

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2026-69-2-110-125>

УДК 621.355

О доступной емкости параллельной группы литий-ионных аккумуляторных батарей

К. В. Доброго¹⁾, И. С. Друтько²⁾, А. С. Каледник²⁾

¹⁾ООО «Белинвестторг» холдинг 1AK GROUP (Минск, Республика Беларусь),

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

Реферат. Аккумуляторная батарея (АКБ) представляет собой параллельно-последовательную сборку ячеек, фактическая емкость и изменения которой специфичны и определяются номинальными параметрами ячейки, структурой сборки и алгоритмами системы управления (BMS). В статье рассмотрена задача определения статистических закономерностей фактической емкости и ее динамики в процессе циклирования для батарейного модуля химической системы LiFePO_4 со структурой 16s и параллельной пары таких модулей. Промоделирована работа соответствующих АКБ в зависимости от начального разброса заряженности составляющих ячеек, характеристик балансирования последних и других параметров. Обнаружен эффект срыва балансировки ячеек последовательной сборки при низком пороге напряжения начала балансировки, пояснена его природа. Проведено статистическое моделирование зарядно-разрядных циклов батарейных модулей, включенных параллельно. Найдены значения дисбаланса токов зарядки и разрядки параллельных модулей и дисперсия этого дисбаланса. Так, для рассмотренных типов ячеек имеются области значений степени заряженности (SOC), в которых токи зарядки и разрядки сравниваются независимо от начальной разбалансировки ячеек в модулях. Показаны общие тренды выхода на максимально доступную емкость таких систем при различных значениях начальной разбалансировки ячеек. Работа носит методический характер, показывает влияние статистического разброса параметров ячеек на эксплуатационные параметры батарей, прежде всего доступную рабочую емкость и величины рабочих токов зарядки и разрядки параллельных модулей. Количественные результаты могут быть использованы для лучшего понимания процессов балансировки и работы ячеек в последовательно-параллельных сборках, для оптимизации работы BMS, прогнозирования доступной емкости сборок литий-ионных ячеек.

Ключевые слова: литий-ионный аккумулятор, литий-ионная батарея, последовательная сборка ячеек, параллельная сборка ячеек, электрическая емкость, балансировка, BMS, дисбаланс токов, зарядно-разрядный цикл аккумуляторной батареи

Для цитирования: Доброго, К. В. О доступной емкости параллельной группы литий-ионных аккумуляторных батарей / К. В. Доброго, И. С. Друтько, А. С. Каледник // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2026. Т. 69, № 2. С. 110–125. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2026-69-2-110-125>

Адрес для переписки

Друтько Иван Сергеевич
Белорусский национальный технический университет
ул. Б. Хмельницкого, 9,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 331-30-58
dsmsm@bntu.by

Address for correspondence

Drutko Ivan S.
Belarusian National Technical University
9, B. Khmel'nitskogo str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 331-30-58
dsmsm@bntu.by

On Accessible Capacity of Parallel Assembly of Lithium-Ion Batteries

K. V. Dobrego¹⁾, I. S. Drutko²⁾, A. S. Kalednik²⁾

¹⁾“Belinvesttorg” LLC 1AK GROUP Holding (Minsk, Republic of Belarus),

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

Abstract. A rechargeable battery (RB) is a parallel-sequential assembly of cells, the actual capacity and changes of which are specific and determined by the nominal parameters of the cell, the structure of the assembly and the algorithms of the control system (BMS). The article considers the problem of determining the statistical patterns of the actual capacity and its dynamics during cycling for a battery module of the LiFePO₄ chemical system with a 16s structure and a parallel pair of such modules. The operation of the corresponding RBs is modeled depending on the initial load variation of the component cells, the balancing characteristics of the latter and other parameters. The effect of disrupting the balancing of sequential assembly cells at a low voltage threshold for the start of balancing has been discovered, and its nature has been explained. Statistical modeling of the charging and discharging cycles of battery modules connected in parallel has been carried out. The values of the imbalance of charging and discharging currents of parallel modules and the dispersion of this imbalance are found. Thus, for the considered cell types, there are areas of charge degree (SOC) values in which the charging and discharging currents are compared regardless of the initial imbalance of the cells in the modules. The general trends of reaching the maximum accessible capacity of such systems at different values of the initial cell imbalance are shown. The work is methodical in its nature, and it demonstrates the influence of the statistical variation of cell parameters on the operational parameters of batteries, primarily the accessible operating capacity and the values of the charging and discharging currents of parallel modules. The quantitative results can be used to better understand the processes of balancing and operation of cells in series-parallel assemblies, to optimize BMS operation, and to predict the accessible capacity of lithium-ion cell assemblies.

Keywords: lithium-ion battery, lithium-ion rechargeable battery, sequential cell assembly, parallel cell assembly, electrical capacity, balancing, BMS, current imbalance, battery charge-discharge cycle

For citation: Dobrego K. V., Drutko I. S., Kalednik A. S. (2026) On Accessible Capacity of Parallel Assembly of Lithium-Ion Batteries // *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 69 (2), 110–125 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2026-69-2-110-125>

Введение

Мировые тенденции развития энергетики и транспорта связаны с системами накопления энергии [1], состоящими из подсистем накопления, силового преобразования, управления и вспомогательных подсистем.

Наиболее распространенные системы накопления энергии – электрохимические батареи, представляющие собой сборки ячеек, работа которых контролируется электронным блоком управления (BMS).

Ячейки даже одного производителя и партии в силу технологических ограничений характеризуются некоторым разбросом электрических, структурно-химических и механических параметров, поэтому емкость и другие параметры сборки ячеек также являются статистическими величинами.

Определение качественных и количественных закономерностей работы батарейных подсистем, связанных с разбросом характеристик ячеек и особенностями системы управления, – важный практический вопрос, решение которого требует прямого статистического моделирования. Проведение такого моделирования возможно с использованием электрохимических,

эмпирических или иных моделей ячеек [2–6], параметры которых адекватно возмущены случайным образом. Однако несмотря на существование большого количества моделей [7–9], их применение для статистического моделирования большой совокупности ячеек практически невозможно из-за недостатка данных о разбросе внутренних параметров ячеек и вычислительной громоздкости моделей.

Попытка решения указанной задачи сделана авторами в работе [10], в которой показан подход к статистическому моделированию последовательной линейки литий-ионных ячеек. Для моделирования использовалась функциональная зависимость напряжения разорванной цепи от степени заряженности, полученная экспериментально и соответствующим образом аппроксимированная. Разброс электрофизических параметров ячеек моделировался соответствующим возмущением параметров математической модели. Была показана применимость такого подхода для моделирования больших сборок, выявлены закономерности изменения общей емкости линейки при циклировании, продемонстрирован эффект срыва балансировки при неадекватных настройках BMS.

Настоящая статья является продолжением работы [10] и посвящена статистическому моделированию двух параллельных литий-ионных (LFP) модулей с общей структурой 2p16s.

Исследование связано с необходимостью параллельного соединения модулей в системах, требующих повышенной емкости для резервирования питания телекоммуникационного и иного оборудования. При этом заказчику оборудования необходимо количественно оценивать разброс емкостных и токовых характеристик системы, связанный с параллельным соединением нескольких модулей, а также со случайным разбросом параметров ячеек в партии.

Проведено статистическое моделирование зарядно-разрядных циклов, определены закономерности изменения при циклировании доступной емкости и дисбаланса токов разрядки и зарядки, в том числе его зависимость от начального разброса степени заряженности ячеек.

Статья имеет методический характер, демонстрирует статистические аспекты работы последовательно-параллельных аккумуляторных сборок. Результаты могут быть использованы для улучшения алгоритмов балансирования ячеек и прогнозирования емкости и других параметров последовательно-параллельных батарейных сборок при эксплуатации.

Постановка задачи

Рассмотрим аккумуляторный модуль, состоящий из литий-ионных (LiFePO_4) ячеек со структурой 16s, номинальным напряжением 3,2 В и номинальной емкостью $C_N = 105 \text{ А} \cdot \text{ч}$. Основной режим зарядки/разрядки батарей – зарядка/разрядка постоянным током с отсечкой по максимальному/минимальному напряжению. Для двух параллельных батарейных модулей проводятся зарядно-разрядные циклы с различными токовыми режимами. Изучаются значение фактической емкости, а также уровень дисбаланса токов зарядки и разрядки между модулями. Определяются ста-

тистический разброс указанных величин и их зависимость от дисперсии электрических параметров ячеек в партии, начального разброса SOC ячеек в модуле.

Задача решается методом прямого статистического имитационного моделирования соответствующей батарейной системы. В [10] данная методология применена для исследования емкости линейки литий-ионных ячеек 16s. Предполагается, что емкости ячеек в партии распределены по нормальному ограниченному распределению, характеризуемому средним значением емкости C и относительным среднеквадратическим отклонением σ_0 (рис. 1).

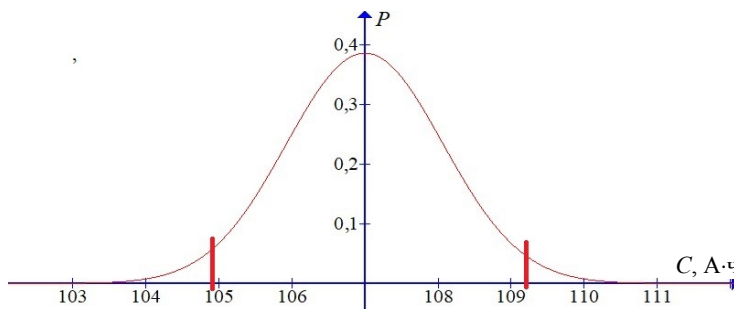


Рис. 1. Модель распределения емкости ячеек в партии (ограниченное $2\sigma_0$)

Fig. 1. Cell capacity distribution model in a batch (limited to $2\sigma_0$)

Данные о внутреннем сопротивлении ячеек приводятся производителями в паспортах на продукцию, однако значение внутреннего сопротивления существенно зависит от метода его измерения, состояния контакта, SOC и др. Опыт показывает, что дисперсии внутреннего сопротивления и емкости близки.

Ввиду отсутствия данных о распределении значений структурных, электрохимических и других параметров ячеек, единой методики их измерения используем универсальный подход для моделирования разброса совокупности параметров ячеек, заключающийся в представлении электрических параметров явной статистической функцией V_{OC} (SOC) в виде, предложенном в [2]:

$$V_{OC} = E_0 + A \cdot SOC + B \cdot \exp((SOC - 1) / D) - F \cdot \exp(-G \cdot SOC). \quad (1)$$

Коэффициенты E_0 , A , B , D , F , G количественно определяют модель. Модельная зависимость (1) состоит из трех независимых частей, что обеспечивает высокую скорость и точность аппроксимации по сравнению, в частности, с функцией Шепарда [1] и подобными ей.

Напряжение электрохимического элемента вычисляется как сумма ЭДС, активного и поляризационного падения напряжения

$$U = V_{OC} - I(r_a + r_p). \quad (2)$$

Рассматривается протекание стационарного тока, поэтому емкостные токи не учитываются. Также не учитывается гистерезис функции $V_{OC}(SOC)$ при смене направления тока [9, 12]. Состояние зарядки (SOC) рассчитыва-

ется стандартным образом по значению емкости ячейки с учетом начального значения $SOC(t=0) = 1$

$$SOC = 1 - \int_0^t Id\tau / C. \quad (3)$$

Предполагается, что разброс всех возможных параметров реальных ячеек адекватно моделируется равным статистическим разбросом параметров E_0, A, B, C, D, F, G модели с дисперсией σ .

Опыт работы с производителями литий-ионных ячеек (данные группы компаний 1AK GROUP) показывает, что емкость ячеек (средняя по партии) превышает номинальную емкость C_N на двукратную величину относительного стандартного отклонения нормального распределения σ_0 (рис. 1). Для $\sigma_0 = 1\%$; $C_N = 105$ А·ч средняя емкость 107,1 А·ч. Значения параметров (1)–(3), согласно [2], для ячеек [13] приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры модели (1)–(3), установленные для $LiFePO_4$ ячеек при разряде, согласно [2]

Model parameters (1)–(3) set for $LiFePO_4$ cells when discharged, according to [2]

$C, \text{ А·ч}$	$E_0, \text{ В}$	$A, \text{ В}$	$B, \text{ В}$	$D, \text{ б. р.}$	$F, \text{ В}$	$G, \text{ б. р.}$	Средне- квадратичное отклонение	$r_a, \text{ м}\Omega$	$r_p, \text{ м}\Omega$
105	3,22000	0,12230	0,25500	0,01170	0,39722	30,98280	<0,4 %	0,93	0,60

Блок BMS управляет работой батареи, в том числе предотвращает превышение опасных уровней тока, напряжений и температур, осуществляет выравнивание (балансировку) напряжений и SOC ячеек. BMS реализуют пассивную и (или) активную балансировку. Активная балансировка – перераспределение заряда между перезаряженной и недозаряженной ячейками – может производиться между несколькими опережающими и несколькими отстающими ячейками одновременно (многоканальная балансировка). Контроль напряжения на ячейках для балансировки производится с заданной периодичностью, сама балансировка проводится током I_b и длится время Δt_b , после чего контроль условий для балансировки повторяется. Условия для начала балансировки включают: превышение напряжения ячейки установленного уровня U_b и превышение разности напряжений между опережающей и отстающей ячейками значения ΔU_b .

Статистическая модель ячейки – это набор значений параметров уравнений (1)–(3) и величина относительной дисперсии этих параметров σ такие, что статистическое моделирование емкости воспроизводит среднее значение и дисперсию емкости партии ячеек.

Принимаются следующие параметры партии ячеек: $C_N = 105$ А·ч; $C = 107,1$ А·ч; $\sigma_0 = 1\%$. Емкость конкретной ячейки C_i определяется в цикле зарядки-разрядки интегрированием тока разрядки по времени, в границах напряжений от $U_{dn} = 2,5$ В ($SOC = 0$) до $U_{up} = 3,65$ В.

Найденные методом пристрелки параметры модели (C и σ) приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры статистической модели ячейки (1)–(3)

Parameters of the statistical model of the cell (1)–(3)

$C_{\text{ном}}, \text{А}\cdot\text{ч}$	$E_0, \text{В}$	$A, \text{В}$	$B, \text{В}$	$D, \text{б. п.}$	$F, \text{В}$	$G, \text{б. п.}$	$r_a, \text{м}\Omega$	$r_p, \text{м}\Omega$	$r_a, \text{м}\Omega$	$r_p, \text{м}\Omega$
105	3,22000	0,1223	0,2550	0,0117	0,3972	30,9830	0,93	0,6	0,93	0,60

Исследование емкости батарейного модуля [10]

Батарейный модуль – линейка ячеек (16s), параметры которых определяются статистической моделью (1)–(3) с использованием генератора случайных чисел. Суммарная функция $V_{\text{OC}} = f(SOC)$ для линейки ячеек – сумма соответствующих функций ячеек. Ток зарядки-разрядки $0,5C$, где $C = C_{\text{ном}}$. Граничные нижнее и верхнее напряжения зарядки-разрядки батареи: $U_{dn16} = 16U_{dn}$; $U_{up16} = 16U_{up}$. Предполагается, что с SOC ячеек вновь собранной батареи не тождественны и распределены с относительным разбросом σ_{SOC} . При моделировании статистического множества линеек определяется среднее значение емкости АКБ и относительное среднеквадратичное отклонение этой величины.

При старте работы вновь собранной батареи состояния заряженности отдельных ячеек неизбежно различаются. Относительная дисперсия SOC может быть порядка $\sigma_{SOC} = 1\%$ при проведении предварительной общей балансировки или составлять $\sigma_{SOC} = 3, 5\%$ и более. Изменения емкости батареи в процессе зарядно-разрядного циклирования для разных σ_{SOC} , а также для различных токов балансировки представлены на рис. 2, 3. Для получения усредненных значений емкости и соответствующей дисперсии каждая точка получена расчетом 30 случайных модулей. Стандартные значения расчетных параметров: $\sigma_{SOC} = 5\%$; $I_6 = 1 \text{ А}$; $\Delta U_6 = 0,2 \text{ В}$; $\Delta \tau_6 = 10 \text{ с}$.

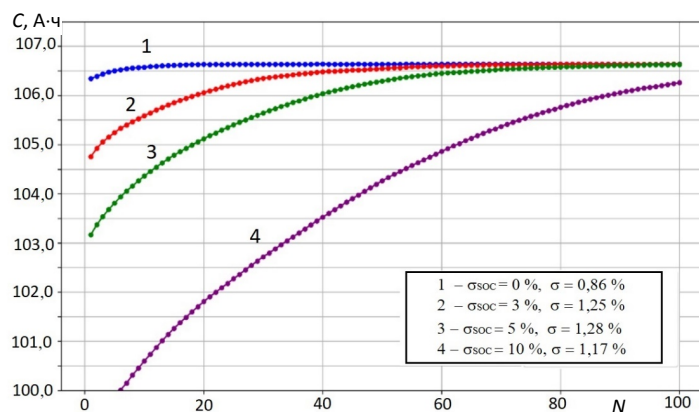


Рис. 2. Изменение доступной емкости батареи C в зависимости от количества полных циклов зарядки-разрядки N . Стандартные значения параметров:

1, 2, 3, 4 – $\sigma_{SOC} = 0, 3, 5$ и 10% соответственно

(на врезке – относительные среднеквадратические отклонения)

Fig. 2. Change in the accessible capacity of battery C depending on the number of full charge-discharge cycles N . Standard parameter values:

1, 2, 3, 4 – $\sigma_{SOC} = 0, 3, 5$, and 10% respectively

(the inset shows the relative RMS deviations)

Расчет показывает, что скорость изменения доступной емкости существенно зависит от тока балансировки. Период балансировки $\Delta\tau_6$ может оказывать специфическое влияние как на скорость изменения, так и на финальное значение емкости (рис. 4).

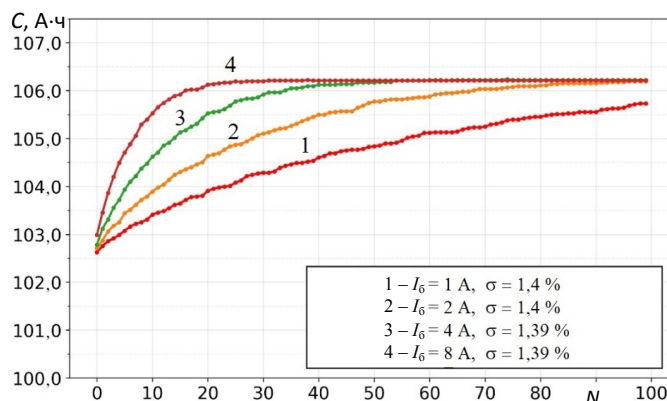


Рис. 3. Изменение доступной емкости батареи C в зависимости от количества полных циклов зарядки-разрядки N : 1, 2, 3, 4 – $I_6 = 1, 2, 4$ и 8 A соответственно (на врезке – относительные среднеквадратические отклонения)

Fig. 3. The change in the accessible capacity of battery C depending on the number of full charge-discharge cycles N : 1, 2, 3, 4 – $I_6 = 1, 2, 4$ and 8 A respectively (the inset shows the relative RMS deviations)

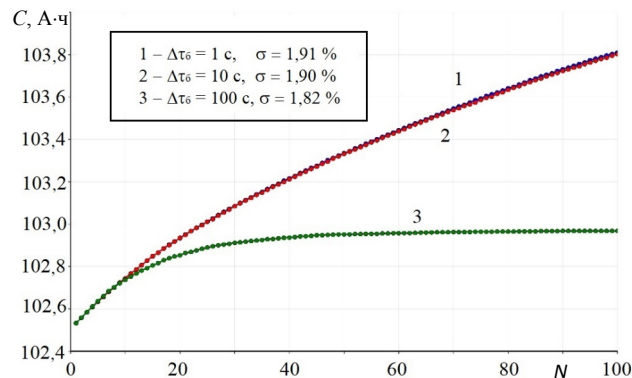


Рис. 4. Изменение доступной емкости батареи C в зависимости от количества полных циклов зарядки-разрядки N : $I_6 = 1 \text{ A}$; 1, 2, 3 – длительность балансировки $\Delta\tau_6 = 1, 10, 100 \text{ c}$ соответственно

Fig. 4. The change in the accessible capacity of battery C depending on the number of full charge-discharge cycles N : $I_6 = 1 \text{ A}$; 1, 2, 3 – balancing duration $\Delta\tau_6 = 1, 10, 100 \text{ s}$ respectively

В работе [10] показан эффект срыва балансировки при снижении порога напряжения начала балансировки ΔU_6 ниже критического значения (рис. 5).

Статистический расчет, представленный на рис. 5, показывает, что при низком пороге начала балансировки $\Delta U_6 < 0,15 \text{ В}$ имеет место срыв балансировки. Граничное значение ΔU_6 области срыва балансировки мало зависит от σ_{soc} , но растет с уменьшением периода балансировки $\Delta\tau_6$.

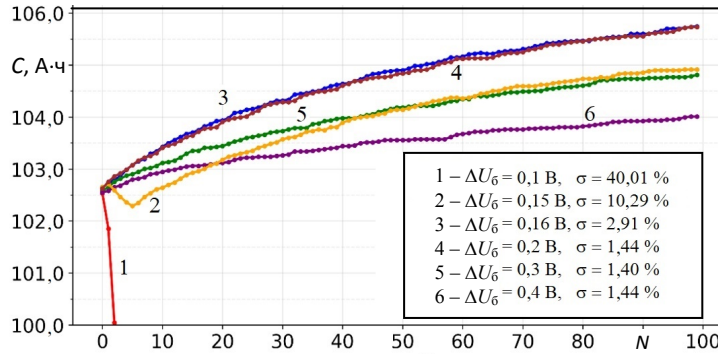


Рис. 5. Изменение доступной емкости батареи C в зависимости от количества полных циклов зарядки-разрядки N : $\sigma_{SOC} = 5\%$; 1, 2, 3, 4, 5 – порог начала балансировки $\Delta U_6 = 0.1, 0.15, 0.16, 0.2, 0.3$ и 0.4 В соответственно (на врезке – относительные среднеквадратические погрешности кривых)

Fig. 5. The change in accessible battery capacity C depending on the number of full charge-discharge cycles N : $\sigma_{SOC} = 5\%$; 1, 2, 3, 4, 5 – balancing start threshold $\Delta U_6 = 0.1, 0.15, 0.16, 0.2, 0.3$ and 0.4 V respectively (the inset shows the relative RMS errors of the curves)

Исследование параллельной работы батарейных модулей

Рассмотрим систему двух модулей, включенных параллельно и управляемых независимыми BMS. Постоянный ток зарядки и разрядки рассчитывается согласно ЭДС ($\varepsilon_1, \varepsilon_2$) и сопротивлению модулей r_1 и r_2

$$I_1 = \frac{I \cdot r_2}{r_1 + r_2} - \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{r_1 + r_2}, \quad I_2 = I - I_1. \quad (5)$$

При зарядке: $I > 0$, $U > \varepsilon_1, \varepsilon_2$, при разрядке соответственно: $I < 0$, $\varepsilon_1, \varepsilon_2 > U$. Рассчитаем доступную емкость системы и дисбаланс токов первого и второго модулей ($\Delta I = |I_1 - I_2|$) в зависимости от величины начального разброса SOC и других параметров.

Расчет токов зарядки и разрядки первого цикла при $\sigma_{SOC} = 5\%$ и базовых параметрах балансировки приведен на рис. 6.

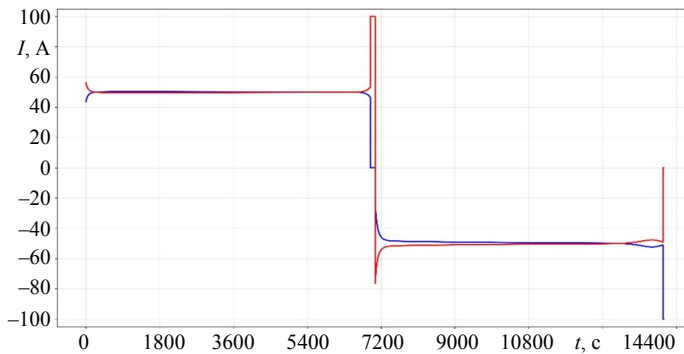


Рис. 6. Токи первого цикла зарядки-разрядки параллельной пары модулей: $\sigma_{SOC} = 5\%$; базовый режим балансировки $\Delta U_6 = 0.2$ В

Fig. 6. Currents of the first charge-discharge cycle of a parallel pair of modules: $\sigma_{SOC} = 5\%$; basic balancing mode $\Delta U_6 = 0.2$ V

Расчет показывает, что максимальный дисбаланс токов $\Delta I = |I_1 - I_2|_{\max}$ наблюдается в начале и конце циклов зарядки и разрядки. Аналогичный расчет для статистической группы 30 пар модулей (рис. 7) позволяет судить о статистической амплитуде дисбаланса $\langle \Delta I \rangle$ и относительном среднеквадратическом отклонении этой величины $\sigma_{\Delta I}$.

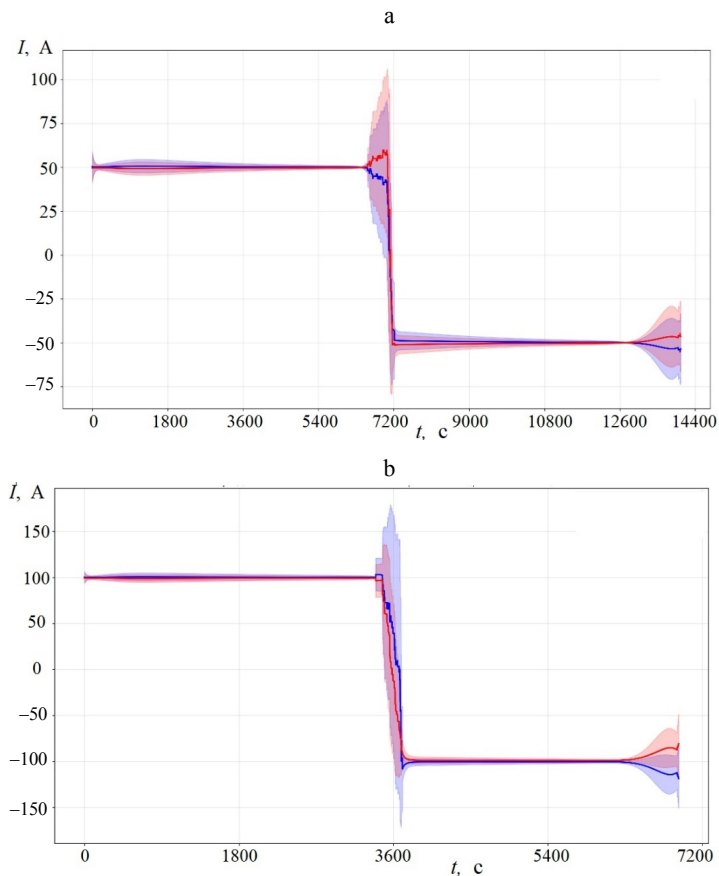


Рис. 7. Среднестатистическая амплитуда дисбаланса токов зарядки-разрядки первого цикла (сплошная линия) и ее относительное среднеквадратическое отклонение (полутонная штриховка). Токковый режим: а – 0,5С; б – 0,95С; $\sigma_{SOC} = 5\%$

Fig. 7. The average amplitude of the charge-discharge current imbalance of the first cycle (solid line) and its relative RMS deviation (half-tone shading). Current mode: а – 0.5С; б – 0.95С; $\sigma_{SOC} = 5\%$

Асимметрия токов в конце этапа зарядки для случая 0,95С (рис. 7) связана с ограничением напряжения при зарядке в соответствии с установкой зарядного устройства при реальном тестировании системы (рис. 8).

Результаты статистического моделирования позволяют сделать следующие выводы: 1) средние значения дисбаланса токов при зарядке выше, чем при разрядке; 2) несмотря на то что средние значения дисбаланса токов порядка $\pm 20\%$ от среднего значения, отклонение от номинального среднего в группе может оказаться существенно выше. Таким образом, при

высокотоковых режимах зарядки велика вероятность превышения порога допустимого тока для одного из модулей и, как следствие, выключения и недозарядки модуля.

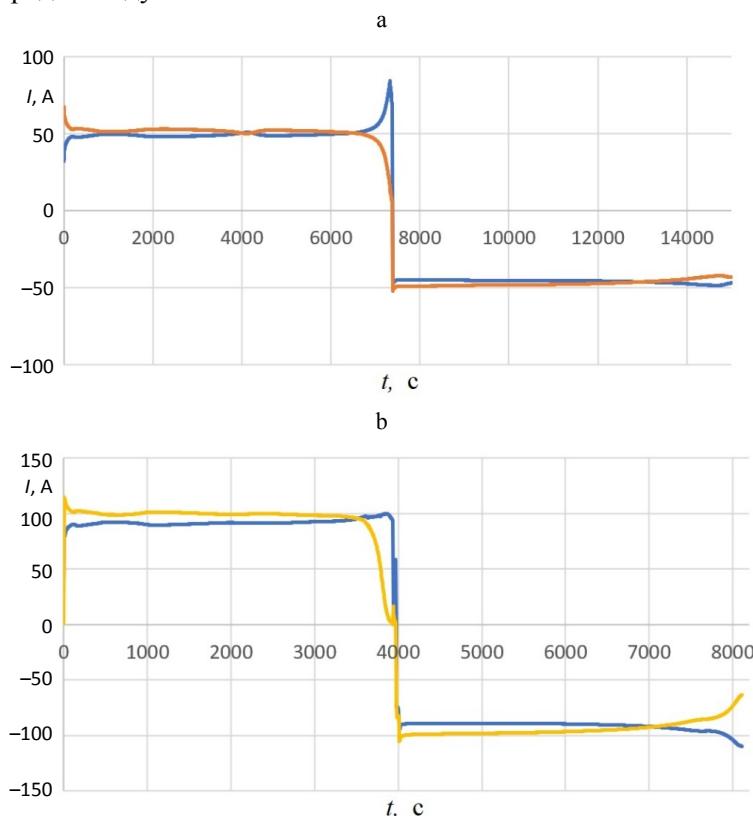


Рис. 8. Токи зарядки и разрядки пары модулей ZUBR Li-Ion 48-100 HR:
а – токовый режим 0,5С; б – 0,95С

Fig. 8. Charging and discharging currents of a pair of ZUBR Li-Ion 48-100 HR modules:
а – 0.5C current mode; б – 0.95C

Моделирование показывает наличие области схождения токов к номинальному среднему значению на уровне $SOC \approx 90\%$ при зарядке и $SOC \approx 25\%$ при разрядке. Для проверки данной закономерности были проведены измерения токов зарядки и разрядки случайной пары промышленных литий-ионных батарей ZUBR Li-Ion 48-100 HR (рис. 8). Для исследования использовалось программируемое зарядное устройство марки TengFei 48V200A, которое для случая режима 0,95C было запрограммировано на ограничение напряжения зарядки 53,5 В.

Эксперимент подтвердил, что данная закономерность характерна для рассматриваемой системы, имеет электрофизическую природу. Это также подтверждает адекватность используемой модели и ее прогностический потенциал.

Исследуем зависимость дисбаланса токов зарядки и разрядки от разброса начальной степени заряженности ячеек σ_{SOC} (табл. 3) и при различных то-

ковых режимах зарядки и разрядки (табл. 4). Расчет проводился для 30 случайных пар АКБ, использовалась базовая модель балансировки $I_b = 1$ А, рабочий диапазон напряжений ячеек 2,85–3,45 В.

Таблица 3

Величина максимального дисбаланса токов при зарядке и разрядке, соответствующее относительное среднеквадратическое отклонение и емкость цикла C_{fact}

The value of the maximum current imbalance during charging and discharging, the corresponding relative RMS deviation, and the C_{fact} cycle capacity

σ_{SOC} , %	$\langle I \rangle$, А	$\Delta I_{max,chr}$	$\sigma_{\Delta I_{chr}}$	$\Delta I_{max,dch}$	$\sigma_{\Delta I_{dch}}$	C_{fact} , А·ч
0	50	35,932	4,375	59,879	10,161	101,536
1	50	34,964	4,251	51,533	9,961	101,279
3	50	32,068	3,906	46,405	9,900	100,225
5	50	28,719	3,649	46,550	10,000	98,864

Согласно данным табл. 3, фактическая емкость пары снижается с ростом начального расхождения σ_{SOC} аналогично тому, как она снижается для отдельного модуля. При этом дисбаланс токов также снижается с увеличением начального разброса SOC , что кажется противоречивым результатом. Такая зависимость объясняется тем, что недозаряд и общее снижение емкости пары, обусловленное ростом σ_{SOC} , сильнее влияет на снижение дисбаланса токов, чем непосредственный рост σ_{SOC} на его увеличение.

Таблица 4

Величина максимального дисбаланса токов при зарядке и разрядке, соответствующее относительное среднеквадратическое отклонение и емкость цикла C_{fact} при различных токовых режимах, $\sigma_{SOC} = 3$ %

The value of the maximum current imbalance during charging and discharging, the corresponding relative RMS deviation and the capacity of the C_{fact} cycle at various current modes, $\sigma_{SOC} = 3$ %

iC	$\langle I \rangle$, А	$\Delta I_{max,chr}$	$\sigma_{\Delta I_{chr}}$	$\Delta I_{max,dch}$	$\sigma_{\Delta I_{dch}}$	C_{fact} , А·ч
0,25	25	25,72	3,45	42,13	6,14	100,63
0,50	50	35,85	4,41	64,24	10,36	100,74
0,90	90	59,53	6,98	65,53	15,12	99,47

Данные табл. 4 показывают ожидаемое увеличение дисбаланса и уменьшение фактической емкости с ростом токов зарядки-разрядки. При этом малозначительный рост дисбаланса при разрядке также связан со снижением фактической емкости.

Рассмотрим долговременное зарядно-разрядное циклирование параллельной пары модулей (рис. 9). Как видно, токовая емкость модулей, различающаяся на старте циклирования, изменяется на первых 5–10 циклах, затем стабилизируется на характерном для каждого модуля значении, раз-

ница емкостей несколько увеличилась на первых циклах и стабилизировалась на уровне 0,65 А·ч.

Механизм расхождения емкостей заключается в следующем. При разрядке один из модулей первым выходит за пределы рабочего напряжения и выключается. Второй модуль оказывается при увеличенном токе нагрузки и быстро достигает предела по напряжению, не разрядившись равнозначно первому модулю. При этом фазу зарядки модули начинают при неравных SOC – более заряженный первым зарядится и в зависимости от алгоритма BMS может выключить второй. Таким образом, реализуется ситуация, когда один из модулей стабильно недоразряжается, а второй – недозаряжается, что снижает общую емкость пары. Однако, как показывают расчеты, с течением времени рабочие емкости модулей и общая емкость пары стабилизируются.

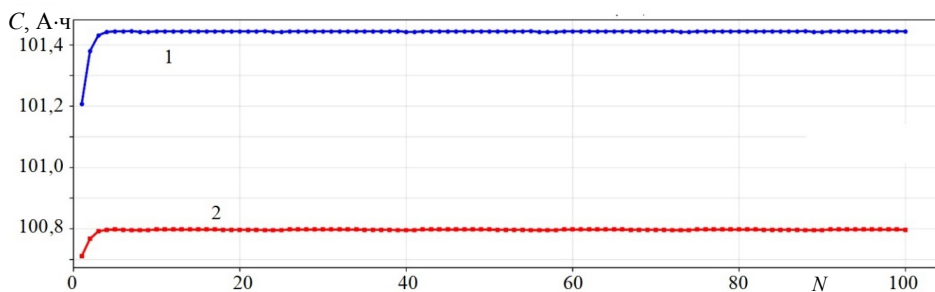


Рис. 9. Зависимость емкости C модулей параллельной пары от количества циклов N зарядки-разрядки. Токковый режим 0,5C. Стандартные параметры балансировки: 1 – емкость модуля 1; 2 – то же модуля 2

Fig. 9. The dependence of the capacity of the parallel pair C modules on the quantity N of charge-discharge cycles. Current mode is 0,5C. Standard balancing parameters: 1 – capacity of module 1; 2 – the same of module 2

Рассчитаем максимальное среднестатистическое значение дисбаланса тока при зарядке и разрядке и фактической емкости батареи от количества циклов N (рис. 10, 11).

Согласно рис. 10, дисбаланс токов может достичь неприемлемо больших величин, прежде всего при зарядке. При разрядке расхождение меньше. Расхождение стабилизируется автоматически в течение 5–10 циклов.

Тот факт, что при начальном разбросе SOC $\sigma_{SOC} = 10\%$ дисбаланс токов стабилизируется на относительно низком уровне, свидетельствует о сложной взаимосвязи электрических параметров системы и параметров балансировки, приводящей к различным параметрам устойчивого состояния динамической системы.

Расчет показывает, что после завершения 3–7 полных разрядно-зарядных циклов емкость пары модулей стабилизируется. При этом значение максимальной емкости практически не зависит от начального разброса SOC ячеек и определяется случайным распределением параметров ячеек.

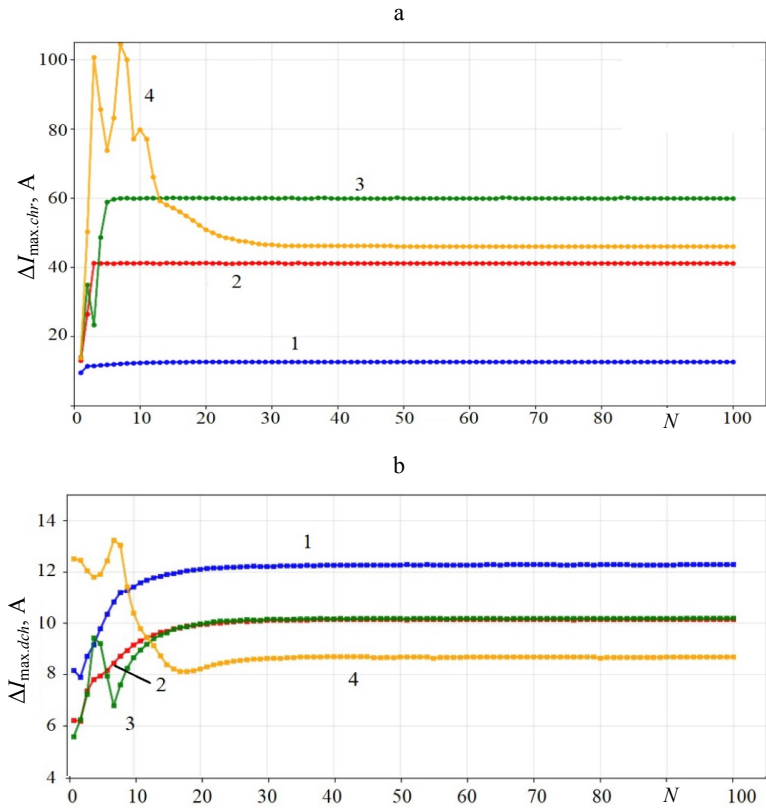


Рис. 10. Зависимость значений максимального дисбаланса от числа циклов N : а – при зарядке; б – при разрядке. Стандартный токовый режим: $\Delta U_6 = 0,15$ В; 1, 2, 3, 4 – $\sigma_{SOC} = 0, 3, 5$ и 10 % соответственно

Fig.10. The dependence of the maximum imbalance values on the number of cycles N : а – during charging; б – during discharging. Standard current mode: $\Delta U_6 = 0,15$ V; 1, 2, 3, 4 – $\sigma_{SOC} = 0, 3, 5$ and 10 % respectively

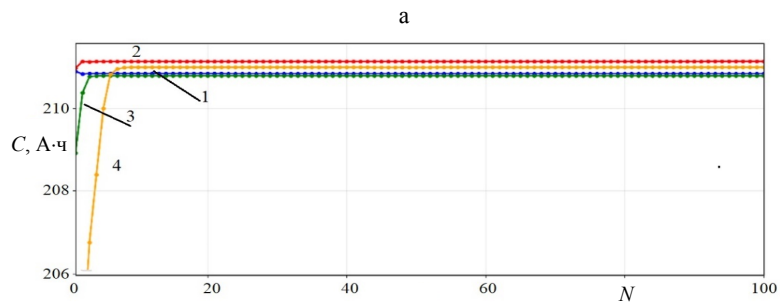


Рис. 11. Емкость системы двух параллельных литий-ионных модулей в зависимости от количества полных зарядно-разрядных циклов N : 1, 2, 3, 4 – начальный разброс SOC ; $\sigma_{SOC} = 0, 3, 5$ и 10 % соответственно. Токовый режим 0,5C; $\Delta U_6 = 0,15$ В (окончание рис. 11 на стр. 123)

Fig. 11. The capacity of the system of two parallel lithium-ion modules depending on the number of full charge-discharge cycles N : 1, 2, 3, 4 are the initial variation of SOC ; $\sigma_{SOC} = 0.3, 5$, and 10 % respectively. Current mode 0,5C; $\Delta U_6 = 0.15$ V (ending of Fig. 11 is on page 123)

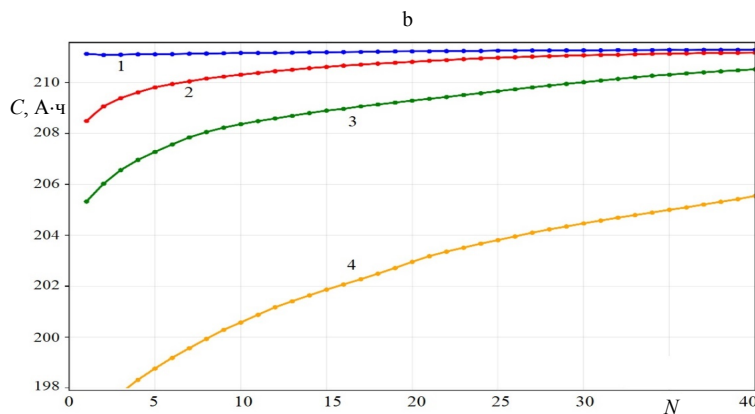


Рис. 11. Окончание

Fig. 11. Ending

ВЫВОДЫ

1. В статье описана методика статистического моделирования квазистационарных зарядно-разрядных циклов литий-ионного батарейного модуля и параллельной пары модулей. Методика базируется на статистической модели зарядно-разрядной кривой $V_{oc} = f(SOC)$ литий-ионной ячейки и соответствующей модели параллельно-последовательной сборки ячеек.

2. С использованием указанной модели исследованы зависимости фактической доступной емкости батарей от начального разброса заряженности σ_{SOC} ячеек, составляющих модуль, от параметров балансировки ячеек в модуле. Расчетным путем продемонстрирован эффект срыва балансировки при малых значениях порога разности напряжений для начала балансировки ΔU_6 . Физическая причина эффекта – превышение случайного разброса электрических характеристик ячеек, составляющих модуль, величины порога ΔU_6 и как следствие – необоснованное (ошибочное) перераспределение заряда.

3. Определен характер дисбаланса токов зарядки и разрядки параллельной пары модулей для различных значений начального разброса заряженности ячеек σ_{SOC} и токовых режимов зарядки и разрядки. Обнаружен эффект выравнивания токов на определенных стадиях зарядки и разрядки вне зависимости от статистического разброса электрических параметров ячеек.

4. Проведены статистические расчеты фактической рабочей емкости параллельной пары модулей в зависимости от количества зарядно-разрядных. В соответствии с результатами моделирования для ответственных приложений АКБ может быть рекомендовано проведение настроечного циклирования АКБ для стабилизации емкости и дисбаланса токов.

5. Работа носит методический характер, показывает влияние статистического разброса индивидуальных параметров ячеек на эксплуатационные параметры батареи. С использованием представленного подхода могут быть количественно исследованы емкостно-токовые параметры крупных

батарейных подсистем для промышленных, энергетических и транспортных приложений, представляющих собой параллельно-последовательные сборки ячеек. Имитационное моделирование работы батарейных систем по разработанной методике позволит проводить виртуальное тестирование и оптимизацию алгоритмов балансировки ячеек в модулях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лемешевский, В. М. Развитие аккумуляторной отрасли и стратегическое позиционирование холдинга 1ak-group / В. М. Лемешевский // *Механика машин, механизмов и материалов*. 2025. № 3 (72). С. 92–96. <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2025-3-72-92-96>
2. Доброго, К. В. Моделирование пассивного сопряжения блоков гибридной системы накопления электроэнергии / К. В. Доброго, И. А. Козначеев, В. Л. Червинский // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2024. Т. 67, № 3. С. 209–227. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-3-209-227>
3. Doyle, M. The use of mathematical modeling in the design of lithium/polymer battery systems / M. Doyle, J. Newman // *Electrochimica Acta*. 1995. Vol. 40, No 13–14. P. 2191–2196. [https://doi.org/10.1016/0013-4686\(95\)00162-8](https://doi.org/10.1016/0013-4686(95)00162-8)
4. 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>
5. A Comprehensive Model for Lithium-Ion Batteries: From the Physical Principles to an Electrical Model / A. Berrueta, A. Urtasun, A. Ursúa, P. Sanchis // *Energy*. 2018. Vol. 144. P. 286–300. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.11.154>
6. Fan, G. A Reduced-Order Electrochemical Model of Li-Ion Batteries for Control and Estimation Applications / G. Fan, X. Li, M. Canova // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2018. Vol. 67, No 1. P. 76–91. <https://doi.org/10.1109/tvt.2017.2738780>
7. Battery Models for Battery Powered Applications: A Comparative Study / N. Campagna, V. Castiglia, R. Miceli [et al.] // *Energies*. 2020. Vol. 13, No 16. P. 4085. <https://doi.org/10.3390/en13164085>
8. Lifetime Modelling of Lead Acid Batteries: Technical Report RISO-R-1515(EN) / H. Bindner, T. Cronin, P. Lundsager [et al.]. Denmark, 2025. URL: <https://www.osti.gov/etdweb/servlets/purl/20607163>
9. A voltage reconstruction model for lithium-ion batteries considering the polarization process / F. Wang, S. Tang, X. Han // *Journal of Power Sources*. 2023. Vol. 588. Art. 233744. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.233744>
10. Оценка рабочей емкости сборок литий-ионных аккумуляторов методом Монте-Карло / К. В. Доброго, В. М. Лемешевский, В. Л. Червинский, А. С. Каледник // *Современные электрохимические технологии и оборудование-2025 = Modern Electrochemical Technologies and Equipment-2025: материалы Междунар. науч.-техн. конф., 19–23 мая 2025 г. Минск: БГТУ, 2025. С. 79–82.*
11. Shepherd, C. M. Design of Primary and Secondary Cells: II. An Equation Describing Battery Discharge / C. M. Shepherd // *Journal of the Electrochemical Society*. 1965. Vol. 112, No 7. P. 657–664. <https://doi.org/10.1149/1.2423518>
12. Roscher, M. A. Dynamic Electric Behavior and Open-Circuit-Voltage Modeling of LiFePO₄-Based Lithium Ion Secondary Batteries / M. A. Roscher, U. D. Sauer // *Journal of Power Sources*. 2011. Vol. 196, No 1. P. 331–336. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.06.098>
13. EVE Power Co., Ltd. Product Specification LF105. URL: <https://batteryfinds.com/wp-content/uploads/2023/09/EVE-LF105-105Ah-3.2V-LiFePO4-Prismatic-Battery-Cell-SpecificationDatasheet.pdf> (accessed: 20.02.2025).

REFERENCES

1. Lemeshevsky V. M. (2025) Development of the Battery Industry and Strategic Positioning of the IAK-Group Holding. *Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials*, (3), 92–96 (in Russian). <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2025-3-72-92-96>
2. Dobrego K. V., Koznacheev I. A., Charvinski V. L. (2024) Modelling of Passive Coupling of Battery Units of Hybrid Energy Storage System. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 67 (3), 209–227 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-3-209-227>
3. Doyle M., Newman J. (1995) The use of Mathematical Modeling in the Design of Lithium / Polymer Battery Systems. *Electrochimica Acta*, 40 (13–14), 2191–2196. [https://doi.org/10.1016/0013-4686\(95\)00162-8](https://doi.org/10.1016/0013-4686(95)00162-8)
4. Dobrego K. V., Bladyko V. V. (2021) Modeling of Batteries and their Assemblies Taking into Account the Degradation of Parameters. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 64 (1), 27–39 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-27-39>
5. Berrueta A., Urtasun A., Ursúa A., Sanchis P. (2018) A Comprehensive Model for Lithium-Ion Batteries: From the Physical Principles to an Electrical Model. *Energy*, 144, 286–300. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.11.154>
6. Fan G., Li X., Canova M. (2018) A Reduced-Order Electrochemical Model of Li-Ion Batteries for Control and Estimation Applications. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 67 (1), 76–91. <https://doi.org/10.1109/tvt.2017.2738780>
7. Campagna N., Castiglia V., Miceli R., Mastromauro R. A., Spataro C., Trapanese M., Viola F. (2020) Battery Models for Battery Powered Applications: A Comparative Study. *Energies*, 13 (16), 4085. <https://doi.org/10.3390/en13164085>
8. Bindner H., Cronin T., Lundsager P., Manwell J. F., Abdulwahid U., Baring-Gould I. (2005) *Lifetime Modelling of Lead acid Batteries. Technical Report RISO-R-1515(EN)*. Denmark. Available at: <https://www.osti.gov/etdweb/servlets/purl/20607163>
9. Wang F., Tang Sh., Han X., Lu L., Yu Ch., Zhao Ch., Gao Y., Zhu G., Zhuang K., Ouyang M. (2023) A Voltage Reconstruction Model for Lithium-ion Batteries Considering the Polarization Process. *Journal of Power Sources*, 588, 233744. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.233744>
10. Dobrego K. V., Lemeshevsky V. M., Chervinski V. L., Kalednik A. S. (2025) Evaluation of the Working Capacity of Lithium-Ion Battery Assemblies by the Monte Carlo Method. *Modern Electrochemical Technologies and Equipment-025: Proceedings of the International Scientific Conference, May 19–23, 2025*. Minsk, BSTU, 61–64 (in Russian).
11. Shepherd C. M. (1965) Design of Primary and Secondary Cells: II. An Equation Describing Battery Discharge. *Journal of the Electrochemical Society*, 112 (7), 657–664. <https://doi.org/10.1149/1.2423659>
12. Roscher M. A., Sauer D. U. (2011) Dynamic Electric Behavior and Open-Circuit-Voltage Modeling of LiFePO₄-Based Lithium Ion Secondary Batteries. *Journal of Power Sources*, 196 (1), 331–336. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.06.098>
13. EVE Power Co., Ltd. *Product Specification LF105*. Available at: [https://batteryfinds.com/wp-content/uploads/2023/09/EVE-LF105-105Ah-3.2V-LiFePO₄-Prismatic-Battery-Cell-SpecificationDatasheet.pdf](https://batteryfinds.com/wp-content/uploads/2023/09/EVE-LF105-105Ah-3.2V-LiFePO4-Prismatic-Battery-Cell-SpecificationDatasheet.pdf) (accessed 20 February 2025).