

Научная статья

УДК 621.355

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30102>



С.Г. Обухов¹, Д.Ю. Давыдов¹ ✉, А.Л. Федянин²

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
г. Томск, Россия;

² Северский технологический институт – филиал федерального государственного
автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный
исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Северск, Россия

✉ denisyudavydov@gmail.com

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГИБРИДНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

Аннотация. Статья посвящена решению вопроса реализации математической модели аккумуляторных накопителей электроэнергии, обладающей универсальностью, высоким быстродействием и прочими качествами, необходимыми для выполнения анализа режимов работы и оптимизации в процессе разработки гибридных энергетических систем на базе возобновляемых источников энергии. Ввиду особенностей условий эксплуатации аккумуляторных батарей в составе гибридных систем, а также наличием специфических требований к их проектированию большинство предложенных моделей малоприспособлены для решения проектных задач. Разработанная модель основана на комбинации модифицированной модели Шеферда и кинетической модели электрохимических аккумуляторных батарей (KiBaM), что позволяет обеспечить возможность моделирования режимов работы аккумуляторов различных типов и алгоритмическую простоту идентификации параметров модели на основе данных технической спецификации. Проведенная экспериментальная апробация разработанной модели на основе серии вычислительных экспериментов показала, что модель адекватно отображает изменение основных параметров в динамических режимах и обладает высоким быстродействием, что позволяет ее использовать для решения задач имитационного моделирования режимов и оптимизации состава оборудования гибридных систем электроснабжения на основе ВИЭ.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, гибридные системы на основе ВИЭ, аккумуляторные накопители энергии, математическая модель, разрядные характеристики.

Для цитирования:

Обухов С.Г., Давыдов Д.Ю., Федянин А.Л. Математическая модель аккумуляторной батареи для проектирования гибридных энергетических систем на основе возобновляемых источников энергии // Глобальная энергия. 2024. Т. 30, № 1. С. 55–68. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30102>



S.G. Obukhov¹, D.Yu. Davydov¹ ✉, A.L. Fedyanin²

¹ National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia;

² Seversk Technological Institute – branch of State Autonomous Educational Institution of Higher Education «National Research Nuclear University «MEPhi», Seversk, Russia

✉ denisyudavydov@gmail.com

MATHEMATICAL MODEL OF A BATTERY FOR THE DESIGN OF HYBRID POWER SYSTEMS BASED ON RENEWABLE ENERGY SOURCES

Abstract. The article is devoted to solving the problem of implementing a mathematical model of battery energy storage that has versatility, high performance and other qualities necessary for performing analysis of operating modes and design optimization of hybrid renewable energy systems. Due to the specific operating conditions of hybrid systems, as well as the presence of specific requirements for their design, most of the proposed models were unsuitable for solving design problems. The proposed model is based on a combination of the modified Shepherd model and the kinetic battery model (KiBaM), which makes it possible to simulate the operating modes of various types of batteries with algorithmic simplicity of identifying model parameters based on technical specification data. The experimental testing of the developed model showed that the model provide adequate simulation results for the change in the main parameters of dynamic modes and has high performance, which allows it to be used to solve problems of simulation modeling of modes and optimization of the hybrid power supply system equipment based on renewable energy sources.

Keywords: renewable energy, hybrid renewable energy systems, battery energy storage, mathematical model, discharge characteristics.

Citation:

S.G. Obukhov, D.Yu. Davydov, A.L. Fedyanin, Mathematical model of a battery for the design of hybrid power systems based on renewable energy sources, *Global Energy*, 30 (01) (2024) 55–68, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30102>

Введение. В настоящее время электроснабжение децентрализованных потребителей осуществляется преимущественно от дизельных электростанций, обеспечение бесперебойного функционирования которых требует серьезных финансовых вложений – только через «северный завоз» ежегодно транспортируется до 3.1 млн. тонн различных грузов, из которых 75% составляют топливно-энергетические ресурсы¹. Эффективным и востребованным способом замещения части потребляемого дизельного топлива является внедрение гибридных энергетических систем (ГС) на основе возобновляемых источников энергии [1], потенциал возможного применения которых составляет порядка 100 тыс. малых изолированных поселений, расположенных в районах Дальневосточного края и Арктических территориях РФ, а также на объектах инфраструктуры Северного морского пути, объектах Министерства обороны и Министерства природных ресурсов [1, 2].

Ввиду значительной вариативности возможных конфигураций ГС, первостепенной задачей их проектирования является выбор оптимального состава и параметров основного энергетического оборудования с целью максимизации технико-экономических показателей и обеспечения требуемой надежности системы [3]. В совокупности с этим, стохастический характер

¹ Федеральный закон "О северном завозе" от 04.08.2023 N 411-ФЗ.

возобновляемых источников энергии (ВИЭ), определяющий большие вариации энергетического баланса системы (в суточных и сезонных временных интервалах), обуславливает необходимость тщательного анализа рабочих режимов ГС для обоснованного выбора генерирующего оборудования [4].

Единственным способом решения обозначенной проблемы на этапе проектирования ГС является имитационное моделирование рассматриваемой энергосистемы, что определяет необходимость использования математических моделей всех ее компонентов. Адекватность математических моделей является определяющим фактором успешного выбора оборудования ГС, и в конечном итоге определяет ее технико-экономические характеристики.

Система накопления электрической энергии является неотъемлемым компонентом ГС, обеспечивающим существенное повышение коэффициента установленной мощности (КИУМ) ВИЭ-генерации, сокращение числа часов работы дизель-генераторных установок, что способствует снижению эксплуатационных издержек и затрат на топливо [5].

Наибольшее практическое применение в качестве систем накопления энергии получили аккумуляторные батареи (АКБ), ввиду наилучшего соответствия требованиям ГС по объемам и времени хранения энергии [6].

Накопитель энергии является основным инструментом управления энергетическим балансом в изолированной энергетической системе, и именно он во многом определяет рабочие режимы всей электростанции [7]. Соответственно, важной задачей является разработка математической модели АКБ, адекватно отражающей ее поведение в процессе эксплуатации в составе ГС.

Несмотря на большое число известных математических моделей АКБ, большинство из них малоприменимы для применения в составе общей имитационной модели ГС. Определяется это двумя основными факторами – особенностью условий эксплуатации АКБ в составе ГС и специфическими требованиями к их проектированию.

Проведенный анализ данных факторов позволяет сформулировать 4 важных требования к математической модели аккумуляторной батареи для решения задач проектирования и оптимизации состава оборудования ГС.

1) Универсальность. Вследствие большого разнообразия ГС по целевому назначению, а соответственно, и по требованиям к бесперебойности электроснабжения, степени автономности, уровню замещения топлива и т.п. в их составе могут использоваться АКБ разных типов (свинцово-кислотные, литий-ионные, никель-кадмиевые и др.), каждый из которых имеет свои достоинства и недостатки в зависимости от конкретного применения. Соответственно, математическая модель АКБ должна обеспечивать возможность моделирования аккумуляторов разных типов.

2) Идентификация. В настоящее время на рынке представлено огромное количество АКБ разных типоразмеров. При этом их технические характеристики могут значительно различаться друг от друга не только в зависимости от химического состава, но и от технологии изготовления и производителя. Единственным достоверным способом определения параметров модели АКБ в данных условиях является использование данных технической спецификации, предоставляемой производителем АКБ.

3) Быстродействие. Решение задачи оптимизации ГС производится на основе сравнительного анализа технико-экономических характеристик множества возможных вариантов, полученных в результате имитационного моделирования ее эксплуатационных режимов на длительных временных интервалах. Соответственно, математические модели всех компонентов ГС должны быть не требовательны к вычислительным ресурсам и обеспечивать высокое быстродействие.

4) Учет ограничений. Основная функция накопителя энергии в составе ГС заключается в регулировании ее энергетического баланса, которая реализуется путем аккумуляции генерируемой установками ВИЭ электроэнергии в периоды ее избытка в системе, и возврата потребителю

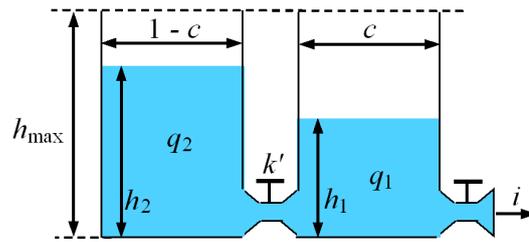


Рис. 1. Схематичное представление кинетической модели аккумуляторной батареи

Fig. 1. Schematic representation of battery kinetic model

в периоды дефицита. При анализе энергетического баланса необходимо учитывать, что полезно использовать всю доступную энергию на практике невозможно. В реальных АКБ любого типа существуют физические ограничения на величину доступной зарядно/разрядной мощности в зависимости от ее текущего состояния, обусловленные особенностью протекания электрохимических процессов. Кроме того, режимы работы АКБ во многом зависят от настроек контроллера заряда, который обеспечивает защиту АКБ от аварийных режимов и рекомендованные способы ее заряда/разряда.

Целью настоящих исследований является разработка математической модели аккумуляторной батареи для проектирования и оптимизации ГС с учетом обозначенных выше требований.

Теоретическая база

На основе выполненного анализа научных работ по теме исследования [8–13] предлагается использовать для достижения поставленной цели комбинированную модель АКБ на основе эмпирических моделей емкости и напряжения. В качестве модели емкости выбрана кинетическая модель батареи (КМАКБ) [14], модель напряжения построена на основе модифицированной модели Шеферда [15]. Основными критериями выбора данных моделей является их универсальность и применимость для решения задач моделирования режимов работы АКБ различных типов с возможностью определения параметров моделей на основании данных технической спецификации. Кроме того, эти модели хорошо апробированы, а их высокое качество подтверждается тем, что на основе модели Шеферда построена модель АКБ в популярном пакете моделирования MatLab/Simulink, а модель КМАКБ используется в известных программных комплексах проектирования и оптимизации ГС: HOMER, iHOGA и SAM [16].

1) Модель емкости

Концепция модели КМАКБ основана на представлении АКБ в виде гидравлической системы, состоящей из двух сообщающихся сосудов с сечениями c и $(1 - c)$, определяющих их вместимость, а соответственно, и величину зарядов: доступного q_1 , и химически связанного q_2 (рис. 1.). Резервуары соединены между собой клапаном, проводимость которого определяется константой k' , величина которой пропорциональна скорости химических реакций в АКБ. Полная емкость АКБ равна сумме зарядов в обоих резервуарах $q_{\max} = q_1 + q_2$, однако для непосредственного использования доступен только заряд в резервуаре 1.

Обозначив уровни заряда каждого резервуара через переменные h_1 и h_2 , авторами работы [14] получена следующая система уравнений, описывающих процессы в АКБ на каждом временном шаге Δt :

$$q_1 = q_{1.0} \cdot e^{-k \cdot \Delta t} + \frac{(q_0 \cdot k \cdot c - i) \cdot (1 - e^{-k \cdot \Delta t})}{k} - \frac{i \cdot c \cdot (k \cdot \Delta t - 1 + e^{-k \cdot \Delta t})}{k};$$

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

где $q_{1,0}$ и $q_{2,0}$ – количество заряда в доступном и связанном резервуарах, соответственно, при $t = 0$, и значит $q_0 = q_{1,0} + q_{2,0}$.

В полученной системе уравнений (1) используется новая переменная k , значение которой определяется по выражению:

$$k = \frac{k'}{c \cdot (1 - c)}. \quad (2)$$

Полная кинетическая модель АКБ включает всего три параметра: постоянная скорости k (1/ч), коэффициент емкости c и максимальная емкость аккумулятора q_{\max} (А·ч).

Оценка параметров модели выполняется на основе данных технической спецификации на конкретную модель АКБ или по экспериментально полученным разрядным характеристикам.

Согласно рекомендациям, приведенным в статье [14], оценку параметров следует производить по трем разрядным кривым для 1-го, 10-ти и 20-ти часового разрядного тока, что позволяет определить численные значения следующих функций:

$$F_{t_1, t_{10}} = \frac{q_{t=1}}{q_{t=10}}; \quad F_{t_1, t_{20}} = \frac{q_{t=1}}{q_{t=20}}, \quad (3)$$

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

По полученным значениям разрядных функций с помощью следующего уравнения определяются два параметра модели c и k :

$$c = \frac{F_t \cdot (1 - e^{-k \cdot t_1}) \cdot t_2 - (1 - e^{-k \cdot t_2}) \cdot t_1}{F_t \cdot (1 - e^{-k \cdot t_1}) \cdot t_2 - (1 - e^{-k \cdot t_2}) \cdot t_1 - k \cdot F_t \cdot t_1 \cdot t_2 + k \cdot t_1 \cdot t_2}. \quad (4)$$

Максимальная емкость АКБ определяется по уравнению:

$$q_{\max} = \frac{q_{t=T} \cdot [(1 - e^{-k \cdot t_1}) \cdot (1 - c) + k \cdot c \cdot t]}{k \cdot c \cdot t}. \quad (5)$$

При вычислении q_{\max} по уравнению (5) рекомендуется использовать значение разрядной емкости при низкой величине разрядного тока, например для 20-ти часового разряда.

Кинетическая модель АКБ определяет ограничения на максимальные токи заряда $I_{\text{char.max}}$ и разряда $I_{\text{dischar.max}}$ на каждом временном интервале имитационного моделирования. Значения максимальных зарядных/разрядных токов АКБ определяются из уравнений (1) путем подстановки в них следующих граничных условий: увеличение емкости АКБ в режиме заряда не должно превышать максимальных значений $q_1 = c \cdot q_{\max}$; снижение емкости АКБ в режиме разряда не может быть ниже нуля $q_1 = 0$. С учетом данных условий получены уравнения для определения максимальных значений токов:

$$I_{\text{char.max}} = \frac{-k \cdot c \cdot q_{\max} + k \cdot q_{1,0} \cdot e^{-k \cdot \Delta t} + q_0 \cdot k \cdot c \cdot (1 - e^{-k \cdot \Delta t})}{1 - e^{-k \cdot \Delta t} + c \cdot (k \cdot t - 1 + e^{-k \cdot \Delta t})};$$

$$I_{\text{dischar.max}} = \frac{k \cdot q_{1.0} \cdot e^{-k \cdot \Delta t} + q_0 \cdot k \cdot c \cdot (1 - e^{-k \cdot \Delta t})}{1 - e^{-k \cdot \Delta t} + c \cdot (k \cdot t - 1 + e^{-k \cdot \Delta t})}, \quad (6)$$

где $q_{1.0}$, $q_{2.0}$, q_0 – величина доступной, связанной и общей емкости АКБ в начале временного интервала.

2) Модель напряжения

Модель напряжения основана на известной модели Шеферда [17], которая в обобщенном виде описывается следующим уравнением:

$$V_{\text{batt}} = E_0 - R \cdot i - K \cdot \frac{q_{\text{max}}}{q_{\text{max}} - q} \cdot q + A \cdot e^{-B \cdot (q_{\text{max}} - q)}, \quad (7)$$

где V_{batt} – напряжение на клеммах АКБ в режиме разряда; i – ток через аккумулятор; R – внутреннее сопротивление АКБ; q_{max} , q – полная и израсходованная емкость АКБ, соответственно; E_0 , K , B и A – эмпирические константы, которые определяются по разрядным характеристикам АКБ из технической спецификации.

В классическом виде (7) модель Шеферда отображает только процессы разряда АКБ постоянным током, что существенно ограничивает возможность ее практического применения. Более удобной является модифицированная версия модели, предложенная авторами работы [15], которая описывается следующим уравнением:

$$V_{\text{batt}} = E_0 - R \cdot i - K \cdot \frac{q_{\text{max}}}{q_{\text{max}} - q} \cdot q - K \cdot \frac{q_{\text{max}}}{q_{\text{max}} - q} \cdot i^* + A \cdot e^{-B \cdot (q_{\text{max}} - q)}, \quad (8)$$

где i^* – «фильтрованный» ток, отображающий инерционную реакцию напряжения АКБ на скачкообразное изменение тока.

Детальное описание модифицированной модели Шеферда, на которой основана предлагаемая модель АКБ, приведено в работе [15] и справочной системе MatLab/Simulink. Данная модель напряжения позволяет описывать как статические, так и динамические характеристики АКБ разных типов, для идентификации ее параметров требуется только разрядная характеристика при малом токе разряда из данных технической спецификации.

3) Модуль учета ограничений

Важной функцией математической модели АКБ, предназначенной для эксплуатации в составе ГС, является адекватное отображение ее способности к приему/отдаче мощности. Доступная мощность АКБ зависит не только от физических ограничений, накладываемых КМАКБ моделью, но и во многом определяется настройками контроллера, под управлением которого работает АКБ. Настройки контроллера устанавливаются на основании данных технической спецификации, в которых определены следующие параметры АКБ: максимально допустимые токи заряда $I_{\text{data.char.max}}$ и разряда $I_{\text{data.dischar.max}}$, максимальное напряжение заряда $V_{\text{data.max}}$ и минимальное напряжение разряда $V_{\text{data.min}}$. Настройки контроллера обеспечивают защиту АКБ от аварийных режимов: перегрузок по току, перенапряжения и глубокого разряда, что в конечном итоге позволяет максимально эффективно использовать ее эксплуатационный ресурс.

Расчет доступной мощности АКБ производится в модуле учета ограничений, источником входного сигнала которого является величина располагаемой электрической мощности P_{set} , которая рассчитывается на каждом временном шаге имитационного моделирования ГС. Данная мощность определяется как разность между мощностями, генерируемыми установками возобновляемой энергетики P_{RES} и гарантированным источником питания P_{DGS} , в качестве которого

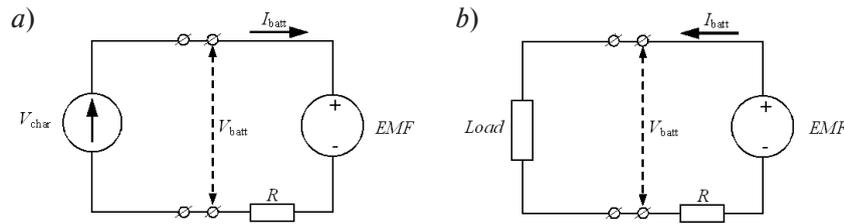


Рис. 2. Эквивалентная схема замещения аккумуляторной батареи: а) – в режиме заряда; б) – в режиме разряда

Fig. 2. Equivalent electrical circuit of a battery: a) – charge mode; b) – discharge mode

чаще всего используется дизель-генераторная установка, и мощностью, потребляемой нагрузкой P_{load} :

$$P_{set} = (R_{RES} + R_{DGS} - P_{load}) \cdot \eta_{char} \quad \text{в режиме заряда;} \quad (9)$$

$$P_{set} = (R_{RES} + R_{DGS} - P_{load}) \cdot \frac{1}{\eta_{dischar}} \quad \text{в режиме разряда,}$$

где η_{char} , $\eta_{dischar}$ – эффективность преобразования энергии АКБ в режимах заряда и разряда, соответственно.

На рис. 2 показаны эквивалентные схемы замещения, на основе которых устанавливаются ограничения на доступную мощность АКБ. В данных схемах АКБ представлена в виде источника напряжения с величиной, равной электродвижущей силе батареи (ElectroMotive Force – EMF), и внутренним сопротивлением R . Режим избытка располагаемой мощности ГС эквивалентен заряду АКБ от внешнего источника V_{char} , режим дефицита мощности равноценен разряду АКБ на внешнюю нагрузку $Load$.

Согласно уравнению Шеферда (7) электродвижущая сила АКБ определяется по уравнению:

$$EMF = E_0 - K \cdot \frac{q_{max}}{q_{max} - q} \cdot q + A \cdot e^{-B \cdot (q_{max} - q)}. \quad (10)$$

Согласно схеме замещения рис. 2а в режиме заряда только часть располагаемой мощности P_{set} непосредственно идет на заряд АКБ ($EMF \cdot I_{char}$), так как часть мощности теряется на внутреннем сопротивлении ($I_{char}^2 \cdot R$).

Решение квадратного уравнения, составленного из баланса мощностей, позволяет найти значения напряжения V_{char} и тока I_{char} внешнего источника в режиме заряда:

$$V_{char} = \frac{EMF + \sqrt{EMF^2 + 4 \cdot R \cdot |P_{set}|}}{2}; \quad (11)$$

$$I_{char} = \frac{EMF - \sqrt{EMF^2 + 4 \cdot R \cdot |P_{set}|}}{2 \cdot R}.$$

С учетом физического ограничения мощности АКБ, определяемого уравнением (6), и ограничением максимального тока, установленного в контроллере, значение тока АКБ в режиме заряда должно удовлетворять следующему условию:



Рис. 3. Функциональная схема модели аккумуляторной батареи

Fig. 3. Functional flowchart for battery model

$$I_{\text{batt}} \leq \min \{ I_{\text{char.max}}, I_{\text{data_char_max}} \}. \quad (12)$$

Кроме того, для защиты АКБ от перезаряда величина зарядного тока не должна превышать следующего значения:

$$I_{\text{batt}} \leq \frac{V_{\text{data_max}} - EMF}{R}. \quad (13)$$

Аналогично определяются ограничения тока АКБ в режиме разряда:

$$I_{\text{batt}} \leq \min \left\{ I_{\text{dischar.max}}, I_{\text{data_dischar_max}}, \frac{EMF - V_{\text{data_min}}}{R} \right\}. \quad (14)$$

4) Описание общей функциональной схемы модели

Упрощенная функциональная схема разработанной модели АКБ показана на рис. 3.

В модуле учета ограничений на каждом шаге имитационного моделирования режимов ГС по уравнениям (9)–(14) определяется значение тока, протекающего через АКБ. В модели емкости по уравнениям (1) рассчитываются величина израсходованного заряда q и величина остаточной емкости, или степень заряда (State of Charge – SOC):

$$SOC(t) = SOC(t-1) + \int_0^t \frac{I_{\text{batt}}}{q_{\text{max}}} dt. \quad (15)$$

Величина напряжения АКБ определяется в модели напряжения по уравнению (8). В данной работе не рассматриваются модели деградации и температурные зависимости, которые опционально могут быть включены в предлагаемую модель.

Результаты и обсуждение

Апробация разработанной модели проведена путем моделирования характеристик и режимов литий-железо-фосфатной АКБ, номинальной емкостью 100 Ач, выпускаемой под торговой маркой ESS-5120 [18]. АКБ данного типа выдерживают до 6000 зарядно-разрядных циклов при глубине разряда до 80%, благодаря чему широко применяются в качестве накопителей энергии в составе ГС. Основные данные технической спецификации АКБ ESS-5120 приведены в табл. 1, разрядные характеристики показаны на рис. 4.

На рис. 4а показаны паспортные графики разряда АКБ ESS-5120 разными токами, которые использовались для идентификации параметров математической модели. Маркерами на рис. 4б отображены экспериментально полученные точки разрядных кривых, а линиями – разрядные характеристики, построенные по результатам моделирования.

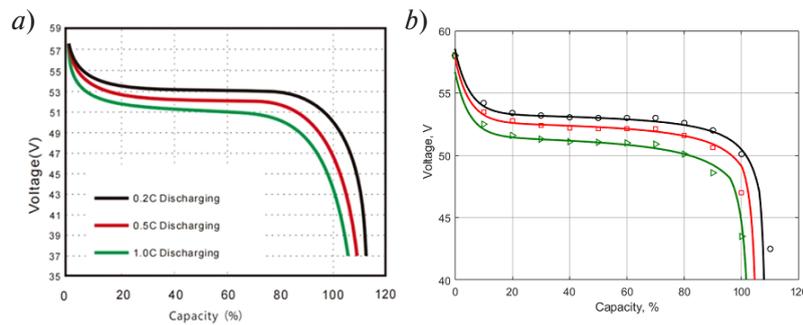


Рис. 4. Разрядные характеристики аккумулятора ESS-5120:

a – из паспорта технической спецификации; *b* – по результатам моделирования

Fig. 4. Discharge characteristics of ESS-5120 battery: *a* – datasheet characteristics; *b* – simulation results

Таблица 1

Данные технической спецификации аккумуляторной батареи ESS-5120

Table 1

ESS-5120 battery data sheet

Параметр	Значение
Химический состав ячеек	LiFePO4
Номинальное напряжение, В	51,2
Номинальная емкость, Ач	100
Максимальный ток заряда, А	100
Напряжение отключение заряда, В	56
Максимальный ток разряда, А	100
Напряжение отключение разряда, В	44,8

Представленные результаты свидетельствуют о том, что предлагаемая модель адекватно отображает разрядные характеристики АКБ с приемлемой точностью.

Динамические свойства модели оценивались путем моделирования режимов АКБ при работе по типовому профилю энергетических систем на основе ВИЭ, предложенному в работе [19].

На рис. 5 представлены результаты имитационного моделирования рабочих режимов АКБ при эксплуатации по данному нагрузочному профилю на суточном временном интервале.

Полученные в ходе проведенных вычислительных экспериментов результаты показывают, что модель адекватно отображает изменение основных параметров АКБ в динамических режимах и обладает высоким быстродействием, что позволяет ее использовать для решения задач имитационного моделирования режимов и оптимизации состава оборудования ГС.

Для проверки способности модели учитывать эксплуатационные ограничения были проведены вычислительные эксперименты, имитирующие разнообразные возможные режимы ее работы. На рис. 6 представлены расчетные зависимости изменения параметров АКБ, работающей в режиме заряда. В данных вычислительных экспериментах показана реакция АКБ на прием зарядной мощности в зависимости от уставок контроллера на величину максимального напряжения заряда V_{data_max} . В проведенных экспериментах в 1 час модельного времени происходит ступенчатое увеличение располагаемой в системе мощности P_{set} с 0 до 2000 Вт (применяются общепринятые соглашения: в режиме заряда – мощность отрицательная, в режиме разряда – положительная). Результаты моделирования показывают, что установленная величина V_{data_max}

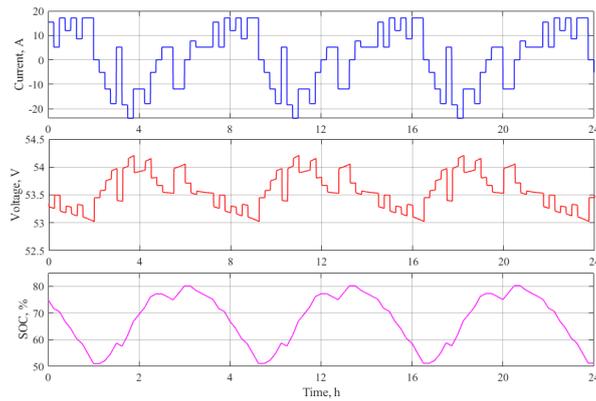


Рис. 5. Результаты моделирования режимов батареи ESS-5120 при эксплуатации по профилю автономных энергетических систем на основе ВИЭ
 Fig. 5. Simulation results of ESS-5120 battery modes during operation in autonomous energy systems based on renewable energy source

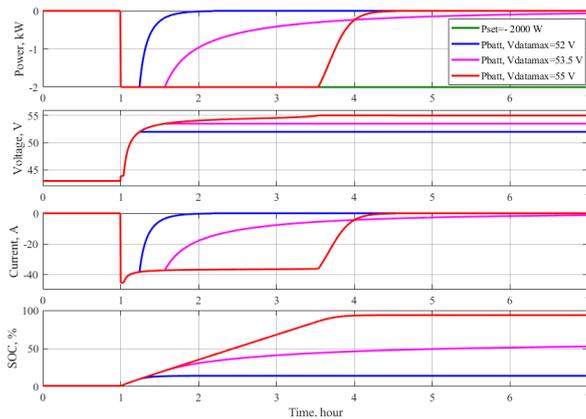


Рис. 6. Изменения параметров батареи ESS-5120 в режиме заряда при разных уставках на величину максимального напряжения заряда
 Fig. 6. Changes in the ESS-5120 battery parameters in charge mode at different settings by the value of the maximum charge voltage

во многом определяет время и степень заряда АКБ, и учет данного параметра чрезвычайно важен при моделировании.

На рис. 7 представлены расчетные зависимости изменения параметров АКБ, работающей в режиме разряда. В данных экспериментах демонстрируется способность модели к учету физических ограничений разрядной мощности, определяемых в модели емкости по току $I_{\text{dischar.max}}$, максимально допустимого тока разряда $I_{\text{data_dischar_max}}$ и минимального напряжения разряда $V_{\text{data_min}}$. В проведенных вычислительных экспериментах величина уставки минимального напряжения для всех опытов принята одинаковой и равной $V_{\text{data_min}} = 44,8 \text{ В}$, значение максимально допустимого тока разряда принято равным $I_{\text{data_dischar_max}} = 100 \text{ А}$. Отработку моделью установленных ограничений поясним на примере эксперимента с величиной располагаемой мощности $P_{\text{set}} = 6000 \text{ Вт}$. В данном эксперименте величина P_{set} скачкообразно изменяется от 0 до 6000 Вт в момент модельного времени $t = 1$ час. Из результатов моделирования видно, что на временном интервале от 1 до 2 часов АКБ не может обеспечить всю необходимую разрядную мощность (верхний график) так

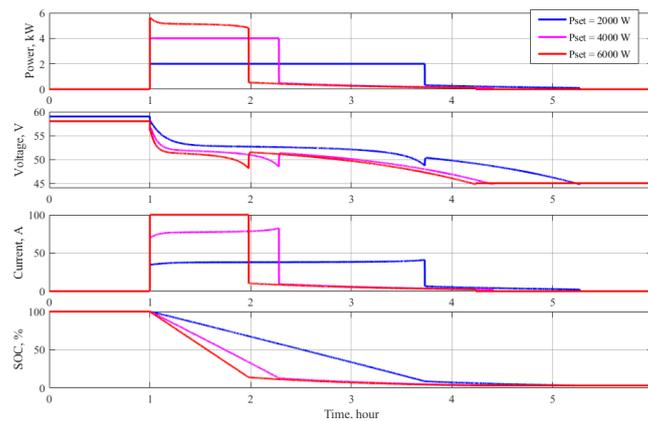


Рис. 7. Изменения параметров батареи ESS-5120 в режиме разряда при разных значениях разрядной мощности
 Fig. 7. Changes in the ESS-5120 battery parameters in the discharge mode at different discharge power values

как ее разрядный ток ограничен величиной 100 А. В момент модельного времени около 2 часов происходит уменьшение остаточного заряда АКБ до величины 15% от номинального, что приводит к ограничению величины разрядного тока до значений, определяемых в модели емкости. В момент времени 4,2 часа напряжение АКБ снижается до установленного минимального порога в 44,8 В – разряд АКБ прекращается.

Отметим, что современные контроллеры АКБ, которые применяются в составе ГС, производят переключение между режимами заряда и разряда не по величине напряжения, а по расчетным значениям остаточного заряда АКБ. Достоверное определение значений SOC в реальных условиях эксплуатации АКБ (особенно литий-ионных) является достаточно сложной технической задачей, для решения которой используют разнообразные приемы, одним из которых является широко применяемый метод прямого счета ампер-часов. Разработка эффективных алгоритмов управления режимами ГС является отдельным направлением исследований, и в рамках данной работы не рассматривается. Однако, предложенная модель позволяет исследовать разнообразные алгоритмы управления ее эксплуатационными режимами, что позволяет ее использовать не только для решения задач оптимизации состава оборудования ГС, но и в других смежных областях, связанных с электрохимическими накопителями энергии.

Заключение

В результате проведенных исследований разработана математическая модель АКБ, адекватно отражающая ее поведение в процессе эксплуатации в составе гибридных энергетических систем с возобновляемыми источниками энергии. Достоинством предложенной модели является учет физических ограничений на доступную мощность, что позволяет моделировать режимы АКБ с учетом предустановленных настроек контроллера заряда, обеспечивающих защиту АКБ от аварийных режимов и заданных условий эксплуатации. Для идентификации параметров модели достаточно данных технической спецификации, предоставляемой производителем, что выгодно отличает ее от большинства, представленных в литературных источниках, математических моделей АКБ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] Люкайтис В.Ю., Глушков С.Ю. Автономные энергокомплексы, гибридные конструкции с применением возобновляемых источников энергии // Силовое и энергетическое оборудование. Автономные системы. 2019. Т. 2, Вып. 2. – С. 111–120. DOI: 10.32464/2618-8716-2019-2-2-111-120

- [2] Сайт Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики». Режим доступа: <https://energy.hse.ru/distributed> (дата обращения: 06.05.2023).
- [3] Renewables 2022 Analysis and forecast to 2027. IEA Publications International Energy Agency. Режим доступа: www.iea.org (дата обращения: 06.05.2023).
- [4] **Обухов С.Г., Ибрагим А.** Оптимизация состава оборудования гибридных энергетических систем с возобновляемыми источниками энергии // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2020. Т. 20, № 2. С. 64–76. DOI: 10.14529/power200206
- [5] **Alsaidan I., Khodaei A., Gao W.** A Comprehensive Battery Energy Storage Optimal Sizing Model for Microgrid Applications // IEEE Transactions on Power Systems. 2018. 33 (4). pp. 3968–3980. DOI: 10.1109/TPWRS.2017.2769639
- [6] **Ogunniyi E.O., Pienaar H.** Overview of battery energy storage system advancement for renewable (photovoltaic) energy applications // 2017 International Conference on the Domestic Use of Energy (DUE). Cape Town, South Africa, 2017, pp. 233–239. DOI: 10.23919/DUE.2017.7931849
- [7] **Обухов С.Г., Плотников И.А., Масолов В.Г.** Анализ режимов работы накопителей энергии в автономных гибридных электростанциях с возобновляемыми источниками энергии // Альтернативная энергетика и экология (ISJAEЕ). 2018. № 13–15. С. 55–67. DOI: 10.15518/isjaee.2018.13-15.055-067
- [8] **Tamilselvi S., Gunasundari S., Karuppiah N., Razak R.K. 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. 13. 10042. DOI: 10.3390/su131810042
- [9] **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 // Journal of Power Sources. 2022. Vol. 452. 227803. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2020.227803
- [10] **Доброго 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. DOI: 10.21122/1029-7448-2021-64-1-27-39
- [11] **Wang Y., Tian J., Sun Z., Wang L., Xu R., Li M., Chen Z.** A comprehensive review of battery modeling and state estimation approaches for advanced battery management systems // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2020. Vol. 131. 110015. DOI: 10.1016/j.rser.2020.110015
- [12] **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 // Adv. Electr. Comput. Eng. 2019. 19. pp. 3–10.
- [13] **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. 166. A605. DOI: 10.1149/2.0411904jes
- [14] **Manwell J.F., McGowan J.G.** Lead acid battery storage model for hybrid energy systems // Solar Energy. 1993. Vol. 50. Iss. 5. pp. 399–405. DOI: 10.1016/0038-092X(93)90060-2
- [15] **Tremblay O., Dessaint L.-A.** Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications // World Electr. Veh. J. 2009. 3. pp. 289–298. DOI: 10.3390/wevj3020289
- [16] **Kavadias K.A., Triantafyllou P.** Hybrid Renewable Energy Systems' Optimisation. A Review and Extended Comparison of the Most-Used Software Tools // Energies. 2021. 14. 8268. DOI: 10.3390/en14248268
- [17] **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. Pp. 657–664.
- [18] EVLithium Режим доступа: www.evlithium.com/ (дата обращения: 15.04.2023).
- [19] **Bindner H., Cronin T., Lundsage, P., Manwell J. F., Abdulwahid U., Baring-Gould I.** Lifetime modelling of lead acid batteries. Denmark. Forskningscenter Risoe. Risoe-R; No. 1515 (EN), 2005.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ОБУХОВ Сергей Геннадьевич – профессор, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, д-р техн. наук.

E-mail: serob99@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7177-4036>

ДАВЫДОВ Денис Юрьевич – старший преподаватель, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, канд. техн. наук.

E-mail: denisyudavydov@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2998-6304>

ФЕДЯНИН Александр Леонидович – доцент, заведующий кафедрой, Северский технологический институт – филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», канд. техн. наук.

E-mail: alfedyanin82@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7658-1249>

REFERENCES

- [1] **V.Yu. Lukaitis, S.Yu. Glushkov**, Autonomous power generation facilities, hybrid structures comprising renewable energy sources, Power and Autonomous equipment, 2 (2) (2019) 111–120. DOI: 10.32464/2618-8716-2019-2-2-111-120
- [2] National Research University Higher School of Economics, <https://energy.hse.ru/distributed>. Accessed May 06, 2023.
- [3] Renewables 2022 Analysis and forecast to 2027, IEA Publications International Energy Agency, www.iea.org. Accessed May 06, 2023.
- [4] **S.G. Obukhov, A. Ibragim**, Methodology of optimum unit commitment of energy systems with renewable energy sources, Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering, 20 (2) (2020) 64–76. DOI: 10.14529/power200206
- [5] **I. Alsaidan, A. Khodaei, W. Gao**, A Comprehensive Battery Energy Storage Optimal Sizing Model for Microgrid Applications, IEEE Transactions on Power Systems, 33 (4) (2018) 3968–3980. DOI: 10.1109/TPWRS.2017.2769639
- [6] **E.O. Ogunniyi, H. Pienaar**, Overview of battery energy storage system advancement for renewable (photovoltaic) energy applications, International Conference on the Domestic Use of Energy (DUE), Cape Town, South Africa, (2017) 233–239. DOI: 10.23919/DUE.2017.7931849
- [7] **S.G. Obukhov, I.A. Plotnikov, V.G. Masolov**, The analysis of operation modes of energy stores in autonomous hybrid power plants with renewable energy resources, Alternative Energy and Ecology (ISJAE), (13-15) (2018) 55–67. DOI: 10.15518/isjaee.2018.13-15.055-067
- [8] **S. Tamilselvi, S. Gunasundari, N. Karuppiah, R.K. A Razak, S. Madhusudan, V.M. Nagarajan, T. Sathish, M.Z.M. Shamim, C.A. Saleel, A. Afzal**, A Review on Battery Modelling Techniques, Sustainability, 13 (18) (2021) 10042. DOI: 10.3390/su131810042
- [9] **X. Song, Y. Lu, F. Wang, X. Zhao, H. Chen**, A coupled electro-chemo-mechanical model for all-solid-state thin film Li-ion batteries: The effects of bending on battery performances, Journal of Power Sources, 452 (2020) 227803. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2020.227803
- [10] **K.V. Dobrego, V.V. Bladyko**, Modeling of Batteries and their Assemblies Taking into Account the Degradation of Parameters, ENERGETIKA. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations, 64 (1) (2021) 27–39. DOI: 10.21122/1029-7448-2021-64-1-27-39

- [11] **Y. Wang, J. Tian, Z. Sun, L. Wang, R. Xu, M. Li, Z. Chen**, A comprehensive review of battery modeling and state estimation approaches for advanced battery management systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 131 (2020) 110015. DOI: 10.1016/j.rser.2020.110015
- [12] **S. Zhang, X. Guo, X. Zhang**, Modeling of back-propagation neural network based state-of-charge estimation for lithium-ion batteries with consideration of capacity attenuation, *Adv. Electr. Comput. Eng*, 19 (2019) 3–10.
- [13] **A.G. Kashkooli, H. Fathiannasab, Z. Mao, Z. Chen**, Application of artificial intelligence to state-of-charge and state-of-health estimation of calendar-aged lithium-ion pouch cells, *J. Electrochem. Soc*, 166 (2019) A605. DOI: 10.1149/2.0411904jes
- [14] **J.F. Manwell, J.G. McGowan**, Lead acid battery storage model for hybrid energy systems, *Solar Energy*, 50 (5) (1993) 399–405. DOI: 10.1016/0038-092X(93)90060-2
- [15] **O. Tremblay, L.-A. Dessain**, Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications, *World Electr. Veh. J.*, 3 (2009) 289–298. DOI: 10.3390/wevj3020289
- [16] **K.A. Kavadias, P. Triantafyllou**, Hybrid Renewable Energy Systems' Optimisation. A Review and Extended Comparison of the Most-Used Software Tools, *Energies*, 14 (2021) 8268. DOI: 10.3390/en14248268
- [17] **C.M. Shepherd**, Design of Primary and Secondary Cells. Part 2. An Equation Describing Battery Discharge, *Journal of Electrochemical Society*, 122 (7) (1965) 657–664.
- [18] EVLithium, www.evlithium.com. Accessed May 06, 2023.
- [19] **H. Bindner, T. Cronin, P. Lundsager, J.F. Manwell, U. Abdulwahid, I. Baring-Gould**, Lifetime modelling of lead acid batteries, Denmark, Forskningscenter Risoe. Risoe-R, No. 1515 (EN) (2005).

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Sergey G. OBUKHOV – *National Research Tomsk Polytechnic University*.
E-mail: serob99@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7177-4036>

Denis Yu. DAVYDOV – *National Research Tomsk Polytechnic University*.
E-mail: denisyudavydov@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2998-6304>

Alexander L. FEDYANIN – *Seversk Technological Institute - branch of State Autonomous Educational Institution of Higher Education «National Research Nuclear University «MEPhI»*.
E-mail: alfedyanin82@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7658-1249>

Поступила: 09.11.2023; Одобрена: 29.11.2023; Принята: 29.11.2023.
Submitted: 09.11.2023; Approved: 29.11.2023; Accepted: 29.11.2023.