

УДК 621.355: 519.713

А.А. Брянцев, В.Г. Букреев

## Алгоритм определения параметров модели Шеферда для построения имитатора литий-ионного аккумулятора

Предлагаются методика и алгоритм определения параметров модели Шеферда для описания нелинейной вольт-амперной характеристики заряда литий-ионного аккумулятора. Результаты моделирования отражают достаточно высокую адекватность алгоритма на тестовом примере в программной среде Simulink Matlab. Подтверждается возможность использования разработанного алгоритма при исследовании режима разряда аккумулятора.

**Ключевые слова:** модель заряда литий-ионного аккумулятора, модель Шеферда, алгоритм определения параметров модели аккумулятора.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2019-22-1-95-99

Применение литий-ионных аккумуляторных батарей (ЛИАБ) в космической технике обуславливает создание специализированных устройств – имитаторов ЛИАБ (ИЛИАБ) с целью тестирования режимов работы преобразующей аппаратуры системы электропитания. Для повышения качества и сокращения времени отработки и испытаний применяются современные методы физического, имитационного и компьютерного моделирования [1, 2].

В данный момент промышленно выпускаемые ИЛИАБ не обеспечивают полностью функциональную реализацию алгоритмов, позволяющих с требуемой точностью воспроизвести основные характеристики батареи. В первую очередь это связано с отсутствием имитации режимов заряда аккумулятора в составе имитатора ЛИАБ.

Предлагается построение ИЛИАБ (рис. 1), который реализован из имитаторов литий-ионных аккумуляторов (ЛИА) [3]. Данная концепция позволяет расширить функциональное наполнение имитатора всей ЛИАБ и исследовать ее характеристики.

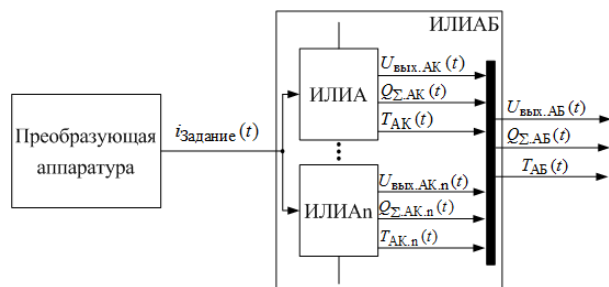


Рис. 1. Структурная схема реализации ИЛИАБ для отработки режимов работы преобразующей аппаратуры

В статье рассмотрена модель ЛИА, основанная на уравнении Шеферда, позволяющая формировать статические характеристики в аккумуляторе при изменении тока  $i_{\text{задание}}(t)$ , поступающего с тестируемого электрооборудования.

### Описание методики определения параметров модели ЛИА

Для реализации имитатора ЛИА рассмотрены математические модели [4, 5]. Представлены варианты описания ЛИА при помощи эквивалентных электрических схем замещения [6, 7].

Моделью ЛИА является модель выходного  $U_{\text{вых}}(t)$  напряжения [8, 9] и составляется по схеме замещения (рис. 2) и описывается 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;  $R_0$  – постоянное сопротивление, Ом.

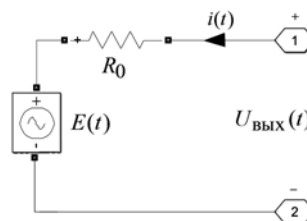


Рис. 2. Схема замещения аккумулятора по модели Шеферда

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

$$U_{\text{вых}}(t) = E_0 - K \frac{Q_{\text{Max}}}{Q_{\text{Max}} - Q_{\Sigma}(t)} + A \cdot e^{(-B \cdot Q_{\Sigma}(t))} + R_0 \cdot i(t), \quad (2)$$

где  $E_0$  – максимальное напряжение аккумулятора, В;  $i(t)$  – измеренный ток заряда аккумулятора, А;  $R_0$  – постоянное сопротивление, Ом;  $K$  – поляризационная составляющая, В;  $A$  – экспоненциальная составляющая, А·ч<sup>-1</sup>;  $B$  – инверсная экспоненциальная составляющая, А·ч;  $Q_{\text{Max}}$  – полная емкость аккумулятора, А·ч;  $Q_{\text{Exp}}$  – экспоненциальная емкость аккумулятора, А·ч;  $Q_{\Sigma}(t)$  – заряд, полученный аккумулятором за время  $t$ , А·ч.

Для определения значений параметров в выражении (2) необходимо воспользоваться данными производителя ЛИА (рис. 3) [12, 13]:

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

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

$$K = \frac{(U_{\text{Full}} - U_{\text{Nom}} + A(\exp(-B \cdot Q_{\text{Nom}}) - 1)) \cdot (Q_{\text{Max}} - Q_{\text{Nom}})}{Q_{\text{Nom}}}, \quad (5)$$

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

$$E_0 = U_{\text{Full}} + K - A + R_0 \cdot i^*, \quad (7)$$

$$Q_{\Sigma}(t) = Q_{\text{Exp}} - \int_{t_0}^t i(t) dt, \quad (8)$$

где  $U_{\text{Full}}$  – максимально допустимое напряжение аккумулятора, представленное производителем, В;  $U_{\text{Exp}}$  – экспоненциальное напряжение аккумулятора, В;  $U_{\text{Nom}}$  – номинальное напряжение аккумулятора, В;  $Q_{\text{Nom}}$  – номинальная емкость аккумулятора, А·ч;  $Q_{\text{Min}}$  – минимальная емкость аккумулятора, А·ч;  $\eta$  – КПД аккумулятора, %;  $i^*$  – фиксированный ток заряда аккумулятора, А.

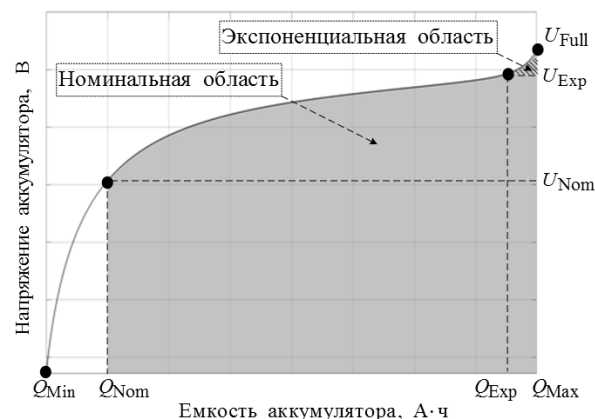


Рис. 3. График зависимости напряжения аккумулятора от емкости в режиме заряда

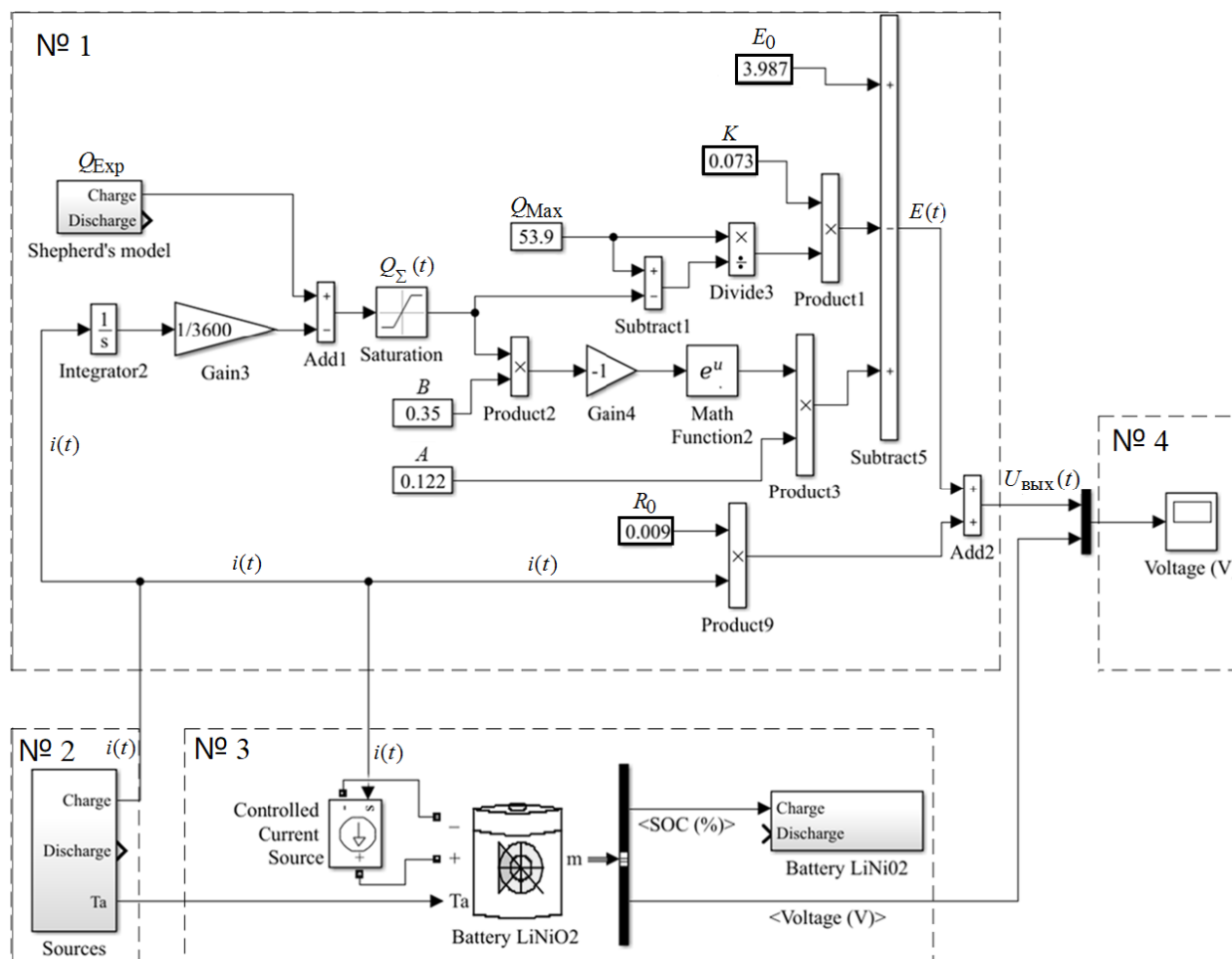


Рис. 4. Имитационная модель Шеферда и эталонного аккумулятора в среде Simulink Matlab:

блок № 1 – реализация системы уравнения (2) модели Шеферда;

блок № 2 – реализация преобразующей аппаратуры тока задания  $i_{\text{задание}}(t)$ ;

блок № 3 – реализация эталонной модели LiNiO<sub>2</sub>;

блок № 4 – реализация визуализации зависимости напряжения аккумулятора от времени

### Описание имитационной модели ЛИА в среде Simulink Matlab

Программный пакет Simulink Matlab оснащен встроенной моделью аккумулятора, позволяющей имитировать поведение литий-ионного аккумулятора. Эту модель будем использовать в качестве эталонной модели LiNiO<sub>2</sub> (далее – имитационная модель

LiNiO<sub>2</sub>) [14, 15], с которой будем сравнивать построенную модель Шеферда. Для построения структуры «модель Шеферда – имитационная модель LiNiO<sub>2</sub> – система управления – система визуализации» (рис. 4) воспользуемся компонентами пакета «Simulink Library Browser». Входные и выходные сигналы данной структуры являются информационными.

Система уравнений (2) задается в виде соответствующих моделирующих компонентов блоком № 1. Задание требуемых значений протекающего тока осуществляется блоком № 2, настроенного на формирование постоянного номинального тока  $\pm 4,5$  А.

После определения параметров модели Шеферда проверяется ее адекватность в результате сравнения соответствующих характеристик, полученных на имитационной модели  $\text{LiNiO}_2$  блоком № 3.

На рис. 5 и 6 представлены графики зависимости напряжения аккумулятора от времени блоком № 4, вычисленные на имитационной модели  $\text{LiNiO}_2$  (сплошная линия) и по модели Шеферда (пунктирная линия).

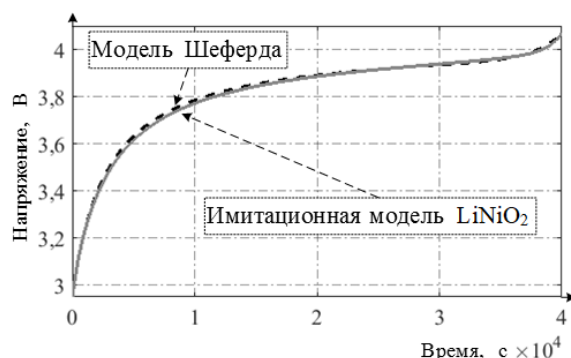


Рис. 5. График зависимости напряжения аккумулятора от времени в режиме заряда

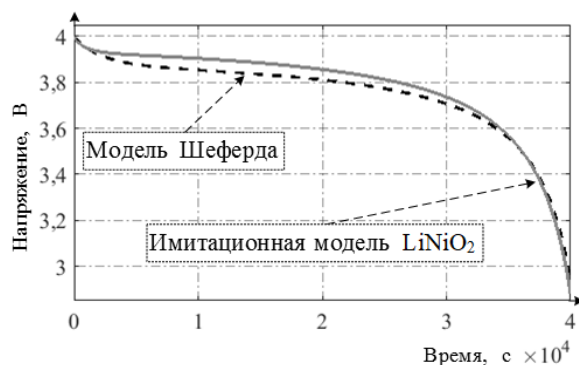


Рис. 6. График зависимости напряжения аккумулятора от времени в режиме разряда

В результате моделирования установлено, что погрешность напряжения ЛИА по модели Шеферда не превышает  $\pm 1\%$  с имитационной моделью  $\text{LiNiO}_2$  практически на всей зарядной и разрядной характеристике (см. графики на рис. 5 и 6). Но имитационная модель  $\text{LiNiO}_2$  имеет погрешность до  $\pm 5\%$  по сравнению с экспериментом при токах, численно равных пятикратной величине емкости ( $5Q_{\text{Max}}$ ) [16].

#### Алгоритм определения параметров модели Шеферда

Алгоритм позволяет определить параметры модели Шеферда как в режиме заряда, так и разряда аккумулятора и иллюстрируется блок-схемой, представленной на рис. 7.

Данный алгоритм строится на основе данных, представленных производителями ЛИА или сформированных экспериментальным путем (см.рис. 2).

Коэффициенты модели рассчитываются по формулам (3)–(7), определяется направление тока  $i(t)$  для построения модели заряда или разряда.

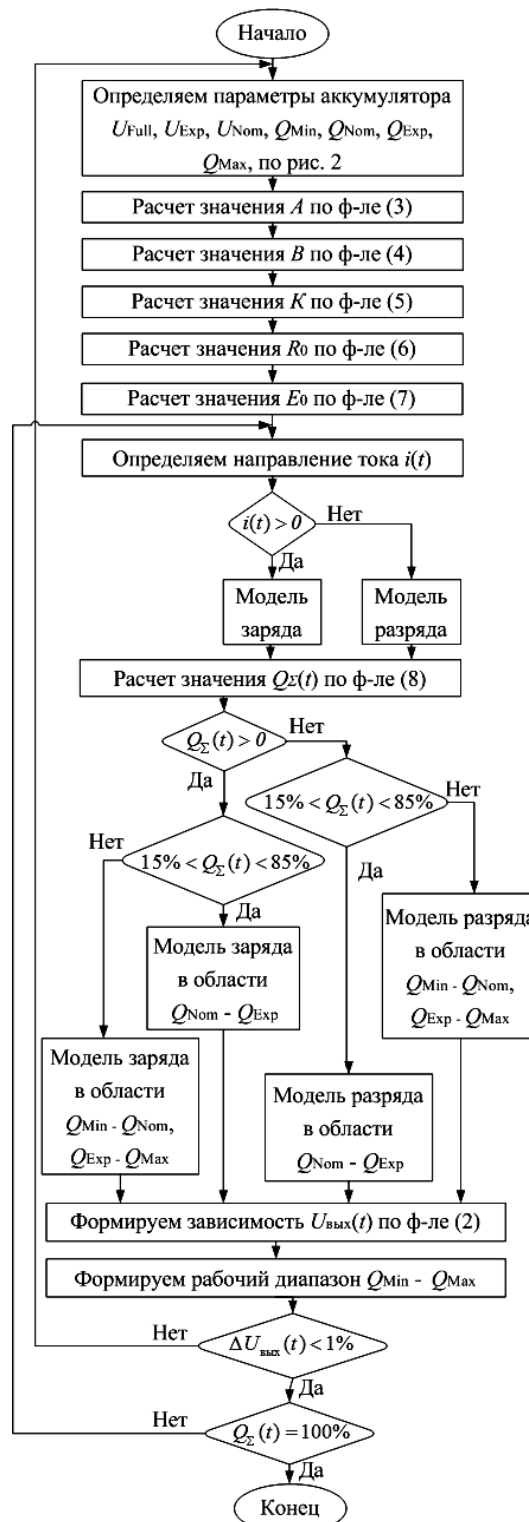


Рис. 7. Алгоритм определения параметров модели Шеферда

Далее рассчитывается  $Q_{\Sigma}(t)$  по формуле (8), определяется область  $Q_{\Sigma}(t)$  для формирования зависимости  $U_{\text{вых}}(t)$  по уравнению (2). Определяем  $\Delta U_{\text{вых}}(t)$ , проводим проверку данных, используемых

для построения  $U_{\text{вых}}(t)$ . Если значение  $\Delta U_{\text{вых}}(t)$  находится в допустимых пределах  $<1\%$ , то продолжаем формировать  $U_{\text{вых}}(t)$ , если не удовлетворяет требованиям – возвращаемся в начало алгоритма и корректируем значения  $U_{\text{ном}}$ ,  $U_{\text{exp}}$ ,  $Q_{\text{ном}}$ ,  $Q_{\text{exp}}$ . Повторяем всю процедуру с самого начала и формируем зависимость  $U_{\text{вых}}(t)$  до тех пор, пока не заполнится счетчик ампер-часов  $Q_{\Sigma}(t)$  аккумулятора.

### Заключение

Алгоритм определения параметров модели Шеффера и непосредственно сама модель были проверены на тестовых примерах при помощи программы Simulink Matlab. Максимальная погрешность предложенной модели ЛИА не превышает  $\pm 1\%$  с имитационной моделью  $\text{LiNiO}_2$  на всей зарядной и разрядной характеристике аккумулятора.

Представленный алгоритм позволяет решить основные проблемы, возникающие при разработке имитаторов ЛИАБ, а именно определение параметров модели каждого аккумулятора и построение его зарядной и разрядной характеристик.

### Литература

1. 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.
2. 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.
3. Имитатор литий-ионного аккумулятора с рекуперацией энергии / А.А. Брянецев, 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. 136–138.
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. 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.
7. Zhao C. 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.
8. Tremblay O. Experimental validation of a battery dynamic model for EV applications / O. Tremblay, A. Dessaint // *Electric Vehicle Journal*. – 2009. – Vol. 3. – P. 289–298.
9. Tremblay O. A generic battery model for the dynamic simulation of hybrid electric vehicles / O. Tremblay, A. Dessaint, I. Dekkiche // *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference* – 2007. – P. 284–289.
10. Shepherd M. Design of Primary and Secondary Cells. – Part 2. An equation describing battery discharge // *Journal of Electrochemical Society*. – 1965. – Vol. 112. – P. 657–664.
11. Mauracher P. Dynamic modelling of lead/acid batteries using impedance spectroscopy for parameter identification / P. Mauracher, E. Karden // *Journal of Power Sources*. – 1997. – Vol. 67. – P. 69–84.
12. Baker K. Modeling Stationary Lithium-Ion Batteries for Optimization and Predictive Control / K. Baker, Y. Shi, D. Christensen // *IEEE Power and Energy Conference Champlain*. – 2017. – P. 1–7.
13. Tremblay O. A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles // *IEEE Power and Energy Society General Meeting*. – 2007. – P. 284–289.
14. Rechargeable lithium-ion battery VL 48 E – high energy space cell // *DataSheet*. – Doc. No. 54058-2-0907–2007.
15. Xi J. Optimal energy management strategy for battery powered electric vehicles / J. Xi, M. Li, M. Xu // *Applied Energy*. – 2014. – P. 332–341.
16. Lithium iron phosphate based battery – Assessment of the aging parameters and development of cycle life model / N. Omar, M. A. Monem, Y. Firouz et al. // *Applied Energy*. – 2014. – Vol. 113. – P. 1575–1585.

### Брянецев Андрей Анатольевич

Аспирант Инженерной школы энергетики  
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  
Инженерной школы энергетики 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

Bryantsev A.A., Bukreev V.G.

### Shepherd algorithm to determine model parameters when constructing simulator of the Lithium-Ion cells

The article proposes a technique and an algorithm to determine the parameters of Shepherd model used to describe the nonlinear current-voltage characteristics of the charge a lithium-ion cells. The simulation results reflect a fairly high adequacy of the algorithm on a test example in Simulink Matlab software environment. The possibility of using the developed algorithm in the study of discharge cell is confirmed.

**Keywords:** lithium-ion cell charge model, Shepherd model, algorithm to determine cell model parameters

**doi:** 10.21293/1818-0442-2019-22-1-95-99

### References

1. 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.
2. 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.
3. 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. 136–138 (in Russ.).

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. 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.
  7. 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.
  8. Tremblay O., Dessaint A. Experimental validation of a battery dynamic model for EV applications. *Electric Vehicle Journal*, 2009, vol. 3, pp. 289–298.
  9. Tremblay O., Dessaint A., Dekkiche I. A generic battery model for the dynamic simulation of hybrid electric vehicles. *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2007, pp. 284–289.
  10. Shepherd M. Design of Primary and Secondary Cells. Part 2. An equation describing battery discharge. *Journal of Electrochemical Society*, 1965, vol. 112, pp. 657–664.
  11. Mauracher P., Karden E. Dynamic modelling of lead/acid batteries using impedance spectroscopy for parameter identification. *Journal of Power Sources*, 1997, vol. 67, pp. 69–84.
  12. 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.
  13. Tremblay Olivier. A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles. *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2007, pp. 284–289.
  14. Rechargeable lithium-ion battery VL 48 E – high energy space cell. *DataSheet*, Doc no. 54058-2-0907–2007.
  15. Xi J., Li M., Xu M. Optimal energy management strategy for battery powered electric vehicles. *Appl. Energy*, 2014, pp. 332–341.
  16. 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.
- 

**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, 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