

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-3-215-232>

УДК 621.355:004.94

К вопросу создания гибридных систем накопления электроэнергии

К. В. Доброго¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2023
Belarusian National Technical University, 2023

Реферат. Системы накопления электрической энергии находят широкое применение в электротранспорте, энергетике, для обеспечения автономного электроснабжения и регулирования нагрузки энергосистем. Один из способов увеличения технической и экономической эффективности накопителей – их гибридизация, т. е. создание накопителей, состоящих из блоков разнотипных батарей. В литературе отсутствуют систематический анализ качественно-количественных эффектов гибридизации и соответствующие методические рекомендации по выбору схемы и оценке эффективности гибридизации. В статье этот вопрос рассмотрен с теоретической и методической позиций, даны рекомендации для конструирования накопителей, обслуживающих солнечные или ветростанции малой мощности. Сделан краткий обзор данных по показателям стоимости буферизации электроэнергии литий-ионными, свинцовыми аккумуляторами и суперконденсаторами. Предложена методика определения необходимости и степени гибридизации накопителя энергии на основе простейших зависимостей параметров накопителя от степени гибридизации. Введены понятия коэффициента синергетического эффекта гибридизации и степени внутренней буферизации электроэнергии. Представлена количественно-качественная модель оценки эффективности гибридизации. Предложен методический подход для расчета степени внутренней рекуперации и оценки коэффициента синергетического эффекта гибридизации. Показано, что в общем случае дополнение литий-ионных аккумуляторов блоком суперконденсаторов не приводит к снижению стоимости буферизации электроэнергии ввиду высокого отношения стоимости буферизации суперконденсатором к стоимости буферизации литий-ионными аккумуляторами. При этом экономическая целесообразность использования суперконденсаторов для компенсации высоких импульсных нагрузок может быть определена на основе анализа частотного спектра графика нагрузок накопительного блока. Разработанные модели и подходы могут найти применение при проектировании электрохимических систем накопления энергии для заданных условий эксплуатации.

Ключевые слова: электрохимический аккумулятор, гибридный накопитель энергии, суперконденсатор, ресурс аккумулятора, моделирование аккумуляторных батарей, стоимость буферизации электроэнергии, синергетический эффект

Для цитирования: Доброго, К. В. К вопросу создания гибридных систем накопления электроэнергии / К. В. Доброго // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2023. Т. 66, № 3. С. 215–232. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-3-215-232>

Адрес для переписки

Доброго Кирилл Викторович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 368-11-57
kirilldobrego@gmail.com

Address for correspondence

Dobrego Kirill V.
Belarusian National Technical University
65/2, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 368-11-57
kirilldobrego@gmail.com

On the Problem of Arrangement of Hybrid Energy Storage Systems

K. V. Dobrego¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Electric energy storage systems are widely used in electric transport, power engineering and in order to provide autonomous power supply and load regulation of power systems. One of the ways to increase the technical and economic efficiency of storage devices is their hybridization, i. e. the creation of storage devices consisting of blocks of different types of batteries. The special literature contains no systematic analysis of qualitative and quantitative effects of hybridization and corresponding methodological recommendations for choosing a scheme and evaluating the effectiveness of hybridization. In the present article, this issue is considered from a theoretical and methodological standpoint, recommendations are given for the design of storage devices serving solar or low-power wind farms. A brief overview of data on the cost of buffering electricity with lithium-ion, lead-acid batteries and supercapacitors is made. A method is proposed for determining the necessity and degree of hybridization of an energy storage device based on the simplest dependencies of the storage parameters on the degree of hybridization. The notions of the coefficient of synergetic effect of hybridization and the degree of internal buffering of electricity are introduced. A quantitative-and-qualitative model for evaluating the effectiveness of hybridization is presented. A methodological approach is proposed for calculating the degree of internal recovery and evaluating the coefficient of synergetic effect of hybridization. It is shown that, in general, the adding of supercapacitor unit to lithium-ion batteries a does not lead to a reduction in the cost of buffering electricity due to the high ratio of the cost of buffering with a supercapacitor to the cost of buffering with lithium-ion batteries. At the same time, the economic feasibility of using supercapacitors to compensate for high pulse loads can be determined on basis of the analysis of the frequency spectrum of the load graph of the storage unit. The developed models and approaches can be used in the design of electrochemical energy storage systems for specified operating conditions.

Keywords: electrochemical battery, hybrid energy storage, supercapacitor, battery life, battery simulation, cost of buffering electricity, synergetic effect

For citation: Dobrego K. V. (2023) On the Problem of Arrangement of Hybrid Energy Storage Systems. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 66 (3), 215–232. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-3-215-232> (in Russian)

Введение

В настоящее время в мире все шире применяются системы накопления электрической энергии. Это связано с развитием электротранспорта, зеленой энергетики, а также необходимостью регулирования нагрузки энергосистем. Рост рынка аккумуляторных батарей (АКБ) в последние десятилетия составлял 20–30 % [1]. Согласно прогнозу Bloomberg NEF от 15 ноября 2021 г., мощность и емкость систем накопления электроэнергии, не считая гидроаккумулирующие электростанции, вырастут соответственно до 358 ГВт и 1028 ГВт·ч к концу 2030 г. Основной объем накопления осуществляется электрохимическими системами накопления энергии (ЭХСНЭ).

В Республике Беларусь реализуется Комплексная программа развития электротранспорта на 2021–2025 гг., утвержденная постановлением Совета Министров от 9 апреля 2021 г. № 213, в рамках которой строятся

специализированные блоки ЭХСНЭ, а также исследуется возможность их использования для выравнивания графика нагрузок, улучшения качества электроэнергии. Конструктивно ЭХСНЭ состоят из блоков АКБ, преобразования тока и напряжения, систем контроля за состоянием аккумуляторных ячеек и управления их зарядом-разрядом.

Технические решения для построения ЭХСНЭ хорошо известны, однако вопрос повышения их экономической эффективности остается на повестке дня. Показателем экономической эффективности отдельно взятой ЭХСНЭ является нормированная стоимость запасенной электроэнергии (LCOE) [2], обобщенно называемая стоимостью буферизации. Ее уменьшение достигается как за счет снижения стоимости составляющих ЭХСНЭ элементов, так и за счет увеличения ресурса работы АКБ. Соответственно, исследуются новые типы АКБ и разрабатываются методы увеличения ресурса существующих, включая совершенствование методов их диагностики, управления [3], построение гибридных ЭХСНЭ, состоящих из блоков разнотипных батарей. Идея использования гибридных накопителей применительно к автономным потребителям и электромобилям представляется в [4] следующим образом. В системе, отвечающей определенным требованиям по запасенной энергии и мощности энергообеспечения, может быть использован гибридный накопитель, один компонент которого обеспечивает потребность по общей энергии накопителя, а второй – по мощности электроснабжения. При этом хотя бы один из общих параметров накопителя (объем, масса или стоимость) должен быть лучше, чем в случае, когда необходимые энергия и мощность обеспечиваются однородными АКБ.

В [4] приведены оценки снижения инвестиционной стоимости накопительного блока автомобиля за счет замены оригинального накопительного литий-ионного блока гибридным из модифицированных литий-ионных и свинцово-кислотных АКБ (табл. 1).

Таблица 1

**Экономический эффект гибридации накопительного блока
для гибридного автобуса Mercedes-Benz Citaro [4]**
**Economic effect of hybridization of the storage block
for a Mercedes-Benz Citaro hybrid bus [4]**

	Стоимость 1 кВт·ч, дол.	Стоимость компонента, дол.	Токвый С-режим для размерности емкости, кВт·ч	Энергия, кВт·ч	Мощность, кВт
Оригинальный блок Li-ion	800	15520	9С	19,4	180
Блок 1 модифици- рованный Li-ion	500	5500	2С	11	22
Блок 2 Pb-acid	300	1350	35С	4,5	158
Эффект замены оригинального блока	–	8670	–	–3,9	–

С методической точки зрения оценки [4] не полны, поскольку экономический эффект сводится к изменению инвестиционной стоимости накопительного блока и отсутствуют оценки стоимости буферизации электро-

энергии. Кроме того, не рассмотрено увеличение веса и объема накопителя при добавлении в него свинцовых АКБ.

В [5] исследованы технический эффект и экономическая целесообразность дополнения свинцово-кислотной тяговой батареи электропогрузчика модулем суперконденсаторов (СК). В силу большой доли импульсных нагрузок и рекуперации энергии при работе погрузчика применение СК оказывается экономически эффективным. Методом моделирования и экспериментально показано, что блок СК емкостью 165 Ф существенно снижает амплитуду токовых нагрузок основного блока, на 15 % увеличивает его рабочую емкость, повышает эффективность рекуперации электроэнергии, в 2–3 раза увеличивает ресурс циклирования батареи. Это приводит к 30%-й экономии расходов на накопитель за срок эксплуатации погрузчика [5]. Отметим, что энергетическая емкость СК не превышает 0,01 % от емкости основного блока, однако он буферизирует (пропускает через себя) до ~30 % всей энергии основного блока. Имеются многочисленные примеры применения гибридных накопителей для работы с возобновляемыми источниками энергии, в автомобилях, для автономной сварки [6] и обеспечения иных импульсных потребителей.

Учитывая, что СК являются электрофизическими элементами, в дальнейшем вместо ЭХСНЭ используем более широкий термин – системы накопления электроэнергии (СНЭ). Компанией DukeEnergy построена гибридная СНЭ, состоящая из блока СК 277 кВт/8,0 кВт·ч и блока АКБ 50 кВт/300 кВт·ч, установленная для сглаживания нестабильной генерации, обеспечения импульсной мощности потребителей солнечной электростанции. По заявлению компании, этим обеспечивается сокращение капитальных затрат на 10–15 % и операционных затрат на 30 % в сравнении с применением только АКБ.

В 2012 г. Объединенный институт высоких температур Российской академии наук по заказу ОАО «ФСК ЕЭС» разработал и экспериментально исследовал гибридный накопитель энергии на базе литий-ионных АКБ и СК для Единой национальной энергетической сети России [7]. В настоящее время подобные разработки выполнены многими фирмами.

При этом в литературе отсутствует систематический анализ качественно-количественных эффектов гибридации и соответствующие методические рекомендации по выбору схемы и оценке эффективности гибридации. Данная статья ставит целью рассмотреть этот вопрос с теоретической и методической позиций, дать рекомендации по гибридации СНЭ. Сделан краткий обзор данных по показателям стоимости буферизации электроэнергии литий-ионными (Li-ion), свинцово-кислотными (Pb-acid) АКБ и СК. Введено понятие коэффициента синергетического эффекта гибридации и степени внутренней буферизации электроэнергии. Представлена количественно-качественная модель расчета эффективности гибридации. Предложен методический подход для оценки степени внутренней буферизации энергии и коэффициента синергетического эффекта гибридации.

Постановка задачи

Пусть необходимо создать СНЭ, характеризующуюся рядом технико-экономических показателей: массой m , кг; инвестиционной стоимостью $Ст_{и}$, дол./(кВт·ч); стоимостью буферизации электроэнергии $Ст$, дол./(кВт·ч); мощностью P , кВт; объемом запасаемой энергии C , кВт·ч; и др. Значение одних параметров определены требованиями технического задания, значение других могут варьироваться. Если СНЭ может быть построена с использования АКБ различных типов, необходимо определить доли ячеек основного и дополнительного типов, при которых удовлетворяются требования технического задания и оптимизируются изменяемые параметры. Можно выделить два типа задач: 1) удовлетворение путем гибридации необходимых требований по массе, мощности, запасаемой энергии и т. п.; 2) оптимизация экономических показателей использования СНЭ в рамках ограничений по прочим параметрам. Если массогабаритные показатели не имеют решающего значения, основным критерием целесообразности гибридации становится экономическая эффективность, важнейший показатель которой – стоимость буферизации электроэнергии, определяемая как сумма инвестиционной стоимости СНЭ, стоимости его обслуживания за время работы (исчерпания эксплуатационного ресурса) и стоимости утилизации, деленной на полный объем электроэнергии, отданный им за этот период.

Степенью гибридации α назовем долю емкости блока АКБ дополнительного типа в общей полезной емкости СНЭ

$$C = \underbrace{(1 - \alpha)C}_{C_1} + \frac{\alpha C}{C_2}, \quad (1)$$

где C_1 , C_2 – емкость соответственно основного и дополнительного блока АКБ, кВт·ч.

Как правило, параметры АКБ основного и дополнительного типов линейно связаны с их емкостью: $m = \beta_1 C$; $P = \gamma_1 C$; $Ст = \delta_1 C$. Тогда параметры гибридного блока с учетом (1):

$$\begin{aligned} m &= [\beta_1(1 - \alpha) + \beta_2\alpha]C; \\ P &= [\gamma_1(1 - \alpha) + \gamma_2\alpha]C; \\ Ст &= [\delta_1(1 - \alpha) + \delta_2\alpha]C, \end{aligned} \quad (2)$$

где β_1 , γ_1 , δ_1 , β_2 , γ_2 , δ_2 – удельные (отнесенные к единице емкости) параметры для АКБ основного (индекс «1») и дополнительного (индекс «2») типов.

Первая задача гибридации. Пусть емкость СНЭ фиксирована и введены ограничения на массу ($m < m_0$), мощность ($P > P_0$), стоимость буфе-

ризации ($C_T < C_{T0}$) и, возможно, другие параметры. Для отдельных типов АКБ выполняются условия:

$$\begin{cases} \beta_1 C > m_0 \\ \beta_2 C < m_0 \end{cases}, \quad \begin{cases} \gamma_1 C < P_0 \\ \gamma_2 C > P_0 \end{cases}, \quad \begin{cases} \delta_1 C < C_{T0} \\ \delta_2 C > C_{T0} \end{cases}. \quad (3)$$

Тогда для выполнения ограничений по массе степень гибридизации должна быть $\alpha > \alpha' = \frac{\beta_1 - m_0/C}{\beta_1 - \beta_2}$, для выполнения условий по мощно-

сти $\alpha > \alpha'' = \frac{\gamma_2 - P_0/C}{\gamma_2 - \gamma_1}$, по стоимости буферизации $\alpha < \alpha''' = \frac{\delta_2 - P_0/C}{\delta_2 - \delta_1}$.

Поскольку повышение степени гибридизации, как правило, связано с увеличением стоимости буферизации электроэнергии, рекомендуемой степенью гибридизации будет минимальная, удовлетворяющая условиям $\alpha > \alpha'$, α'' . Таким образом, используя технико-экономические показатели конкретных типов накопителей (типичные значения приведены в табл. 2), определим возможную и экономически целесообразную гибридизацию СНЭ.

Таблица 2

Типичные значения параметров различных видов АКБ
Typical values of parameters of various types of car acid batteries

Параметр	Pb-acid	Li-ion	СК
Стоимость единицы емкости C_{T1} , дол./кВт·ч	100	170	700000
Максимальный пиковый ток $I_{p,max}$, в единицах тока часовой разрядки АКБ	10C	50C	10 ⁵ C
Максимальный рабочий ток I_{max} , в единицах тока часовой разрядки АКБ	1C	10C	1000C
Плотность энергии P_m , Вт·ч/кг	50	200	0,04
Удельная масса M_p , кг/(Вт·ч)	1/50	1/200	25
Объемная плотность энергии P_V , Вт·ч/л	125	360	0,05
Удельный объем (на единицу энергии) V_p , л/(Вт·ч)	1/125	1/360	20
Число рабочих циклов (стандартизированных) N_c	500*	2000	10 ⁶
Стоимость буферизации C_T , дол./кВт·ч	0,40	0,085	1,00
Примечание. *DOD = 0,5.			

Гибридный накопитель может работать в режиме, когда часть энергии, принятой основным блоком ε , выдается потребителю через дополнительный блок или перекачивается между блоками, т. е. осуществляется внутренняя буферизация электроэнергии. В этом случае стоимость буферизации растёт

$$C_T = [\delta_1(1 - \alpha) + \delta_2\alpha + \varepsilon(1 - \alpha)\delta_2]C. \quad (4)$$

С другой стороны, внутренняя буферизация энергии существенно повышает вклад дополнительного блока в регулирование режима работы основного.

Вторая задача гибридации, связанная с оптимизацией стоимости накопления энергии, более сложная, поскольку подразумевается, что дополнительный блок оказывает существенное влияние на режим работы основного (синергетический эффект). При этом имеет место нелинейная связь стоимости буферизации СНЭ и степени гибридации $\delta_1 = \delta_1(\alpha)$, следовательно

$$C_T = [\delta_1(\alpha)(1 - \alpha) + \delta_2\alpha]C. \quad (5)$$

Моделируем главный тренд синергетического эффекта простейшей дробной функцией

$$\delta_1 = \frac{\delta_{10}}{1 + \sigma\alpha}, \quad (6)$$

где σ – коэффициент синергетического эффекта. С учетом (6) определим экономическую эффективность гибридации как

$$\eta = \frac{C_T(\alpha = 0)}{C_T(\alpha)} - 1 = \frac{1}{\frac{1 - \alpha}{1 + \sigma\alpha} + \frac{\delta_2}{\delta_{10}}\alpha} - 1. \quad (7)$$

Величина η положительна, если при увеличении степени гибридации общая стоимость буферизации электроэнергии падает, и отрицательна – если возрастает. Для $\alpha \ll 1$ (7) может быть переписана в виде

$$\eta \cong \sigma\alpha + \alpha - \alpha \frac{\delta_2}{\delta_{10}} - \sigma\alpha^2. \quad (8)$$

Из (8) следует, что положительная экономическая эффективность гибридации для $\alpha \ll 1$ возможна при условии

$$\sigma > \delta_2/\delta_{10} - 1. \quad (9)$$

Теоретические методы оценки коэффициента синергетического эффекта в настоящее время отсутствуют, хотя ясно, что он обусловлен смягчением режима работы основного типа АКБ. Грубую оценку коэффициента α можно сделать на основании данных о сроке службы АКБ при различных нагрузках. Согласно [8], при изменении токового режима с 1С на 0,25С ресурс литий-ионных аккумуляторов типа LiFePO₄ возрастает примерно в два раза. Демпфирование нагрузки АКБ суперконденсаторами существенно не меняет средний токовый режим, однако убирает импульсные перегрузки. Полагая, что в случае максимальной гибридации ресурс основного блока увеличивается в два раза, с учетом (6) оцениваем $\alpha \approx 1$. Для свинцово-кислотных АКБ можем также предположить удвоение ре-

сурса циклирования при наиболее благоприятных, по сравнению с типичными, условиях эксплуатации [9]. Учитывая оценку α и условие (9), гибридная может быть экономически целесообразна, если стоимость буферизации АКБ дополнительного типа превышает таковую АКБ основного типа не более чем в два раза, $\delta_2/\delta_{10} < 2$.

На рис. 1 представлена зависимость эффективности гибридной от ее степени, рассчитанная по (7) при различных значениях коэффициента синергетического эффекта α .

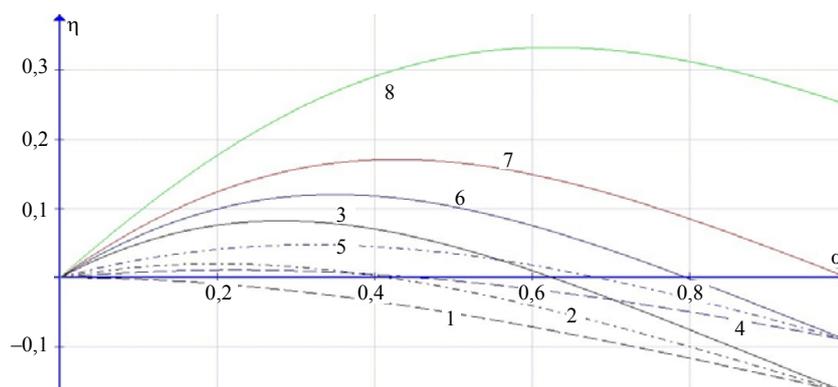


Рис. 1. Зависимость эффективности гибридной η от ее степени α при значении δ_2/δ_{10} : 1,2 (кривые 1–3); 1,1 (4–6); 1 (7); 0,8 (8); и значении σ : 0,2 (кривые 1, 4); 0,4 (2, 5); 0,8 (3, 6–8)

Fig. 1. The dependence of the hybridization efficiency η on its degree α at a value of δ_2/δ_{10} : 1.2 (curves 1–3); 1.1 (4–6); 1 (7); 0.8 (8); and the value of σ : 0.2 (curves 1, 4); 0.4 (2, 5); 0.8 (3, 6–8)

Согласно модели, эффективность гибридной даже при значительных σ сравнительно невелика ввиду того, что положительный эффект компенсируется более высокой стоимостью буферизации АКБ дополнительного типа (рис. 1). Максимум эффективности сдвинут в сторону малых α относительно центра. В том случае, когда стоимость буферизации АКБ дополнительного типа близка к стоимости буферизации АКБ основного типа (кривая 7), эффект синергизма скрадывается уменьшением доли основного типа накопителей. Очевидно, гибридная эффективна и в случае, когда стоимость буферизации АКБ дополнительного типа меньше таковой для АКБ основного типа (кривая 8), однако это не стандартный случай.

Ранее упомянутый пример [5] иллюстрирует ситуацию, когда кажущийся коэффициент α существенно превышает 1, поскольку при незначительном емкости СК ($\alpha \sim 0,01$ %) относительный экономический эффект велик, оценивается в 20–30 %. При этом в связи с высокой стоимостью единицы емкости СК и применением DC-DC преобразователя также выполняется условие $\delta_2/\delta_{10} \gg 1$. Модели (6), (7) воспроизводят и эту ситуацию (рис. 2). Можно показать, что положительная эффективность возможна, если $\alpha > \delta_2/\delta_{10}$. Однако столь большие значения α , δ_2/δ_{10} не соответ-

ствуют реальным параметрам свинцово-кислотных, литий-ионных ячеек и СК. Для описания такой ситуации необходимо усложнить модель взаимодействия блоков гибридной СНЭ.

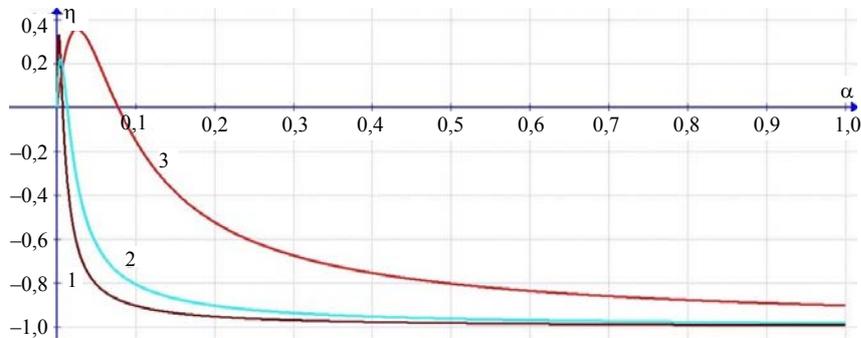


Рис. 2. Зависимость эффективности гибридации η от ее степени α :
1 – $\sigma = 400$, $\delta_2/\delta_{10} = 100$; 2 – $\sigma = 150$, $\delta_2/\delta_{10} = 50$; 3 – $\sigma = 40$, $\delta_2/\delta_{10} = 10$

Fig. 2. Dependence of hybridization efficiency η on its degree α :
1 – $\sigma = 400$, $\delta_2/\delta_{10} = 100$; 2 – $\sigma = 150$, $\delta_2/\delta_{10} = 50$; 3 – $\sigma = 40$, $\delta_2/\delta_{10} = 10$

Как отмечалось ранее, перекачивание энергии, запасенной в основном блоке, в дополнительный блок и обратно приводит к увеличению стоимости буферизации электроэнергии (4), однако также является фактором, увеличивающим синергетический эффект, оценить который можно прибавив величину ε к α в (6) и соответственно модифицируя уравнения (7), (8):

$$\eta = \frac{1}{\frac{1-\alpha}{1+\sigma(\alpha+\varepsilon)} + \frac{\delta_2}{\delta_{10}}\alpha} - 1;$$

$$\eta \cong \sigma\varepsilon + \alpha \left[1 + \sigma(1-\varepsilon) - \frac{\delta_2}{\delta_{10}} \right]. \quad (10)$$

Из (10) следует, что при $\alpha \ll 1$ эффективность гибридации определяется значением $\sigma\varepsilon$. Данная модель дает более корректную трактовку высокой экономической эффективности буферизации при $\alpha \sim 0,001$ и коэффициенте $\sigma \sim 1$, однако требует определения степени внутренней буферизации энергии ε . Представим общий подход для определения этой величины на примере данных [5].

Исходным материалом для оценки является график нагрузки СНЭ с высоким частотным разрешением. Информацию об амплитудно-частотном характере нагрузки дает Фурье-спектр графика. Способность СК пропускать через себя (демпфировать) высокочастотные моды спектра будет определять их участие в работе основного блока и эффективность гибридации согласно (10). На рис. 3 представлен характерный участок графика нагрузки электропогрузчика [5] с разрешением по времени 0,2 с (322 точки).

Такая дискретность соответствует точности графического представления нагрузки, хотя не разрешает все частоты исходной осциллограммы.

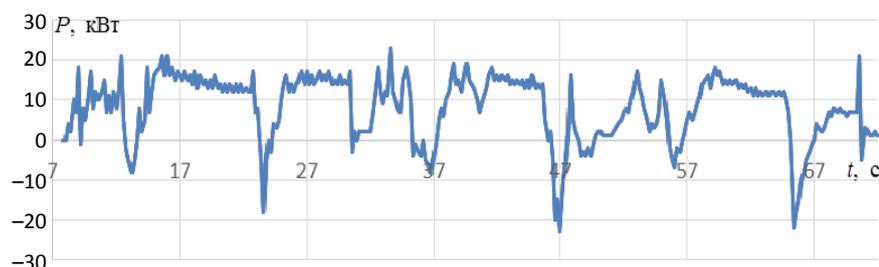


Рис. 3. Участок графика нагрузки системы накопления электроэнергии электропогрузчика [5], представленный с дискретностью 0,2 с

Fig. 3. The section of the load graph of the electric power storage system of the electric loader [5], presented with a discreteness of 0.2 s

Спектр дискретного косинус-преобразования Фурье графика нагрузки представлен на рис. 4.

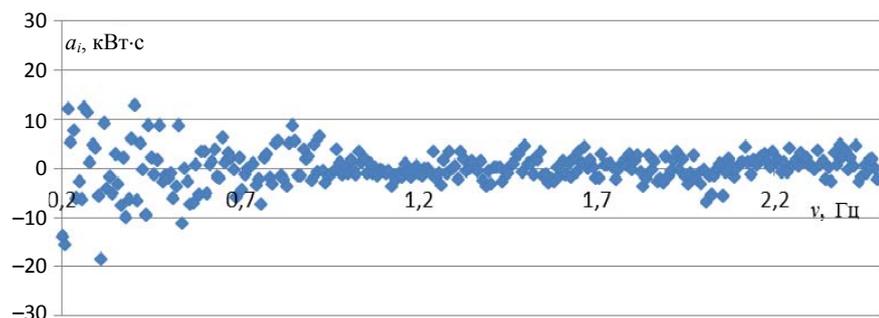


Рис. 4. Высоочастотная часть спектра дискретного косинус-преобразования Фурье графика нагрузки электропогрузчика [5]

Fig. 4. The high-frequency part of the spectrum of the discrete cosine-Fourier transform of the electric loader load graph [5]

Предполагаем, что СК буферизирует все моды, для которых выполняется условие $C_{СК} > \left| \frac{a_i}{\nu_i} \right|$, где $C_{СК}$ – энергетическая емкость СК; a_i – амплитуда i -й спектральной составляющей; ν_i – ее частота. Демпфируемая энергия оценивается как сумма абсолютных значений энергий таких мод

$$C_{СК, \text{sum}} = \frac{2}{\pi} \sum_i \left| \frac{a_i}{\nu_i} \right|. \quad (11)$$

Формула (11) дает верхнюю оценку демпфируемой энергии и предполагает статистическую независимость фаз высокочастотных мод. Более корректно строить график кумулятивной энергии n высокочастотных мод

и сравнивать ее амплитуду во времени с емкостью СК. Также следует понимать, что СК в общем случае не забирает на себя всю высокочастотную нагрузку, а делит ее с основным блоком АКБ в соответствии с электрической схемой и алгоритмом управления.

Общую энергию, пропущенную через СНЭ, находят из графика нагрузки как интеграл $L_{\text{СНЭ}} = \int_{t_1}^{t_2} |f(t)| dt$. Долю энергии, которую может демпфировать СК (верхняя оценка степени внутренней буферизации), определяют как отношение $C_{\text{СК, sum}}$ и $L_{\text{СНЭ}}$:

$$\varepsilon = \frac{C_{\text{СК, sum}}}{L_{\text{СНЭ}}}. \quad (12)$$

Интегрирование нагрузки СНЭ (рис. 3) дает значение $L_{\text{СНЭ}} = 638$ кВт·с. Рассчитанные согласно (11), (12) значения ε приведены в табл. 3.

Таблица 3

Оценка значения ε для данных [5]
Estimation of the value of ε for the data [5]

Емкость СК, кВт·с	Энергия СНЭ, кВт·с	Демпфируемая энергия, кВт·с	ε
2	638	106	0,17
4	638	169	0,26
8	638	249	0,39

Несмотря на приближенный характер модели, величина экономической эффективности 0,26 хорошо согласуется с полученной в [5] оценкой: 30 % экономии средств на накопительный блок за время эксплуатации погрузчика при использовании СК емкостью 165 Ф.

Фурье-спектр нагрузки СНЭ позволяет более точно оценивать синергетический эффект от гибридизации, условно разделяя нагрузку на две части по спектру (буферизируемые основным и дополнительным блоками) и учитывая неблагоприятное влияние нагрузки на АКБ по ее амплитудно-частотным характеристикам, однако этот вопрос выходит за рамки настоящей статьи.

Следует учитывать, что схемы управления гибридной СНЭ могут быть сложнее и дороже, чем для накопителя из однородных АКБ. Поэтому для анализа стоимости буферизации необходимо учитывать стоимость всех компонентов СНЭ. Методика такого расчета и данные по компонентному составу величины LCOE для мощных СНЭ имеются в [2] (табл. 4).

Износ преобразователей мощности (инверторов), электроники связи и управления не связан напрямую с пропущенной электроэнергией, поэтому их стоимость амортизируется в соответствии с технически установленным сроком эксплуатации. В связи с этим размерности данных в табл. 4 различаются, а расчет LCOE проводится посредством расчета нормализованной годовой стоимости эксплуатации [2].

Таблица 4

Состав инвестиционной стоимости и LCOE мощных систем накопления электроэнергии на 2020 г. без стоимости инженерного обеспечения и интеграции в систему [2]

The composition of the investment value and LCOE of powerful electricity storage systems for 2020 without the cost of engineering support and integration into the system [2]

Стоимость оборудования	Pb-acid, 1 МВт, 4 ч	Li-ion (LiFePO ₄) 1 МВт, 4 ч	Li-ion (NMC) 1 МВт, 4 ч
АКБ + BMS, дол./кВт·ч	180	182	194
Техническое обеспечение (коммутация, крепеж, контейнер, кондиционирование и т. д.), дол./кВт·ч	49	42	37
Преобразователи мощности, дол./кВт	155	85	85
Система управления и связи, дол./кВт	40	40	40
Полная инвестиционная стоимость, дол./кВт·ч	452	448	459
LCOE, дол./кВт·ч	1,39	0,40	0,63

Согласно данным табл. 4, стоимость собственно накопительного блока составляет около 40 % от полной инвестиционной стоимости СНЭ, приведенной к единицам дол./кВт·ч). При этом LCOE для СНЭ на основе свинцовых АКБ в 3,5 раза выше соответствующей стоимости буферизации современными литий-ионными (LiFePO₄) батареями, что обусловлено меньшим ресурсом циклирования и согласуется с элементарными оценками стоимости буферизации разнотипными АКБ [5].

В [2] содержатся обобщенные данные анализа рынка систем накопления энергии, покомпонентно оценена инвестиционная стоимость различных видов СНЭ, стоимость эксплуатации, LCOE на 2020 г. и сделан прогноз для основных экономических параметров на 2030 г. (табл. 5).

Таблица 5

Величина LCOE для разнотипных систем накопления электроэнергии за 2020 г. и прогноз на 2030 г., цент/кВт·ч [2]

LCOE value for different types of electricity storage systems for 2020 and forecast for 2030, cent/(kW·h) [2]

Референтный год/время выдачи мощности	Li-ion (LiFePO ₄) 1 МВт	Li-ion (LiFePO ₄) 10 МВт	Li-ion (LiFePO ₄) 100 МВт	Li-ion (NMC) 1 МВт	Li-ion (NMC) 10 МВт	Li-ion (NMC) 100 МВт	Pb-acid 1 МВт	Pb-acid 10 МВт	Pb-acid 100 МВт
2020/4 ч	36–45	33–41	31–39	53–73	49–67	46–63	128–150	117–138	111–130
2020/10 ч	33–44	31–41	29–39	47–65	45–62	42–58	108–127	102–120	96–113
2030/4 ч	27–36	24–33	23–31	40–51	37–47	35–44	110–129	100–118	95–112
2030/10 ч	25–34	23–30	22–28	36–50	34–44	32–41	95–111	89–104	84–98

Использование СК в качестве основного накопителя электроэнергии в настоящее время неэффективно вследствие их высокой стоимости и относительно малой плотности хранения энергии. Кроме того, из-за линей-

ной зависимости напряжения от заряда СК должны комплектоваться дорогостоящими DC-DC преобразователями. Однако при напряженных импульсных режимах работы СНЭ использование СК в качестве демпфирующей емкости становится экономически выгодным [5, 6].

Оценим стоимость буферизации электроэнергии СК на основе данных фирм-производителей и международных торговых интернет-площадок. Рассмотрим СК с единичной емкостью более 10 Ф ($C > 10$ Ф) и рабочим напряжением от 12 до 100 В от наиболее известных производителей (табл. 6). Стоимость буферизации рассчитываем исходя из стоимости единицы емкости СК и суммарного объема электроэнергии, пропускаемого через СК за время его службы ($N_{\text{раб}}$ циклов), кВт·ч:

$$Q_{\text{tot}} = \frac{C_n U_n}{2 \cdot 3600 \cdot 10^3} N_{\text{раб}}, \quad (13)$$

где C_n – номинальная емкость, Ф; U_n – номинальное напряжение, В.

Таблица 6

**Характеристики суперконденсаторов
и оценка стоимости буферизации электроэнергии**
**Characteristics of supercapacitors
and estimation of the cost of buffering electricity**

Производитель, модель	Напряжение, В / емкость, Ф	Стоимость единицы ем- кости C_{T1}	Рабочие циклы	Стоимость буфери- зации C_T , дол./кВт·ч
Maxwell, BMOD0058 E016 C02 [10, 11]	16/58	139 €	5·10 ⁵	2,14
Maxwell, BMOD0165 P048 C0B [12, 13]	48/165	700 \$	10 ⁶	0,64
EATON, XLR-48R6167-R [14, 15]	48,6/166	1350 €	10 ⁶	1,20
EATON, XLR-51R3187-R [16, 17]	51,3/188	1981 \$	10 ⁶	1,47
SPSCAP, MCP0165C0_0048R0SHC [18, 19]	48/165	796 €	10 ⁶	0,72
SPSCAP, MCP0083C0-0048R0SHC [20, 21]	48/83	758 €	10 ⁶	1,38
KYOCERA AVX, SCMZ1EP167SRBB0 [22, 23]	48/165	1472 €	5·10 ⁵	2,67
KYOCERA AVX, SCMZ1EK507SRBB0 [24, 25]	16/500	619 €	5·10 ⁵	1,10
CAP-XX, CAPMOD064V083A23 [26, 27]	64/83	1786 \$	10 ⁶	2,40
CAP-XX, CAPMOD080V100A23 [26, 28]	80/100	2314 \$	10 ⁶	2,10
CAP-XX, CAPMOD032V250A23 [26, 29]	32/250	1279 \$	10 ⁶	1,16
EATON, XLR-16R2507-R [30, 31]	16/500	584 €	10 ⁶	0,53

Полагая эксплуатационные расходы и стоимость утилизации СК несущественными, стоимость буферизации оценим как

$$C_T = \frac{C_{T1}}{Q_{tot}}. \quad (14)$$

Наименьшая стоимость буферизации электроэнергии обеспечивается СК больших номиналов емкости и составляет $\delta_{СК} \sim 0,6$ дол./кВт·ч).

Принимая стоимость буферизации литий-ионными АКБ $\delta_{Li} = 0,12-0,20$ дол./кВт·ч), получим $\delta_{СК}/\delta_{Li} = 3-4$. Исходя из модели (7)–(10), заключаем, что дополнение модулей литий-ионных АКБ модулями СК экономически не целесообразно, если не преследуется цель увеличения пиковой нагрузки. Для свинцово-кислотных АКБ и СК отношение $\delta_{СК}/\delta_{Pb} = 1,3-1,4$. И в данном случае дополнение блоков свинцово-кислотных АКБ блоком СК может быть целесообразным, если коэффициент синергетического эффекта и степень внутренней буферизации достаточно велики ($\sigma > 0,6$).

Общая постановка задачи оптимизации СНЭ может сводиться к минимизации целевой функции, которая строится как функция параметров системы $\Psi = f(\alpha, \xi_i)$, где α – степень гибридации; ξ_i – параметры системы. Однако поскольку принципиальное значение имеет характер взаимодействия блоков, определяемый программно-аппаратным и алгоритмическим решением, которое должно быть заложено в функциональный вид целевой функции, формулировка и решение такой задачи практически невозможны.

Таким образом, проектирование гибридной СНЭ должно включать:

- 1) выбор возможных вариантов гибридного исполнения СНЭ, учитывающих требования по запасаемой энергии, мощности, объемно-массовым показателям, допустимому объему начальных инвестиций;
- 2) определение базовых технико-экономических показателей для различных типов АКБ и дополнительного оборудования СНЭ (инверторы, преобразователи напряжения, системы управления, соединительные шины и т. д.) (аналогично табл. 1) и последующее построение зависимостей параметров СНЭ от степени гибридации (2), (7), (10).
- 3) оценку синергетического эффекта и степени внутренней буферизации энергии ϵ на основании данных об ожидаемом графике нагрузки и алгоритме взаимодействия блоков. Построение уточненных, в том числе нелинейных, зависимостей стоимости буферизации электроэнергии и других параметров СНЭ;
- 4) определение допустимых и оптимальных значений степени гибридации с использованием построенных зависимостей и требований технического задания.

ВЫВОДЫ

1. Рассмотрены вопросы технического и экономического обоснования эффективности гибридизации систем накопления электроэнергии. В качестве накопителей проанализированы свинцово-кислотные, литий-ионные АКБ и суперконденсаторы. Показано, что первичные выводы о целесообразности гибридизации систем накопления электроэнергии могут быть сделаны на основе линейных и нелинейных зависимостей параметров систем накопления электроэнергии от степени гибридизации (2), (7) на основе соответствующих данных для базовых типов накопителей.

2. Введены понятия коэффициента синергетического эффекта гибридизации и степени внутренней буферизации электроэнергии. Качественно показано влияние этих коэффициентов на стоимость буферизации электроэнергии. Предложены подходы для их оценки при заданном графике нагрузки системы накопления электроэнергии с использованием Фурье-спектра этого графика.

3. Показано, что в общем случае гибридизация системы накопления электроэнергии экономически эффективна, если стоимость буферизации дополнительным типом АКБ не более чем в два раза превышает соответствующую стоимость для АКБ основного блока. Так, дополнение литий-ионных блоков суперконденсаторными блоками экономически нецелесообразно, хотя может быть продиктовано техническими требованиями по импульсной мощности. При снижении стоимости буферизации электроэнергии суперконденсаторами до 0,2–0,3 дол./((кВт·ч) их использование в качестве дополнительного накопительного блока может стать актуальным.

4. Дальнейшие исследования вопроса повышения эффективности системы накопления электроэнергии за счет гибридизации накопительных блоков могут быть связаны с имитационным моделированием работы блоков гибридной системы при различных режимах нагрузки с учетом внутренней рекуперации электроэнергии и синергетического эффекта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Эксперты: мировой рынок накопителей энергии до 2030 года будет расти на 23 % в год [Электронный ресурс] // Национальная ассоциация нефтегазового сервиса. 2021. Режим доступа: <https://nangs.org/news/renewables/eksperty-mirovoy-rynok-nakopiteley-energii-do-2030-goda-budet-rasti-na-23-v-god>. Дата доступа: 20.05.2022.
2. Grid Energy Storage Technology Cost and Performance Assessment: Technical Report Publication No. DOE/PA-0204, December 2020 [Electronic Resource] / K. Mongird [et al.]. Mode of access: <https://www.pnnl.gov/sites/default/files/media/file/Final%20-%20ESGC%20Cost%20Performance%20Report%2012-11-2020.pdf>.
3. 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>.
4. Hybrid Battery System for Electric and Hybrid Electric Vehicles: Pat. US2014016659A1 / S. K. Dhar, F. Albano, S. Venkatesan, D. Townsend. Publ. date 03.07.2014.

5. Hybrid Battery-Supercapacitor Storage for an Electric Forklift: a Life-Cycle Cost Assessment / M. Conte [et al.] // *Journal of Applied Electrochemistry*. 2014. Vol. 44. P. 523–532. <https://doi.org/10.1007/s10800-014-0669-z>.
6. Бондаренко, Ю. В. Гибридные энергонакопители на основе аккумуляторов и суперконденсаторов для контактной микросварки / Ю. В. Бондаренко, П. С. Сафронов // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. 2014. № 4. С. 33–38.
7. Гибридный накопитель электроэнергии для ЕНЭС на базе аккумуляторов и суперконденсаторов / Р. Н. Бердников [и др.] // *Энергия Единой сети*. 2013. № 2. С. 40–51.
8. New High-Performance Lithium LiFePO₄ Cells [Electronic Resource]. Mode of access: <https://www.powertechsystems.eu/new-high-performance-lithium-lifepo4-cells/>. Date of access: 10.12.2022.
9. Доброго, К. В. Универсальная имитационная модель деградации аккумуляторных батарей с оптимизацией параметров по генетическому алгоритму / К. В. Доброго, И. А. Козначеев // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2022. Т. 65, № 6. С. 481–498. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-6-481-498>.
10. 16 Volt Smart Module [Electronic Resource]. Mode of access: https://maxwell.com/wp-content/uploads/2021/08/3003212.2_Datasheet_BMOD0058-E016-C02.pdf. Date of access: 12.11.2022.
11. Mouser Electronics. [Electronic Resource] // Mouser Electronics. Mode of access: <https://eu.mouser.com/ProductDetail/Maxwell-Technologies/BMOD0058-E016-C02?qs=W%2FMpXkg%252BdQ772gmnfQLCEw%3D%3D>. Date of access: 12.11.2022.
12. NEW 48V MODULE (C0B) [Electronic Resource] // Maxwell Technologies Datasheet. Mode of access: https://maxwell.com/wp-content/uploads/2021/12/48V_ds_C0B_3001491-EN.6_20210713.pdf. Date of access: 12.11.2022.
13. Maxwell Ultra конденсатор 165F 48V 53Wh BMOD0165 P048 C0B 165 Farad 48VDC DuraBlue [Электронный ресурс] // EBAY. Режим доступа: <https://www.ebay.com/itm/392705837809>. Дата доступа: 12.11.2022.
14. XLR-48 Supercapacitor 48 V, 166 F Rugged Module [Electronic Resource]. Mode of access: <https://www.eaton.com/content/dam/eaton/products/electronic-components/resources/datasheet/eaton-xlr-48-supercapacitor-module-data-sheet.pdf>. Date of access: 12.11.2022.
15. XLR-48R6167-R // Mouser Electronics [Electronic Resource]. Mode of access: <https://eu.mouser.com/ProductDetail/PowerStor-Eaton/XLR-48R6167-R?qs=NtE2QagKf6SSazGy%2F3UkQA%3D%3D>. Date of access: 12.11.2022.
16. XLR-51 Supercapacitor 51 V, 188 F Rugged module [Electronic Resource]. Mode of access: <https://www.eaton.com/content/dam/eaton/products/electronic-components/resources/datasheet/eaton-xlr-51-supercapacitor-module-data-sheet.pdf>. Date of access: 12.11.2022.
17. XLR-51R3187-R Supercapacitor, Module, 188 F, 51.3 V, Screw, 0%, +20%, 1500 hours@65°C [Electronic Resource] // Newark. Mode of access: <https://www.newark.com/eaton-bussmann/xlr-51r3187-r/supercapacitor-188f-51-3v-screw/dp/84AC4633>. Date of access: 12.11.2022.
18. MCP0165C0-0048R0SHC [Electronic Resource]. Mode of access: https://spscap.de/fileadmin/Webdata/public/datenblaetter/Module/SPS_Data_sheet-MCP0165C0-0048R0SHC-V06_E.pdf. Date of access: 12.11.2022.
19. MCP0165C0-0048R0SHC – Super Capacitor, 165F, 48V, SPSCAP [Electronic Resource] // Distrelec. Mode of access: <https://www.distrelec.de/en/super-capacitor-165f-48v-spscap-mcp0165c0-0048r0shc/p/30176484>. Date of access: 12.11.2022.
20. DataSheet 48V Module MCP0083C0-0048R0SHC [Electronic Resource]. Mode of access: https://www.capcomp.de/fileadmin/Webdata/partner/SPSCAP/Datasheet_module/SPS_48V83F_20160725101337351.pdf. Дата доступа: 12.11.2022.
21. MDCL0083C0-0048R0SHC – Super Capacitor, 83F, 48V, SPSCAP [Electronic Resource] // Distrelec. Mode of access: <https://www.distrelec.biz/en/super-capacitor-83f-48v-spscap-mdc10083c0-0048r0shc/p/30294986?trackQuery=&pos=9&origPos=9&origPageSize=50>. Date of access: 12.11.2022.
22. 48V SCM Series Series-Connected SuperCapacitor Modules SCMZ1EP167SRBB0 [Electronic Resource]. Mode of access: <https://datasheets.kyocera-avx.com/AVX-SCM-48V.pdf>. Date of access: 12.11.2022.

23. SCMZ1EP167SRBB0 [Electronic Resource] // Mouser Electronics. Mode of access: https://eu.mouser.com/ProductDetail/KYOCERA-AVX/SCMZ1EP167SRBB0?qs=r5DSvlrk_XmIA4886fky0Vw%3D%3D. Date of access: 12.11.2022.
24. 48V SCM Series Series-Connected SuperCapacitor Modules [Electronic Resource]. Mode of access: https://eu.mouser.com/datasheet/2/40/AVX_SCM_48V-1648423.pdf. Date of access: 12.11.2022.
25. SCMZ1EK507SRBB0 [Electronic Resource] // Mouser Electronics. Mode of access: https://eu.mouser.com/ProductDetail/KYOCERAAVX/SCMZ1EK507SRBB0?qs=sGAEpiMZZMsCu9HefNW_qpIWseRo8tpnke2zs72MTLqCSE2JJEoVUXg%3D%3D. Дата доступа: 12.11.2022.
26. CAPMOD Specifications [Electronic Resource]. Mode of access: <https://www.cap-xx.com/wp-content/uploads/2022/07/CAPmod-Data-Sheet-07-06-22.pdf>. Date of access: 12.11.2022.
27. CAPMOD064V083A23. 64V, 83F, ESR 6.8mΩ 457×147×224 mm Datasheet [Electronic Resource]. Mode of access: <https://www.cap-xx.com/product/capmod064v083a23>. Date of access: 12.11.2022.
28. CAPMOD080V100A23 [Electronic Resource]. Mode of access: <https://www.cap-xx.com/product/capmod080v100a23/> Date of access: 12.11.2022.
29. CAPMOD032V250A23. 32V, 250F, ESR 3.4mΩ 309×147×224 mm Datasheet [Electronic Resource]. Mode of access: <https://www.cap-xx.com/product/capmod032v250a23/> Date of access: 12.11.2022.
30. XLR-16 Supercapacitor 16.2 V, 500 F Module. (Technical Data 10945) [Electronic Resource]. Mode of access: <https://www.eaton.com/content/dam/eaton/products/electronic-components/resources/data-sheet/eaton-xlr-16-supercapacitor-module-data-sheet.pdf>. Date of access: 12.11.2022.
31. XLR-16R2507-R [Electronic Resource] // Mouser Electronics Mode of access: <https://eu.mouser.com/ProductDetail/PowerStor-Eaton/XLR-16R2507-R?qs=BJlw7L4Cy78HoKwcukr%252B2w%3D%3D>. Date of access: 12.11.2022.

Поступила 11.01.2023 Подписана в печать 31.03.2023 Опубликована онлайн 31.05.2023

REFERENCES

1. Experts: the Global Energy Storage Market will Grow by 23% per Year until 2030. *National Association of Oil and Gas Service* (2021). Available at: <https://nangs.org/news/renewables/eksperty-mirovoy-rynok-nakopiteley-energii-do-2030-goda-budet-rasti-na-23-v-god> (accessed 20 May 2022) (in Russian).
2. Mongird K., Viswanathan V., Alam J., Vartanian Ch., Sprengle V., Richard Baxter R. (2020) *Grid Energy Storage Technology Cost and Performance Assessment: Technical Report Publication No. DOE/PA-0204, December 2020*. <https://www.pnnl.gov/sites/default/files/media/file/Final%20-%20ESGC%20Cost%20Performance%20Report%2012-11-2020.pdf>.
3. 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 the CIS Higher Educational Institutions and Power Engineering Associations*, 64 (1), 27–39. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-27-39> (in Russian).
4. Dhar S. K., Albano F., Venkatesan S., Townsend D. (2014) *Hybrid Battery System for Electric and Hybrid Electric Vehicles*. Patent No US2014016659A1.
5. Conte M., Genovese A., Ortenzi F., Vellucci F. (2014) Hybrid Battery-Supercapacitor Storage for an Electric Forklift: a Life-Cycle Cost Assessment. *Journal of Applied Electrochemistry*, 44, 523–532. <https://doi.org/10.1007/s10800-014-0669-z>.
6. Bondarenko Yu. V., Safronov P. S., Bondarenko O. F., Sidorets V. M., Rogozina T. S. (2014) The Hybrid Energy Storages Based on Batteries and Ultracapacitors for Contact Micro-welding. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, (4), 33–38 (in Russian).
7. Berdnikov R. N., Fortov V. E., Son E. E., Den'shchikov K. K., Zhuk A. Z., Novikov N. L., Shakaryan Yu. G. (2013) Hybrid Electric Power Storage for UNEG Based on Batteries and Supercapacitors. *Energiya Edinoy Seti [Unified Grid Energy]*, (2), 40–51 (in Russian).
8. *New High-Performance Lithium LiFePO₄ Cells*. Available at: <https://www.powertechnologies.com/new-high-performance-lithium-lifepo4-cells/> (accessed 10 December 2022).
9. Dobrego K. V., Koznacheev I. A. (2022) Universal Simulation Model of Battery Degradation with Optimization of Parameters by Genetic Algorithm. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Educational Institutions and Power Engineering Associations*, 65 (6), 481–498. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-6-481-498> (in Russian).

10. 16 Volt Smart Module. Available at: https://maxwell.com/wp-content/uploads/2021/08/3003212.2_Datasheet_BMOD0058-E016-C02.pdf (accessed 12 November 2022).
11. BMOD0058 E016 C02. *Mouser Electronics*. Available at: <https://eu.mouser.com/ProductDetail/Maxwell-Technologies/BMOD0058-E016-C02?qs=W%2FMpXkg%252BdQ772gmnfQLCEw%3D%3D> (accessed 12 November 2022).
12. NEW 48V MODULE (C0B) // Maxwell Technologies Datasheet. Available at: https://maxwell.com/wp-content/uploads/2021/12/48V_ds_C0B_3001491-EN.6_20210713.pdf (accessed 12 November 2022).
13. Maxwell Ultra Capacitor 165F 48V 53Wh BMOD0165 P048 C0B 165 Farad 48VDC DuraBlue. *EBAY*. Available at: <https://www.ebay.com/itm/392705837809> (accessed 12 November 2022).
14. XLR-48 Supercapacitor 48 V, 166 F Rugged Module. Available at: <https://www.eaton.com/content/dam/eaton/products/electronic-components/resources/data-sheet/eaton-xlr-48-supercapacitor-module-data-sheet.pdf> (accessed 12 November 2022).
15. XLR-48R6167-R. *Mouser Electronics* [Electronic Resource]. Available at: <https://eu.mouser.com/ProductDetail/PowerStor-Eaton/XLR-48R6167-R?qs=NtE2QagKf6SSazGy%2F3UkQA%3D%3D> (accessed 12 November 2022).
16. XLR-51 Supercapacitor 51 V, 188 F Rugged Module. Available at: <https://www.eaton.com/content/dam/eaton/products/electronic-components/resources/data-sheet/eaton-xlr-51-supercapacitor-module-data-sheet.pdf> (accessed 12 November 2022).
17. XLR-51R3187-R Supercapacitor, Module, 188 F, 51.3 V, Screw, 0%, +20%, 1500 hours @ 65°C. *Newark*. Available at: <https://www.newark.com/eaton-bussmann/xlr-51r3187-r/supercapacitor-188f-51-3v-screw/dp/84AC4633> (accessed 12 November 2022).
18. *MCP0165C0-0048R0SHC*. Available at: https://spscap.de/fileadmin/Webdata/public/datenblaetter/Module/SPS_Data_sheet-MCP0165C0-0048R0SHC-V06_E.pdf (accessed 12 November 2022).
19. MCP0165C0-0048R0SHC – Super Capacitor, 165F, 48V, SPSCAP. *Distrelec*. Available at: <https://www.distrelec.de/en/super-capacitor-165f-48v-spscap-mcp0165c0-0048r0shc/p/30176484> (accessed 12 November 2022).
20. *DataSheet 48V Module MCP0083C0-0048R0SHC*. Available at: https://www.capcomp.de/fileadmin/Webdata/partner/SPSCAP/Datasheet_module/SPS_48V83F_20160725101337351.pdf (accessed 12 November 2022).
21. MDCL0083C0-0048R0SHC – Super Capacitor, 83F, 48V, SPSCAP. *Distrelec*. Available at: <https://www.distrelec.biz/en/super-capacitor-83f-48v-spscap-mdcl0083c0-0048r0shc/p/30294986?trackQuery=&pos=9&origPos=9&origPageSize=50> (accessed 12 November 2022).
22. *48V SCM Series Series-Connected SuperCapacitor Modules SCMZ1EP167SRBB0*. Available at: <https://datasheets.kyocera-avx.com/AVX-SCM-48V.pdf> (accessed 12 November 2022).
23. SCMZ1EP167SRBB0. *Mouser Electronics*. Available at: <https://eu.mouser.com/ProductDetail/KYOCERA-AVX/SCMZ1EP167SRBB0?qs=r5DSvlrkXmIA4886fky0Vw%3D%3D> (accessed 12 November 2022).
24. 48V SCM Series Series-Connected SuperCapacitor Modules. Access mode: https://eu.mouser.com/datasheet/2/40/AVX_SCM_48V-1648423.pdf (accessed 12 November 2022).
25. SCMZ1EK507SRBB0. *Mouser Electronics*. Available at: <https://eu.mouser.com/ProductDetail/KYOCERA-AVX/SCMZ1EK507SRBB0?qs=P1JMDcb91o7PmsKd3ItCnQ%3D%3D> (accessed 12 November 2022).
26. *CAPMOD Specifications*. Available at: <https://www.cap-xx.com/wp-content/uploads/2022/07/CAPmod-Data-Sheet-07-06-22.pdf> (accessed 12 November 2022).
27. *CAPMOD064V083A23. 64V, 83F, ESR 6.8mΩ 457×147×224 mm Datasheet*. Available at: <https://www.cap-xx.com/product/capmod064v083a23/> (accessed 12 November 2022).
28. *CAPMOD080V100A23. 80V, 100F, ESR 7.8mΩ 741×147×224 mm Datasheet*. Available at: <https://www.cap-xx.com/product/capmod080v100a23/> (accessed 12 November 2022).
29. *CAPMOD032V250A23. 32V, 250F, ESR 3.4mΩ 309×147×224 mm Datasheet*. Available at: <https://www.cap-xx.com/product/capmod032v250a23/> (accessed 12 November 2022).
30. *XLR-16 Supercapacitor 16.2 V, 500 F Module. (Technical Data 10945)*. Available at: <https://www.eaton.com/content/dam/eaton/products/electronic-components/resources/data-sheet/eaton-xlr-16-supercapacitor-module-data-sheet.pdf> (accessed 12 November 2022).
31. XLR-16R2507-R. *Mouser Electronics*. Available at: <https://eu.mouser.com/ProductDetail/PowerStor-Eaton/XLR-16R2507-R?qs=BJlw7L4Cy78HoKwcukr%252B2w%3D%3D> (accessed 12 November 2022).