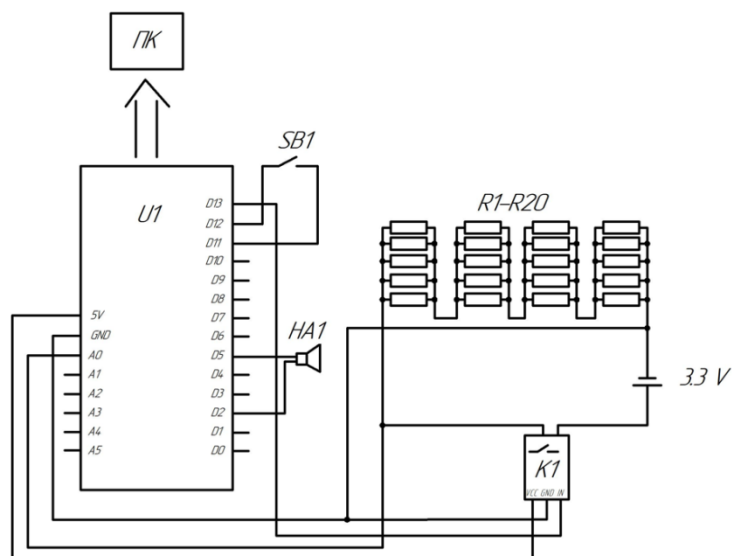


Рис. 3. Принципиальная схема установки
Fig. 3. Schematic diagram of the measuring setup

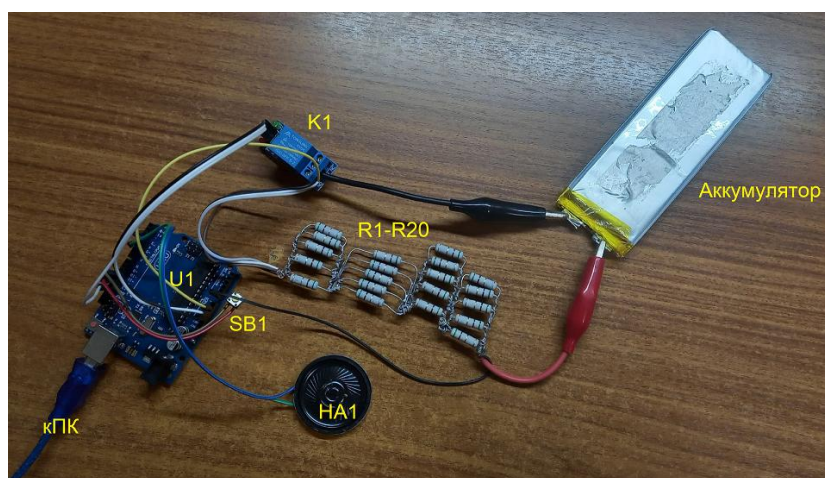


Рис. 4. Установка для проведения эксперимента
Fig. 4. Measuring setup for the experiment

Таблица 1
Экспериментальные данные
Table 1
Experimental data

Время, с	Напряжение, В	Емкость, мА·ч
5	3,498	1
10	3,481	2
15	3,474	3
20	3,463	4
25	3,452	6
...
9985	2,2	2128

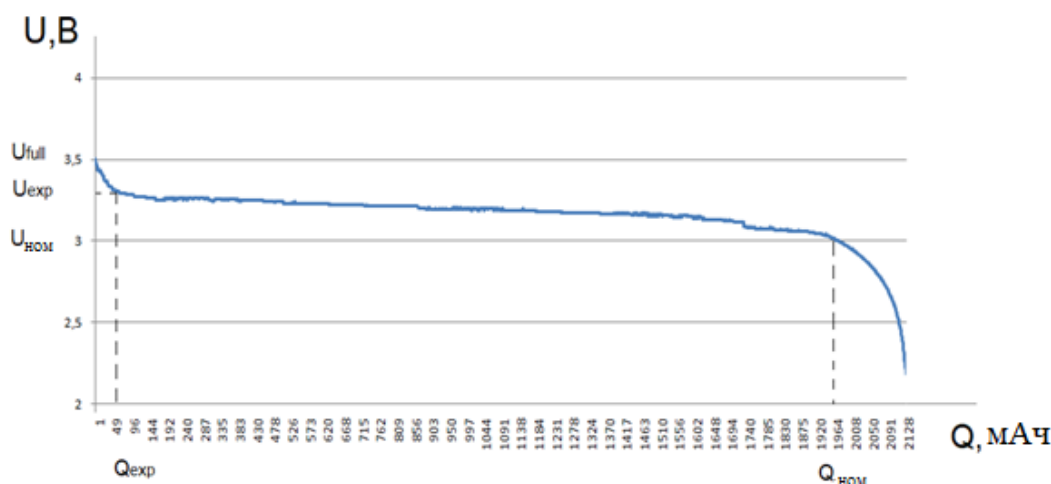


Рис. 5. Зависимость напряжения от емкости
Fig. 5. Graph of voltage versus capacitance

Нагрузкой являются 20 резисторов (R_1-R_{20}), соединенных последовательно-параллельно для рассеивания тепловой мощности, выделяющейся на них при протекании электрического тока. Поскольку резисторы углеродные, имеющие прецизионный класс точности и нагрев не прошивает температуру окружающей среды более чем на 10 градусов, то изменением их сопротивления можно пренебречь.

При нажатии на кнопку SB1 происходит запуск процесса разряда. По достижении критического значения напряжение реле К1 отключает нагрузку от аккумулятора, а динамик HA1 сообщает о прекращении процесса.

Полученные экспериментальные данные были сведены в табл. 1. Время эксперимента по разряду АКБ составило 9985 с. Рассчитанная в процессе

емкость составила 2128 мА·ч, что соответствует паспортным данным. Постоянный ток разряда составил 0,8 А.

После на основании экспериментальных данных, переданных через СОМ-порт компьютера, была построена зависимость напряжения батареи от емкости, на которой были выделены ключевые области для определения сходимости с формулой Шеферда (рис. 5).

Разработка модели в среде MATLAB/Simulink

Опираясь на модель литий-ионного аккумулятора Шеферда были рассчитаны основные параметры, требующиеся для подтверждения экспериментальных данных с теоретической базой (табл. 2).

Таблица 2
Параметры математической модели
Table 2
Parameters of the mathematical model

Параметр	Значение
A	0,3
B	15
K	0,036
R_0	0,39
E_0	3,43

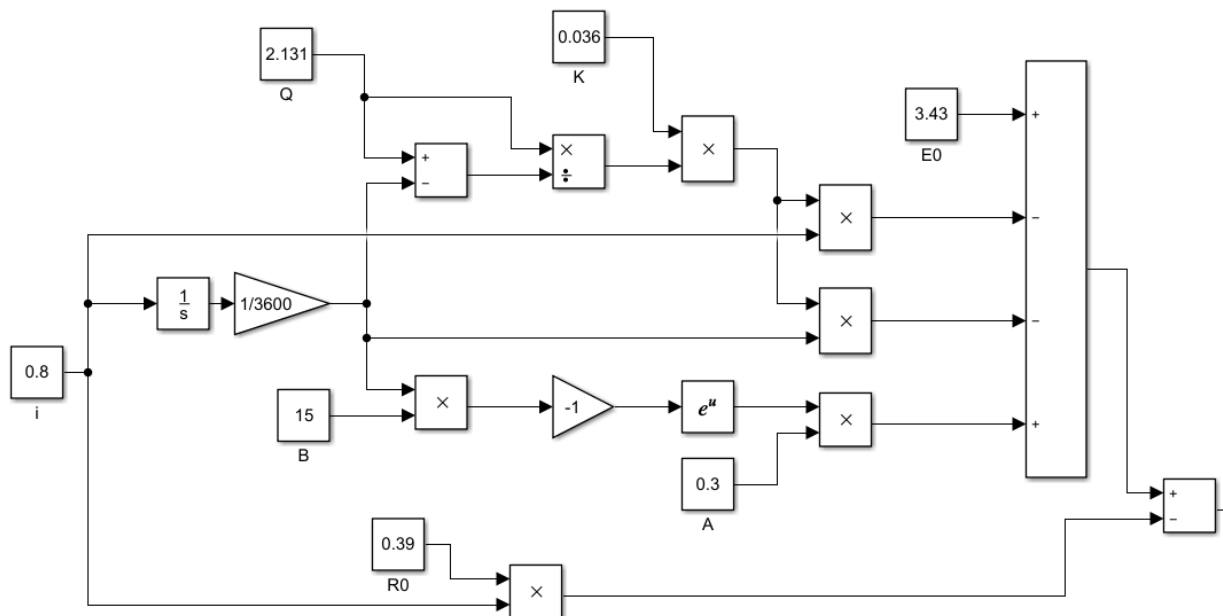


Рис. 6. Математическая модель литий-ионного аккумулятора в программной среде MATLAB/Simulink
Fig. 6. Mathematical model of a lithium-ion battery in the MATLAB/Simulink

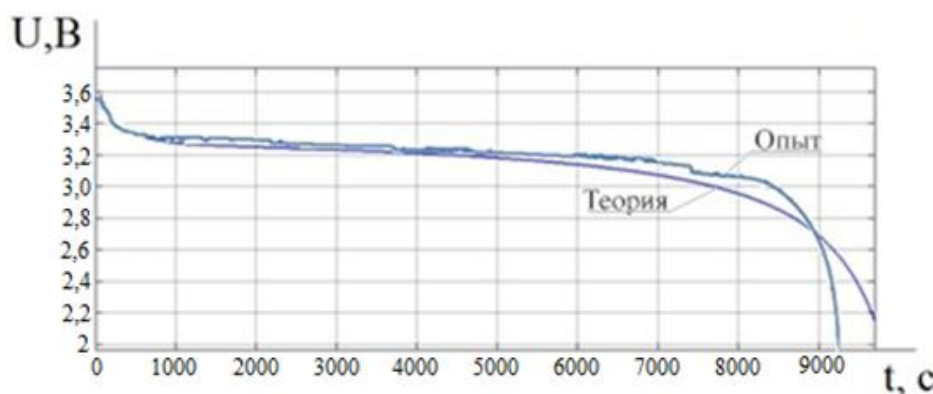


Рис. 7. Сравнение экспериментальных и расчетных данных
Fig. 7. Comparison of experimental and calculated data

Далее была составлена математическая модель в программной среде MATLAB/Simulink (рис. 6).

На входе модели ток разряда, на выходе – зависимость напряжения от времени разряда.

После проведения сравнения результатов эксперимента и математической модели (рис. 7) было выявлено, что экспериментальная модель имеет хорошую сходимость с теоретической, и средне-квадратичное отклонение всех точек составило 2,6 %.

Заключение

На основе изучения областей применения литий-ионных аккумуляторов установлено, что они в настоящее время широко используются в качестве эффективных накопителей энергии во многих носимых электронных устройствах, КПК и в электромобилях. Поэтому исследования в области мо-

делирования процессов заряда и разряда этих АКБ позволяют повысить качество предлагаемых моделей и использовать их в составе управляющих устройств.

Наиболее полной моделью разряда и заряда литиевой АКБ является модель Шеферда, которую можно дополнить и исследовать при помощи базовых законов физики, что и было сделано в этой работе. Как показали результаты эксперимента, использование микропроцессоров младшей серии (8 бит) с разрядностью АЦП 10 бит при применении алгоритмов фильтрации считываемых значений позволяет добиться приемлемых по точности результатов с погрешностью 2,6 %.

Также поскольку разработанная установка носит универсальный характер (она программируема), то она имеет возможность проводить замеры не только литиевых АКБ, но и свинцовых, никелевых и др.

Список литературы

1. Linden D. *Handbook of Batteries*. Second ed. New York: McGraw-Hill, 1995. 324 p.
2. Bergveld H.J., Kruijt W.S., Notten P.H.L. *Battery Management Systems: Design by Modelling*. Kluwer Academic Publishers, 2002. 512 p. DOI: 10.1007/978-94-017-0843-2_4
3. Reiner K. *Lithium-Ion Batteries: Basics and Applications*. New York: Kindle, 2020. 588 p.
4. Safety focused modeling of lithium-ion batteries: A review / S. Abada, G. Marlair, A. Lecocq et al. // *Journal of Power Sources*. 2016. Vol. 306. P. 178–192. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2015.11.100
5. Algorithms for Advanced Battery-Management Systems / N.A. Chaturvedi, R. Klein, J. Christensen et al. // *IEEE Control Systems*. 2010. Vol. 30 (3). P. 49–68. DOI: 10.1109/MCS.2010.936293
6. Modeling and Simulation of Lithium-Ion Batteries from a Systems Engineering Perspective / V. Ramadesigan, P.W.C. Northrop, S. De et al. // *Journal of The Electrochemical Society*. 2012. Vol. 159 (3). P. R31–R45. DOI: 10.1149/2.018203jes
7. Braatz R.D., Seebauer E.G., Alkire E.C. *Multiscale Modeling and Design of Electrochemical Systems*. Wiley-VCH, 2018. P. 289–334. DOI: 10.1002/9783527625307.ch4
8. 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. Vol. 4 (4). P. 582–598. DOI: 10.3390/en4040582
9. Comparison study on the battery models used for the energy management of batteries in electric vehicles / H. He, R. Xiong, H. Guo, S. Li // *Energy Conversion and Management*. 2012. Vol. 64. P. 113–121. DOI: 10.1016/j.enconman.2012.04.014
10. 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. тр. НПЦ «Полюс»*. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2016. С. 136–138.
11. Martínez-Rosas E., Vasquez-Medrano R., Flores A. Modeling and simulation of lithium-ion batteries // *Computers & Chemical Engineering*. 2011. Vol. 35 (9). P. 1937–1948. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2011.05.007
12. Li S., Ke B. Study of battery modeling using mathematical and circuit oriented // 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting. 2011. P. 1–8. DOI: 10.1109/pes.2011.6039230
13. 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. DOI: 10.1109/tsg.2015.2512503

References

1. Linden D. *Handbook of Batteries*. Second ed. New York: McGraw-Hill, 1995. 324 p.
2. Bergveld H.J., Kruijt W.S., Notten P.H.L. *Battery Management Systems: Design by Modelling*. Kluwer Academic Publishers, 2002. 512 p. DOI: 10.1007/978-94-017-0843-2_4
3. Reiner K. *Lithium-Ion Batteries: Basics and Applications*. New York: Kindle, 2020. 588 p.
4. Abada S., Marlair G., Lecocq A., Petit M., Sauvant-Moynot V., Huet F. Safety focused modeling of lithium-ion batteries: A review. *Journal of Power Sources*. 2016;306:178–192. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2015.11.100
5. Chaturvedi N.A., Klein R., Christensen J., Ahmed J., Kojic A. Algorithms for Advanced Battery-Management Systems. *IEEE Control Systems*. 2010;30(3):49–68. DOI: 10.1109/MCS.2010.936293
6. Ramadesigan V., Northrop P.W.C., De S., Santhanagopalan S., Braatz R.D. Modeling and Simulation of Lithium-Ion Batteries from a Systems Engineering Perspective. *Journal of The Electrochemical Society*. 2012;159(3):R31–R45. DOI: 10.1149/2.018203jes
7. Braatz R.D., Seebauer E.G., Alkire E.C. *Multiscale Modeling and Design of Electrochemical Systems*. Wiley-VCH; 2018. P. 289–334. DOI: 10.1002/9783527625307.ch4
8. 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;4(4):582–598. DOI: 10.3390/en4040582
9. He H., Xiong R., Guo H., Li S. Comparison study on the battery models used for the energy management of batteries in electric vehicles. *Energy Conversion and Management*. 2012;64:113–121. DOI: 10.1016/j.enconman.2012.04.014
10. Bryantsev A.A, Il'in A.N., Kachin L.A., Bukreev V.G. [Energy Recovery Lithium-Ion Battery Simulator]. In: *Collection of scientific works SPC "Polyus"*. Tomsk; 2016. P. 136–138. (In Russ.)
11. Martínez-Rosas E., Vasquez-Medrano R., Flores A. Modeling and simulation of lithium-ion batteries // *Computers & Chemical Engineering*. 2011;35(9):1937–1948. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2011.05.007
12. Li S., Ke B. Study of battery modeling using mathematical and circuit oriented. In: *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*; 2011. P. 1–8. DOI: 10.1109/pes.2011.6039230
13. 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;7:992–1001. DOI: 10.1109/tsg.2015.2512503

Информация об авторах

Возмилов Александр Григорьевич, д-р техн. наук, проф. кафедры «Электропривод и мехатроника», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; vozmiag44@rambler.ru.

Панишев Сергей Алексеевич, магистр, аспирант кафедры «Электропривод и мехатроника», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; panishef.serega@mail.ru.

Лисов Андрей Анатольевич, магистр, аспирант кафедры «Электропривод и мехатроника», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; lisov.andrey2013@yandex.ru.

Information about the authors

Alexander G. Vozmilov, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Electric Drive and Mechatronics Department, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; vozmiag44@rambler.ru,

Sergey A. Panishev, Master, Postgraduate Student of the Electric Drive and Mechatronics Department, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; panishef.serega@mail.ru.

Andrey A. Lisov, Master, Postgraduate Student of the Electric Drive and Mechatronics Department, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; lisov.andrey2013@yandex.ru.

Статья поступила в редакцию 09.04.2022; одобрена после рецензирования 05.05.2022; принята к публикации 05.05.2022.

The article was submitted 09.04.2022; approved after reviewing 05.05.2022; accepted for publication 05.05.2022.