

Электрохимическая энергетика. 2023. Т. 23, № 3. С. 121–133

Electrochemical Energetics, 2023, vol. 23, no. 3, pp. 121–133

<https://energetica.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1608-4039-2023-23-3-121-133>, EDN: FYHKZY

Научная статья

УДК 621.355

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ С УЧЕТОМ ФИЗИЧЕСКИХ ОГРАНИЧЕНИЙ НА ДОСТУПНУЮ МОЩНОСТЬ

С. Г. Обухов[✉], Д. Ю. Давыдов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30

Обухов Сергей Геннадьевич, доктор технических наук, доцент, профессор отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетика, serob99@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7177-4036>

Давыдов Денис Юрьевич, кандидат технических наук, ассистент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетика, denisyudavydov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2998-6304>

Аннотация. Представлена универсальная комбинированная модель аккумуляторной батареи, построенная на основе модифицированного уравнения Шеферда и кинетической модели. Модель обеспечивает адекватное отображение основных характеристик аккумуляторной батареи в эксплуатационных режимах с учетом физических ограничений на доступную мощность. Приведены результаты верификации разработанной математической модели на примере свинцово-кислотной и литий-железо-фосфатной аккумуляторных батарей, которые доказывают ее более высокую точность по сравнению с базовой моделью аккумуляторной батареи MatLab/Simulink.

Ключевые слова: накопитель энергии, аккумуляторная батарея, математическая модель, разрядные характеристики

Для цитирования: Обухов С. Г., Давыдов Д. Ю. Математическая модель аккумуляторной батареи с учетом физических ограничений на доступную мощность // Электрохимическая энергетика. 2023. Т. 23, № 3. С. 121–133. <https://doi.org/10.18500/1608-4039-2023-23-3-121-133>, EDN: FYHKZY

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

Mathematical model of the electrochemical battery with physical constraints of available capacity

S. G. Obukhov[✉], D. Yu. Davydov

National Research Tomsk Polytechnic University

30 Lenin Avenue, Tomsk 634050, Russia

Sergey G. Obukhov, serob99@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7177-4036>

Denis Yu. Davydov, denisyudavydov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2998-6304>

Abstract. The article presents a universal combined model of the electrochemical battery, built on the basis of the modified Shepherd equation and the kinetic model. The proposed model provides the adequate mapping of the basic characteristics of the battery in operating mode, taking into account the physical constraints of the capacity available. The results of verification of the developed mathematical model using lead-acid and lithium-iron-phosphate batteries are presented. These results prove its higher accuracy in comparison with the basic model of MATLAB/Simulink electrochemical battery.

Keywords: energy storage unit, electrochemical battery, mathematical model, discharge characteristics

For citation: Obukhov S. G., Davydov D. Yu. Mathematical model of the electrochemical battery with physical constraints of available capacity. *Electrochemical Energetics*, 2023, vol. 23, no. 3, pp. 121–133 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1608-4039-2023-23-3-121-133>, EDN: FYHKZY

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

ВВЕДЕНИЕ

Приоритетным направлением развития современной энергетики является использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Внедрение технологий ВИЭ позволяет практически полностью удовлетворить растущий спрос на электроэнергию и во многом решить экологические проблемы, обусловленные выбросами углекислого газа. После непродолжительного экономического спада, вызванного пандемией COVID-19, возобновляемая энергетика выходит на привычные ежегодные темпы роста в 30–40% по объемам установленной мощности. В 2021 г. установленная мощность ВИЭ увеличилась более чем на 314 ГВт, а объем производства электроэнергии ВИЭ достиг отметки в 28.3% от мирового [1].

В настоящее время технологии возобновляемой энергетики находят практическое применение во многих отраслях промышленности, сельском хозяйстве, транспорте и жилищном строительстве. Особенно востребованы технологии ВИЭ в системах электроснабжения децентрализованных потребителей, стоимость генерируемой электроэнергии в которых зачастую является чрезвычайно высокой [2]. С учетом того, что мощность, генерируемая установками ВИЭ, крайне изменчива во времени, а потребителям необходимо гарантировать бесперебойную подачу электроэнергии, важным элементом большинства энергетических систем с ВИЭ является накопитель энергии. Применение накопителей энергии позволяет повысить эффективность электростанции за счет аккумуляирования излишков энергии в периоды ее избытка и отдачи потребителю в периоды дефицита [3]. Требованиям энергетических систем с ВИЭ по объемам и времени хранения энергии наилучшим образом соответствуют аккумуляторные батареи (АКБ), которые и получили наибольшее распространение [4, 5]. Область практического применения накопителей энергии на основе АКБ достаточ-

но обширна и постоянно расширяется: они используются в электротранспорте, в качестве источников аварийного и резервного электроснабжения, разнообразных мобильных устройствах и др. Совершенствование существующих и разработка новых устройств и технологий, использующих АКБ, определяет необходимость точного отображения их характеристик и режимов работы в процессе эксплуатации. Одним из основных инструментов решения обозначенных выше задач является математическое моделирование АКБ, что подтверждается стремительным ростом числа публикаций по данной тематике в периодических научных изданиях за последние годы [6]. Большое число исследований, посвященных моделированию АКБ, во многом объясняется тем, что на сегодняшний день на рынке представлено несколько различных типов аккумуляторов (свинцово-кислотные, литий-ионные, никель-кадмиевые и др.), каждый из которых имеет свои достоинства и недостатки и, соответственно, преимущественную область практического применения [7]. Применительно к моделированию данная ситуация привела к появлению двух разных подходов в разработке математических моделей АКБ: создание универсальных моделей, пригодных для исследования АКБ разных типов, и специализированных моделей, ориентированных на АКБ определенного целевого назначения.

С точки зрения детализации процессов в АКБ математические модели можно поделить на три большие группы: физические модели, модели на основе эквивалентных электрических схем замещения и эмпирические модели на основе экспериментальных данных. Подробный обзор и сравнительный анализ моделей АКБ разных видов рассмотрен в работах [8, 9].

Физические модели базируются на уравнениях, описывающих структуру материалов аккумуляторов и химические реакции, которые происходят внутри их элементов. Модели этого типа используются

для решения разнообразных задач (исследование физико-химических причин и закономерностей саморазряда свинцово-кислотной АКБ [10], анализ зарядного процесса и синтеза алгоритмов управления процессом восполнения энергозапаса никель-водородных аккумуляторов [11], исследование диффузии частиц, кинетики межфазного переноса и механической деформации твердотельных тонкопленочных литий-ионных аккумуляторов [12]). Данный тип моделей позволяет с высокой точностью отобразить состояние АКБ в процессе эксплуатации, однако для их построения требуется определение с высокой точностью большого числа параметров, описывающих электрохимические процессы. Эти модели находят применение при моделировании только определенных типов АКБ, они сложны, требуют значительных вычислительных ресурсов.

Для построения *моделей на основе эквивалентных электрохимических схем замещения* используют эквивалентные электрические схемы, элементы которых отображают определенные параметры АКБ. В зависимости от степени детализации модели данного типа могут быть достаточно простыми и включать всего несколько простых элементов [13, 14] или гораздо более сложными, с использованием большого числа RC-цепочек и нелинейных элементов [8, 15]. Достоинствами данных моделей являются хорошо разработанный и доступный инструментарий по методам расчета и анализа электрических цепей, возможность построения как статических, так и динамических моделей АКБ, а также использование единых схем замещения для моделирования АКБ разных типов. Общим недостатком таких моделей является их неспособность отображать некоторые важные процессы эксплуатации АКБ (изменение ЭДС в процессе отдачи/приема энергии, деградацию, ограничения доступной емкости и др.). Для учета этих и других факторов классические модели модифицируются введением

дополнительных элементов, например, известная модель Тевенина за счет добавления RC-цепочек имитирует перенапряжение при зарядке и включает резистор саморазряда [16]. Однако повышение адекватности моделей приводит к их значительному усложнению и создает серьезные трудности в определении их параметров.

Наиболее распространенной группой моделей, которые применяются при моделировании АКБ, являются *эмпирические модели* [8, 9]. Для их построения используют разного рода экспериментальные зависимости, которые отображают протекание какого-либо процесса или изменение параметра АКБ, которые необходимо исследовать при моделировании [17]. Достоинствами эмпирических моделей являются простота и приемлемая точность в отображении изучаемых процессов, возможность идентификации параметров моделей по данным технической спецификации и применение общих функциональных зависимостей для моделирования АКБ разных типов. Для повышения точности эмпирических моделей при идентификации их параметров все чаще используют популярные в последние годы нейронные сети и методы машинного обучения [18, 19]. Такой подход позволяет добиться высокой точности в отображении моделируемых характеристик АКБ, однако это приводит к значительному усложнению моделей, а область их практического применения ограничивается конкретными марками аккумуляторов, для которых имеется детализированная экспериментальная база данных.

На основе проведенного анализа научных работ по рассматриваемой тематике и с учетом того, что конечной целью проводимых исследований является разработка программного комплекса по оптимизации состава оборудования гибридных энергетических систем с ВИЭ был сделан выбор в пользу модифицированной модели Шеферда, предложенной авторами работы [20]. Данная модель является уни-

версальной и позволяет моделировать режимы АКБ разных типов, она достаточно проста и не требовательна к вычислительным ресурсам, параметры модели легко определяются по данным технической спецификации. Модель хорошо апробирована, ее адекватность подтверждена результатами многих исследований [17, 21, 22], о высоком качестве модели свидетельствует тот факт, что именно на ее основе построена базовая модель АКБ в программном комплексе MatLab/Simulink.

Известным недостатком математической модели АКБ, встроенной в MatLab/Simulink, является то, что она не учитывает физические ограничения на доступную мощность батареи, определяемые величиной ее остаточной емкости и значениями зарядно/разрядных токов. Для устранения данного недостатка используют разные приемы и методы. Например, авторы работы [23] предлагают корректировать величину остаточного заряда АКБ через специальную степенную логарифмическую функцию в зависимости от величины тока батареи. Данный подход позволяет повысить точность модели, применим к АКБ разных типов, но требует увеличения числа параметров модели, идентификация значений которых базируется на достаточно сложной вычислительной процедуре. Результаты исследований, проведенных в Национальной лаборатории возобновляемой энергетики (NREL) [24], показывают, что можно повысить точность рассматриваемой модели АКБ за счет введения в нее ряда регрессионных зависимостей, связывающих параметры модели с условиями эксплуатации. Предложенная модель обеспечивает высокое быстродействие, она достаточно просто идентифицируется, однако для ее практического применения необходимы детальные данные экспериментальных исследований, которые не приводятся в технической спецификации на АКБ.

В результате проведенных исследований разработана комбинированная модель АКБ, в которой по модифицированной мо-

дели Шеферда определяется напряжение батареи, а для моделирования изменения емкости используется кинетическая модель (KiBaM), предложенная в работе [25]. Данная модель обеспечивает учет физических ограничений на доступную мощность, она применима для моделирования АКБ разных типов, для идентификации ее параметров достаточно только данных технической спецификации.

В качестве основного инструмента при проведении наших исследований использовался программный комплекс MatLab/Simulink (версия 2020b).

ОПИСАНИЕ ПРЕДЛАГАЕМОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ

Модифицированная модель Шеферда описывается следующим уравнением [20]:

$$V_{\text{batt}} = E - R \cdot i - K \frac{Q}{Q - \int_0^t idt} \cdot \int_0^t idt - R_{\text{pol}} \cdot i^* + Exp, \quad (1)$$

где V_{batt} – напряжение на клеммах АКБ; E – ЭДС аккумулятора; R – внутреннее сопротивление АКБ; i – ток через аккумулятор; i^* – фильтрованный ток; K – постоянная поляризации; Q – полная (максимальная) емкость АКБ; R_{pol} – сопротивление поляризации; Exp – напряжение экспоненциальной зоны.

Авторы работы [20] ввели в модель понятие фильтрованного тока i^* (ток, пропущенный через фильтр низких частот), что позволяет отобразить инерционную реакцию напряжения АКБ на скачкообразное изменение тока. Кроме того, они предложили использовать два независимых уравнения для описания режимов разряда и заряда, в которых в зависимости от типа АКБ видоизменяются два последних слагаемых в уравнении (1). Например, для свинцово-кислотных АКБ эти слагаемые определя-

ются по следующим уравнениям:

$$R_{\text{pol}} = \begin{cases} K \frac{Q}{Q - \int_0^t idt} & \text{при } i > 0 \text{ (режим разряда),} \\ K \frac{Q}{\int_0^t idt + 0.1 \cdot Q} & \text{при } i < 0 \text{ (режим заряда);} \end{cases} \quad (2)$$

$$Exp = \begin{cases} A \cdot \exp(-B \cdot i \cdot t) & \text{при } i > 0 \text{ (режим разряда),} \\ A \cdot [1 - \exp(-B \cdot |i| \cdot t)] & \text{при } i < 0 \text{ (режим заряда),} \end{cases} \quad (3)$$

где A – амплитуда экспоненциальной зоны напряжения, B – обратная постоянная времени экспоненциальной зоны.

Модель напряжения идентифицируется по пяти параметрам (R , E , K , A , B), значения которых определяются по данным технической спецификации АКБ. Подробное описание модифицированной модели Шеферда, на которой основана предлагаемая модель АКБ, приведено в работе [20] и справочной системе MatLab/Simulink, процедура идентификации параметров модели объясняется в работе [22].

Для отображения процессов изменения емкости АКБ в процессе эксплуатации в предлагаемой модели используется модель КиВаМ [25], построенная на основе аналогии с простой гидравлической системой. В данной модели АКБ представляется в виде двух резервуаров (рис. 1), соединенных клапаном, проводимость которого определяется константой k' . Значение k' соответствует скорости процесса химической реакции. Один резервуар вмещает заряд (объем) q_1 , который доступен для непосредственного использования, а другой резервуар содержит химически связанный заряд q_2 . Передача заряда между резервуарами происходит в тех случаях, когда существует разница в уровнях заряда (напоре) в каждом резервуаре $h_1 - h_2 \neq 0$. Резервуары имеют одинаковую высоту, но разные сечения, а соответственно, и разные объемы. Если обозначить сечение «доступного» резервуара 1 переменной c , а «связанного» резервуара 2 переменной $(1 - c)$, то их суммарная площадь будет равна единице.

Тогда при полном заполнении резервуаров величина общего суммарного напора h_{max} будет соответствовать общей вместимости обоих баков – максимальному заряду батареи Q .

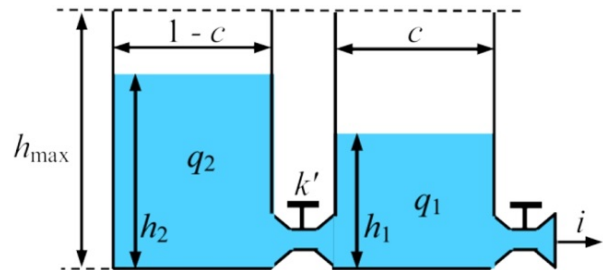


Рис. 1. Схематичное представление кинетической модели аккумуляторной батареи

Fig. 1. Schematic representation of the kinetic model of an electrochemical battery

Напор (уровень заряда) и емкость (заряд) резервуаров связываются следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} h_1 &= q_1/c, \\ h_2 &= q_2/(1-c), \end{aligned} \quad (4)$$

где q_1 – доступный заряд; q_2 – связанный заряд.

Регулятор, установленный на выходе из резервуара 1, работает таким образом, что расход жидкости (величина тока i) остается постоянным в течение отдельного временного шага:

$$\frac{dq_1}{dt} = -i - k' \cdot (h_1 - h_2), \quad (5)$$

$$\frac{dq_2}{dt} = k' \cdot (h_1 - h_2).$$

С использованием преобразований Лапласа авторами работы [25] получено решение уравнений (4) и (5), описывающих процессы в АКБ на временном шаге Δ :

$$\begin{aligned} q_1 &= q_{1,0} \cdot e^{-k \cdot \Delta t} + \frac{(q_0 \cdot k \cdot c - i) \cdot (1 - e^{-k \cdot \Delta t})}{k} - \\ &\frac{i \cdot c \cdot (k \cdot \Delta t - 1 + e^{-k \cdot \Delta t})}{k}, \\ q_2 &= q_{2,0} \cdot e^{-k \cdot \Delta t} + q_0 \cdot (1 - c) \cdot (1 - e^{-k \cdot \Delta t}) - \\ &\frac{i \cdot (1 - c) \cdot (k \cdot \Delta t - 1 + e^{-k \cdot \Delta t})}{k}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $q_{1.0}$ и $q_{2.0}$ – количество заряда в доступной и связанной емкостях соответственно, при $t = 0$, и значит $q_0 = q_{1.0} + q_{2.0}$; k – новая переменная, которая определяется по выражению

$$k = \frac{k'}{c \cdot (1 - c)}. \quad (7)$$

Для построения модели емкости АКБ необходимо определить три параметра: максимальную емкость аккумулятора Q (А·ч), константу скорости k и коэффициент емкости c . Параметры модели определяются по разрядным кривым или таблицам из технической спецификации на конкретную модель АКБ. Авторы модели [25] рекомендуют использовать три разрядных кривых для одно-, десяти- и двадцатичасового разрядного тока, что позволяет определить численные значения следующих функций:

$$F_{t_1, t_{10}} = \frac{q_{t=1}}{q_{t=10}}, \quad F_{t_1, t_{20}} = \frac{q_{t=1}}{q_{t=20}}, \quad (8)$$

где $q_{t=T}$ – разрядная емкость АКБ (А·ч) при времени разряда $t = T$ часов.

Неизвестные параметры модели c и k связаны между собой следующим выражением:

$$c = \frac{F_t \cdot (1 - e^{-k \cdot t_1}) \cdot t_2 - (1 - e^{-k \cdot t_2}) \cdot t_1}{\left\{ \begin{array}{l} F_t \cdot (1 - e^{-k \cdot t_1}) \cdot t_2 - (1 - e^{-k \cdot t_2}) \cdot t_1 - \\ - k \cdot F_t \cdot t_1 \cdot t_2 + k \cdot t_1 \cdot t_2 \end{array} \right\}}. \quad (9)$$

Уравнение (9) позволяет по любым двум выбранным F_t определить зависимости c от k и по их соответствию друг другу окончательно установить их значения. После определения параметров c и k по следующему уравнению определяется максимальная емкость АКБ:

$$Q = \frac{q_{t=T} \cdot \left[(1 - e^{-k \cdot t_1}) \cdot (1 - c) + k \cdot c \cdot t \right]}{k \cdot c \cdot t}. \quad (10)$$

Степень заряда (State of Charge – SOC), или остаточная емкость АКБ, рассчитыва-

ется по выражению

$$SOC(t) = SOC(t-1) + \frac{1}{Q} \int_0^t idt. \quad (11)$$

Для учета физических ограничений на доступную емкость (мощность) АКБ уравнение (11) было модифицировано введением «буферного» заряда q_{buff} :

$$SOC(t) = SOC(t-1) + \frac{1}{Q} \left[\int_0^t idt + q_{\text{buff}} \right]. \quad (12)$$

Физически q_{buff} отображает уменьшение доступной емкости АКБ в режимах разряда большими токами, а также ограничения на принимаемую зарядную мощность при высоком уровне остаточного заряда. Математически величина q_{buff} определяется по следующим уравнениям:

$$q_{\text{buff}} = \begin{cases} q_1 & \text{при } q_1 < 0, \\ 0 & \text{при } 0 < q_1 < q_{1 \text{ max}}, \\ q_1 - q_{1 \text{ max}} & \text{при } q_1 > q_{1 \text{ max}}. \end{cases} \quad (13)$$

На основе уравнений (1)–(13) в среде MatLab/Simulink была реализована математическая модель АКБ, упрощенная функциональная схема которой приведена на рис. 2.

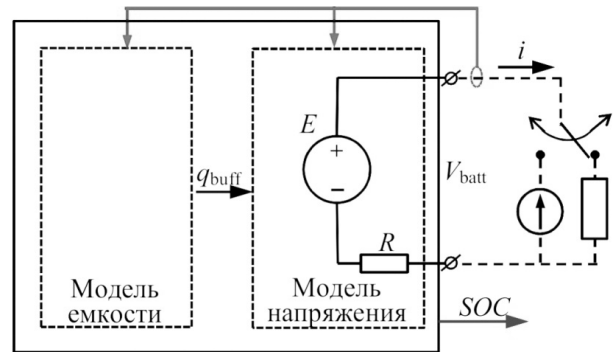


Рис. 2. Функциональная схема модели аккумуляторной батареи

Fig. 2. Functional scheme of an electrochemical battery model

Разработанная модель отображает динамическую реакцию напряжения на изменение тока АКБ и определяет текущую величину остаточного заряда, что позволяет

использовать ее для решения разнообразных задач, связанных с выбором и управлением режимами АКБ.

ВЕРИФИКАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Для верификации разработанной модели использовались данные технической спецификации двух АКБ разных типов, номинальной емкостью 200 Ач, от компаний Yellow Battery и CS Battery Energy CO., Limited [26, 27]:

- свинцово-кислотный аккумулятор панцирного типа с трубчатыми электродами и жидким электролитом OPzS 2V200Ah;
- литий-железо-фосфатный аккумулятор LFP 12.8V200Ah.

Данные типы АКБ допускают глубокий разряд и обеспечивают большое число зарядно-разрядных циклов, благодаря чему их часто используют в качестве накопителей энергии в автономных системах электроснабжения на основе ВИЭ.

По паспортным разрядным кривым АКБ идентифицированы параметры их математических моделей, которые представлены в таблице.

При проведении вычислительных экспериментов значения параметров, приве-

денные в таблице, использовались как для разработанной модели АКБ, так и встроенной модели MatLab/Simulink, что обеспечивает их корректное сравнение.

На рис. 3 представлены результаты моделирования разрядных характеристик АКБ при разных значениях разрядного тока, которые выражены в долях от величины номинальной емкости C .

Маркерами на рис. 3 показаны экспериментальные точки разрядных кривых, а линиями представлены результаты моделирования. Результаты моделирования показывают, что разработанная модель обеспечивает адекватное отображение разрядных характеристик АКБ с удовлетворительной точностью.

Для проверки возможностей модели отображать динамические характеристики АКБ была проведена серия вычислительных экспериментов при работе на разных профилях нагрузки. В качестве примера на рис. 4 представлены результаты моделирования режимов АКБ OPzS 2V200Ah при эксплуатации по типовому профилю энергетических систем на основе ВИЭ [28]. В данном нагрузочном профиле величина зарядно-разрядных токов АКБ изменяется в пределах от $-0.25C$ до $0.2C$, что обуславливает изменение уровня остаточного заряда батареи в широком диапазоне. Получен-

Параметры математических моделей аккумуляторных батарей

Table 1. Parameters of the mathematical models of electrochemical batteries

Наименование параметра	Значение параметра	
	OPzS 2V200Ah	LFP 12.8V200Ah
Модель напряжения		
ЭДС аккумулятора, E (В)	2.0602	12.90
Внутреннее сопротивление, R (Ом)	0.0017	0.0006
Постоянная поляризации, K (В/А·ч)	0.000282	0.00121
Амплитуда экспоненциальной зоны напряжения, A (В)	0.0476	1.724
Обратная постоянная времени экспоненциальной зоны, B (1/А·ч)	6.0	0.333
Модель емкости		
Максимальная емкость аккумулятора, Q (А·ч)	238.27	221.08
Константа скорости, k (А)	1.80	0.7
Коэффициент емкости, c	0.23	0.835

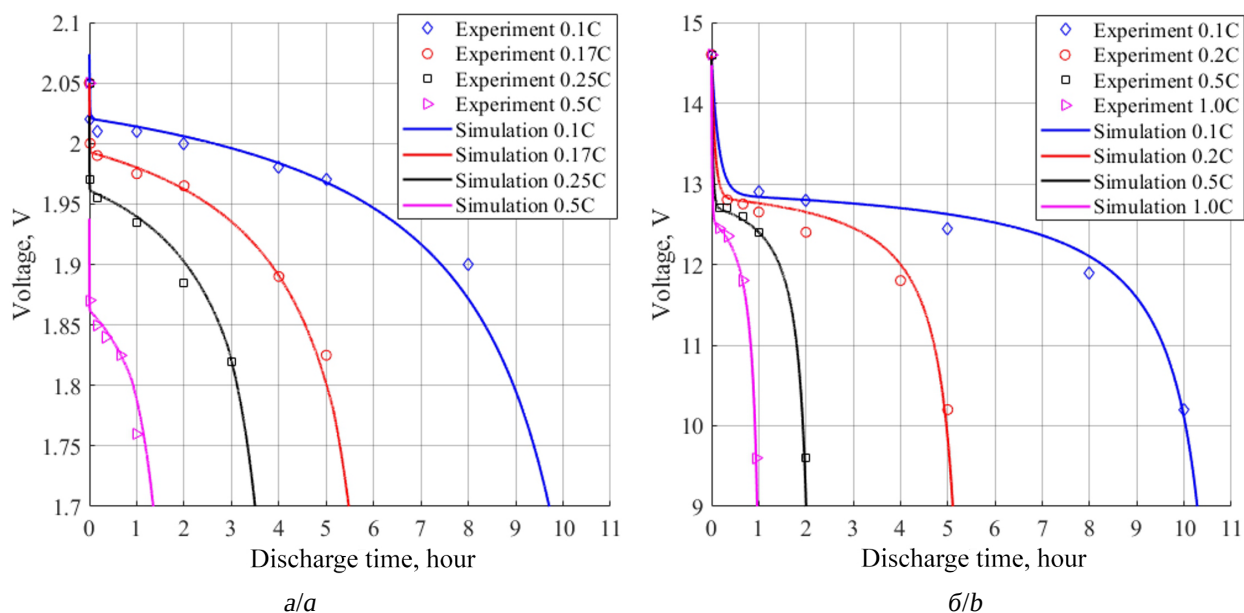


Рис. 3. Разрядные характеристики аккумуляторов: а – OPzS 2V200Ah; б – LFP 12.8V200Ah (цвет онлайн)
 Fig. 3. Battery discharge characteristics: a – OPzS 2V200Ah; b – LFP 12.8V200Ah (color online)

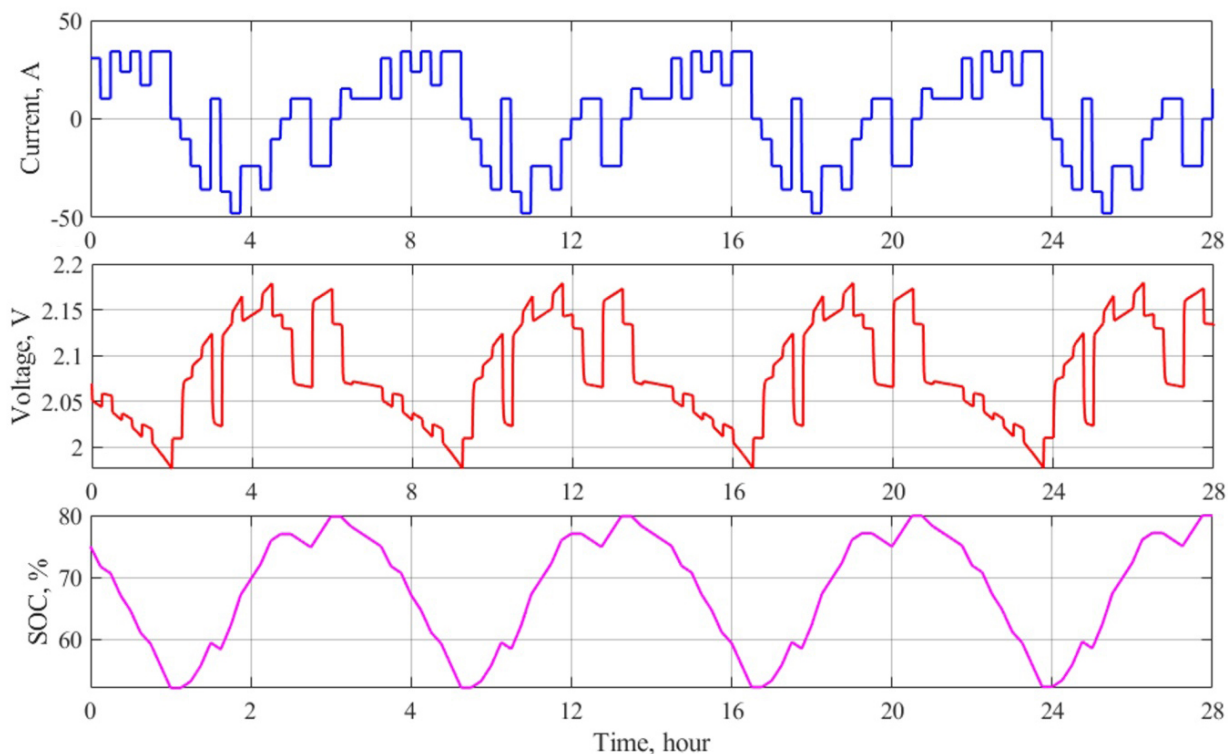


Рис. 4. Результаты моделирования режимов батареи OPzS 2V200Ah при эксплуатации по профилю автономных энергетических систем на основе ВИЭ (цвет онлайн)
 Fig. 4. The results of the simulation the operating modes of the battery OPzS 2V200Ah in the storage system of an autonomous energy system based on renewable energy sources (color online)

ные результаты моделирования хорошо согласуются с результатами тестовых экспериментов над АКБ серии OPzS, представленными в работе [28].

Оценка способности разработанной модели учитывать физические ограничения на величину доступной мощности АКБ проводилась путем сравнения с результатами моделирования, полученными на стандартной модели MatLab/Simulink. На рис. 5 представлены результаты моделирования разрядных кривых АКБ OPzS 2V200Ah в зависимости от величины снятой с батареи разрядной емкости.

Из результатов моделирования видно, что при величине разрядного тока 0.1C предложенная модель обеспечивает абсолютно идентичные результаты с базовой моделью MatLab/Simulink, а различия проявляются только при больших значениях разрядного тока. Объясняется это тем, что величина остаточной емко-

сти АКБ в MatLab-модели определяется простым суммированием израсходованных/полученных А·ч, а в предлагаемой модели корректируется на каждом шаге моделирования в соответствии с процедурой, описанной выше. Это позволяет более точно отобразить известный закон Пейкертга, определяющий зависимость доступной емкости АКБ от величины разрядного тока. Представленные на рис. 5 результаты моделирования свидетельствуют о том, что предложенная модель обеспечивает более точное отображение величины доступной емкости АКБ в сравнении с моделью MatLab/Simulink.

Следует отметить, что не учет фактора ограничения доступной мощности АКБ может приводить к существенным ошибкам моделирования при относительно больших значениях зарядно-разрядных токов, характерных для автономных энергетических систем на основе ВИЭ. Степень влияния

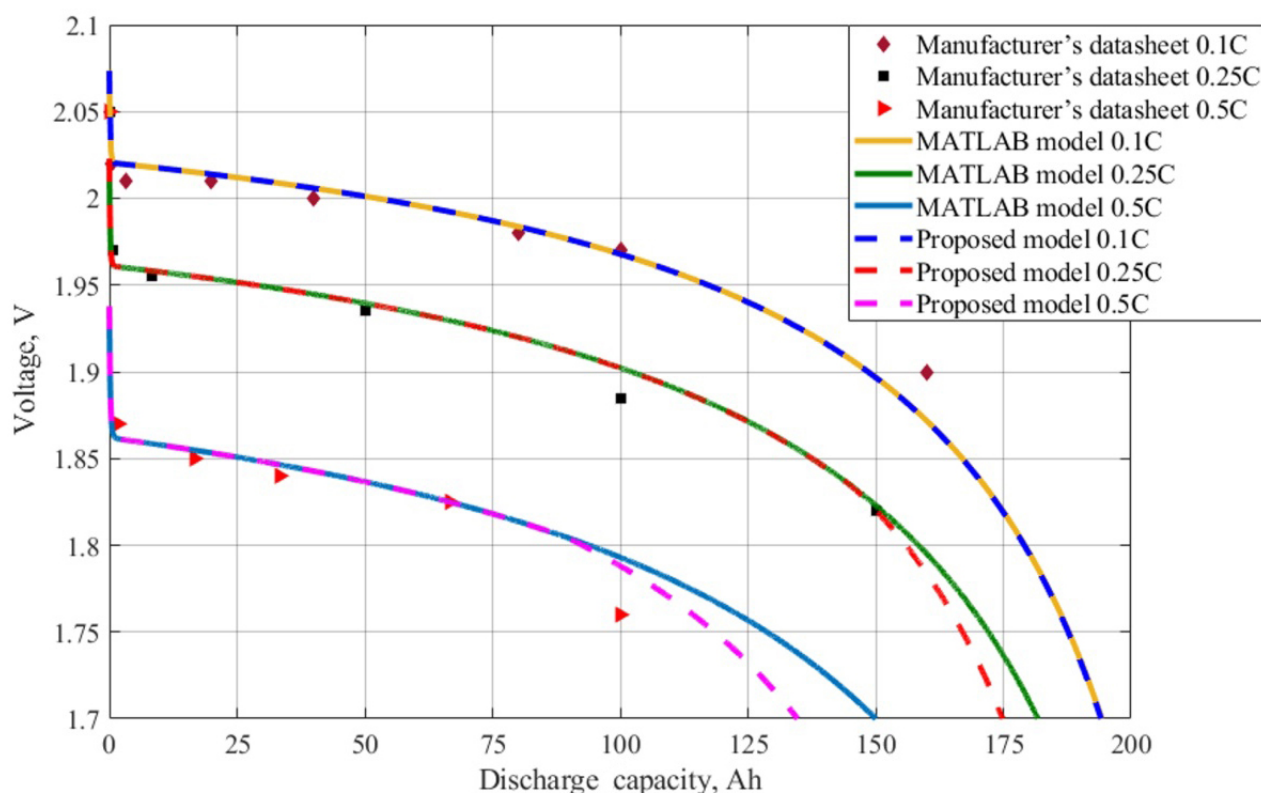


Рис. 5. Результаты моделирования разрядных характеристик батареи OPzS 2V200Ah (цвет онлайн)

Fig. 5. The simulation results of the battery OPzS 2V200Ah discharge characteristics (color online)

данного фактора на характеристики батареи во многом определяется ее типом. Результаты проведенных вычислительных экспериментов показали практически полную идентичность модельных характеристик АКБ LFP 12.8V200Ah, полученных на предлагаемой модели и модели MatLab/Simulink в широком диапазоне изменения разрядных токов, вплоть до величины, близкой к 1С. Для свинцово-кислотных АКБ влияние данного фактора необходимо учитывать уже при величине разрядных токов более 0.1С, что и демонстрируют результаты моделирования, приведенные на рис. 5.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлены результаты исследований по разработке универсальной модели АКБ, позволяющей моделировать режимы работы АКБ разных типов, используя в качестве исходных данных толь-

ко техническую спецификацию. Предложена комбинированная модель, построенная на основе модифицированного уравнения Шеферда и кинетической модели АКБ. Введено понятие «буферного» заряда, позволяющего учесть при моделировании физические ограничения на доступную емкость АКБ. Результаты верификации предложенной модели показали, что она обеспечивает адекватное отображение разрядных кривых и динамических характеристик свинцово-кислотных и литий-железо-фосфатных АКБ, отобранных для исследования, при этом точность модели выше по сравнению с базовой моделью MatLab/Simulink. Разработанная модель построена по модульному принципу, а это позволяет достаточно просто ее модифицировать, дополнив модулями деградации и температурной вариации параметров АКБ, что и является очередными задачами проводимого исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Renewables 2022 Global Status Report. Paris : REN21 Secretariat, 2022. 312 p. URL: https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2022_Full_Report.pdf (дата обращения: 18.06.2023).
2. Shivarama K. K., Sathish K. K. A review on hybrid renewable energy systems // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. Vol. 52(C). P. 907–916. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.187>
3. Обухов С. Г., Плотников И. А., Масолов В. Г. Анализ режимов работы накопителей энергии в автономных гибридных электростанциях с возобновляемыми источниками энергии // *Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология*. 2018. № 13–15. С. 55–67. <https://doi.org/10.15518/isjaee.2018.13-15.055-067>
4. Kebede A. A., Kalogiannis T., Van Mierlo J., Berecibar M. A comprehensive review of stationary energy storage devices for large scale renewable energy sources grid integration // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022. Vol. 159. Article number 112213. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112213>
5. Behabtu H. A., Messagie M., Coosemans T., Berecibar M., Anlay Fante K., Kebede A. A., Van Mierlo J. A Review of Energy Storage Technologies' Application Potentials in Renewable Energy Sources Grid Integration // *Sustainability*. 2020. Vol. 12 (24). Article number 10511. <https://doi.org/10.3390/su122410511>
6. Мартыанов А. С., Гриценко А. В., Шенелев В. Д., Граков Ф. Н., Плехушина В. С. Имитационная модель накопителя электрической энергии // *Транспорт. Транспортные сооружения. Экология*. 2020. № 4. С. 60–70. <https://doi.org/10.15593/24111678/2020.01.08>
7. Кулова Т. Л., Николаев И. И., Фатеев В. Н., Алиев А. Ш. Современные электрохимические системы аккумулирования энергии // *Kimya Problemleri*. 2018. Т. 16, № 1. С. 9–34.
8. Tamilselvi S., Gunasundari S., Karupiah N., Razak R. A., Madhusudan S., Nagarajan V. M., Sathish T., Shamim M. Z. M., Saleel C. A., Afzal A. A. Review on Battery Modelling Techniques // *Sustainability*. 2021. Vol. 13. Article number 10042. <https://doi.org/10.3390/su131810042>
9. Hu X., Li S., Peng H. A comparative study of equivalent circuit models for Li-ion batteries // *J. Power Sources*. 2012. Vol. 198. P. 359–367. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.10.013>
10. Волков С. С., Ильин М. Е., Рогачёв В. Д., Набатчиков А. В. Моделирование процессов изменения электрических характеристик свинцово-кислотного аккумулятора // *Вестник РГРТУ*. 2020.

№ 71. С. 196–208. <https://doi.org/10.21667/1995-4565-2020-71-196-208>

11. Стеганов Г. Б., Чудновский Ю. А. Математическая модель аккумуляторной батареи для зарядного процесса ступенчатым током // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. 2017. № 657. С. 34–40.

12. Song X., Lu Y., Wang F., Zhao X., Chen H. A coupled electro-chemo-mechanical model for all-solid-state thin film Li-ion batteries: The effects of bending on battery performances // J. Power Sources. 2020. Vol. 452. Article number 227803. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.227803>

13. Борисов П. В., Воробьев А. А., Константинов К. В., Самаркина И. К. Исследование характеристик литий-ионной аккумуляторной батареи // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2023. Т. 20, № 1. С. 207–221. <https://doi.org/10.20295/1815-588X-2023-1-207-221>

14. Nejad S., Gladwin D. T., Stone D. A. A systematic review of lumped-parameter equivalent circuit models for real-time estimation of lithium-ion battery states // J. Power Sources. 2016. Vol. 316. P. 183–196. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.03.042>

15. Барсегян К. Р., Перепелица М. А., Онищенко Д. О. Разработка математической модели литий-ионной аккумуляторной батареи и ее сравнение с существующими аналогами // Известия МГТУ «МАМИ». 2022. Т. 16, № 1. С. 81–88. <https://doi.org/10.17816/2074-0530-104574>

16. He H., Xiong R., Fan J. Evaluation of Lithium-Ion Battery Equivalent Circuit Models for State of Charge Estimation by an Experimental Approach // Energies. 2011. Vol. 4, № 4. P. 582–598. <https://doi.org/10.3390/en4040582>

17. Добрего К. В., Бладыко Ю. В. Моделирование аккумуляторных батарей и их сборок с учетом деградации параметров // 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>

18. Zhang S., Guo X., Zhang X. Modeling of back-propagation neural network based state-of-charge estimation for lithium-ion batteries with consideration of capacity attenuation // Advances in Electrical and Computer Engineering. 2019. Vol. 19, № 3.

Article number 10. <https://doi.org/10.4316/AECE.2019.03001>

19. Kashkooli A. G., Fathiannasab H., Mao Z., Chen Z. Application of artificial intelligence to state-of-charge and state-of-health estimation of calendar-aged lithium-ion pouch cells // J. Electrochem. Soc. 2019. Vol. 166, № 4. Article number A605. <https://doi.org/10.1149/2.0411904jes>

20. Tremblay O., Dessaint L. A. Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications // World Electric Vehicle Journal. 2009. Vol. 3, № 2. P. 289–298. <https://doi.org/10.3390/wevj3020289>

21. Фоменко Н. С., Григорьев А. С., Динишилов А. С. Особенности моделирования свинцово-кислотного аккумулятора // Электрохимическая энергетика. 2019. Т. 19, № 2. С. 81–89. <https://doi.org/10.18500/1608-4039-2019-19-2-81-89>

22. Campagna N., Castiglia V., Miceli R., Mastromauro R. A., Spataro C., Trapanese M., Viola F. Battery Models for Battery Powered Applications: A Comparative Study // Energies. 2020. Vol. 13, № 16. Article number 4085. <https://doi.org/10.3390/en13164085>

23. Song D., Sun C., Wang Q., Jang D. A Generic Battery Model and Its Parameter Identification // Energy and Power Engineering. 2018. Vol. 10, № 1. P. 10–27. <https://doi.org/10.4236/epe.2018.101002>

24. Raszmann E., Baker K., Shi Y., Christensen D. Modeling Stationary Lithium-Ion Batteries for Optimization and Predictive Control // IEEE Power and Energy Conference. Champaign, Illinois, February 23–24, 2017. Conference paper NREL/CP-5B00-67809. <https://doi.org/10.1109/PECI.2017.7935755>

25. Manwell J. F., McGowan J. G. Lead acid battery storage model for hybrid energy systems // Solar Energy. 1993. Vol. 50, № 5. P. 399–405. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(93\)90060-2](https://doi.org/10.1016/0038-092X(93)90060-2)

26. Компания CS Battery Energy CO Limited [сайт]. URL: <https://www.csbattery.cn/> (дата обращения: 18.06.2023).

27. Компания Yellow Battery [сайт]. URL: <https://yellow-battery.ru/> (дата обращения: 18.06.2023).

28. Bindner H., Cronin T., Lundsager P., Manwell J. F., Abdulwahid U., Baring-Gould I. Lifetime modelling of lead acid batteries. Denmark : Forskningscenter Risoe, 2005. Risoe-R, No. 1515(EN).

REFERENCES

1. *Renewables 2022 Global Status Report*. Paris: REN21 Secretariat, 2022. 312 p. Available at: https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2022_Full_Report.pdf (accessed June 18, 2023).

2. Shivarama K. K., Sathish K. K. A review on hybrid renewable energy systems. *Renewable and Sus-*

tainable Energy Reviews, 2015, vol. 52(C), pp. 907–916. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.187>

3. Obukhov S. G., Plotnikov I. A., Masolov V. G. The analysis of operation modes of energy stores in autonomous hybrid power plants with renewable energy resources. *Alternative Energy and Ecology*

(ISJAE), 2018, no. 13–15, pp. 55–67 (in Russian). <https://doi.org/10.15518/isjaee.2018.13-15.055-067>

4. Kebede A. A., Kalogiannis T., Van Mierlo J., Berecibar M. A comprehensive review of stationary energy storage devices for large scale renewable energy sources grid integration. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, vol. 159, article no. 112213. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112213>

5. Behabtu H. A., Messagie M., Coosemans T., Berecibar M., Anlay Fante K., Kebede A. A., Van Mierlo J. A Review of Energy Storage Technologies' Application Potentials in Renewable Energy Sources Grid Integration. *Sustainability*, 2020, vol. 12 (24), article no. 10511. <https://doi.org/10.3390/su122410511>

6. Martyanov A. S., Gritsenko A. V., Shep-elev V. D., Pletukhina V. S. Electric energy storage simulation model. *Transport. Transport Facilities. Ecology*, 2020, no. 3, pp. 60–70 (in Russian). <https://doi.org/10.15593/24111678/2020.01.08>

7. Kulova T. L., Nikolaev I. I., Fateev V. N., Aliev A. Sh. Modern electrochemical energy storage systems. *Kimya Problemleri*, 2018, vol. 16, no. 1, pp. 9–34 (in Russian).

8. Tamilselvi S., Gunasundari S., Karuppiyah N., Razak R. A., Madhusudan S., Nagarajan V. M., Sathish T., Shamim M. Z. M., Saleel C. A., Afzal A. A. Review on Battery Modelling Techniques. *Sustainability*, 2021, vol. 13, article no. 10042. <https://doi.org/10.3390/su131810042>

9. Hu X., Li S., Peng H. A comparative study of equivalent circuit models for Li-ion batteries. *J. Power Sources*, 2012, vol. 198, pp. 359–367. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.10.013>

10. Volkov S. S., Il'in M. E., Rogachyov V. D., Nabatchikov A. V. Modeling of the processes of changing the electrical characteristics of a lead-acid battery. *Bulletin of RGRTU*, 2020, no. 71, pp. 196–208 (in Russian). <https://doi.org/10.21667/1995-4565-2020-71-196-208>

11. Steganov G. B., Chudnovskij Yu. A. Mathematical model of a battery for a step-current charging process. *Proceedings of the Military Space Academy named after A. F. Mozhaisky*, 2017, no. 657, pp. 34–40 (in Russian).

12. Song X., Lu Y., Wang F., Zhao X., Chen H. A coupled electro-chemo-mechanical model for all-solid-state thin film Li-ion batteries: The effects of bending on battery performances. *J. Power Sources*, 2020, vol. 452, article no. 227803. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.227803>

13. Borisov P. V., Vorob'ev A. A., Konstantinov K. V., Samarkina I. K. Research of lithium-ion battery characteristics. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, no. 1, pp. 207–221 (in Russian). <https://doi.org/10.20295/1815-588X-2023-1-207-221>

14. Nejad S., Gladwin D. T., Stone D. A. A systematic review of lumped-parameter equivalent circuit models for real-time estimation of lithium-ion battery

states. *J. Power Sources*, 2016, vol. 316, pp. 183–196. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.03.042>

15. Barsegyan K. R., Perepeliza M. A., Onishchenko D. O. Mathematical model creation for the lithium-ion battery and its comparing with analogs. *Izvestiya MGTU MAMI*, 2022, vol. 16, no. 1, pp. 81–88 (in Russian). <https://doi.org/10.17816/2074-0530-104574>

16. He H., Xiong R., Fan J. Evaluation of Lithium-Ion Battery Equivalent Circuit Models for State of Charge Estimation by an Experimental Approach. *Energies*, 2011, vol. 4, no. 4, pp. 582–598. <https://doi.org/10.3390/en4040582>

17. Dobrego K. V., Bladyko Y. V. Modeling of Batteries and their Assemblies Taking into Account the Degradation of Parameters. *ENERGETIKA. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations*, 2021, vol. 64, no. 1, pp. 27–39 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-27-39>

18. Zhang S., Guo X., Zhang X. Modeling of back-propagation neural network based state-of-charge estimation for lithium-ion batteries with consideration of capacity attenuation. *Advances in Electrical and Computer Engineering*, 2019, vol. 19, no. 3, article no. 10. <https://doi.org/10.4316/AECE.2019.03001>

19. Kashkooli A. G., Fathiannasab H., Mao Z., Chen Z. Application of artificial intelligence to state-of-charge and state-of-health estimation of calendared lithium-ion pouch cells. *J. Electrochem. Soc.*, 2019, vol. 166, no. 4, article no. A605. <https://doi.org/10.1149/2.0411904jes>

20. Tremblay O., Dessaint L. A. Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications. *World Electric Vehicle Journal*, 2009, vol. 3, no. 2, pp. 289–298. <https://doi.org/10.3390/wevj3020289>

21. Fomenko N. S., Grigor'ev A. S., Dinisilov A. S. Features of Lead-Acid Battery Modelling. *Electrochemical Energetics*, 2019, vol. 19, no. 2, pp. 81–89 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1608-4039-2019-19-2-81-89>

22. Campagna N., Castiglia V., Miceli R., Mastromauro R. A., Spataro C., Trapanese M., Viola F. Battery Models for Battery Powered Applications: A Comparative Study. *Energies*, 2020, vol. 13, no. 16, article no. 4085. <https://doi.org/10.3390/en13164085>

23. Song D., Sun C., Wang Q., Jang D. A Generic Battery Model and Its Parameter Identification. *Energy and Power Engineering*, 2018, vol. 10, no. 1, pp. 10–27. <https://doi.org/10.4236/epe.2018.101002>

24. Raszmann E., Baker K., Shi Y., Christensen D. Modeling Stationary Lithium-Ion Batteries for Optimization and Predictive Control. *IEEE Power and Energy Conference*. Champaign, Illinois, February 23–24, 2017. Conference paper NREL/CP-5B00-67809. <https://doi.org/10.1109/PECI.2017.7935755>

25. Manwell J. F., McGowan J. G. Lead acid battery storage model for hybrid energy systems. *Solar Energy*, 1993, vol. 50, no. 5, pp. 399–405. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(93\)90060-2](https://doi.org/10.1016/0038-092X(93)90060-2)

26. *Company CS Battery Energy CO Limited* (site). Available at: <https://www.csbattery.cn/> (accessed June 18, 2023).

27. *Company Yellow Battery* (site). Available at: <https://yellow-battery.ru/> (accessed June 18, 2023).

28. Bindner H., Cronin T., Lundsager P., Manwell J. F., Abdulwahid U., Baring-Gould I. *Lifetime modelling of lead acid batteries*. Denmark, Forskningscenter Risoe, 2005. Risoe-R, No. 1515(EN).

Поступила в редакцию 06.07.2023; одобрена после рецензирования 28.07.2023; принята к публикации 15.09.2023
The article was submitted 06.07.2023; approved after reviewing 28.07.2023; accepted for publication 15.09.2023