

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-3-209-227>

УДК 621.355:004.94

Моделирование пассивного сопряжения блоков гибридной системы накопления электроэнергии

К. В. Доброго¹⁾, И. А. Козначеев²⁾, В. Л. Червинский¹⁾

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

²⁾Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова

Национальной академии наук Беларуси (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2024
Belarusian National Technical University, 2024

Реферат. В связи с развитием электротранспорта и ростом «зеленой» энергетики в мире все шире применяются системы накопления электрической энергии. Рост рынка аккумуляторных батарей в последнее десятилетие составлял 20–30 %. Одним из способов повышения эффективности работы накопителя электроэнергии является его гибридизация, т.е. использование разнородных аккумуляторных блоков. В работе исследуются особенности пассивного сопряжения свинцово-кислотных и литий-ионных батарей в гибридном накопителе. Представлена модель для расчета электрических характеристик указанных блоков в процессе работы. Показана возможность выбора структуры гибридного накопителя, обеспечивающей сопоставимый диапазон рабочего напряжения блоков (работы без преобразователей напряжения). Промоделированы режимы работы гибридной системы накопления электроэнергии (СНЭ) как при простом параллельном соединении, так и при коммутации блоков по пороговому алгоритму. Показано, что для выравнивания темпа разрядки основного и дополнительного блоков необходимо согласование емкости СНЭ, степени гибридизации, типа нагрузки и электрических параметров батарей, что невозможно без моделирования системы. При пороговой коммутации блоков появляются дополнительные параметры управления, позволяющие изменять темп разрядки дополнительного блока и повышать экономическую эффективность гибридной СНЭ. Сделаны оценки экономической эффективности работы гибридных СНЭ при различных значениях порогового напряжения коммутации литий-ионного блока, а также для трех характерных нагрузок: вилочного электропогрузчика, 30-квартирного жилого дома и 300-квартирного жилого комплекса. Результаты демонстрируют особенности и технико-экономический потенциал пассивной гибридизации, могут быть использованы при проектировании гибридных СНЭ для небольших энергосистем с солнечными и ветроэлектростанциями, расчете и проектировании систем «генератор – накопитель – потребитель».

Ключевые слова: накопитель электроэнергии, аккумулятор, свинцово-кислотный аккумулятор, литий-ионный аккумулятор, гибридный накопитель, система управления батареей (BMS), взаимодействие блоков, эквивалентная схема, моделирование

Для цитирования: Доброго, К. В. Моделирование пассивного сопряжения блоков гибридной системы накопления электроэнергии / К. В. Доброго, И. А. Козначеев, В. Л. Червинский // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2024. Т. 67, № 3. С. 209–227. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-67-3-209-227>

Адрес для переписки

Доброго Кирилл Викторович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/13,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-92-16
dobrego@bntu.by

Address for correspondence

Dobrego Kirill V.
Belarusian National Technical University
65/13, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-92-16
dobrego@bntu.by

Modelling of Passive Coupling of Battery Units of Hybrid Energy Storage System

K. V. Dobrego¹⁾, I. A. Koznacheev²⁾, V. L. Charvinski¹⁾

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

²⁾Luikov's Heat and mass transfer Institute of National Academy of Sciences of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Due to the development of electric transport and the growth of “green” energy, electric energy storage systems (ESS) are increasingly being used in the world. The growth of the battery market in the last decade has been 20-30%. One of the ways to increase the efficiency of an electric power storage device is its hybridization, i.e. the use of heterogeneous battery units. The paper examines the features of passive coupling of lead-acid and lithium-ion batteries in a hybrid storage device. A model is presented for calculating the electrical characteristics of these units during operation. The possibility of choosing a hybrid drive structure that provides a comparable operating voltage range of the units (operation without voltage converters) is demonstrated. The modes of operation of a hybrid energy storage system are modeled both for simple parallel connection and for switching blocks according to a threshold algorithm. It is demonstrated that in order to equalize the discharge rate of the main and additional units, it is necessary to coordinate the capacity of the ESS, the degree of hybridization, the type of load and the electrical parameters of the batteries, which is impossible without modeling the system. When the threshold switching of the blocks takes place, additional control parameters, making it possible to change the discharge rate of the additional block and increase the economic efficiency of the hybrid ESS. Estimates of the economic efficiency of hybrid ESSs have been made for different values of the threshold switching voltage of the lithium-ion unit, as well as for three characteristic loads: an electric forklift truck, a 30-apartment apartment building and a 300-apartment residential complex. The results demonstrate the features and technical and economic potential of passive hybridization, can be used for the design of hybrid ESSs for small power systems with solar and wind power plants, in the calculation and design of generator – storage – consumer systems.

Keywords: electric power storage, battery, lead-acid battery, lithium-ion battery, hybrid storage, battery management system (BMS), block interaction, equivalent circuit, simulation

For citation: Dobrego K. V., Koznacheev I. A., Charvinski V. L. (2024) Modelling of Passive Coupling of Battery Units of Hybrid Energy Storage System. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 67 (3), 209–227. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-67-3-209-227> (in Russian)

Введение

В настоящее время в мире все шире применяются системы накопления электрической энергии. Это связано с развитием электротранспорта, ростом «зеленой» энергетики, а также с необходимостью регулирования нагрузки крупных энергосистем. Рост рынка аккумуляторных батарей (АКБ) в последнее десятилетие составлял 20–30 %. Согласно данным BloombergNEF [1], мощность и емкость систем накопления электроэнергии в мире выросла за 2022 г. на 16 ГВт / 35 ГВт·ч и приращение объемов накопителей продолжит расти в среднем на 23 % до конца 2030 г. При этом отмечается, что использование накопителей пока не стало экономически привлекательным в большинстве стран мира.

Одним из способов повышения эффективности работы накопителя электроэнергии является его гибридизация, т. е. использование разнородных аккумуляторных блоков, что позволяет выполнить требования технического задания по массе, мощности, запасаемой энергии, либо уменьшить стоимость буферизации электроэнергии по сравнению с накопителем, состоящим из однородных ячеек.

Формулировка задачи гибридизации системы накопления электроэнергии (СНЭ) дана в [2]. В целом она сводится к выбору параметров системы, обеспечивающих минимизацию стоимости буферизации электроэнергии при выполнении некоторых заданных конструкционных или иных ограничений.

Первым и наиболее простым параметром гибридной системы является степень гибридизации – доля емкости аккумуляторов дополнительного типа в общей энергоемкости системы. Однако на эффективность работы системы оказывают влияние технические и алгоритмические аспекты взаимодействия блоков гибридной СНЭ, специфика графика нагрузки [2, 3], факторы тарифной политики поставщика электроэнергии и др.

Технические аспекты гибридизации накопительных блоков рассматривались в литературе достаточно давно [4]. Задача гибридизации литий-ионных батарей и суперконденсаторов (СК) для применения в гибридных электрических автомобилях обсуждалась и моделировалась в 1997 г. в работе [5], где показано, что отдаваемая мощность и эксплуатационный ресурс АКБ гибридного автомобиля могут быть увеличены за счет пассивной параллельной интеграции с суперконденсаторами.

Одна из первых работ по моделированию параллельных гибридных СНЭ на литий-ионных АКБ и СК опубликована Р. Дугалом в 2002 г. [6]. Автор моделировал суперконденсатор RC цепочкой, а батарею – как идеальный источник напряжения с заданным внутренним сопротивлением. Моделирование пассивных гибридных систем проводилось в [7], где показано, что лучший эффект от гибридизации СНЭ достигается при коротких импульсах и длинных периодах отдыха нагрузки. В [8] показано, что пассивная гибридизация с использованием СК действует как фильтр низкочастотных составляющих нагрузки. Сравнение функциональности пассивных и активных гибридных СНЭ проведено в [9]. Однако общих методик оценки эффективности гибридизации не представлено.

В [9] проводится сравнительное исследование аккумуляторной батареи и гибридного источника энергии. Для нагрузок, имеющих импульсный характер, как пассивные, так и полуактивные и активные схемы гибридизации демонстрируют преимущество по сравнению с питанием только от аккумуляторов. Пассивная гибридная сборка, не требующая сложного управления, – проста и дешева, однако не позволяет использовать весь потенциал системы. Активные гибридные сборки могут быть оптимизированы под нагрузку, но имеют высокую стоимость из-за необходимости двух DC-DC конверторов. Полуактивные гибридные сборки, использующие один DC-DC конвертор, представляются разумным компромиссом. Пред-

ставлен математический анализ функционирования гибридных структур, даны рекомендации по их проектированию для случая импульсной нагрузки.

В последние годы большой интерес проявляется к гибридации СНЭ для конкретных приложений, типов нагрузки, с рассмотрением экономического эффекта. В [10] предложена методология определения оптимальной СНЭ для заданного применения. Метод использует усовершенствованные диаграммы Рагона (в осях удельная мощность – удельная энергия) для определения эффективности работы литий-ионных АКБ и СК в зависимости от токового режима и температуры. Рассматривалось применение алгоритма для электрических и гибридных автомобилей, в частности для Tesla Model S, тягача Tesla Semi и автомобиля повышенной проходимости.

Перечисленные и другие работы рассматривают, прежде всего, СК в качестве дополнительного накопителя, кроме того, они не затрагивают вопроса количественной оценки экономической эффективности гибридации для различных видов нагрузки. Последнее освещается в [2], где представлена модель количественной оценки эффективности гибридации, основанная на сравнении стоимости буферизации электроэнергии каждым типом АКБ и гибридным накопителем в целом. Введены понятия коэффициента синергетического эффекта гибридации и степени внутренней буферизации электроэнергии, предложены методы расчета этих величин. Показано, что в общем случае гибридача СНЭ экономически эффективна, если стоимость буферизации электроэнергии дополнительным типом АКБ не превышает соответствующую стоимость для АКБ основного блока более чем в 1,5–2 раза. Так, дополнение литий-ионных блоков суперконденсаторами, как правило, экономически нецелесообразно, хотя может быть продиктовано требованиями высокой импульсной мощности СНЭ.

Несмотря на то что за счет ресурса циклирования стоимость буферизации электроэнергии литий-ионными АКБ ниже, чем свинцово-кислотными, более низкая стоимость свинцово-кислотных батарей приводит к их широкому использованию в системах солнечной и ветрогенерации. Очевидно, что в случае дорогих кредитных ресурсов использование дешевых типов АКБ в СНЭ становится более привлекательным. В работе [3] представлена модель расчета экономической эффективности гибридации, основанная на расчете отношения стоимости буферизации гибридной СНЭ и стоимости буферизации основным блоком. В данной работе эта модель использована для оценки эффективности гибридации свинцово-кислотных АКБ литий-ионным блоком.

Целью настоящей работы является продолжение разработки методов технико-экономического обоснования использования той или иной схемы гибридации для заданного применения СНЭ. Исследуются особенности пассивной гибридации свинцово-кислотных и литий-ионных аккумуляторов. Получены технические и экономические характеристики гибридных СНЭ для трех характерных типов нагрузок: вилочного электропогруз-

чика (ЭП), 30-квартирного жилого дома (ЖД), а также 300-квартирного жилого комплекса (ЖК). Полученные результаты могут быть использованы для проектирования гибридных СНЭ для небольших домашних энергосистем с солнечными и ветроэлектростанциями, демонстрируют особенности и технико-экономический потенциал пассивной гибридизации, могут найти непосредственное применение при проектировании СНЭ и систем «генератор – накопитель – потребитель».

Постановка задачи

При конструировании гибридных СНЭ встает вопрос о способе электрического сопряжения разнотипных модулей. Поскольку гибридизация СНЭ, как правило, имеет целью снижение инвестиционных и эксплуатационных затрат на накопление электроэнергии, использование наиболее экономичных и простых способов сопряжения становится принципиальным требованием. Простейшим способом сопряжения являются их постоянное параллельное соединение и силовая коммутация блоков накопителей согласно определенному алгоритму (рис. 1). При этом токи определяются ЭДС как функциями состояния зарядки $\varepsilon_1(SOC)$ и $\varepsilon_2(SOC)$, внутренними сопротивлениями, емкостями и индуктивностями модулей. Блоки должны иметь совпадающий или близкий диапазон рабочих напряжений.

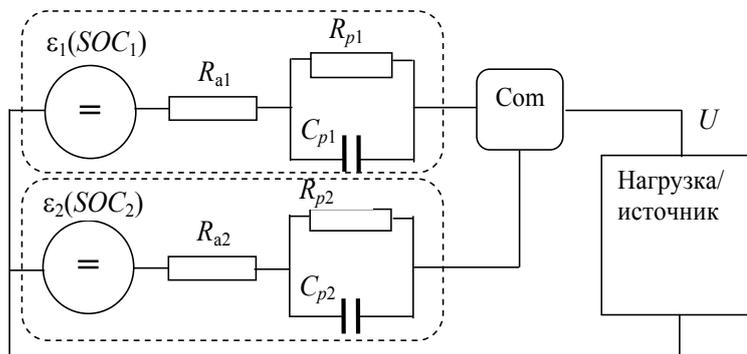


Рис. 1. Электрическая схема гибридной системы накопления электроэнергии:
 $\varepsilon(SOC)$ – ЭДС аккумулятора, функция SOC, Com – программируемый коммутатор

Fig. 1. Electrical diagram of a hybrid energy storage system: $\varepsilon(SOC)$ – battery electromotive force, SOC function, Com – programmable switch

Для моделирования совместной работы блоков СНЭ в рамках электрической схемы (рис. 1) необходимо с достаточной точностью определить электрические характеристики СНЭ различных типов: зависимость ЭДС (напряжения разомкнутой цепи) от состояния заряда батареи $V_{oc}(SOC)$, внутреннее активное сопротивление (R_{a1} , R_{a2}) и параметры поляризации – величины R_{p1} , R_{p2} , C_{p1} и C_{p2} в электрических схемах замещения. Для определения $V_{oc}(SOC)$ и параметров схемы замещения нами использованы ступенчатые разрядно-зарядные кривые в токовом режиме $0,5C$ и с трехчасовой паузой для релаксации параметров АКБ на каждой ступени.

Экспериментальные значения $V_{oc}(SOC)$ аппроксимировались функцией

$$V_{oc} = E_0 + A \cdot SOC + B \cdot \exp\left(\frac{SOC - 1}{D}\right) - F \cdot \exp(-G \cdot SOC), \quad (1)$$

где E_0, A, B, D, F и G – параметры.

Особенностью функции (1) по сравнению с функцией Шеперда [11] является то, что она состоит из трех относительно независимых функциональных частей, что обеспечивает высокую эффективность нахождения параметров аппроксимации.

Напряжение на ячейке представляется в виде суммы напряжения разомкнутой цепи, падения напряжения на активном сопротивлении и напряжения поляризации ячейки, равного напряжению на $R-C$ цепочке:

$$U = V_{oc} - IR_a - U_p. \quad (2)$$

Предполагаем, что параметры схемы замещения не зависят от направления тока (разрядка или зарядка). Незначительный гистерезис функции $V_{oc}(SOC)$, возникающий при смене направления тока, отдельно не моделируется. Значение SOC рассчитывается по величине протекшего заряда и номинальной емкости

$$SOC = 1 - \int_0^t Idt / C_N$$

при начальном значении $SOC(t=0) = 1$. Величина емкости в $R-C$ цепочке схемы замещения (рис. 1) рассчитывается по времени поляризации τ_p : $C_p = \tau_p / R_p$.

Параметры, использованные для расчетов совместной работы блоков гибридной СНЭ, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры модели (1) и схемы замещения для некоторых видов аккумуляторов
Model (1) parameters and equivalent circuits for some types of batteries

АКБ	C , А·ч	U_{op} , В	E_0 , В	A , В/(А·ч)	B , В	D , А·ч	F , В	G , А·ч	Средне- квадрати- ческое отклоне- ние, %	R_a , мΩ	R_p , мΩ	τ_p , с
Pl ₁ AM 100/850	100	10,6–12,6	2,493	0,221	10,005	11,538	1,1677	18,222	~0,7	25	100	1,15
Pl ₂ 7 Ач, AGM DELTA	7	10,6–12,6	2,493	0,221	10,005	11,538	1,1677	18,222	~0,7	62	270	2,83
LiFePO разряд	210	3,1–3,4	3,220	0,1223	0,255	0,0117	0,39722	30,9828	<0,4	0,93	0,6	9,6
MNC разряд	50	3,3–4,3	3,2593	0	1,0781	0,577	0,1807	26,49	<0,4	3,7	0,89	9,4

В исследовании основной блок составлен свинцово-кислотными АКБ, а дополнительный – литий-ионными. Идея гибридизации предполагает, что степень гибридизации α (отношение емкости дополнительного блока к общей емкости) существенно меньше единицы [2]. Для стандартного варианта СНЭ полагаем $\alpha \sim 1/10$, общая энергетическая емкость $C \sim 10$ кВт·ч, номинальное напряжение $U_n = 12$ В. Структуры гибридных систем, отвечающие вышеуказанным условиям:

$$\alpha = 0,22; \begin{cases} \text{Pl}_1 \ 8p1s, \\ \text{LiFePO} \ 4s, \end{cases} C = 12,33 \text{ кВт}\cdot\text{ч},$$

$$\begin{cases} \text{Pl}_1 \ 8p1s, \\ \text{MNC} \ 2p3s, \end{cases} C = 10,74 \text{ кВт}\cdot\text{ч}, \alpha = 0,106.$$

Для номинального напряжения 48 В возможны структуры:

$$\begin{cases} \text{Pl}_1 \ 8p4s, \\ \text{LiFePO} \ 14s, \end{cases} C = 47,96 \text{ кВт}\cdot\text{ч}, \alpha = 0,2;$$

$$\begin{cases} \text{Pl}_1 \ 8p4s, \\ \text{LiFePO} \ 15s, \end{cases} C = 48,65 \text{ кВт}\cdot\text{ч}, \alpha = 0,21;$$

$$\begin{cases} \text{Pl}_1 \ 8p4s, \\ \text{MNC} \ 12s, \end{cases} C = 40,68 \text{ кВт}\cdot\text{ч}, \alpha = 0,056;$$

$$\begin{cases} \text{Pl}_1 \ 8p4s, \\ \text{MNC} \ 13s, \end{cases} C = 40,87 \text{ кВт}\cdot\text{ч}, \alpha = 0,06.$$

Буквы “*p*” и “*s*” означают параллельное и последовательное соединения. Далее по тексту обозначения “*1s*” и “*1p*” опускаются. Параллельно-последовательные сборки, как и отдельные ячейки, моделируются схемами замещения (рис. 1). Функция $V_{oc}(SOC)$ сборки определяется с учетом числа последовательно соединенных базовых элементов, величины R_a и R_p определяются по правилам сложения сопротивлений, емкость C_p вычисляется исходя из допущения о том, что постоянная времени поляризации для сборки τ остается той же, что и у отдельной ячейки, т. е.

$$\begin{cases} C_{p,сборки} = \frac{\tau}{R_{p,сборки}}, \end{cases} \quad (3)$$

где $\begin{cases} R_{p,сборки} = \sum R_p \end{cases}$ – для последовательного и $R_{p,сборки} = \frac{1}{\sum \left(\frac{1}{R_p} \right)}$ –

для параллельного соединения. Параметры для блоков АКБ представлены в табл. 2.

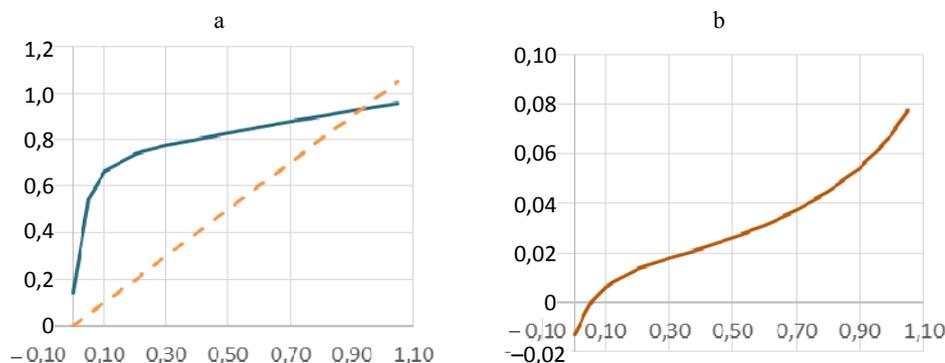
Таблица 2

Модельные параметры аккумуляторных блоков гибридных систем
Model parameters of battery units of hybrid systems

Структура и тип модуля	C_E , кВт·ч*	U_{op} , В	R_a , мΩ	R_p , мΩ	C_p , Ф
PI ₁ 8p	9,60	10,6–12,6	25/8 = 3,125	100/8 = 12,5	1,15/12,5 = 92
LiFePO 4s	2,73	12,4–13,6	3,72	2,4	9,6/2,4 = 4 · 10 ³
MNC 2p 3s	1,14	9,9–12,9	3,7·3/2 = 5,55	0,89·3/2 = 1,335	9,4/1,335 = 7,04·10 ³
MNC 16p 3s	9,12	9,9–12,9	3,7·3/16 = 0,69	0,89·3/16 = 0,17	9,4/0,17 = 55,3·10 ³
PI ₁ 8p 4s	38,4	42,4–50,4	50	200	1,5/0,2 = 7,5
MNC 12s	2,28	39,6–51,6	44,4	10,68	9,4/10,68 = 0,88
MNC 13s	2,47	42,9–55,9	48,1	11,57	9,4/11,57 = 0,812
LiFePO 14s	9,56	43,4–47,6	13,02	8,4	9,6/8,4 = 1,14
LiFePO 15s	10,25	46,5–51	13,95	9,0	9,6/9 = 1,07

*Энергетическая емкость рассчитана по номинальному напряжению.

Как видно из табл. 2, для достаточно высоких напряжений, можно создать структуру, в которой рабочее напряжение дополнительного блока лежит вблизи или сдвинуто относительно рабочего диапазона основного. Наглядное представление о соответствии рабочих диапазонов напряжений дает график $SOC_2 = \varphi(SOC_1)$, получаемый как решение уравнения $V_{oc1}(SOC_1) = V_{oc2}(SOC_2)$ (рис. 2, 3).

Рис. 2. Зависимость $SOC_2 = \varphi(SOC_1)$ для систем $U_n = 12$ В:а – PI₁ 8p – MNC 2p 3s; б – PI₁ 8p – LiFePO 4s.Штриховая линия – $SOC_2 = SOC_1$ Fig. 2. Dependence $SOC_2 = \varphi(SOC_1)$ for $U_n = 12$ V systems:а – PI₁ 8p – MNC 2p 3s; б – PI₁ 8p – LiFePO 4s.Dashed line – $SOC_2 = SOC_1$

Из графиков рис. 2, 3 видно, что при структуре СНЭ PI₁ 8p – LiFePO 4s рабочий диапазон напряжений литиевого модуля лежит выше диапазона напряжений свинцового. В системе PI₁ 8p – MNC 2p3s рабочий диапазон напряжений литиевого блока близок к диапазону свинцового.

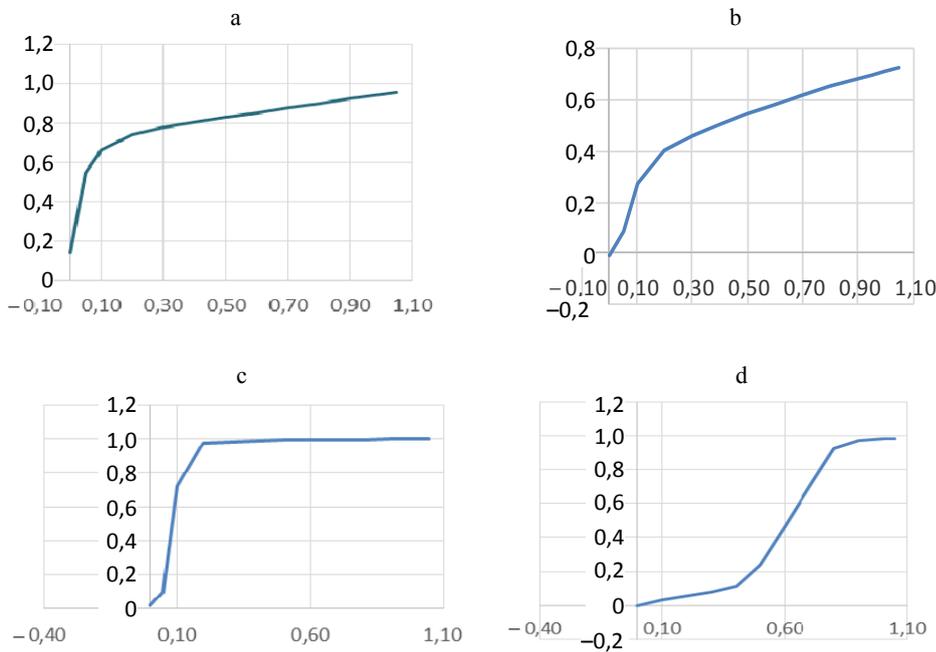


Рис. 3. Зависимость $SOC_2 = \varphi(SOC_1)$ для систем $U_n = 48$ В:

а – $Pl_1 8p4s - MNC 12s$; б – $Pl_1 8p4s - MNC 13s$;
 с – $Pl_1 8p4s - LiFePO 14s$; д – $Pl_1 8p4s - LiFePO 15s$

Fig. 3. Dependence $SOC_2 = \varphi(SOC_1)$ for $U_n = 48$ V systems:

а – $Pl_1 8p4s - MNC 12s$; б – $Pl_1 8p4s - MNC 13s$;
 с – $Pl_1 8p4s - LiFePO 14s$; д – $Pl_1 8p4s - LiFePO 15s$

Наклон графика $SOC_2 = \varphi(SOC_1)$ определяется отношением производных функций $V_{oc,1}(SOC_1)$ и $V_{oc,2}(SOC_2)$. В области напряжений, характеризующейся большим наклоном $SOC_2 = \varphi(SOC_1)$, с большей интенсивностью работает дополнительный блок СНЭ.

Имитационное моделирование гибридной СНЭ

Для моделирования гибридной СНЭ использовались три типа модельных графиков электрической нагрузки: 1 – нагрузка вилочного электропогрузчика (ЭП) [2]; 2 – нагрузка 30-квартирного жилого дома; 3 – нагрузка 300-квартирного жилого комплекса [12]. График длительной работы вилочного электропогрузчика получаем повторением имеющегося короткого графика с ритмом: 10 мин нагрузки – 10 мин отдыха.

Расчеты проводились для случая постоянного параллельного соединения блоков и для случая коммутации дополнительного блока по пороговому алгоритму: подключение при превышении тока нагрузки выше порога I_{max} и при снижении тока – ниже I_{min} . Базовой величиной нагрузки примем среднее по времени значение тока нагрузки $\langle I \rangle$, а величины I_{min} и I_{max} будем определять амплитудой $\Delta I \equiv (I_{max} - \langle I \rangle)$.

Представление о характере взаимодействия блоков дают графики состояния зарядки блоков от времени $SOC_1(t)$ и $SOC_2(t)$ в рабочем цикле. Количественно работа гибридной системы характеризуется коэффициентом внутренней рекуперации ϵ и эффективностью гибридизации [3]

$$\varepsilon(\alpha) \equiv \int_0^T |i_2 - \alpha I| dt / \int_0^T |I| dt, \quad (4)$$

где i_2 – ток дополнительного блока; I – то же нагрузки; α – степень гибридизации.

Величина $\varepsilon(\alpha)$ зависит от графика нагрузки $I(t)$, поэтому не является собственной характеристикой СНЭ. В случае коммутации дополнительного блока по пороговому алгоритму рассчитывалось также относительное время его «простоя», складывающееся из времени нахождения в отключенном состоянии (τ_0), времени нахождения в предельно заряженном (τ_+) и предельно разряженном (τ_-) состоянии:

$$\theta_0 = \frac{\tau_0 + \tau_- + \tau_+}{\tau_{\text{общ}}}.$$

На рис. 4 приведены графики зависимости состояния зарядки блоков СНЭ P1 8p и MNC 2p3s от времени для различных видов нагрузки. Для нагрузок более высокой мощности рассматриваются варианты параллельной работы 2 и 13 идентичных гибридных СНЭ.

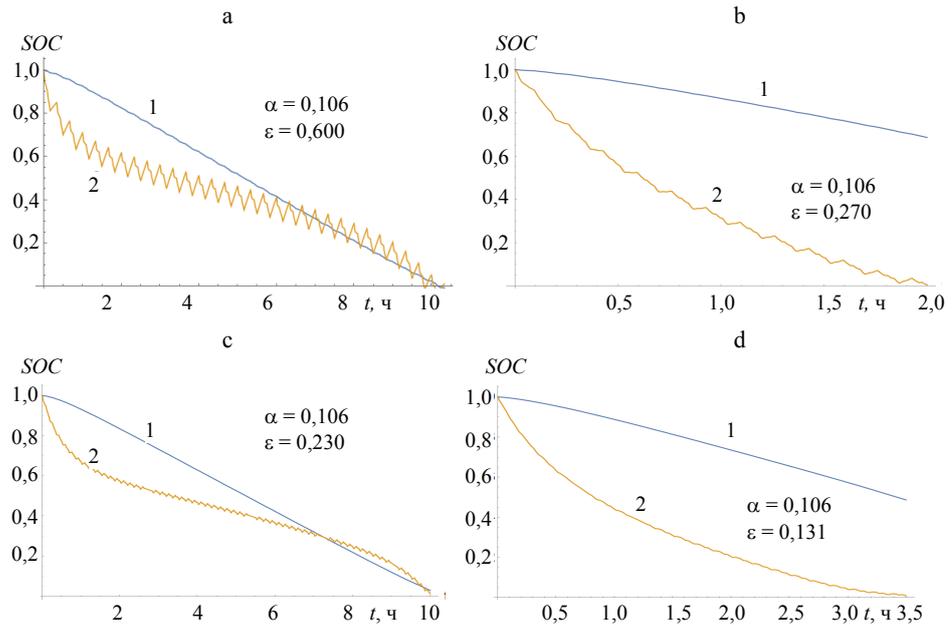


Рис. 4. Зависимость SOC_1 и SOC_2 от времени. Параллельное соединение блоков: а – нагрузка электропогрузчика; б – то же жилого дома; с – то же жилого дома (удвоенная емкость системы накопления электроэнергии); д – то же жилого комплекса (емкость системы накопления электроэнергии увеличена в 13 раз); 1 – основной блок; 2 – дополнительный блок

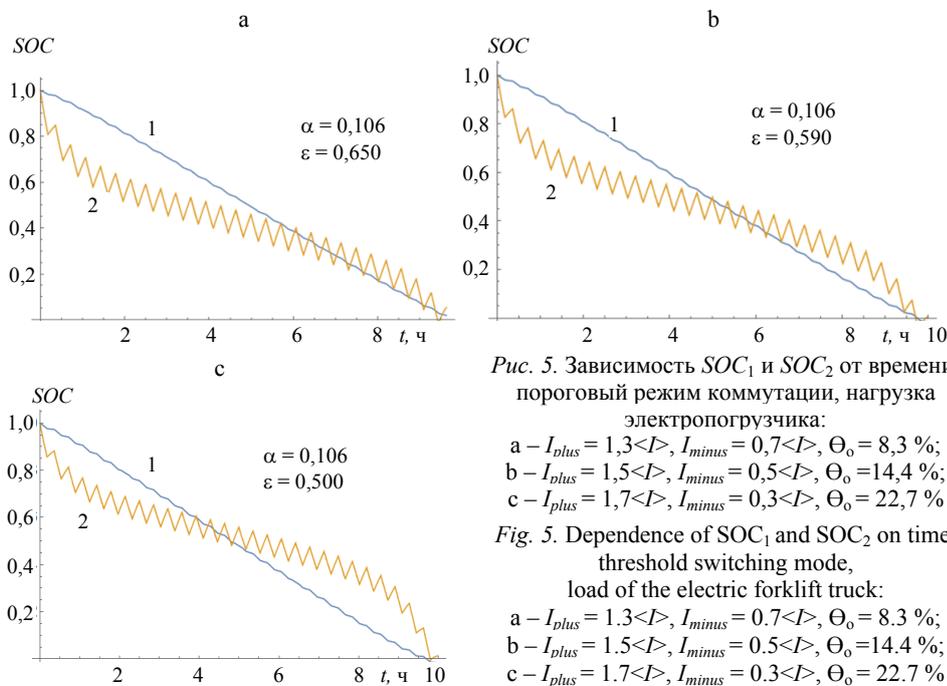
Fig. 4. The dependence of SOC_1 and SOC_2 on time. Parallel connection of the units: а – load of the electric forklift truck; б – the same for the residential building; с – the same for the residential building (doubled capacity of the electricity storage system); д – the same for the residential complex (the capacity of the power storage system has been increased by 13 times); 1 – main unit; 2 – additional unit

При анализе данных (рис. 2, 4) обращает на себя внимание кажущееся противоречие, заключающееся в том, что равновесная функция $SOC(I)$ литиевого блока почти везде лежит выше таковой свинцово-кислотного блока, в то время как при работе СНЭ имеет место обратное. Такое поведение системы обусловлено относительно малой емкостью дополнительного блока и недостаточной скоростью его подзарядки.

Расчеты показывают, что при параллельном соединении блоков для нагрузки ЭП достигается высокое значение коэффициента внутренней рекуперации электроэнергии $\varepsilon = 0,6$, соответствующее интенсивному взаимодействию блоков. Для более равномерных нагрузок ЖД и ЖК коэффициент внутренней рекуперации существенно ниже $\varepsilon \sim 0,1-0,3$, что снижает эффективность гибридизации.

Из графиков рис. 4 видно, что емкость СНЭ, степень гибридизации и тип нагрузки определяют согласованность темпа разрядки основного и дополнительного блоков. Согласно рис. 4b, d, недостаточная общая емкость СНЭ (высокие токовые режимы) приводит к преждевременной разрядке дополнительного блока. При 10-часовом режиме разрядки (рис. 4a, b) основной и дополнительный блоки разряжаются согласованно.

Рассмотрим режимы работы блоков гибридной СНЭ при пороговом режиме коммутации. Значения порогов включения/выключения корректируются в зависимости от типа нагрузки, ее равномерности. В противном случае дополнительный блок может быть практически исключен из работы. На рис. 5 приведены зависимости состояния зарядки основного и дополнительного блоков СНЭ от времени для трех типов нагрузки.

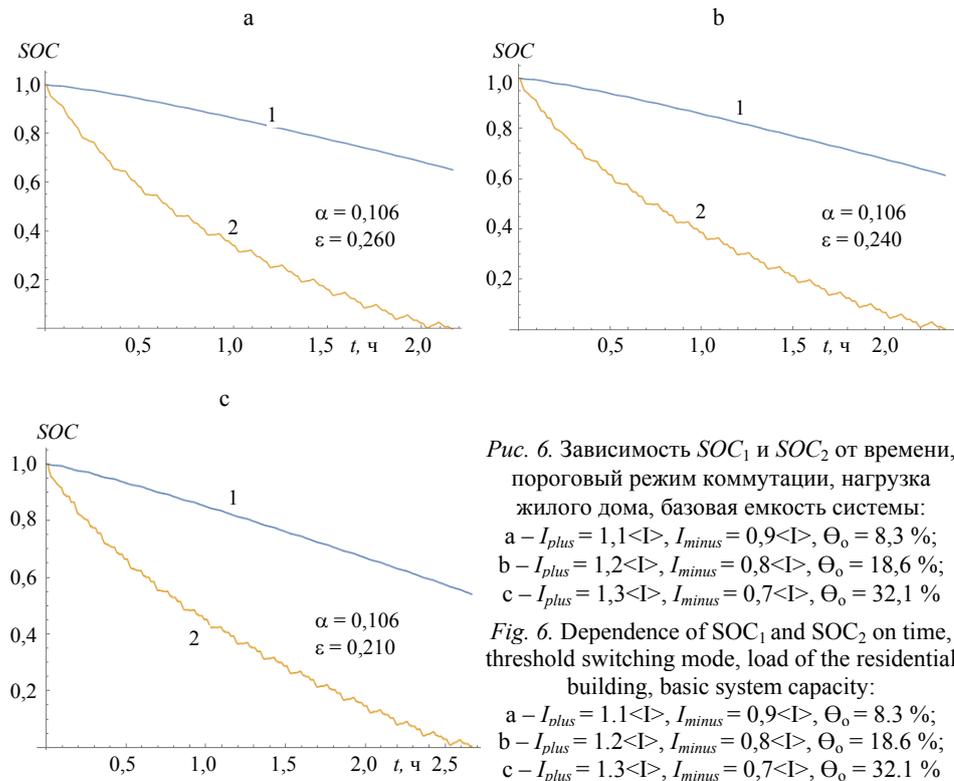


Режимы разрядки, представленные на рис. 5, отличаются временем простоя дополнительного блока. Из расчетов видно, что коэффициент внутренней рекуперации при пороговой коммутации может быть выше, чем при простом параллельном включении блоков. Однако простой дополнительного блока уменьшает его износ, что должно учитываться при оценке экономической эффективности гибридизации.

Приведем графики разрядки блоков для графиков нагрузки ЖД при базовой и увеличенной в два раза емкости СНЭ (две СНЭ подключаются параллельно).

Сравнение данных рис. 6 и 7 показывает, что величина емкости СНЭ оказывает сильное влияние на время работы гибридной пары, что связано с преждевременным разрядом и прекращением работы дополнительного блока. При этом относительное время простоя не зависит от емкости СНЭ. Значение порога включения/выключения также оказывает (но меньшее) влияние на длительность работы гибридной СНЭ.

На примере расчета разрядки блоков для нагрузки ЖК (рис. 8) видно, что изменением значения порогов включения/выключения можно добиться хорошего соответствия темпа разрядки блоков, при этом повышая значение коэффициента внутренней рекуперации и время отдыха дополнительного блока.



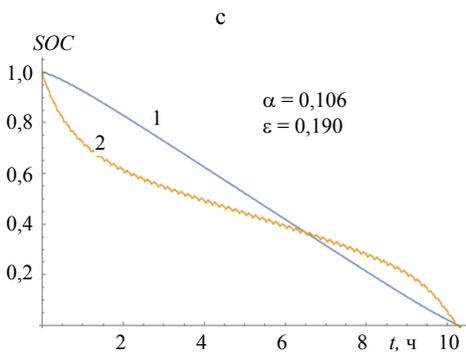
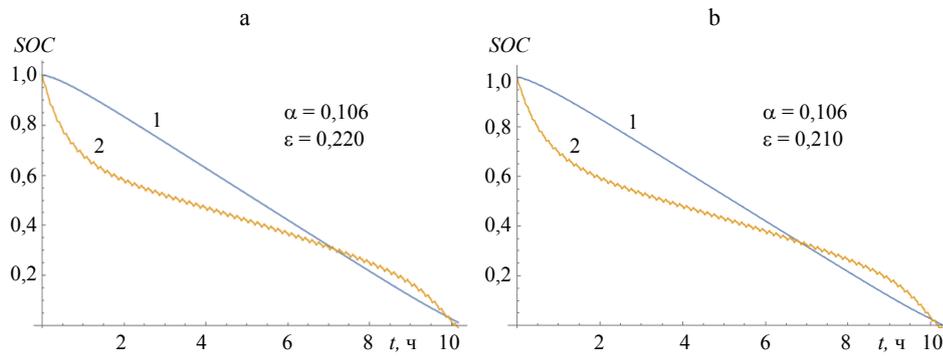


Рис. 7. Зависимость SOC_1 и SOC_2 от времени, пороговый режим коммутации, нагрузка жилого дома, удвоенная емкость системы:
 a – $I_{plus} = 1,1 < I >$, $I_{minus} = 0,9 < I >$, $\Theta_0 = 8,3\%$;
 b – $I_{plus} = 1,2 < I >$, $I_{minus} = 0,8 < I >$, $\Theta_0 = 18,6\%$;
 c – $I_{plus} = 1,3 < I >$, $I_{minus} = 0,7 < I >$, $\Theta_0 = 32,1\%$

Fig. 7. Dependence of SOC_1 and SOC_2 on time, threshold switching mode, load of the residential building, doubled capacity of the electricity storage system:
 a – $I_{plus} = 1.1 < I >$, $I_{minus} = 0.9 < I >$, $\Theta_0 = 8.3\%$;
 b – $I_{plus} = 1.2 < I >$, $I_{minus} = 0.8 < I >$, $\Theta_0 = 18.6\%$;
 c – $I_{plus} = 1.3 < I >$, $I_{minus} = 0.7 < I >$, $\Theta_0 = 32.1\%$

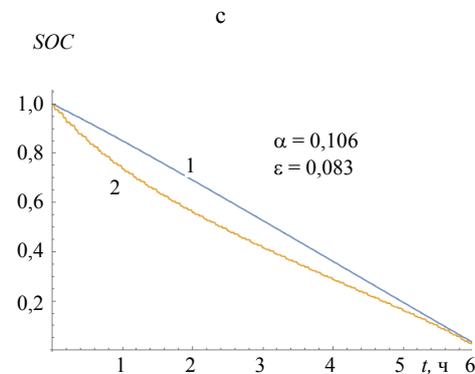
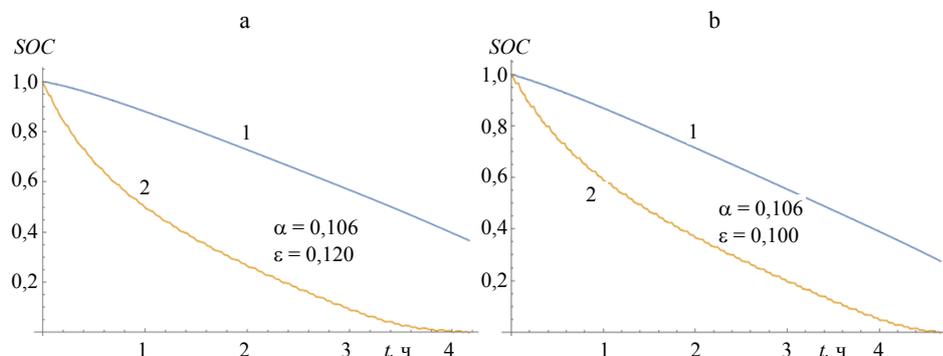


Рис. 8. Зависимость SOC_1 и SOC_2 от времени, пороговый режим коммутации, нагрузка жилого комплекса:

a – $I_{plus} = 1,05 < I >$, $I_{minus} = 0,95 < I >$, $\Theta_0 = 20,5\%$;
 b – $I_{plus} = 1,1 < I >$, $I_{minus} = 0,9 < I >$, $\Theta_0 = 45,4\%$;
 c – $I_{plus} = 1,15 < I >$, $I_{minus} = 0,85 < I >$, $\Theta_0 = 72,4\%$

Fig. 8. Dependence of SOC_1 and SOC_2 on time, threshold switching mode, load of the residential building complex:
 a – $I_{plus} = 1.05 < I >$, $I_{minus} = 0.95 < I >$, $\Theta_0 = 20.5\%$;
 b – $I_{plus} = 1.1 < I >$, $I_{minus} = 0.9 < I >$, $\Theta_0 = 45.4\%$;
 c – $I_{plus} = 1.15 < I >$, $I_{minus} = 0.85 < I >$, $\Theta_0 = 72.4\%$

Поскольку при пороговой коммутации часть времени дополнительный блок исключен из работы (рис. 9), коэффициент ε рассчитывается только во время совместной работы блоков. При этом ε незначительно падает с увеличением амплитуды порога (рис. 10), а коэффициент эффективности η возрастает.

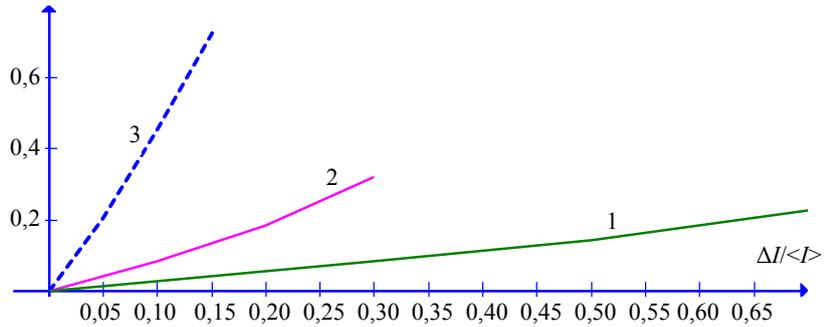


Рис. 9. Зависимость времени простоя дополнительного блока Θ_0 от относительной амплитуды ΔI отклонения пороговых значений тока от среднего: 1 – нагрузка электропогрузчика; 2 – то же жилого дома (удвоенная емкость системы накопления электроэнергии); 3 – то же жилого комплекса (емкость системы накопления электроэнергии увеличена в 13 раз)

Fig. 9. Dependence of the downtime of the additional block Θ_0 on the relative amplitude ΔI of the deviation of the threshold current values from the average: 1 – load of electric forklift; 2 – the same of residential building (double capacity of electric power storage system); 3 – the same of residential complex (capacity of electric power storage system increased by 13 times)

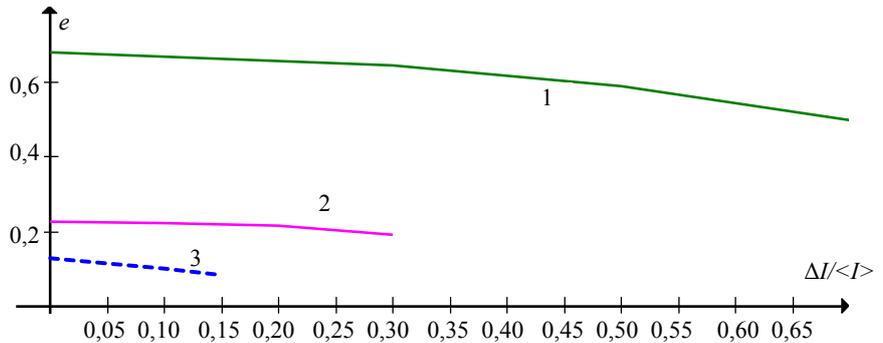


Рис. 10. Зависимость величины внутренней рекуперации гибридной системы накопления электроэнергии ε от относительной амплитуды $\Delta I/<I>$ отклонения пороговых значений тока от среднего: 1 – нагрузка электропогрузчика; 2 – то же жилого дома (удвоенная емкость системы накопления электроэнергии); 3 – то же жилого комплекса (емкость системы накопления электроэнергии увеличена в 13 раз)

Fig. 10. The dependence of the internal recovery value of the hybrid energy storage system ε on the relative amplitude $\Delta I/<I>$ of the deviation of the threshold values of the current from the average: 1 – load of the electric forklift truck; 2 – the same of the residential building (doubled capacity of the electric power storage system); 3 – the same of the residential complex (capacity of the electric power storage system increased by 13 times)

В [2] предложена модель оценки экономической эффективности гибри- дизации СНЭ. Введен коэффициент эффективности η , имеющий смысл от- носительного изменения стоимости буферизации электроэнергии при ги- бридизации СНЭ. Величина η положительная, если при гибридизации сто- имость буферизации электроэнергии падает, и отрицательная – если возрастает. Учитывая, что простой блока исключается из времени его из- носа, модернизируем формулу для оценки коэффициента экономической эффективности

$$\eta(\alpha) = \frac{1}{\frac{1 - \alpha}{1 + \sigma(\alpha + \varepsilon(\alpha))} + \frac{\delta_2}{\delta_{10}} \alpha (1 + \varepsilon)(1 - \theta)} - 1, \quad (5)$$

где δ_{10} – стоимость буферизации электроэнергии основным блоком АКБ в отсутствие дополнительного; δ_2 – то же буферизации электроэнергии до- полнительным блоком; σ – коэффициент, характеризующий эффект допол- нительного блока АКБ на ресурс работы основного.

Специфика рассматриваемой в статье задачи заключается в том, что схема гибридной СНЭ (свинцово-кислотный АКБ, дополненный литий- ионным блоком) в общем случае экономически не обоснована ввиду отно- сительно более низкой стоимости буферизации электроэнергии литий- ионными АКБ [2]. Однако если на приобретение литий-ионных АКБ ис- пользуются дорогие кредитные ресурсы, стоимость литий-ионных бата- рей на протяжении срока эксплуатации может существенно увеличиться. Учитывая сказанное, проведем оценку экономической эффективности гибридизации, согласно (5), для варианта равной стоимости буфериза- ции свинцово-кислотным и литий-ионным блоками $\delta_{10} = \delta_2 = 0,4$ \$/(кВт·ч) и вариантом более дешевой буферизации литий-ионным блоком $\delta_{10} = 0,4$ \$/(кВт·ч), $\delta_2 = 0,2$ \$/(кВт·ч), $\sigma = 1$. Соответствующие оценки для раз- личных нагрузок и режимов коммутации блоков приведены в табл. 3.

Оценки показывают, что эффект гибридизации СНЭ положительный для всех типов нагрузки как при низкой, так и при высокой стоимости литий- ионной компоненты. Данный результат объясняется использованием посто- янного значения синергетического коэффициента $\sigma = 1$, который в силу свое- го физического смысла должен зависеть от характера нагрузки. Действитель- но, при «жестком» режиме нагрузки его смягчение дополнительным блоком заметно увеличивает ресурс базового блока, а при изначально мягком режиме его дополнительное смягчение мало отразится на ресурсе АКБ. Соответ- ственно синергетический коэффициент должен учитывать жесткость режима нагрузки. Физически обоснованным будет нормировка синергетического ко- эффициента на величину относительной дисперсии токовой нагрузки. Тогда для нагрузки ЭП $\sigma = 1$, для ЖД – 0,405, для ЖК – 0,125. Соответствующие данные (табл. 3) показывают, что учет коррекции значения σ приводит к снижению эффективности гибридизации.

Анализ данных показывает, что управление коммутацией блоков по пороговому значению нагрузки предпочтительнее схемы посто- янного параллельного соединения для всех видов нагрузки.

Таблица 3

Эффективность гибридизации для рассмотренных систем,
схем взаимодействия блоков и видов нагрузки (степень гибридизации $\alpha = 0,106$)
Hybridization efficiency for the considered systems, units interaction schemes and load types
(degree of hybridization $\alpha = 0.106$)

Нагрузка	Емкость	Амплитуда $\Delta I / \langle I \rangle$	Коэффициент ε	Время простоя Θ_0	Эффективность η , $\delta_{10} = \delta_2$	Эффективность η , $\delta_{10} = \delta_2$ Коррек. σ	Эффективность η при $\delta_{10} = 2\delta_2$	
Электропогрузчика	1С	0,0	0,677	0,0	0,472	0,472	0,694	
Электропогрузчика	1С	0,3	0,645	0,083	0,491	0,491	0,693	
Электропогрузчика	1С	0,5	0,587	0,144	0,488	0,488	0,667	
Электропогрузчика	1С	0,7	0,496	0,227	0,469	0,469	0,615	
Жилого дома	1С	0,0	0,270	0,0	0,275	0,098	0,395	Б2*
Жилого дома	1С	0,1	0,257	0,083	0,285	0,109	0,395	Б2*
Жилого дома	1С	0,2	0,239	0,186	0,296	0,122	0,392	Б2*
Жилого дома	1С	0,3	0,210	0,321	0,305	0,137	0,383	Б2*
Жилого дома	2С	0,0	0,227	0,0	0,249	0,090	0,359	
Жилого дома	2С	0,1	0,222	0,083	0,262	0,101	0,365	
Жилого дома	2С	0,2	0,215	0,186	0,279	0,116	0,371	
Жилого дома	2С	0,3	0,193	0,321	0,292	0,132	0,368	
Жилого комплекса	13С	0,0	0,131	0,0	0,187	0,012	0,278	Б2*
Жилого комплекса	13С	0,05	0,116	0,205	0,211	0,037	0,284	Б2*
Жилого комплекса	13С	0,1	0,101	0,454	0,243	0,069	0,294	Б2*
Жилого комплекса	13С	0,15	0,083	0,724	0,276	0,105	0,303	
* Преждевременный разряд.								

Наибольшая эффективность достигается для существенно переменного графика нагрузки ЭП. При этом функция зависимости эффективности от амплитуды порога демонстрирует максимум. Для более равномерных графиков ЖД и ЖК параметр эффективности существенно меньше, что связано с уменьшением коэффициента внутренней рекуперации (перетоков энергии между блоками) и синергетического коэффициента, при этом увеличение времени простоя оказывает противоположное влияние на эффективность гибридации, в результате чего она повышается с ростом амплитуды порога включения дополнительного блока.

ВЫВОДЫ

1. В статье рассмотрен вопрос взаимодействия блоков гибридного накопителя электроэнергии на основе свинцово-кислотных и литий-ионных аккумуляторов при пассивном сопряжении блоков: простом параллельном соединении и коммутации по пороговому алгоритму. Представлена модель моделирования работы данной гибридной системы на основе схемы замещения первого порядка при разнообразных нагрузках, задаваемых графиками потребляемой мощности или силы тока. Показано, что выбором электрохимической системы литий-ионных элементов можно добиться удовлетворительного соответствия рабочих напряжений разнородных модулей и реализовать гибридный СНЭ без активных преобразователей напряжения. Проведено моделирование гибридной СНЭ, составленной из свинцово-кислотных и литий-ионных NMC элементов и степенью гибридации $\alpha = 0,106$.

2. Показано, что величина емкости СНЭ при постоянной степени гибридации оказывает принципиальное влияние на время работы гибридной пары, поскольку при недостаточной емкости СНЭ имеют место преждевременный разряд и прекращение работы дополнительного блока.

3. Наибольшая степень внутренней рекуперации и экономическая эффективность гибридной СНЭ достигаются при сильно переменных нагрузках, характерных для электропогрузчиков и некоторых других промышленных потребителей. Для более ровных графиков нагрузок величина коэффициента внутренней рекуперации уменьшается. Схема коммутации блоков по пороговому значению нагрузки предпочтительнее схемы постоянного параллельного соединения для всех видов нагрузки. При этом для случая резкопеременных нагрузок достаточно эффективной может оказаться простейшая схема параллельного соединения блоков АКБ.

4. Схема коммутации блоков по пороговому принципу (при технической простоте) позволяет управлять работой гибридной системы, эффективно использовать емкость дополнительного блока на длительных рабочих периодах и оптимизировать коэффициент внутренней рекуперации электроэнергии. Таким образом, системы с пороговым алгоритмом сопряжения блоков могут использоваться для потребителей, изменяю-

щих свой график электрической нагрузки. В то же время, при равномерном графике нагрузки, примером которого может служить график потребления жилого многоквартирного комплекса, вопрос об экономической эффективности гибридной системы должен рассматриваться более детально с учетом уменьшения влияния дополнительного блока на режим работы основного ($\sigma < 1$).

5. Полученные результаты могут служить основой для проектирования и технико-экономического обоснования применения гибридных систем накопления электроэнергии для промышленных и жилищно-коммунальных объектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мировой рынок накопителей энергии [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://about.bnef.com/blog/1h-2023-energy-storage-market-outlook>. Дата доступа: 07.04.2023.
2. Доброго, К. В. Моделирование функционального взаимодействия блоков гибридного накопителя электроэнергии / К. В. Доброго, И. А. Козначеев // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2023. Т. 66, № 5. С. 405–422. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-5-405-422>.
3. 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>.
4. Ragone, D. V. Review of Battery Systems for Electrically Powered Vehicles / D. V. Ragone // SAE Technical Paper. 1968. 680453. <https://doi.org/10.4271/680453>.
5. Application of Ultracapacitors as Traction Energy Sources / I. N. Varkin [et al.] // Proceedings of the 7th International Seminar on Double Layer Capacitors and Similar Energy Storage Devices 1997 Dec 8. Florida Educational Seminars, Boca Raton, 1997. P. 742–749.
6. Dougal, R. A. Power and Life Extension of Battery-Ultracapacitor Hybrids / R. A. Dougal, S. Liu, R. E. White // IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies. 2002. Vol. 25, No 1. P. 120–131. <https://doi.org/10.1109/6144.991184>.
7. Cericola, D. Hybridization of rechargeable batteries and electrochemical capacitors: principles and limits / D. Cericola, R. Koz'tz // Electrochim Acta. 2012. Vol. 72. P. 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2012.03.151>.
8. A Frequency Domain Approach to Analyzing Passive Battery-Ultracapacitor Hybrids Supplying Periodic Pulsed Current Loads / A. Kuperman [et al.] // Energy Conversion and Management. 2011. Vol. 52, Is. 12. P. 3433–3438. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2011.07.013>.
9. Kuperman, A. Battery-Ultracapacitor Hybrids for Pulsed Current Loads: A Review / A. Kuperman, I. Aharon // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2011. Vol. 15, No 2. P. 981–992. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.010>.
10. Catenaro, E. Framework for Energy Storage Selection to Design the Next Generation of Electrified Military Vehicles / E. Catenaro, D. M. Rizzo, S. Onori // Energy. 2021. Vol. 231. P. 120695. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120695>.
11. Shepherd, C. M. Design of Primary and Secondary Cells: II. An Equation Describing Battery Discharge // Journal of the Electrochemical Society. 1965. Vol. 112, No 7. P. 657–664. <https://doi.org/10.1149/1.2423659>.
12. Доброго, К. В. Модель электрической нагрузки жилищно-коммунального объекта для исследования систем «генератор – накопитель – потребитель» методом Монте-Карло / К. В. Доброго // Наука и техника. 2017. Т. 16, № 2. С. 160–170. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-2-160-170>.

REFERENCES

1. *IH 2023 Energy Storage Market Outlook*. Available at: <https://about.bnef.com/blog/1h-2023-energy-storage-market-outlook> (accessed 07 April 2023) (in Russian).
2. Dobrego K. V., Koznacheev I. A. (2023) Modelling of Functional Interaction of Hybrid Energy Storage System Battery Units. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 66 (5), 405–422. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-5-405-422> (in Russian).
3. Dobrego K. V. (2023) On the Problem of Arrangement of Hybrid Energy Storage Systems. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 66 (3), 215–232. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-3-215-232> (in Russian).
4. Ragone D. V. (1968) Review of Battery Systems for Electrically Powered Vehicles. *SAE Technical Paper*, 680453. <https://doi.org/10.4271/680453>.
5. Varkin I. N., Klementov A. D., Litvinenko S. V., Starodubtsev N. F., Stepanov A. B. Application of Ultracapacitors as Traction Energy Sources. *Proceedings of the 7th International Seminar on Double Layer Capacitors and Similar Energy Storage Devices 1997 Dec 8*. Florida Educational Seminars, Boca Raton, 742–749.
6. Dougal R. A., Liu S., White R. E. (2002) Power and Life Extension of Battery-Ultracapacitor Hybrids. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 25 (1), 120–131. <https://doi.org/10.1109/6144.991184>.
7. Cericola D., Kötz R. (2012) Hybridization of Rechargeable Batteries and Electrochemical Capacitors: Principles and Limits. *Electrochim. Acta*, 72, 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2012.03.151>.
8. Kuperman A., Aharon I., Kara A., Malki S. (2011) A Frequency Domain Approach to Analyzing Passive Battery-Ultracapacitor Hybrids Supplying Periodic Pulsed Current Loads. *Energy Conversion and Management*, 52 (12), 3433–3438. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2011.07.013>.
9. Kuperman A., Aharon I. (2011) Battery-Ultracapacitor Hybrids for Pulsed Current Loads: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15 (2), 981–992. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.010>.
10. Catenaro E., Rizzo D. M., Onori S. (2021) Framework for Energy Storage Selection to Design the Next Generation of Electrified Military Vehicles. *Energy*, 231, 120695. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120695>.
11. Shepherd C. M. (1965) (1965). Design of Primary and Secondary Cells: II. An Equation Describing Battery Discharge. *Journal of the Electrochemical Society*, 112 (7), 657–664. <https://doi.org/10.1149/1.2423659>.
12. Dobrego K. V. (2017) Model for Electric Load of Community Housing Projects to Investigate “Generator – Accumulator – Consumer” System while Using Monte-Carlo Method. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, 16 (2), 160–170. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-2-160-170> (in Russian).