

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-27-39>

УДК 621.355.1

Моделирование аккумуляторных батарей и их сборок с учетом деградации параметров

К. В. Доброго¹⁾, Ю. В. Бладыко²⁾

¹⁾Высшая аттестационная комиссия Республики Беларусь (Минск, Республика Беларусь),

²⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. В последние годы системы накопления электрической энергии рассматриваются как ключевой элемент технологического развития транспортных средств, возобновляемой энергетики. В статье дано краткое описание методов, приведены некоторые новые подходы и представлены результаты моделирования аккумуляторов в параллельно-последовательных сборках, которые могут использоваться для проектирования накопительных блоков для локальных энергетических систем. Аккумулятор – сложный физико-химический, электротехнический и электротехнический объект, моделирование которого может проводиться на различных уровнях глубины и разными методами. Рассматриваются варианты симулирования аккумуляторов. Представление аккумулятора в виде схем замещения хорошо согласуется с общим подходом графического представления электротехнических систем в таких пакетах, как MatLab-Simulink, Electronics Workbench и подобных. В моделировании аккумуляторных батарей выделяют два направления: представление текущих параметров в течение цикла заряда-разряда; моделирование параметров функционального состояния за длительное время эксплуатации. Указанные направления рассматривают различные характерные периоды времени (часы и сутки в первом случае и сотни суток – во втором), различаются по учитываемым параметрам и являются относительно независимыми. В MatLab-Simulink последних версий имеется встроенная модель с деградацией параметров аккумулятора, однако она достаточно сложна. В частности, при моделировании работы более чем одного аккумулятора значительно возрастает длительность счета. При расчете сборки из большого числа аккумуляторов, соединенных параллельно-последовательно, время в программе практически останавливается, что говорит о невозможности моделировать большие сборки. Вместе с тем свою работоспособность показала электронная лаборатория Electronics Workbench, имеющая при использовании критерия подобия перспективы к усложнению схем, что позволяет анализировать параллельно-последовательные сборки аккумуляторов.

Ключевые слова: аккумулятор, сборка, модель, схема замещения, заряд, разряд, емкость, старение, деградация

Для цитирования: Доброго, К. В. Моделирование аккумуляторных батарей и их сборок с учетом деградации параметров / К. В. Доброго, Ю. В. Бладыко // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2021. Т. 64, № 1. С. 27–39. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-27-39>

Modeling of Batteries and their Assemblies Taking into Account the Degradation of Parameters

K. V. Dobrego¹⁾, Y. V. Bladyko²⁾

¹⁾The Higher Certification Commission of the Republic of Belarus (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. In recent years, electric energy storage systems are considered as a key element in the technological development of vehicles, renewable energy. This article provides a brief description

Адрес для переписки

Бладыко Юрий Витальевич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел. +375 17 292-71-93
eic@bntu.by

Address for correspondence

Bladyko Yuri V.
Belarusian National Technical University
65/2, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Тел. +375 17 292-71-93
eic@bntu.by

of modeling methods, some new approaches and the results of modeling batteries in parallel-to-serial assemblies that can be used to design storage units for local power systems. A battery is a very complex physicochemical, electrochemical and electrotechnical object, the modeling of which can be carried out at various depth levels and by various methods. Battery modeling options are being considered. Presentation of the battery in the form of equivalent circuits is in good agreement with the general approach of graphical representation of electrical systems in such packages as MatLab-Simulink, Electronics Workbench and the like. Two directions of battery modeling can be distinguished, viz. modeling current battery parameters during a charge-discharge cycle and modeling the parameters of the functional state of the batteries over a long period of operation. These directions consider different characteristic time periods (hours and days in the first case and hundreds of days in the second one), differ in the parameters taken into account and are relatively independent. The latest versions of MatLab-Simulink have a built-in model with degradation of battery parameters. The built-in battery model is quite complex and when simulating the operation of more than one battery, the time period of counting increases significantly. When modeling assemblies from a large number of batteries connected in parallel-to-series, the time in the program practically stops, which indicates the impossibility of modeling large assemblies. Nevertheless, the Electronics Workbench electronics lab has shown its performance. When using the similarity criterion, Electronics Workbench has the potential to complicate the circuits, which makes it possible to analyze parallel-serial battery assemblies.

Keywords: battery, assembly, model, equivalent circuit, charge, discharge, capacity, aging, degradation

For citation: Dobrego K. V., Bladyko Y. V. (2021) Modeling of Batteries and their Assemblies Taking into Account the Degradation of Parameters. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 64 (1), 27–39. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-27-39> (in Russian)

Введение

В последние годы системы накопления электрической энергии рассматриваются как ключевой элемент технологического развития транспортных средств, возобновляемой энергетики, робототехнических и автономных электронных систем. Об этом свидетельствуют стремительный рост рынка аккумуляторных батарей (АКБ), а также большое количество исследований, направленных на повышение эффективности традиционных и создание новых типов АКБ. Соответствующие исследования требуют моделирования жизненного цикла отдельных АКБ и их сборок, т. е. представления эксплуатационных параметров АКБ в типичных режимах в течение времени, ограниченного критическим снижением их эксплуатационных характеристик. Несмотря на то что проблема симулирования работы АКБ не нова и имеется обширная литература на эту тему [1–9], в настоящее время появляются задачи, предъявляющие новые требования к такому моделированию. В частности, это касается оптимизации работы больших сборок АКБ с учетом деградации их параметров в зависимости от типа, конструкции, режима заряда-разряда, условий эксплуатации с целью снижения затрат на их реальные долгосрочные испытания. В статье дано краткое описание методов симулирования, приведены некоторые новые подходы и результаты моделирования АКБ в параллельно-последовательных сборках, которые могут быть использованы для проектирования накопительных блоков для локальных энергетических систем.

Математическое моделирование – фундаментальный метод исследования сложных систем. Можно говорить об аналитическом, численном, имитационном и других видах моделирования. В первом случае процессы и характеристики системы записываются в виде математических выраже-

ний, допускающих получение искоемых данных аналитическими методами. Численное моделирование использует методы вычислительной математики и позволяет получить приближенные решения соответствующих уравнений для частных наборов параметров системы. Получаемые при этом данные не обладают общностью аналитических решений, требуют верификации, могут быть чувствительны к использованному численному методу. Имитационное моделирование – это, как правило, численное моделирование функционирования исследуемой системы, для которого характерна высокая детализация, сохранение логической структуры и временной последовательности процессов. Оно зачастую обеспечивается наглядным интерфейсом, позволяющим конструировать различные варианты системы, наблюдать эффекты в реальном, ускоренном или замедленном темпе, и в определенном смысле аналогично экспериментальному исследованию реального объекта.

АКБ – сложный физико-химический, электрохимический и электротехнический объект, расчет которого может проводиться различными методами и с разным уровнем детализации. В данной работе не рассматриваются физико-химические, электрохимические процессы в АКБ, вопросы прочности или механики, а ставится задача моделирования функциональных параметров. Схема основных функциональных параметров при моделировании АКБ приведена на рис. 1. Однонаправленными стрелками обозначены параметры, не зависящие от текущего состояния АКБ. Двухнаправленные стрелки указывают на параметры, которые характеризуют состояние и работу и сами могут меняться в процессе функционирования.

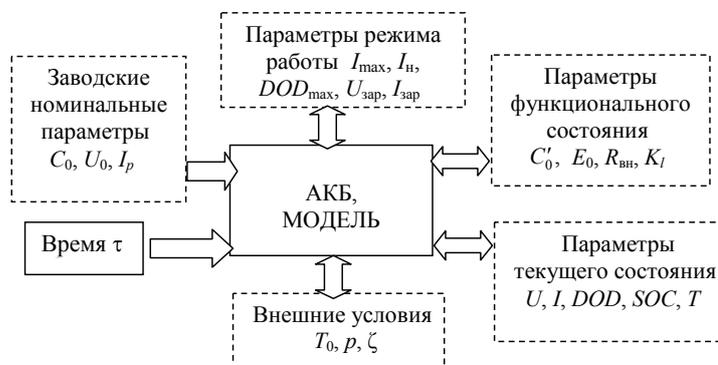


Рис. 1. Параметры моделирования АКБ: C_0, U_0 – номинальные емкость и напряжение; I_p – пиковый ток; I_{\max}, I_n – максимально допустимый и нормальный ток разряда; DOD_{\max} – допустимая глубина разрядки; $U_{\text{зар}}, I_{\text{зар}}$ – рекомендуемые напряжение и ток зарядки; $R_{\text{вн}}, K_l$ – внутреннее активное и поляризационное сопротивление; C'_0 – электрическая емкость; E_0 – напряжение разомкнутой цепи; SOC – степень заряженности; T_0, p, ζ – температура, давление, влажность окружающей среды

Fig. 1. Battery modeling parameters: C_0, U_0 – nominal capacity and voltage; I_p – peak current; I_{\max}, I_n – maximal and normal operational current; DOD_{\max} – permissible depth of discharge; $U_{\text{зар}}, I_{\text{зар}}$ – recommended charging voltage and current; $R_{\text{вн}}, K_l$ – active and polarization resistance; C'_0 – electrical capacity; E_0 – open circuit voltage; SOC – state of charge; T_0, p, ζ – ambient temperature, pressure and humidity

В [4] перечислены основные подходы к моделированию химических батарей. Среди них: решение одномерной электрохимической задачи с ис-

пользованием параметров материалов (пористость электродов, плотность электролита и др.); подбор коэффициентов в модельных уравнениях работы АКБ (например, эмпирическом уравнении Шеферда [1]) по разрядным кривым; составление эквивалентной схемы батареи и подбор зависимости параметров всех ее компонентов от параметров состояния АКБ (например, от степени заряженности). Последний подход более нагляден ввиду знакомства исследователей со стандартными электротехническими компонентами и более прост для первичного воплощения, поскольку модели простых электротехнических компонентов встроены в стандартные пакеты симуляции радиотехнических систем и согласуются с общим подходом графического представления электротехнических систем в пакетах MatLab-Simulink [10, 11], Electronics Workbench [12] и подобных.

По масштабу моделируемого интервала времени можно выделить следующие направления: 1) исследование текущих параметров АКБ в течение одного или нескольких циклов заряда-разряда; 2) воспроизведение параметров функционального состояния АКБ за длительное время эксплуатации (по существу учет деградации параметров). Указанные направления различаются по расчетным параметрам и относительно независимы, однако могут быть объединены в единой модели.

Для экономического обоснования эксплуатации АКБ первостепенный интерес представляет долговременное моделирование и менее важны нюансы кратковременного циклирования. Поэтому модели текущего состояния АКБ в процессе разрядки-зарядки при решении таких задач могут быть приближенными.

Простейшими математическими моделями текущего состояния АКБ являются модели Пуэкерта, Шеферда [1, 2]. Первая связывает время разряда при постоянном токе с его величиной

$$\tau_I = \frac{\text{const}}{I^p},$$

где τ_I – время разряда при токе I , с; I – разрядный ток, А; p – показатель Пуэкерта (зависит от типа АКБ и температуры, табл. 1).

Таблица 1

Показатель Пуэкерта для различных типов АКБ [3]

Peukert's index for various types of batteries [3]

Тип АКБ	p	Тип АКБ	p
Pb	1,27–1,34	Ni-Zn-H	1,09
Ni-Cd	1,14	Ag-Zn	1,05
Ni-Mh	1,10	Na-S	1,10

Модель Шеферда [1, 6] связывает электрохимические свойства АКБ с напряжением и током

$$E_I = E_0 - R_{\text{вн}} I - K_I \frac{f}{1-f},$$

где E_I – напряжение АКБ, В; E_0 – напряжение разомкнутой цепи АКБ при полной зарядке, В; $R_{\text{вн}}$ – внутреннее сопротивление АКБ, Ом; I – разряд-

ный ток, A ; K_I – напряжение поляризации, В; $f = \int \frac{Idt}{Q}$ – степень заряженности АКБ, или SOC (отношение накопленного заряда к полной емкости); Q – полная емкость АКБ, А·ч.

В целом для эмпирических моделей характерна простая функциональная связь внутренних параметров АКБ и значений SOC и DOD .

Схемы замещения являются, по существу, графическим представлением математических моделей электрических устройств. В [4–8] рассматриваются простейшие схемы замещения АКБ, не учитывающие конечной емкости, деградации, особенностей перенапряжения при зарядке, а также модели с конденсатором, имитирующие ограничение скорости заряда. Несколько более сложная схема, называемая моделью Тевенина, имитирующая перенапряжение при зарядке, включает резистор саморазряда. Существуют модели замещения, в которых значения элементов цепи зависят от напряжения или тока. В ряде случаев резисторы цепи перенапряжения и внутреннего сопротивления имитируются нелинейными элементами с различными характеристиками для воспроизведения электрических особенностей режимов разряда и заряда АКБ [9].

Анализируя опыт, можно заключить, что для обеспечения наглядности и универсальности моделирование АКБ целесообразно проводить, используя схемы замещения в стандартных пакетах электротехнического моделирования. Исходя из принципов физической адекватности, модель замещения предпочтительнее составлять без использования источника напряжения, а лишь емкостью и компонентами, ограничивающими минимальное и максимальное напряжение на ней, а также цепями, имитирующими перенапряжение при заряде и другие особенности АКБ.

Программные средства для реализации моделей АКБ

Рассмотрим несколько базовых программ для моделирования систем АКБ.

MatLab-Simulink [5–8, 10, 11] – это графическая среда имитационного моделирования, позволяющая при помощи блок-диаграмм в виде направленных графов строить динамические модели, включая дискретные, непрерывные и гибридные, нелинейные и разрывные системы. Дополнительные пакеты расширения Simulink позволяют решать широкий спектр задач от разработки концепции модели до тестирования, проверки, генерации кода и аппаратной реализации. Simulink интегрирован в среду MatLab, что позволяет использовать встроенные математические алгоритмы, мощные средства обработки данных и научную графику.

Electronics Workbench [12, 13] – программа, которая позволяет моделировать аналоговые, цифровые и цифро-аналоговые схемы высокой сложности. Имеющиеся в ней библиотеки включают в себя большой набор электронных компонентов. Есть возможность создания и подключения новых библиотек компонентов.

Встроенная модель MatLab-Simulink с деградацией параметров

В пакете MatLab-Simulink имеется встроенная модель АКБ с деградацией емкости, с помощью которой возможна симуляция работы свинцово-кислотного, литий-ионного, никель-кадмиевого, никель-металлогидридного аккумуляторов. Схема разряда литий-ионной батареи с использованием соответствующей встроенной модели представлена на рис. 2. Параметры АКБ можно задать вручную либо выбрать из списка в соответствующем блоке меню [11].

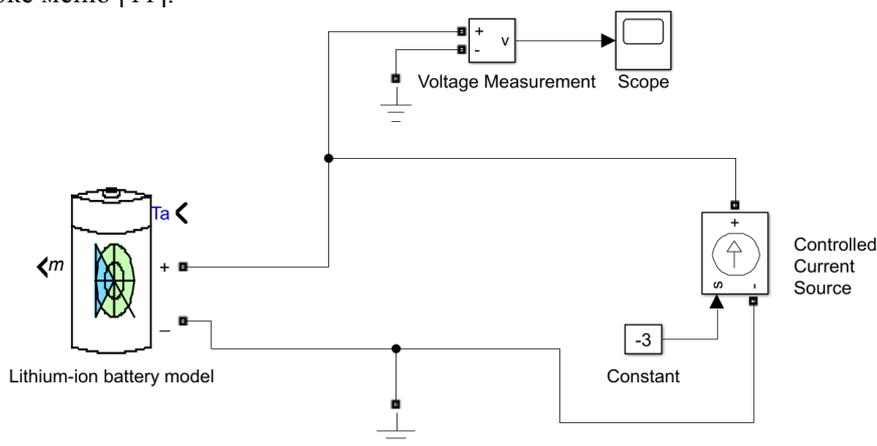


Рис. 2. Схема разряда литий-ионного аккумулятора в MatLab-Simulink
 Fig. 2. Lithium-ion battery discharge circuit in MatLab-Simulink

Модель имеет иерархическую структуру (рис. 3). Блок «Internal Resistance» задает внутреннее сопротивление аккумулятора, блок «Current Measurement» измеряет и передает значение тока в модель аккумулятора, «Controlled Voltage Source» – управляемый источник напряжения.

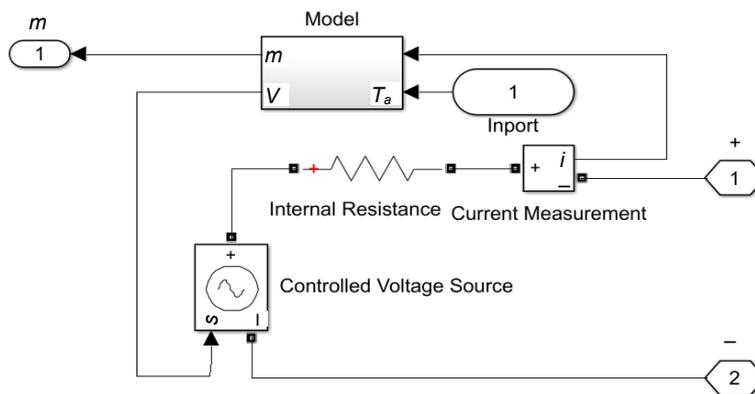


Рис. 3. Иерархическая структура модели литий-ионного аккумулятора:
 1, 2 в шестиугольнике – плюсовой и минусовой терминалы АКБ;
 i, T_a – входные параметры тока и температуры; m, V – выходные параметры

Fig. 3. The hierarchical structure of the Lithium-ion battery model:
 1, 2 in the hexagon – the positive and negative terminals of the battery;
 i, T_a – input parameters current and temperature; m, V – output parameters

На рис. 4 показана эквивалентная схема аккумулятора, моделируемого блоком. Блок батареи реализует общую динамическую модель.

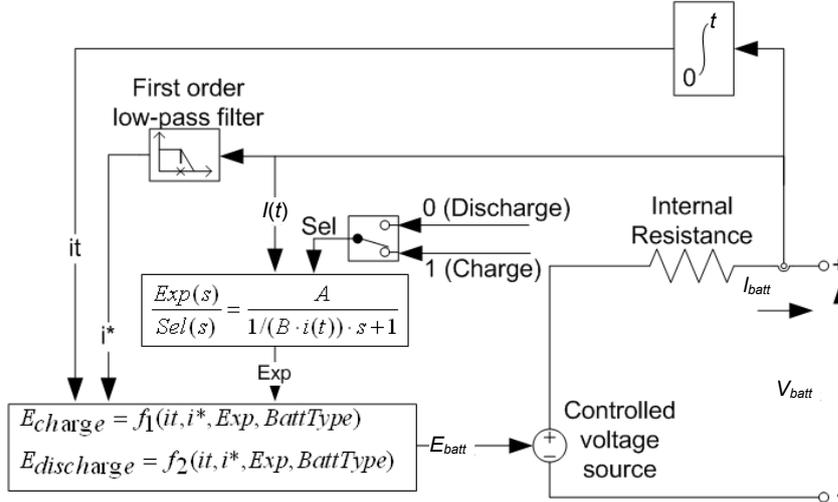


Рис. 4. Эквивалентная схема аккумулятора, моделируемая блоком

Fig. 4. The equivalent battery circuit that the unit models

Встроенная модель использует следующие уравнения, связывающие электрические параметры АКБ:

разряд ($i^* > 0$):

$$u_1(it, i^*, i) = E_0 - Ri - K \frac{Q}{Q - it} i^* - K' \frac{Q}{Q - it} it + A \cdot \exp(-B \cdot it); \quad (1)$$

заряд ($i^* < 0$):

$$u_2(it, i^*, i) = E_0 - Ri - K \frac{Q}{it - 0,1 \cdot Q} i^* - K' \frac{Q}{Q - it} it + A \cdot \exp(-B \cdot it), \quad (2)$$

где E_0 – постоянное напряжение, В; K – поляризационное сопротивление, Ом; K' – постоянная поляризации, В/(А·ч); i^* – ток после фильтра, А; i – ток батареи, А; $it = \int_0^t idt$ – заряд батареи, А·ч; Q – емкость батареи, А·ч; A – амплитуда напряжения, В; B – обратная постоянной времени, (А·ч)⁻¹.

Для литий-ионного аккумулятора эффекты деградации емкости и внутреннего сопротивления представлены следующей моделью [9]:

$$Q(n) = \begin{cases} Q_{BOL} - \varepsilon(n)(Q_{BOL} - Q_{EOL}), & \text{if } k/2 \neq 0; \\ Q(n-1) & \text{otherwise;} \end{cases} \quad (3)$$

$$R(n) = \begin{cases} R_{BOL} - \varepsilon(n)(R_{EOL} - R_{BOL}), & \text{if } k/2 \neq 0; \\ R(n-1) & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (4)$$

где $n = kT_h$ ($k = 1, 2, 3, \dots, \infty$) – параметр времени эксплуатации АКБ; T_h – продолжительность полупериода заряда-разряда, с; Q_{BOL} – максимальная емкость батареи в начале срока службы при номинальной температуре окружающей среды, А·ч; Q_{EOL} – то же в конце срока службы при номинальной температуре окружающей среды, А·ч; R_{BOL} – внутреннее сопротивление батареи в начале срока службы при номинальной температуре окружающей среды, Ом; R_{EOL} – то же в конце срока службы при номинальной температуре окружающей среды, Ом; $\varepsilon(n)$ – фактор старения батареи.

Коэффициент старения равен нулю в начале срока службы и единице в конце, выражается как

$$\varepsilon(n) = \begin{cases} \varepsilon(n-1) + \frac{0,5}{N(n-1)} \left(2 - \frac{DOD(n-2) + DOD(n)}{DOD(n-1)} \right), & \text{if } k/2 \neq 0; \\ \varepsilon(n-1) & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (5)$$

где $DOD(n)$ – глубина разряда батареи по истечении времени полупериода, %; $N(n)$ – максимальное число циклов, рассчитываемое по формуле

$$N(n) = H \left(\frac{DOD(n)}{100} \right)^{-\xi} \exp \left(-\psi \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_a(n)} \right) \right) \left(I_{dis_ave}(n) \right)^{-\gamma_1} \left(I_{ch_ave}(n) \right)^{-\gamma_2}, \quad (6)$$

H – константа; ξ – коэффициент; ψ – постоянная скорости для номера цикла; $I_{dis_ave}(n)$ – средний ток разряда в течение половины цикла, А; $I_{ch_ave}(n)$ – средний ток заряда в течение половины цикла, А; T_{ref} , $T_a(n)$ – номинальная и текущая температуры окружающей среды соответственно, К; γ_1 , γ_2 – показатель степени для тока разряда и заряда соответственно.

Основным параметром деградации является срок службы аккумулятора (количество циклов заряда-разряда, Initial battery age (Equivalent full cycles)). Остальные параметры задаются автоматически в зависимости от типа и параметров аккумулятора, их также можно редактировать.

Эффект деградации свойств АКБ наглядно демонстрируется рис. 5. Как видно из рис. 5а, при подключении к новому аккумулятору нагрузки 3 А в начальный момент времени напряжение снизилось с 4,05 до 3,95 В, затем в процессе разряда (300 с) – до 3,81 В. На использованном аккумуляторе (2000 циклов заряда-разряда, рис. 5б) при подключении той же нагрузки напряжение в начальный момент времени снизилось до 3,77 В, затем в процессе разряда – до 3,61 В.

Недостатком описанной модели является ее относительная сложность, что приводит к увеличению длительности счета и затрудняет исследование сборок АКБ.

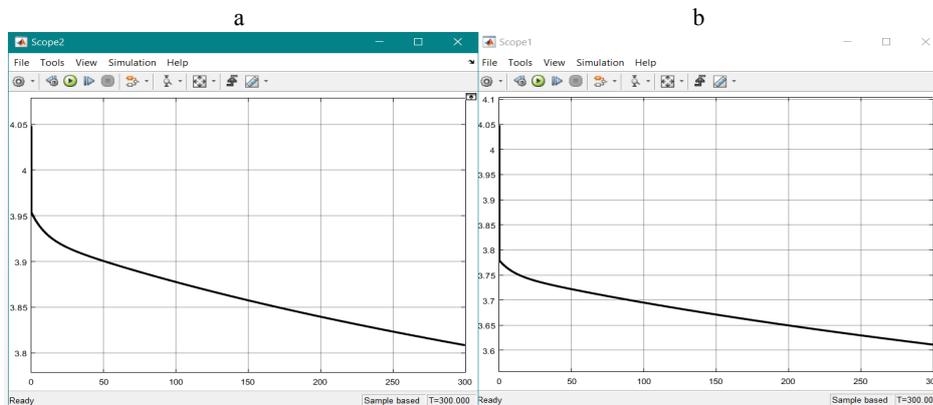


Рис. 5. Разрядная характеристика аккумулятора 3,6 В, 4,5 А·ч током 3 А:
 а – новый аккумулятор; б – аккумулятор после 2000 циклов заряда-разряда
 Fig. 5. The discharge characteristic of the battery is 3,6 V, 4,5 A·h by a current of 3 A:
 а – new battery; б – battery after 2000 charge-discharge cycles

Модель АКБ в электронной лаборатории Electronics Workbench

Для преодоления указанного выше недостатка построена модель ячейки АКБ в Electronics Workbench [12], имитирующей реальное рабочее место исследователя – электронную лабораторию. Программная среда предоставляет виртуальные инструменты: рабочий стол; библиотеку компонентов – аналоговых и цифровых устройств; контрольно-измерительные приборы; набор команд, обеспечивающих выполнение расчетов и выдачу на экран дисплея результатов моделирования в виде таблиц и графиков.

На рис. 6 представлена модель аккумулятора в Electronics Workbench.

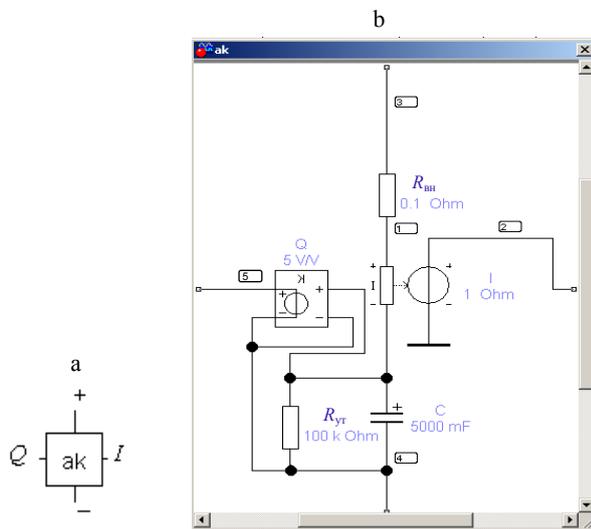


Рис. 6. Модель АКБ: а – аккумулятор в виде подцепи ak; б – подцепь ak: 1 – внутреннее сопротивление; 2 – индикатор тока на основе генератора напряжения, управляемого током; 3 – плюсовая клемма; 4 – минусовая клемма; 5 – индикатор заряда на основе Voltage Gain Block

Fig. 6. Battery model: а – a battery is in the form of subcircuit ak; б – subcircuit ak:
 1 – internal resistance; 2 – current indicator on the basis of the generator voltage controlled current; 3 – positive terminal; 4 – negative terminal; 5 – charge indicator based on Voltage Gain Block

Модель аккумулятора в Electronics Workbench выполнена в виде подцепи ak. Ее основными элементами являются конденсатор C , сопротивление утечки $R_{ут}$, внутреннее сопротивление АКБ $R_{вн}$. Для контроля тока АКБ в модель включен преобразователь тока в напряжение Current-Controlled Voltage Source $I*1\text{ Ohm}$. Для регистрации изменения заряда АКБ используется Voltage Gain Block с коэффициентом усиления напряжения, равным емкости конденсатора $K = C$.

Моделирование параллельно-последовательной сборки

Апробирование модели АКБ выполнено на простой параллельно-последовательной сборке (рис. 7), состоящей из четырех АКБ. Параметры батарей, входящих в сборку, могут отличаться от образцовых вследствие деградации, старения изоляции, разного времени эксплуатации и других причин. Одной из важных задач является исследование параметров работы сборки в условиях, когда параметры отдельных входящих в нее АКБ отклоняются от номинальных значений.

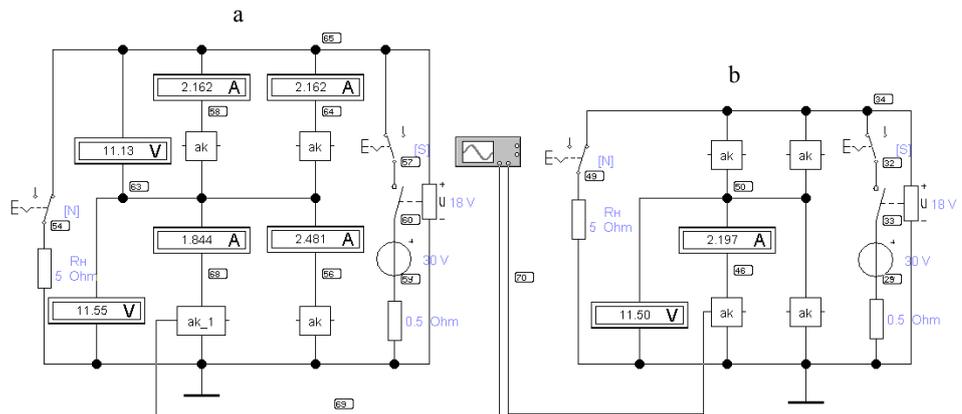


Рис. 7. Параллельно-последовательная сборка четырех АКБ: а – исследуемая сборка; б – эталонная сборка

Fig. 7. Parallel-to-serial assembly of four batteries: a – assembly under study; b – reference assembly

В сборке на рис. 7 параметры одной АКБ (подцепь ak_1) отличаются от параметров остальных (подцепь ak). Для оценки работы сборки с дефектной АКБ параллельно с ней рассматривается работа аналогичной эталонной сборки с идентичными АКБ (рис. 7b). В схему добавлены нагрузка, устройства измерения, источник питания для зарядки АКБ и ключ переключения режима заряда-разряда Voltage-Controlled Switch с заданными порогами включения-выключения источника заряда. Цифры в блоках на рис. 7 показывают значения контрольно-измерительных устройств сразу после запуска схемы в режиме разряда АКБ.

На рис. 8 показаны временные диаграммы изменения напряжения АКБ. При задании реальных параметров АКБ (рис. 8a) расчет занимает очень много времени, поэтому использовалось ускоренное моделирование с уменьшенной

емкостью батарей и соблюдением правил подобия. Так, при уменьшении емкости в 3600 раз на столько же сокращается время расчета (рис. 8b). На виде временных диаграмм это не сказывается, изменяется только масштаб оси абсцисс: секундам при ускоренном моделировании соответствуют часы в реальной диаграмме.

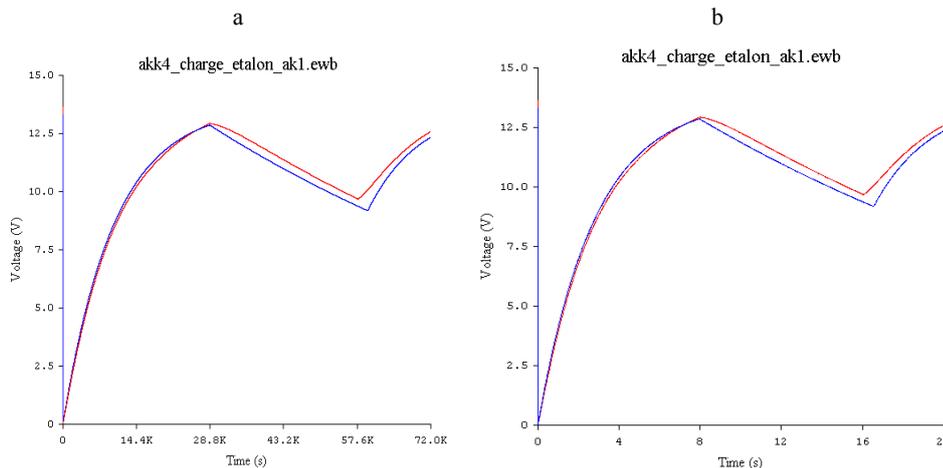


Рис. 8. Результаты моделирования работы параллельно-последовательной сборки АКБ: а – с реальными параметрами; б – с параметрами по критерию подобия

Fig. 8. The results of modeling the work of parallel-to-serial battery assembly: а – with real parameters; б – with parameters according to the similarity criterion

Расчет на разработанной модели показал, что уменьшение емкости дефектной АКБ на 10 % приводит к сокращению времени разряда исследуемой сборки на 2,9 % по сравнению со временем разряда эталонной сборки. При одновременной деградации сопротивления дефектной АКБ (внутреннее сопротивление выросло на 50 %) время разряда исследуемой сборки уменьшается на 3,7 % по сравнению со временем разряда эталонной сборки. Наличие дефектной АКБ в сборке приводит к перераспределению токов и напряжений. Возрастает напряжение на дефектной АКБ и на АКБ, включенной с ней параллельно, на остальных АКБ напряжение понижается. При снижении емкости дефектной АКБ на 10 % напряжение изменяется на 5 %. Большая токовая нагрузка ложится на АКБ, включенную параллельно дефектной.

ВЫВОДЫ

1. Рассмотрены основные методы и направления моделирования жизненного цикла АКБ. Показано, что наглядным и универсальным методом имитационного моделирования отдельных АКБ и их сборок является электротехническое моделирование соответствующих схем замещения в современных программных средах MatLab-Simulink и Electronics Workbench. В первой из них с 2017 г. имеется встроенная модель деградации пара-

метров АКБ. Поскольку она достаточно сложна, исследование работы более чем одного аккумулятора занимает значительное время, а моделирование больших сборок практически невозможно. При этом имеется возможность упростить существующую модель и ускорить вычисления.

2. Электронная лаборатория Electronics Workbench показала свою эффективность при моделировании сборок АКБ. В частности, масштабирование процесса по времени с использованием правил подобия позволяет имитировать как краткосрочную работу сборок, так и долговременное циклирование и деградацию параметров отдельных АКБ и сборки в целом.

3. С помощью разработанной модели выполнен расчет параллельно-последовательной сборки из четырех АКБ. Исследовано влияние дефицита электрической емкости одной АКБ в сборке на работу сборки в целом. Показано, что уменьшение емкости дефектной АКБ на 10 % приводит к сокращению времени разряда исследуемой сборки на 2,9 % по сравнению со временем разряда эталонной сборки. Возрастает напряжение на дефектной АКБ и на АКБ, включенной с ней параллельно, на остальных АКБ напряжение понижается. При этом большая токовая нагрузка ложится на АКБ, включенную параллельно дефектной.

ЛИТЕРАТУРА

1. Shepherd, C. M. Design of Primary and Secondary Cells. Part 2. An Equation Describing Battery Discharge / C. M. Shepherd // Journal of Electrochemical Society. 1965. Vol. 112, Iss. 7. P. 657–664.
2. Tremblay, O. Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications / O. Tremblay, L.-A. Dessaint // World Electric Vehicle Journal. 2009. Vol. 3, Iss. 2. P. 289–298.
3. Krasucki, J. Projektowanie hybrydowych elektro-hydraulicznych układów napędowych / J. Krasucki, A. Rostowski. Radom, 2010.
4. Фоменко, Н. С. Особенности моделирования свинцово-кислотного аккумулятора / Н. С. Фоменко, А. С. Григорьев, А. С. Динисиллов // Электрохимическая энергетика. 2019. Т. 19, № 2. С. 81–89. <https://doi.org/10.18500/1608-4039-2019-19-2-81-89>.
5. Пост, С. С. Имитационная электроэнергетическая модель литий-ионной аккумуляторной батареи [Электронный ресурс] / С. С. Пост, В. И. Иванчур // Молодежь и наука: сб. материалов IX Всероссийской науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых с междунар. участием, посвященной 385-летию со дня основания г. Красноярска. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2013. Режим доступа: <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2013>. Дата доступа: 10.07.2019.
6. Борисевич, А. В. Моделирование литий-ионных аккумуляторов для систем управления батареями: обзор текущего состояния [Электронный ресурс] / А. В. Борисевич // Современная техника и технологии. 2014. № 5. Режим доступа: <http://technology.snauka.ru/2014/05/3542>. Дата доступа: 12.04.2020.
7. Сазанов, А. Б. Математическое моделирование режимов работы аккумуляторных батарей / А. Б. Сазанов // Техника машиностроения. 2007. № 2. С. 27–30.
8. Мартьянов, А. С. Моделирование алгоритмов заряда аккумуляторной батареи / А. С. Мартьянов // Наука ЮУрГУ: материалы 67-й науч. конф. Секции технических наук [Электронный ресурс]. 2015. С. 1165–1171. Режим доступа: <https://dspace.susu.ru/xmlui/bitstream/handle/0001.74/6376/44.pdf?sequence=1>. Дата доступа: 12.04.2020.
9. Гринчик, Н. Н. Об измерении электрического сопротивления жидких электролитов аккумуляторных батарей / Н. Н. Гринчик, К. В. Доброго, М. А. Чумаченко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 6. С. 494–507. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-6-494-507>.
10. Зализный, Д. И. Модель фотоэлемента для библиотеки SimPowerSystems пакета MatLab/Simulink / Д. И. Зализный // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг.

объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 2. С. 135–145. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-135-145>.

11. Simulink – моделирование и симуляция динамических систем для Simulink [Электронный ресурс] / MatLab и Simulink центр компетенций компании Mathworks. М., 2019. Режим доступа: <https://MatLab.ru/products/simulink>. Дата доступа: 10.07.2019.
12. Карлашук, В. И. Электронная лаборатория на IBM PC. Лабораторный практикум на базе Electronics Workbench и MatLab / В. И. Карлашук. М.: СОЛОН-Пресс, 2004. 800 с.
13. Бладыко, Ю. В. Электроника. Практикум / Ю. В. Бладыко. Минск: ИВЦ Минфина, 2016. 190 с.

Поступила 09.06.2020 Подписана в печать 18.08.2020 Опубликована онлайн 29.01.2021

REFERENCES

1. Shepherd C. M. (1965) Design of Primary and Secondary Cells. Part 2. An Equation Describing Battery Discharge. *Journal of Electrochemical Society*, 112 (7), 657–664.
2. Tremblay O., Dessaint L.-A. (2009) Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications. *World Electric Vehicle Journal*, 3 (2), 289–298. <https://doi.org/10.3390/wevj3020289>.
3. Krasucki J., Rostowski A. (2010) *Projektowanie Hybrydowych Elektro-Hydraulicznych Układów Napędowych*. Radom.
4. Fomenko N. S., Grigoryev A. S., Dinisilov A. S. (2019) Specific Features of Lead-Acid Battery Modelling. *Electrochemical Energetics*, 19 (2), 81–89. <https://doi.org/10.18500/1608-4039-2019-19-2-81-89> (in Russian).
5. Post S. S., Ivanchura V. I. (2013) Simulation Electric Power Model of a Lithium-Ion Battery. *Molodezh' i Nauka: Sb. Materialov IX Vserossiiskoi Nauch.-Tekhn. Konf. Studentov, Aspirantov i Molodykh Uchenykh s Mezhdunar. Uchastiem, Posvyashchennoi 385-letiyu so Dnya Osnovaniya g. Krasnoyarska* [Youth and Science: Collection of Materials of the IX All-Russian Scientific and Technical Conference of Undergraduate Students, Postgraduate Students and Young Scientists with International Participation, Dedicated to the 385th Anniversary of Founding of the City of Krasnoyarsk]. Krasnoyarsk, Siberian Federal University. Available at: <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2013/>. (Accessed 10 July 2019) (in Russian).
6. Borisevich A. V. (2014) Modeling of Lithium-Ion Batteries for Battery Management Systems: the Survey of the Current State. *Sovremennaya Tekhnika i Tekhnologii = Modern Techniques and Technologies*, (5). Available at: <http://technology.snauka.ru/2014/05/3542> (Accessed 12 April 2020) (in Russian).
7. Sazanov A. B. (2007) Mathematical Modeling of Battery Operating Conditions. *Tekhnika Mashinostroeniya = Mechanical Engineering Equipment*, (2), 27–30 (in Russian).
8. Mart'yanov A. S. (2015) Modeling of Rechargeable Battery Charge Algorithms. *Nauka YuUrGU: Materialy 67-i Nauch. Konf. Sektsii Tekhnicheskikh Nauk* [SUSU Science: Proceedings of the 67th Scientific Conference. Section of Technical Sciences], 1165–1171. Available at: <https://dspace.susu.ru/xmlui/bitstream/handle/0001.74/6376/44.pdf?sequence=1>. (Accessed 12 April 2020) (in Russian).
9. Grinchik N. N., Dobrego K. V., Chumachenko M. A. (2018) On the Measurement of Electric Resistance of Liquid Electrolytes of Accumulator Battery. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (6), 494–507. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-6-494-507> (in Russian).
10. Zalizny D. I. (2019) Model of a Photovoltaic Cell for the MatLab/Simulink SimPowerSystems Library. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (2), 135–145. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-135-145> (in Russian).
11. *Simulink – Simulation and Simulation of Dynamic Systems for Simulink*. MatLab and Simulink Mathworks Competence Center. Moscow, 2019. <https://MatLab.ru/products/simulink> (Access date 10 July 2019) (in Russian).
12. Karlashchuk V. I. (2004) *Electronic Laboratory in IBM PC. Laboratory Workshop Based on Electronics Workbench and MatLab*. Moscow, SOLON-Press Publ. 800 (in Russian).
13. Bladyko Y. V. (2016) *Electronics. Workshop*. Minsk, Ministry of Finance ICC Publ. 190 (in Russian).