

МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ ЛИТИЙ-ИОННЫХ БАТАРЕЙ В ЭНЕРГООБЕСПЕЧИВАЮЩИХ КОМПЛЕКСАХ АВТОНОМНЫХ ОБЪЕКТОВ

Д.В. Сердечный, Ю.Б. Томашевский

Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А., г. Саратов, Россия

При расчете и разработке накопителей на базе многоэлементной литий-ионной батареи, а также системы контроля и управления его параметрами необходимо оценить поведение одиночного аккумулятора в процессе разряда, заряда и в экстремальных условиях при критических значениях основных параметров. Разработка полномасштабной и достоверной модели, а также экспериментальное подтверждение выбранной модели является актуальной инженерной задачей. При этом модель должна отличаться простотой реализации и относительно небольшим объемом и приемлемой скоростью вычислительных операций. Для моделирования многоэлементной аккумуляторной батареи из ячеек с известными и схожими характеристиками, а также для проектировки и разработки систем по контролю и управлению многоэлементной батареей эмпирическая модель на основе эквивалентной схемы обладает достаточной простотой реализации, а также достаточной точностью оценки параметров аккумуляторной батареи. Эквивалентная схема была составлена при помощи языка и блоков Simscape в среде MATLAB. Каждый элемент схемы представляет собой набор экспериментально полученных значений основных параметров литий-ионного аккумулятора. Также в работе рассмотрена модель литий-ионного аккумулятора из библиотеки Simulink MATLAB. На основе результатов сравнения экспериментальных и смоделированных данных даны рекомендации в выборе модели при разработке системы контроля и управления литий-ионной аккумуляторной батареей.

Ключевые слова: литий-ионный аккумулятор, накопитель, система контроля и управления, эквивалентная схема, емкость.

Введение

В последнее время в качестве энергообеспечивающих комплексов для различных мобильных и автономных объектов все чаще используются литий-ионные аккумуляторные батареи. Широкое применение они нашли в таких устройствах, как ноутбуки, мобильные телефоны, а также в системах накопления и распределения электроэнергии, в электротранспорте и летательной технике. По сравнению с другими литий-ионная батарея имеет целый ряд преимуществ и выделяется в первую очередь низким саморазрядом и оптимальным соотношением емкость/масса [1]. Однако, несмотря на все преимущества литий-ионной батареи, протекающие внутри аккумулятора процессы недостаточно предсказуемы. Известны случаи аварий на мобильных объектах с использованием литий-ионных аккумуляторов, которые произошли вследствие превышения критических параметров батареи (температура, напряжение, токи) [2]. В основе безопасной эксплуатации литий-ионных батарей лежит непрерывный контроль основных параметров аккумулятора, а также мониторинг истории заряда/разряда и фактической емкости. Определяющую роль при проектировании систем контроля и мониторинга играет моделирование мно-

гоэлементной батареи. Понимание процессов, происходящих в аккумуляторной ячейке, позволит избежать аварийных ситуаций, продлить сроки эксплуатации и повысить производительность накопителя энергии на базе многоэлементной литий-ионной батареи.

Актуальность, постановка задачи

Химические источники тока известны достаточно давно [3]. Но только в последнее время благодаря растущему спросу на энергоносители активизировались исследования различных типов батарей. На рис. 1 приведено показательное сравнение широко используемых типов батарей [4]. По оси абсцисс отложены значения удельной энергии по массе ($\text{Вт}\cdot\text{ч}/\text{кг}$), по оси ординат – значения удельной энергии по объему ($\text{Вт}\cdot\text{ч}/\text{мм}^3$).

Свинцово-кислотная батарея, несмотря на невысокую себестоимость и плотность энергии, не удовлетворяет требованиям современных мобильных электропотребителей. С целью увеличения плотности энергии были разработаны Ni-Cd и Ni-металлогидридные батареи. На сегодняшний день самая высокая плотность энергии у литий-ионных батарей. Литий является самым легким металлом с молярной массой 6,94 г/моль с элек-

тродным потенциалом $-3,04$ В относительно стандартного водородного электрода. Он имеет плотность только $0,53$ г/см³, что делает его хорошим материалом для создания аккумуляторов высокой плотности энергии.

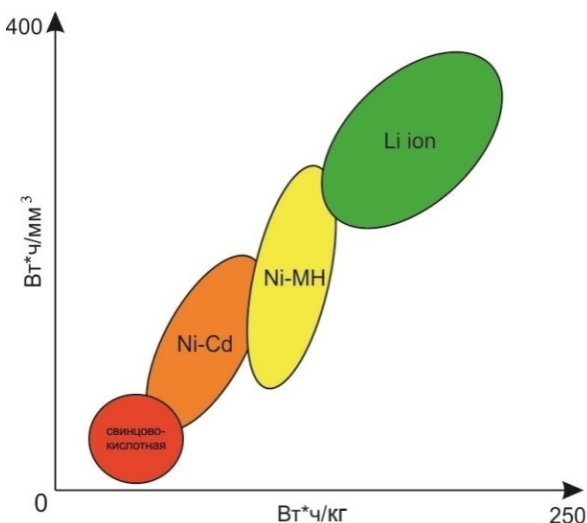


Рис. 1. Сравнение различных типов батарей по их емкостным и массогабаритным соотношениям

Проблемы, связанные с эксплуатацией литий-ионных батарей, могут быть решены организацией непрерывного их мониторинга в процессе заряда и разряда с целью обеспечения безопасности и надежности. Контроль температуры, критических уровней напряжений, токов заряда и разряда позволяет замедлить естественный процесс старения материалов литий-ионной батареи, а также снизить вероятность протекания необратимых процессов в материалах аккумулятора.

Моделирование одиночных и многоэлементных батарей позволяет более детально проанализировать происходящие внутри процессы и их влияние на характеристики аккумулятора, что достаточно трудно оценить экспериментально. Кроме того, компьютерное моделирование делает возможным оценить поведение батареи в экстремальных условиях при критических значениях основных параметров.

На рис. 2 схематически представлено решение инженерной задачи по проектированию энерго-

обеспечивающих комплексов с близкими к оптимальным параметрами на основе литий-ионной аккумуляторной батареи с использованием компьютерного моделирования.

Разработка полномасштабной компьютерной модели является трудоемким и дорогостоящим процессом, который начинается с достаточно простых моделей, которые в дальнейшем корректируются до тех пор, пока не будет обеспечена приемлемая достоверность. Важным этапом является экспериментальная проверка корректности выбранной модели, используемой в дальнейшем как эффективный инструмент проектирования. Таким образом, руководствуясь принципом многоэлементности в системном анализе, утверждающим, что никакая единственная модель не может с достаточной степенью адекватности описывать различные аспекты сложной системы, разработка точных и эффективных способов моделирования аккумуляторных батарей является актуальной задачей при проектировании энергообеспечивающих комплексов на их основе.

Теоретическая часть

В научной литературе достаточно широко представлены различные методы моделирования батарей, основанные на представлении внутренних физических процессов [5–7].

Модели можно условно разделить на четыре категории: эмпирические, электрохимические, мультифизические и молекулярно/атомарные модели. Упрощенные эмпирические модели часто применяются в инженерной практике [8–10]. Эмпирические модели строятся на основе экспериментальных разрядных/зарядных данных и используются для прогнозирования поведения литий-ионных аккумуляторов, при этом не рассматриваются физико-химические процессы в отдельных ячейках. При достаточной простоте вычислений данная модель подходит лишь для уже используемых типов батарей. Естественно, что подобные модели бесполезны при проектировании энергообеспечивающих комплексов на базе новых типов аккумуляторов.

Для моделирования многоэлементной аккумуляторной батареи из ячеек с известными и схожими характеристиками, а также для проектиров-

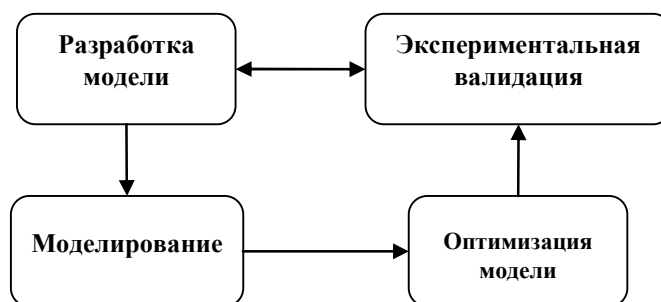


Рис. 2. Этапы разработки модели

Альтернативные источники энергии

ки и разработки систем контроля и управления (СКУ, BMS (battery management systems)) эмпирическая модель на основе эквивалентной схемы представляется приемлемой, поскольку обладает достаточной простотой реализации, а также достаточной точностью оценки состояния заряда аккумуляторной ячейки.

В настоящее время известно множество различных эквивалентных схем, реализованных как на простых реактивных элементах, так и на сложных нелинейных компонентах, описывающих электрохимические процессы внутри отдельных ячеек [11–14].

На рис. 3 показана эквивалентная схема, хорошо зарекомендовавшая себя с точки зрения простоты реализации и точности [14].

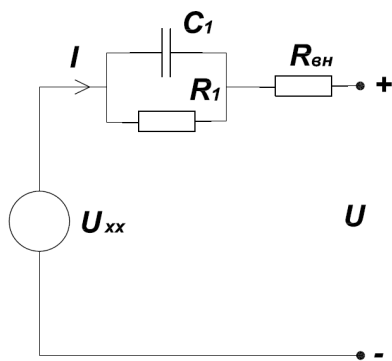


Рис. 3. Эквивалентная схема литий-ионной ячейки

Аккумуляторная ячейка с напряжением U представлена в виде источника напряжения U_{xx}

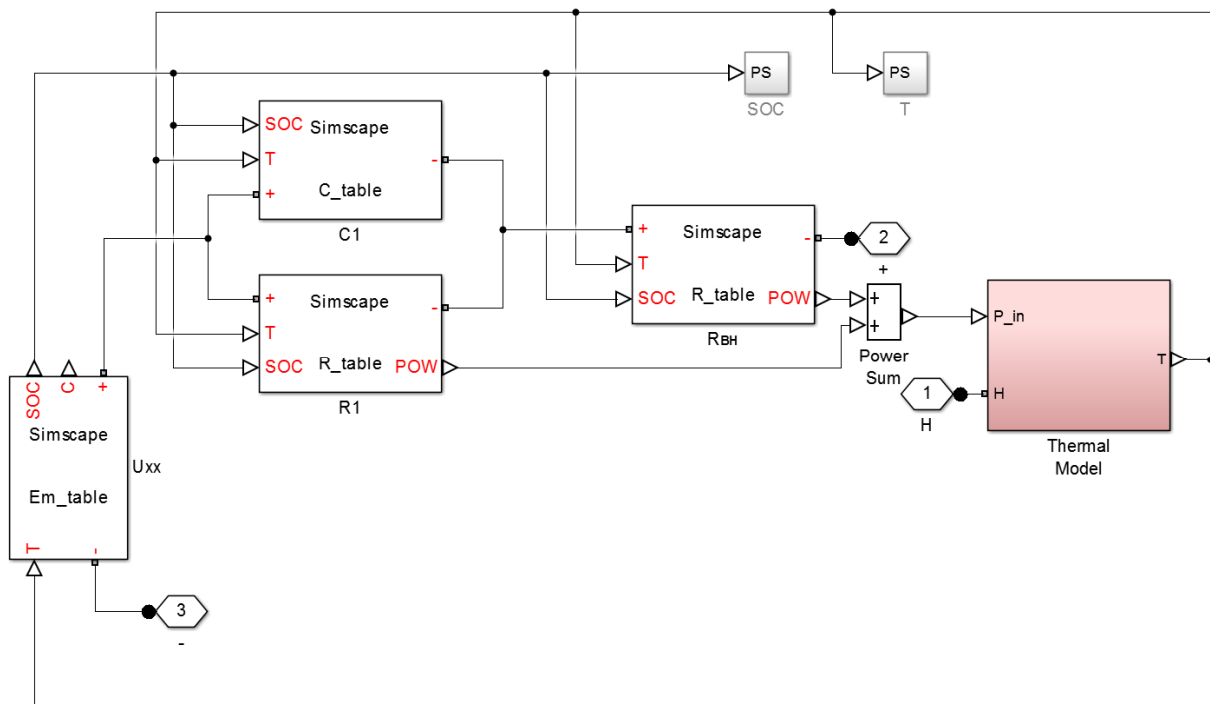


Рис. 4. Эквивалентная схема литий-ионной ячейки

(напряжение холостого хода аккумулятора), внутреннего сопротивления $R_{вн}$ и RC-контура, моделирующего внутренние процессы.

Фактическая емкость аккумуляторной батареи зависит от ряда факторов: средний разрядный ток и продолжительность разряда, внутренняя температура батареи, напряжение в конце разряда, продолжительность хранения (саморазряд), количество циклов заряд-разряд (старение).

При учете процесса разряда и температуры ячейки емкость аккумулятора определяется в виде

$$C_{акк} = C_{акк}(I, T). \quad (1)$$

Предположим, что аккумуляторная ячейка в момент времени $t=0$ полностью заряжена. Тогда извлеченный заряд аккумулятора $Q_{акк}$ определяется как

$$Q_{акк}(t) = \int_0^t I_m(\tau) d\tau. \quad (2)$$

Состояние заряда (SOC) будет выражаться $SOC = 1 - Q_{акк}/C_{акк}$.

Каждый элемент эквивалентной схемы представляет собой функцию, зависящую от состояния уровня заряда и от температуры:

$$R_{вн} = R_{вн}(SOC, T), \quad (4.1)$$

$$R_1 = R_1(SOC, T), \quad (4.2)$$

$$C_1 = C_1(SOC, T), \quad (4.3)$$

$$E_m = E_m(SOC, T). \quad (4.4)$$

Набор данных для каждого из компонентов представляет собой таблицу со значениями, полученными экспериментально при определенных

условиях. На основании этих экспериментальных данных происходит построение модели.

Рассмотренный метод моделирования представляет собой сопоставление экспериментальных данных с результатами моделирования и подразумевает дальнейшую корректировку модели. Эквивалентная схема была составлена при помощи языка и блоков Simscare в среде MATLAB. Каждый элемент схемы представляет собой блок с настраиваемыми параметрами (рис. 4).

Результаты экспериментальных исследований

Для получения экспериментальных данных в качестве аккумуляторных ячеек были использованы батареи INR18650. Характеристики ячеек представлены в табл. 1.

Данные для построения модели определялись экспериментально. Значения фактической емкости и номинального напряжения были внесены как начальные параметры для моделирования. Разряд проводился от максимального $U_{\max} = 4,2$ В до минимального $U_{\min} = 2,5$ В напряжения током 2,5 А при температуре окружающей среды $T = 25$ °С. Экспериментально полученная зависимость на-

пряжения от состояния отданного батареей заряда $Q = 1 - SOC$ представлена на рис. 5 и в табл. 2.

Полученные экспериментальные данные были внесены в таблицы, на основе которых построены модели в Simulink (MATLAB) на основе эквивалентных схем Simscare. На рис. 6 показана зависимость напряжения от времени при разряде током 2,5 А.

Поведение при разряде и заряде модели литий-ионной ячейки из библиотеки Simulink (MATLAB) описывается уравнениями (5) и (6) соответственно [15]:

Уравнение разряда ($i^* > 0$):

$$f_1(it, i^*, i) = E_0 - K \frac{Q}{Q-it} i^* - K \frac{Q}{Q-it} it + A \cdot \exp(-B \cdot it). \quad (5)$$

Модель заряда ($i^* < 0$):

$$f_2(it, i^*, i) = E_0 - K \frac{Q}{it+0,1Q} i^* - K \frac{Q}{Q-it} it + A \cdot \exp(-B \cdot it), \quad (6)$$

где E_0 – постоянное напряжение, В;
 K – постоянная поляризации, (Ач)⁻¹;
 i^* – низкочастотная динамика тока, А;

Таблица 1
Характеристики аккумуляторных ячеек INR18650

Параметр	Значение
Диаметр, мм	18,4
Длина, мм	64,9
Напряжение номинальное, В	3,6
Напряжение минимальное, В	2,5
Напряжение максимальное, В	4,2
Емкость, мАч	2500
Ток заряда ном/макс, А	1,25/4
Ток разряда ном/макс, А	2,5/20 (< 1с 100А)

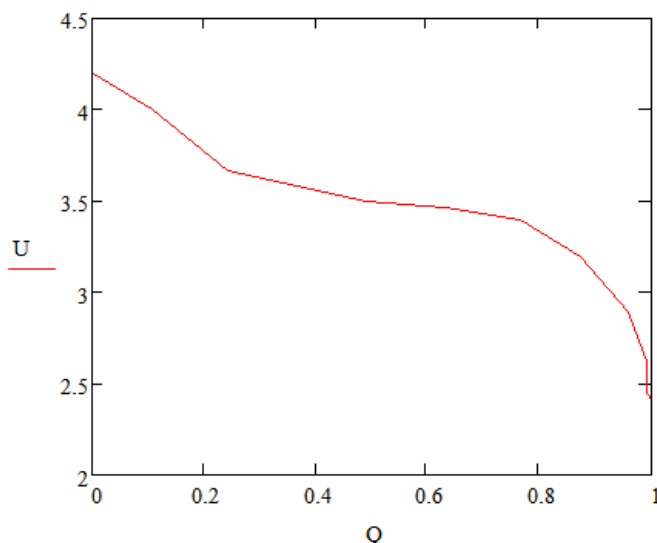


Рис. 5. Экспериментально полученная зависимость напряжения от уровня заряда аккумуляторной ячейки, где U – напряжение аккумулятора (В), $Q = 1 - SOC$ – отданный заряд

Таблица 2
Характеристики аккумуляторных ячеек INR18650

$Q = 1 - SOC$	U , В
0	4,2
0,1	4
0,2	3,67
0,5	3,56
0,6	3,47
0,7	3,39
0,8	3,1
0,95	2,9
0,98	2,63
0,99	2,6
1	2,5

Альтернативные источники энергии

i – ток через батарею, it – извлеченный заряд, Ач;
 Q – емкость батареи, Ач;
 A – экспоненциальное напряжение, В;
 B – экспоненциальная емкость, (Ач)⁻¹.

Для модели были установлены следующие параметры батареи: $U_{\text{ном}} = 3,8$ В ($E_0 = 3,66$ В), $Q = 2,5$ Ач, $SOC = 1$. Разрядная характеристика модели при токе 2,5 А и от напряжения 4,2 В до 2,8 В представлена на рис. 7.

Для получения экспериментальной разрядной кривой производился разряд одиночной аккумуляторной ячейки INR18650 с характеристиками, перечисленными в табл. 1, током 2,5 А при температуре $T = 25$ °С от напряжения 4,2 до 2,8 В. Измерения напряжения и тока производились мультиметром APPA 97 и токоизмерительными клещами Agilent U1213A. Экспериментально полученная разрядная характеристика представлена на рис. 8.

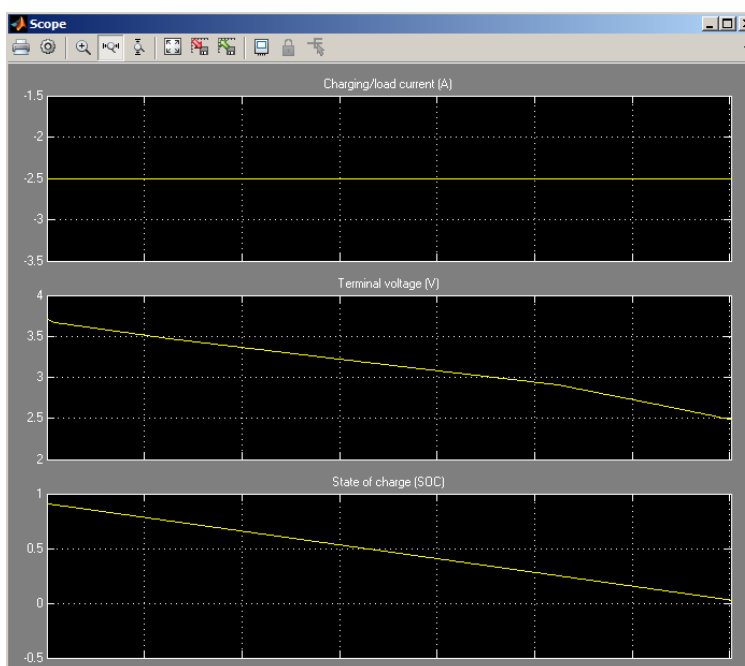


Рис. 6. Результат моделирования процесса разряда аккумулятора током $I = 2,5$ А при помощи эквивалентной схемы Simscape (MATLAB)

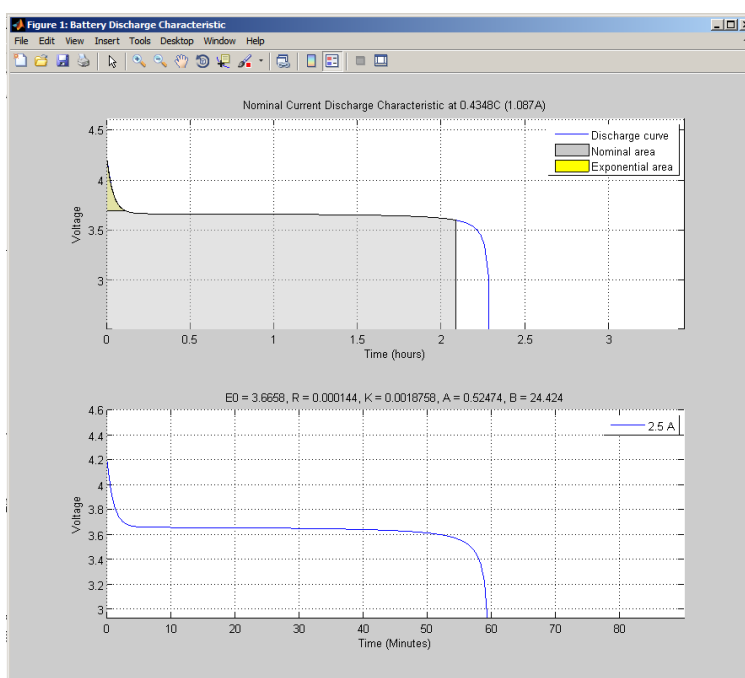


Рис. 7. Результат моделирования разряда аккумулятора током $I = 2,5$ А при помощи модели литий-ионного аккумулятора библиотеки Simulink (MATLAB)

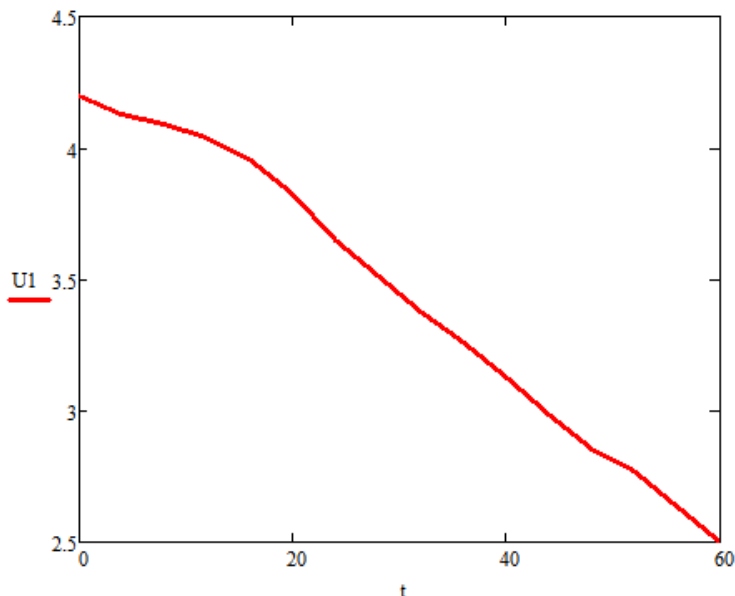


Рис. 8. Экспериментально полученная зависимость напряжения $U1$ (В) аккумулятора от времени t (мин) при разряде током $I = 2,5$ А

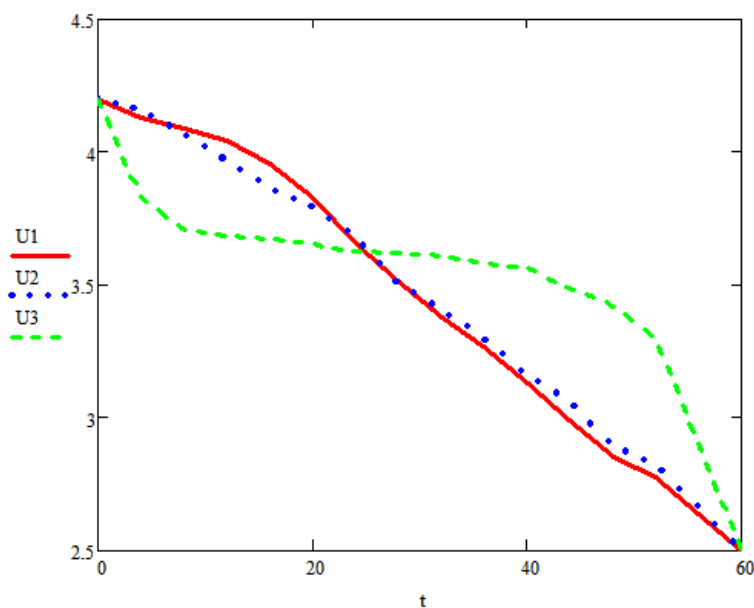


Рис. 9. Экспериментально полученная зависимость напряжения $U1$ (В) аккумулятора от времени t (мин) при разряде током $I = 2,5$ А

Заключение

На рис. 9 представлено сравнение полученных экспериментально зависимостей напряжения от времени при разряде током 2,5 А (разрядная кривая $U1$), а также на основе эквивалентной модели в Simscape MATLAB ($U2$) и модели литий-ионной батареи из библиотеки Simulink MATLAB ($U3$).

Зависимость $U3$ имеет значительные расхождения с кривыми $U1$ и $U2$. Разрядная кривая для модели батареи из библиотеки Simulink соответствует разрядным кривым батареям с графитовым катодом [16]. Так как экспериментальная кривая была получена при разряде батареи другого типа,

то этим обусловлено значительное расхождение данных модели из библиотеки Simulink и экспериментальной кривой. Следует отметить, что в уравнениях (5) и (6) не учитывается влияние температуры окружающей среды на эксплуатацию аккумулятора. Для приведения модели в соответствие экспериментальным данным необходимо провести корректировку коэффициентов K , A и B .

Для устранения несоответствия разрядных кривых $U1$ и $U2$ необходима корректировка/оптимизация модели, которая должна осуществляться путем увеличения объема экспериментальных данных, отражающих зависимости напряжения от

времени при разных токах разряда и различных температурах окружающей среды.

Для проектировки многоэлементной батареи, состоящих из ячеек типа INR18650, модель из библиотеки Simulink (MATLAB) является неприемлемой без внесения изменений в уравнения состояния аккумулятора из-за значительного расхождения с экспериментальными данными.

Зависимость напряжения от времени при разряде, полученная при помощи модели на основе эквивалентной схемы Simscare (MATLAB), обладает приемлемой корреляцией с экспериментальными данными. При этом модель учитывает влияние температуры на разрядные и зарядные процессы батареи.

Разрабатывая систему контроля и управления многоэлементными литий-ионными батареями, следует учитывать такие параметры, как $C_{\text{акк}}$, U_{max} , U_{min} , I_{max} , I_{min} . При проектировании энергообеспечивающих комплексов на их основе СКУ должна обеспечивать безопасную эксплуатацию батареи, не допуская превышения значения перечисленных параметров их критических значений. При этом характер разрядных/зарядных процессов на работу СКУ влияния не оказывает, так как система руководствуется лишь граничными состояниями этих процессов (I_{min} , $U_{\text{min}}/I_{\text{max}}$, U_{max}).

Таким образом, при проектировании энергообеспечивающих комплексов для описания поведения как отдельных ячеек, так и всей аккумуляторной батареи рассмотренные в работе модели являются приемлемыми. Выбор стоит производить, руководствуясь необходимой точностью и быстротой вычислений.

Выводы

1. Рассмотрены современные способы моделирования литий-ионных аккумуляторных батарей с целью дальнейшего использования при проектировании энергообеспечивающих комплексов на их основе. Из соображений простоты реализации, точности и быстроты вычислений предпочтение было отдано эмпирическим методам моделирования.

2. На базе сравнения полученных результатов экспериментальных исследований и данных моделирования даны рекомендации по выбору модели литий-ионной аккумуляторной батареи, используемой в дальнейшем при разработке системы контроля и управления.

Литература

1. Википедия – свободная энциклопедия. *Comparison of Battery Types* / Википедия. – https://en.wikipedia.org/wiki/Comparison_of_battery_types (дата обращения: 18.02.2017).

2. *Thermal Runaway Caused Fire and Explosion of Lithium Ion Battery* / Q. Wang, P. Ping, X. Zhao et al. // *Journal of The Electrochemical Society*. – 2011. – No. 3. – P. 1–25.

3. Piccolino, M. *The Bicentennial of the Voltaic Battery (1800–2000): the Artificial Electric Organ* / M. Piccolino // *Trends Neurosci.* – 2000. – No. 23. – P. 147–151. DOI: 10.1016/S0166-2236(99)01544-1

4. Tarascon, J. *Issues and Challenges Facing Rechargeable Lithium Batteries* / J. Tarascon, M. Armand // *Nature*. – 2001. – No. 414. – P. 359–367. DOI: 10.1038/35104644

5. Long, C. *White Reduction of Model Order Based on Proper Orthogonal Decomposition for Lithium-Ion Battery Simulations* / C. Long, E. Ralph // *The Electrochemical Society*. – 2009. – Vol. 156, no. 3. – P. 154–161. DOI: 10.1149/1.3049347

6. *Mathematical Model Reformulation for Lithium-Ion Battery Simulations: Galvanostatic Boundary Conditions* / V. Subramanian, V. Boovaragavan, V. Ramadesigan, M. Arabandi // *The Electrochemical Society*. – 2009. – Vol. 156, no. 4. – P. 260–271. DOI: 10.1149/1.3065083

7. *Modeling and Simulation of Lithium-Ion Batteries from a Systems Engineering Perspective* / V. Ramadesigan, P. Northrop, D. Sumitava et al. // *The Electrochemical Society*. – 2012. – Vol. 159, no. 3. – P. 31–45. DOI: 10.1149/2.086205jes

8. Rahimian, S. *Comparison of Single Particle and Equivalent Circuit Analog Models for a Lithium Ion Cell* / S. Rahimian, S. Rayman, R. White // *Journal of Power Sources*. – 2011. – Vol. 196, no. 20. – P. 8450–8462. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2011.06.007

9. *Battery Management System: An Overview of its Application in the Smart Grid and Electric Vehicles* / H. Rahimi, U. Ojha, F. Baronti, M. Chow // *Industrial Electronics Magazine*. – 2013. – Vol. 7, no. 2. – P. 4–16. DOI: 10.1109/MIE.2013.2250351

10. Melentjev, S. *Overview of Simplified Mathematical Models of Batteries. Topical Problems of Education in the Field of Electrical and Power Engineering* / S. Melentjev, D. Lebedev // *Doctoral school of energy and geotechnology, Parnu*. – 2013. – No. 7. – P. 231–235.

11. Hu, X. *A Comparative Study of Equivalent Circuit Models for Li-ion Batteries* / X. Hu, S. Li, H. Peng // *Journal of Power Sources*. – 2012. – No. 198. – P. 359–367. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2011.10.013

12. Hongwen, H. *Evaluation of Lithium-Ion Battery Equivalent Circuit Models for State of Charge Estimation by an Experimental Approach* / H. Hongwen, R. Xiong, J. Fan // *Energies*. – 2011. – No. 4. – P. 582–598. DOI: 10.3390/en4040582

13. Борисевич, А.В. *Моделирование литий-ионных аккумуляторов для систем управления батареями: обзор текущего состояния* / А.В. Борисевич. – <http://technology.snauka.ru/2014/05/3542> (дата обращения: 02.01.2017).

14. *High Fidelity Electrical Model with Thermal Dependence for Characterization and Simulation of High Power Lithium Battery Cells* / T. Huria, M. Ceraolo, J. Gazzarri, R. Jackey // *International Electric Vehicle Conference*. – 2012. – P. 1–8. DOI: 10.1109/IEVC.2012.6183271

15. Tremblay, O. *A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles* / O. Tremblay, L. Dessaint, A. Dekkiche // *Vehicle Power and Propulsion Conference*. – 2007. – P. 284–289. DOI: 10.1109/VPPC.2007.4544139

16. Pistoia, G. *Lithium Ion Batteries: Advances and Applications* / G. Pistoia. – Amsterdam: Elsevier Publ., 2013. – 634 p.

Сердечный Денис Владимирович, аспирант, кафедра «Системотехника», Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А., г. Саратов; serdechnyy.denis@gmail.com.

Томашевский Юрий Болеславович, д-р техн. наук, профессор, кафедра «Системотехника», Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А., г. Саратов; yurytomash@mail.ru.

Поступила в редакцию 2 мая 2017 г.

DOI: 10.14529/power170310

MODELING OF MULTIELEMENT LITHIUM-ION BATTERIES IN POWER STATION COMPLEXES OF AUTONOMOUS OBJECTS

D.V. Serdechnyy, serdechnyy.denis@gmail.com,

Yu.B. Tomashevskiy, yurytomash@mail.ru

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russian Federation

To develop multi-element lithium-ion batteries, one needs to understand a single battery. The development of reliable and accurate models of lithium-ion battery is the actual engineering problem. This model should be easy to use and calculating. The empirical model based on the equivalent circuit is easy for the implementation and sufficient precision evaluation of the battery parameters for the modeling of battery cells with known characteristics and for the BMS design (battery management systems). The equivalent circuit has been drawn up with the help of the language and Simscape blocks in MATLAB. Each circuit element is a set of experimentally obtained values of the basic parameters of the lithium-ion battery. Also, the paper considers the model of a lithium-ion battery from Simulink MATLAB libraries. On the basis of comparison of experimental and simulated data recommendations for choosing a model at the development of lithium-ion battery monitoring and control system are provided.

Keywords: lithium-ion batteries, energy storage, battery management system, equivalent circuit model, capacity.

References

1. Wikipedia the free encyclopedia. Comparison of Battery Types. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Comparison_of_battery_types (accessed 18.02.2017).

2. Wang Q., Ping P., Zhao X., Guanquan C., Sun J., Chen C. Thermal Runaway Caused Fire and Explosion of Lithium Ion Battery. *Journal of The Electrochemical Society*, 2011, no. 3, pp. 1–25.

3. Piccolino M. The Bicentennial of the Voltaic Battery (1800–2000): the Artificial Electric Organ. *Trends Neurosci*, 2000, no. 23, pp. 147–151. DOI: 10.1016/S0166-2236(99)01544-1

4. Tarascon J., Armand M., Issues and Challenges Facing Rechargeable Lithium Batteries. *Nature*, 2001, no. 414, pp. 359–367. DOI: 10.1038/35104644

5. Long C., Ralph E. White Reduction of Model Order Based on Proper Orthogonal Decomposition for Lithium-Ion Battery Simulations. *The Electrochemical Society*, 2009, vol. 156, no. 3, pp. 154–161. DOI: 10.1149/1.3049347

6. Subramanian V., Boovaragavan V., Ramadesigan V., Arabandi M. Mathematical Model Reformulation for Lithium-Ion Battery Simulations: Galvanostatic Boundary Conditions. *The Electrochemical Society*, 2009, vol. 156, no. 4, pp. 260–271. DOI: 10.1149/1.3065083

7. Ramadesigan V., Northrop P., Sumitava D., Santhanagopalan S., Braatz R., Subramaniana R. Modeling and Simulation of Lithium-Ion Batteries from a Systems Engineering Perspective. *The Electrochemical Society*, 2012, vol. 159, no. 3, pp. 31–45. DOI: 10.1149/2.086205jes

8. Rahimian S., Rayman S., White R. Comparison of Single Particle and Equivalent Circuit Analog Models for a Lithium Ion Cell. *Journal of Power Sources*, 2011. vol. 196, no. 20, pp. 8450–8462. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2011.06.007

9. Rahimi H., Ojha U., Baronti F., Chow M. Battery Management System: An Overview of its Application in the Smart Grid and Electric Vehicles. *Industrial Electronics Magazine*, 2013, vol. 7, no. 2, pp. 4–16. DOI: 10.1109/MIE.2013.2250351

10. Melentjev S., Lebedev D. Overview of Simplified Mathematical Models of Batteries. Topical Problems of Education in the Field of Electrical and Power Engineering. *Doctoral school of energy and geotechnology, Parnu*. 2013, no. 7, pp. 231–235.

11. Hu X., Li S., Peng H. A Comparative Study of Equivalent Circuit Models for Li-ion Batteries. *Journal of Power Sources*, 2012, no. 198, pp. 359–367. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2011.10.013

12. Hongwen 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. DOI: 10.3390/en4040582

13. Borisevich A.V. *Modelirovanie litiy-ionnykh akkumulyatorov dlya sistem upravleniya batareyami: obzor tekushchego sostoyaniya* [Modeling of Li-ion Batteries for Battery Management Systems: Overview of Current State]. Available at: <http://technology.snauka.ru/2014/05/3542> (accessed 02.01.2017).

14. Huria T., Ceraolo M., Gazzarri J., Jackey R. High Fidelity Electrical Model with Thermal Dependence for Characterization and Simulation of High Power Lithium Battery Cells. *International Electric Vehicle Conference*, 2012, pp. 1–8. DOI: 10.1109/IEVC.2012.6183271

15. Tremblay O., Dessaint L., Dekkiche A., A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles. *Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2007, pp. 284–289. DOI: 10.1109/VPPC.2007.4544139

16. Pistoia, G. *Lithium Ion Batteries: Advances and Applications*. Amsterdam, Elsevier Publ., 2013. 634 p.

Received 2 May 2017

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Сердечный, Д.В. Моделирование многоэлементных литий-ионных батарей в энергообеспечивающих комплексах автономных объектов / Д.В. Сердечный, Ю.Б. Томашевский // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2017. – Т. 17, № 3. – С. 86–94. DOI: 10.14529/power170310

FOR CITATION

Serdechnyy D.V., Tomashevskiy Yu.B. Modeling of Multielement Lithium-Ion Batteries in Power Station Complexes of Autonomous Objects. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2017, vol. 17, no. 3, pp. 86–94. (in Russ.) DOI: 10.14529/power170310