

УДК 621.3

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМА ИМПУЛЬСНОГО РАЗРЯДА
ЛИТИЙ-ИОННОГО АККУМУЛЯТОРА****С.В. Кучак***Новосибирский государственный технический университет*

Для разработки устройств силовой электроники, функционирующих в системах накопления электрической энергии, необходимо знать свойства и поведение применяемого накопительного элемента. Наиболее применяемым типом накопителей являются электрохимические накопители – аккумуляторные батареи. В данном ряду перспективностью выделяются литий-ионные аккумуляторы. В статье рассматриваются временные диаграммы напряжения LiFePO_4 аккумуляторов, отражающих реакцию на импульсы тока разряда. В результате анализа зависимостей получены параметры схемы замещения аккумулятора, представляющей последовательное соединение источника напряжения, внутреннего сопротивления и двух резистивно-емкостных звеньев. Установлено, что величина внутреннего сопротивления и параметры RC-звена с меньшей постоянной времени практически не зависят от силы разрядного тока. В свою очередь, более инерционное звено обладает варьируемыми значениями сопротивления и емкости. На основе полученных результатов сформирована модель аккумулятора в режиме импульсного разряда. Результаты моделирования с допустимой погрешностью соответствуют экспериментальным зависимостям реального аккумулятора, что подтверждает достоверность проведенных расчетов.

Ключевые слова: импульсный разряд, литий-железо-фосфат, литий-ионный аккумулятор, моделирование, разрядные характеристики.

DOI: 10.17212/1727-2769-2018-2-62-69

Введение

В последние годы многие разработчики устройств в сфере энергетики нацелены на конструирование систем накопления энергии (СНЭ) [1–3]. За исключением преобразователя, основной частью СНЭ являются накопительные устройства, такие как суперконденсаторы, маховики, топливные элементы и т.д. Наиболее широкое применение получили электрохимические накопители энергии – аккумуляторные батареи.

Среди большого количества типов аккумуляторов свинцово-кислотные и литий-ионные батареи являются наиболее применяемыми. В настоящее время, будучи наиболее изученными, свинцово-кислотные аккумуляторы остаются классическим решением для большинства приложений. Но поскольку специалисты постоянно улучшают литий-ионную технологию, тем самым уменьшая массу и стоимость батарей, в будущем литий-ионные аккумуляторы (далее – ЛИА) могут существенно потеснить свинцово-кислотные батареи на рынке энергетики.

Для увеличения срока эксплуатации батареи, включенной в состав системы накопления энергии, необходимо знать ее свойства и поведение в основных режимах эксплуатации. Целью данной работы является исследование характеристик литий-ионного аккумулятора в режиме импульсного разряда.

Рассматриваемые литий-ионные аккумуляторы содержат в качестве катодного материала литий-железо-фосфат (LiFePO_4). Наноструктурированный графит используется в качестве анодного материала. Номинальные характеристики LiFePO_4 аккумуляторов производства Лиотех представлены в таблице [4].

Рекомендованные режимы эксплуатации аккумуляторов типа LiFePO₄
Recommended LiFePO₄ accumulators operating modes

| Параметр / Parameter | Значение / Value |
|---|---------------------------------|
| Номинальное напряжение, В / Nominal voltage, V | 3.2 |
| Предельное напряжение заряда, В / Limiting charge voltage, V | 3.7 |
| Предельное напряжение разряда, В / Limiting discharge voltage, V | 2.5 |
| Удельная энергоемкость, Вт·ч/кг / Storage density, W·h/kg | 80.5 – 93.0 |
| Максимальный непрерывный ток заряда/разряда / Maximum continuous charge/discharge current | 3C* |
| Предельные температуры заряда, °C / Limiting charge temperatures, °C | от 0 до +30 / from 0 to +30 |
| Предельные температуры разряда, °C / Limiting discharge temperatures, °C | от –30 до +50 / from –30 to +50 |
| Количество циклов ** / Number of cycles ** | 3000 |

* C – сила тока, численно равная номинальной емкости аккумулятора Сн.

** При глубине разрядки до 80 %.

Одна из наиболее зарекомендовавших себя схем замещения аккумуляторного элемента [5–7] представлена на рис. 1, где U_{ocv} – напряжение разомкнутой цепи (НРЦ); R_{int} – внутреннее омическое сопротивление; C_{PA} , R_{PA} – емкость и сопротивление активационной поляризации, соответственно; C_{PC} , R_{PC} – емкость и сопротивление концентрационной поляризации соответственно; U_T – напряжение на выводах батареи.

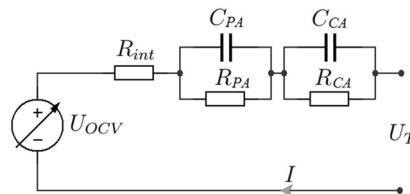


Рис. 1 – Схема замещения аккумулятора

Fig. 1 – Equivalent circuit of accumulator

Параметры активационной поляризации отражают процессы перетекания носителей заряда между электродами и имеют существенное влияние в процессах импульсного характера (десятки – сотни миллисекунд). В свою очередь, параметры концентрационной поляризации относятся к изменению концентрации носителей в приэлектродном слое вещества электролита и соответствуют более длительным процессам.

1. Экспериментальные результаты

1.1. Методика испытания

Целью исследования является получение характеристик LiFePO₄ аккумуляторов при импульсном разряде различными токами. Для испытаний были отобраны по три аккумулятора с номинальной емкостью 380 А·ч. Разброс по величине разрядной емкости менее 0,05C, где C – номинальная емкость аккумуляторов.

Перед разрядом аккумуляторы были заряжены двухстадийным методом, рекомендованным производителем. Первая стадия – заряд постоянным током 0,2C до напряжения 3,7 В. На второй стадии заряд постоянным напряжением проводился до снижения тока до 0,02C. После заряда выдерживалась 30-минутная пауза.

В ходе исследования, при нормальных климатических условиях аккумуляторы подвергались импульсному разряду током с амплитудой 0,2C, 1,0C 1,5C и 2,5C, отражающих практически весь диапазон характерных для ЛИА разрядных токов.

Ограничение на уровне $2,5C$ вызвано предельным током испытательной установки (до 1000 А). Длительность каждого импульса составляла 8 с, что отражает существенную часть переходного процесса.

1.2. Внутреннее сопротивление

На рис. 2 представлены типовые временные диаграммы напряжения разрядного импульса аккумулятора емкостью 380 А·ч, представляющие собой усредненные данные по исследуемым аккумуляторам. Начальное значение напряжения равнялось 3,36 В. Как можно увидеть из диаграммы, основная часть падения напряжения происходит мгновенно в начале переходного процесса, что говорит о чисто активном характере падения напряжения. Далее происходит плавное, близкое к экспоненциальному, снижение напряжения. Исходя из формы напряжения, можно определить величину R_{int} как отношение разности падения напряжения в момент скачка для различных токов к разности этих токов:

$$R_{int}|_{380\text{A}\cdot\text{h}} = \frac{\Delta U_{2,5C} - \Delta U_{0,2C}}{2,5C - 0,2C} = \frac{U_{0,2C}|_{t=0} - U_{2,5C}|_{t=0}}{2,5C - 0,2C} = \frac{3,338 - 3,06}{950 - 76} = 0,3181 \text{ мОм}.$$

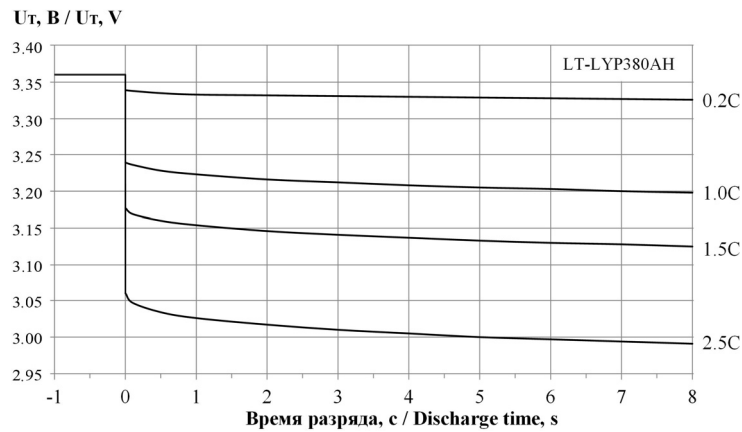


Рис. 2 – Временные диаграммы напряжения аккумулятора

Fig. 2 – Time diagrams of accumulator voltage

1.3. Параметры поляризации

Для анализа параметров поляризации рассмотрим зависимость для тока разряда $2,5C$. Как можно увидеть, больше половины спада напряжения происходит за первые две секунды переходного процесса. На основании рис. 1 переходный процесс является суммой двух экспонент и может быть описан следующим выражением:

$$U(t) = U_0 - \Delta U_{int} - \Delta U_{PA} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{PA}}} \right) - \Delta U_{PC} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{PC}}} \right),$$

где U_0 – напряжение до подачи импульса (НПИ); $\Delta U_{int} = IR_{int}$ – падение напряжения на внутреннем сопротивлении; $\Delta U_{PA} = IR_{PA}$ и $\Delta U_{PC} = IR_{PC}$ – падение напряжения на звене активационной и концентрационной поляризации соответ-

ственно; $\tau_{PA} = R_{PA}C_{PA}$ и $\tau_{PC} = R_{PC}C_{PC}$ – постоянные времени звена активационной и концентрационной поляризации соответственно.

При известных U_0 , ΔU_{int} и значении результирующего напряжения в моменты времени $t_1 = 0,5, 1, 4, 8$ с была решена система уравнений относительно τ_{PA} , U_{PA} и U_{PC} . Было получено, что постоянная времени процессов активационной поляризации τ_{PA} слабо зависит от протекающего тока и составляет в среднем 0,294 с. При этом, учитывая величину падения напряжения, было получено, что сопротивление R_{PA} имеет значение $26,14 \text{ мОм} \pm 6 \%$ для режимов 1,0C, 1,5C и 2,5C.

На основании полученного значения R_{PA} и постоянной времени τ_{PA} получим величину емкости C_{PA} :

$$C_{PA} = \frac{\tau_{PA}}{R_{PA}} = \frac{0,294}{26,14 \cdot 10^{-6}} = 11,25 \text{ кФ}.$$

Также, из решения системы уравнений было получено, что постоянная времени звена концентрационной поляризации τ_{PC} практически не зависит от протекающего тока и составила $5,35 \text{ с} \pm 6,5 \%$. При этом разброс по величине сопротивления R_{PC} и емкости C_{PC} данного звена составил $\pm 29 \%$. На рис. 3 представлены зависимости данных параметров от силы тока разряда. На диаграмме расчетные значения R_{PC} и C_{PC} для соответствующих режимов изображены в виде маркеров. Сплошными линиями представлена аппроксимация результатов.

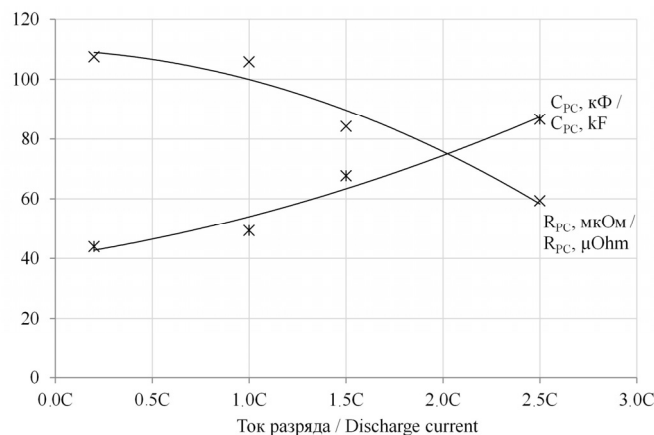


Рис. 3 – Зависимости параметров схемы замещения для концентрационной поляризации от силы тока разряда

Fig. 3 – Dependences of concentration polarization equivalent scheme on discharge current

2. Моделирование импульсных разрядов

Для подтверждения актуальности полученных параметров схемы замещения для импульсных разрядов было проведено имитационное моделирование электротехнических процессов.

Модель, сформированная в среде схемотехнического моделирования PSIM, представлена на рис. 4. Величина напряжения разомкнутой цепи U_{ocv} установлена на уровне 3,36 В, что соответствует состоянию полного заряда аккумулятора.

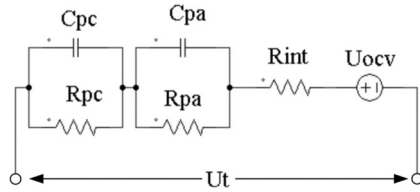


Рис. 4 – Имитационная модель аккумулятора

Fig. 4 – Accumulator simulation model

Параметры R_{int} , R_{PA} , C_{PA} соответствуют результатам пп. 1.2–1.3. Значения R_{PC} и C_{PC} устанавливаются предварительно в соответствии с рис. 3.

На рис. 5 представлены совмещенные диаграммы экспериментальных данных (маркеры) и результатов моделирования (сплошные линии) для токов $0,2C$, $1C$, $1,5C$ и $2,5C$ соответственно.

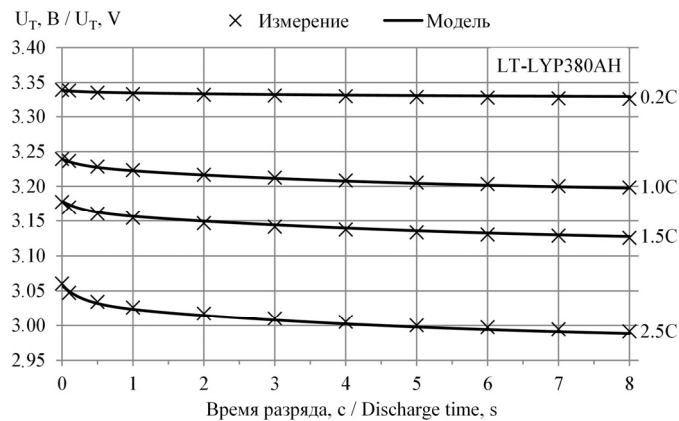


Рис. 5 – Совмещенная временная диаграмма результатов измерения и моделирования

Fig. 5 – Combined time diagram of measurement and simulation

Как можно увидеть, результаты моделирования с минимальной погрешностью соответствуют результатам реального эксперимента, что подтверждает правильность проведенных расчетов. Недостатком же данной реализации является отсутствие универсальности модели, поскольку для каждой силы тока необходимо предварительно устанавливать конкретные значения R_{PC} и C_{PC} .

2.1. Модель с обратной связью по току

Для получения модели, не требующей предустановки параметров R_{PC} и C_{PC} , зависимости данных параметров от силы тока разряда (см. рис. 3) были усреднены полиномами второй степени. В результате получены следующие выражения:

$$R_{PC}(I_{\text{разр}}) = A_R I_{\text{разр}}^2 + B_R I_{\text{разр}} + C_R;$$

$$C_{PC}(I_{\text{разр}}) = A_C I_{\text{разр}}^2 + B_C I_{\text{разр}} + C_C,$$

где $A_R = -49,5 \cdot 10^{-12}$, $B_R = -7,17 \cdot 10^{-9}$, $C_R = 110 \cdot 10^{-6}$, $A_C = 24,7 \cdot 10^{-3}$, $B_C = 25,8$, $C_C = 40,6 \cdot 10^3$.

Данные выражения дают погрешность не более 10 % относительно рассчитанных ранее значений, что говорит о достаточной точности описания характеристик. На основе значений, полученных в п. 2, и представленных выше соотношений сформирована математическая модель ЛИА, изображение которой представлено на рис. 6. В данной модели аккумулятор представлен в виде регулируемого источника напряжения U_T , система управления которого представляет собой математическое описание работы ЛИА при импульсном разряде.

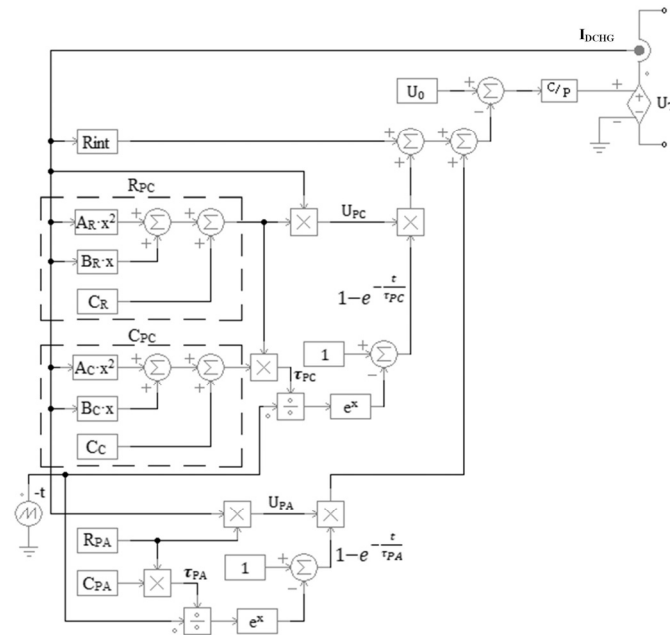


Рис. 6 – Имитационная модель ЛИА с обратной связью по току

Fig. 6 – Accumulator simulation model with current feedback

Временные диаграммы, полученные при помощи данной модели, совмещенные с зависимостями реального ЛИА, представлены на рис. 7. Из диаграммы видно, что усреднение зависимостей R_{PC} и C_{PC} не привело к ухудшению численных показателей, отражающих переходный процесс импульсного разряда ЛИА. Данная модель лишена недостатка, присущего ранее рассмотренной. В данном случае значения R_{PC} и C_{PC} не требуют предустановки, что позволяет производить моделирование режимов работы на всем диапазоне токов разряда.

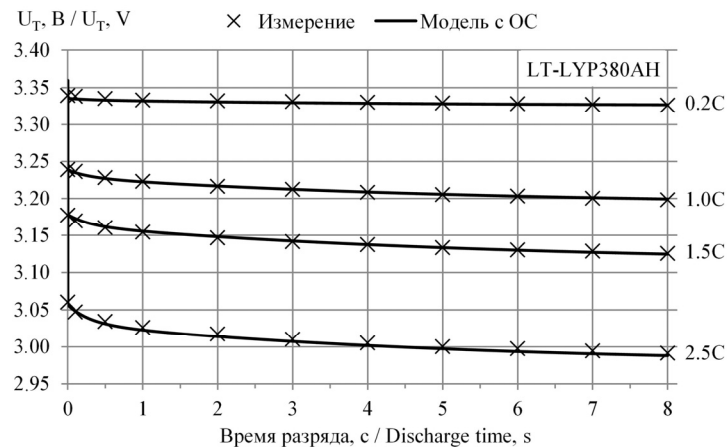


Рис. 7 – Совмещенная временная диаграмма результатов измерения и моделирования с обратной связью по току

Fig. 7 – Combined time diagram of measurement and simulation with current feedback

Заключение

В работе рассмотрены временные диаграммы для литий-ионного аккумулятора с катодным материалом типа LiFePO_4 емкостью 380 А·ч при импульсном разряде токами 0,2С, 1,0С, 1,5С и 2,5С. В результате анализа диаграмм было получено:

- изменение напряжения аккумулятора при импульсном разряде может быть описано суммой двух экспонент и постоянной составляющей;
- величина постоянной составляющей зависит от внутреннего сопротивления;
- величина внутреннего сопротивления и параметры звена активационной поляризации, а также постоянная времени звена концентрационной поляризации не зависят от силы разрядного тока;
- величина сопротивления и емкости звена концентрационной поляризации имеют зависимость от силы разрядного тока в виде полинома второй степени.

На основании полученных параметров построена модель аккумулятора, характеристики которой с минимальной погрешностью соответствуют зависимостям, полученным при разряде реального аккумулятора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Optimal sizing of a lithium battery energy storage system for grid-connected photovoltaic systems / J. Dulout, B. Jammes, C. Alonso, A. Anvari-Moghaddam, A. Luna, J.M. Guerrero // 2017 IEEE Second International Conference on DC Microgrids (ICDCM). – Nürnberg, Germany, 2017. – P. 582–587.
2. Model predictive control for distributed microgrid battery energy storage systems / T. Morstyn, B. Hredzak, R.P. Aguilera, V.G. Agelidis // IEEE Transactions on Control Systems Technology. – 2018. – Vol. 26, iss. 3. – P. 1107–1114.
3. Dybko M.A., Brovanov S.V. Hybrid multilevel modular converter for energy storage applications // 17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2016: Conference Proceedings. – Erlagol, Altai, Russia, 2016. – P. 441–447.
4. ООО «Лиотех». Литий-ионные аккумуляторы [Электронный ресурс]. – Новосибирск, 2018. – URL: <http://liotech.ru/newsection7159> (дата обращения: 06.06.2018).
5. Safwat I.M., Li W., Wu X. A novel methodology for estimating state-of-charge of Li-Ion batteries using advanced parameters estimation // Energies. – 2017. – Vol. 10 (11). – P. 1751.
6. Rahmoun A., Biechl H. Modelling of Li-Ion batteries using equivalent circuit diagrams // Przegląd Elektrotechniczny. – 2012. – Vol. 88. – P. 152–156.
7. 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, N 4. – P. 582–598.

SIMULATION OF THE LITHIUM-ION ACCUMULATOR PULSE DISCHARGE MODE

Kuchak S.V.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

To develop power electronic devices working in energy storage systems, it is necessary to know the properties and behavior of the used storage element. Electro-chemical storages referred to as accumulator batteries are the most spread type of storage devices. Lithium-ion batteries are most promising among them. Time diagrams of LiFePO_4 accumulator voltages which reflect responses to discharge current pulses are presented in the paper. By analyzing the diagrams parameters of the accumulator equivalent scheme are obtained. The accumulator equivalent circuit consists of the series connection of a voltage source, an internal resistance and two resistive-

capacitive units. It is found, that values of the internal resistance and the RC-unit parameters with a lower time constant are practically independent of the discharge current. At same time, a more inertial RC-unit has varying values of resistance and capacitance. Using the obtained results, a pulsed discharge accumulator model is built. The simulation results with a permissible error correspond to the experimental results of an actual accumulator, which confirms the reliability of the calculations.

Keywords: pulse discharge, lithium-iron-phosphate, lithium-ion battery, simulation, discharge characteristics.

DOI: 10.17212/1727-2769-2018-2-62-69

REFERENCES

1. Dulout J., Jammes B., Alonso C., Anvari-Moghaddam A., Luna A., Guerrero J.M. Optimal sizing of a lithium battery energy storage system for grid-connected photovoltaic systems. *2017 IEEE Second International Conference on DC Microgrids (ICDCM)*, Nürnberg, Germany, 2017, pp. 582–587.
2. Morstyn T., Hredzak B., Aguilera R.P., Agelidis V.G. Model predictive control for distributed microgrid battery energy storage systems. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2018, Vol. 26, iss. 3, pp. 1107–1114.
3. Dybko M.A., Brovanov S.V. Hybrid multilevel modular converter for energy storage applications. *17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2016: Conference Proceedings*, Erlagol, Altai, Russia, 2016, pp. 441–447.
4. *ООО "Liotech". Литий-ионные аккумуляторы* [Liotech, Ltd. Lithium-ion batteries]. Novosibirsk, 2018. Available at: <http://liotech.ru/newsection7159> (accessed 06.06.2018).
5. Safwat I.M., Li W., Wu X. A novel methodology for estimating state-of-charge of Li-Ion batteries using advanced parameters estimation. *Energies*, 2017, vol. 10 (11), p. 1751.
6. Rahmoun A., Biechl H. Modelling of Li-Ion batteries using equivalent circuit diagrams. *Przeglad Elektrotechniczny*, 2012, vol. 88, pp. 152–156.
7. 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, no. 4, pp. 582–598.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Кучак Сергей Викторович – родился в 1991 году, аспирант, ассистент, кафедра электроники и электротехники НГТУ. Область научных интересов: системы автономного электроснабжения. Опубликовано более 10 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: kuchak.2012@corp.nstu.ru).

Kuchak Sergey Viktorovich (b. 1991) – postgraduate student, assistant lecturer at the electronics and electrical engineering department, NSTU. His research interests are currently focused on autonomous power supply systems. He has published 10 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: kuchak.2012@corp.nstu.ru).

Статья поступила 22 декабря 2017 г.
Received December 22, 2017

To Reference:

Kuchak S.V. Modelirovanie rezhima impul'snogo razryada litii-ionnogo akkumulyatora [Simulation of the lithium-ion accumulator pulse discharge mode]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2018, no. 2 (39), pp. 62–69. doi: 10.17212/1727-2769-2018-2-62-69.