

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-5-405-422>

УДК 621.355:004.94

Моделирование функционального взаимодействия блоков гибридного накопителя электроэнергии

К. В. Доброго¹⁾, И. А. Козначеев²⁾

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, 2023
Belarusian National Technical University, 2023

Реферат. Оптимизация технико-экономических параметров накопителей электроэнергии – необходимое условие для их широкого применения. В статье развивается общий подход и предлагается методика оценки экономической эффективности гибридизации электрохимических систем накопления энергии. С точки зрения оценки эффективности гибридизации накопителей исследуется ряд модельных систем, работающих в разных условиях нагрузки с использованием различных схем функционального взаимодействия блоков. В качестве базовых типов гибридных накопителей рассматриваются: свинцово-кислотные аккумуляторы (аккумуляторные кислотные батареи – АКБ), дополненные литий-ионными АКБ; свинцово-кислотные АКБ, дополненные суперконденсаторами; литий-ионные АКБ, дополненные суперконденсаторами. В качестве нагрузки системы накопления электроэнергии (СНЭ) рассматриваются: вилочный электропогрузчик, 30-квартирный жилой дом, а также 300-квартирный жилой комплекс. Используется количественно-качественная модель оценки эффективности гибридизации, основанная на сравнении стоимости буферизации электроэнергии каждым типом АКБ и гибридным накопителем в целом. Для всех случаев рассчитываются экономические показатели, характеризующие стоимость буферизации электроэнергии гибридными СНЭ, и анализируются преимущества той или иной схемы взаимодействия блоков гибридной СНЭ. Показано, что эффективность гибридизации демонстрирует сложную нелинейную зависимость от степени гибридизации, вид которой зависит как от типа используемых АКБ, так и от характера графика нагрузки, а также от типа функционального взаимодействия блоков. Характерной особенностью этой зависимости является резкое возрастание экономической эффективности при малых значениях $\alpha \leq 0,01$ и дальнейшее замедление роста или падение графика. Полученные результаты позволяют количественно сравнивать эффективность гибридизации СНЭ для конкретных условий ее эксплуатации. Рассмотренные модели и методы могут найти применение при проектировании СНЭ и систем «генератор – накопитель – потребитель», оценке экономической целесообразности гибридизации СНЭ.

Ключевые слова: накопитель электроэнергии, аккумулятор, суперконденсатор, гибридный накопитель, система управления аккумулятором, взаимодействие блоков, эквивалентная схема, моделирование

Для цитирования: 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>

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 Functional Interaction of Hybrid Energy Storage System Battery Units

K. V. Dobrego¹⁾, I. A. Koznacheev²⁾

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. Optimization of technical and economic parameters of electric power storage devices is a necessary condition for their widespread use. The article develops a general approach and proposes a methodology for assessing the economic efficiency of hybridization of electrochemical energy storage systems (ESSs). From the point of view of evaluating the effectiveness of storage hybridization, a number of model systems operating under different load conditions using different block functional interaction schemes are being investigated. Lead-acid batteries supplemented with lithium-ion batteries; lead-acid batteries supplemented with supercapacitors and lithium-ion batteries supplemented with supercapacitors are considered as the basic types of hybrid storage devices. An electric forklift, a 30-apartment residential building, as well as a 300-apartment residential complex are considered as the load of the ESS. A quantitative and qualitative model for evaluating the effectiveness of hybridization is used, based on comparing the cost of buffering electricity by each type of battery and the hybrid drive as a whole. For all cases, economic indicators characterizing the cost of buffering electricity by hybrid ESSs are calculated and the advantages of a particular scheme of interaction of hybrid ESS blocks are analyzed. It is shown that the hybridization efficiency demonstrates a complex nonlinear dependence on the degree of hybridization, the type of which depends both on the type of batteries used and on the nature of the load schedule, as well as on the type of functional interaction of the blocks. A specific feature of this dependence is a sharp increase in economic efficiency at small values of $\alpha \leq 0.01$ and a further slowdown in the growth or fall of the graph. The obtained results make it possible to quantitatively compare the efficiency of the hybridization of the ESS for specific conditions of its operation. The considered models and methods can be used in the design of ESSs and “generator – storage – consumer” systems, assessment of the economic feasibility of hybridization of ESSs.

Keywords: electric energy storage, battery, supercapacitor, hybrid storage, battery management system (BMS), block interaction, equivalent circuit, modeling

For citation: Dobrego K. V., Koznacheev I. A. (2023) Modelling of Functional Interaction of Hybrid Energy Storage System Battery Units. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 66 (5), 405–422. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-5-405-422> (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 кислотных батарей (АКБ) в последнее десятилетие составлял 20–30 %. Согласно данным BlumbergNEF [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.

Задача гибридизации формулируется следующим образом. Пусть необходимо создать систему накопления электроэнергии (СНЭ), характеризующуюся рядом технико-экономических параметров. Значения одних параметров СНЭ определены требованиями технического задания (ТЗ), значения других могут варьироваться. Пусть СНЭ может быть построена с использованием АКБ двух типов. Необходимо определить доли ячеек основного и дополнительного типов, при которых удовлетворяются требования ТЗ и (или) достигаются оптимальные значения целевых параметров. Исходя из данной формулировки можно выделить два типа задач: первый – удовлетворение путем гибридизации обязательных требований по массе, мощности, запасаемой энергии и т. п.; второй – минимизация стоимости СНЭ в рамках ограничений по другим параметрам. Последняя задача более сложная, поскольку подразумевается существенное влияние АКБ дополнительного типа на режим работы АКБ основного типа и, следовательно, на экономические характеристики всей СНЭ.

Технические аспекты гибридизации накопительных блоков рассматривались в литературе достаточно давно [2]. Так, задача гибридизации литий-ионных батарей и суперконденсаторов (СК) для применения в системах связи и в гибридных электрических автомобилях обсуждалась и моделировалась уже в 1996 г. в работе [3], в которой показано, что отдаваемая мощность и эксплуатационный ресурс АКБ гибридного автомобиля может быть увеличен за счет пассивной параллельной интеграции с суперконденсаторами. При этом уменьшается не только электрохимический, но и тепловой стресс АКБ [4].

Одна из первых работ по моделированию параллельных гибридных СНЭ на литий-ионных АКБ и СК была опубликована Р. Дугалом в 2002 г. [5]. Автор моделировал суперконденсатор RC цепочкой, а батарею – как идеальный источник напряжения с заданным внутренним сопротивлением. Аналогичное моделирование пассивных гибридных систем проводилось и другими авторами [6]. В исследованиях показано, что лучший эффект от гибридизации СНЭ достигается при коротких импульсах и длинных периодах отдыха нагрузки. Показано, что пассивная гибридизация с использованием СК действует как фильтр низкочастотных составляющих нагрузки [7]. Исследование гибридного накопителя электроэнергии, состоящего из литий-ионной батареи и блока суперконденсаторов, с помощью пакета прикладных программ SimPowerSystems в MatLab представлено в [8]. Однако обших методик оценки эффективности гибридизации не представлено.

В обзорной статье [6] обсуждаются и сравниваются различные подходы к гибридизации аккумуляторных батарей и суперконденсаторов, такие как внешняя и внутренняя гибридизация, последовательная и параллельная

схемы. Основной акцент сделан на системах с внутренней гибридизацией. Собраны примеры современных технических решений в этой области. Выводы работы носят общий характер.

В [9] предложены методики характеристики суперконденсаторов. Установлены уровни тока и напряжения, частотные интервалы для их эффективного тестирования. Приводятся экспериментальные данные для определения функциональных характеристик СК в терминах энергии и плотности мощности, зависимость емкости от напряжения. Предложена электрическая модель суперконденсаторов, учитывающая их характеристики для использования в качестве пиковых источников энергии для гибридных и электрических автомобилей. Проведена валидация модели как в частотном, так и во временном измерении.

В [8] 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 процессорного или иного 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. Представлен математический анализ функционирования гибридных структур, даны рекомендации по их проектированию для случая импульсной нагрузки.

В последние годы большой интерес проявляется к гибридизации СНЭ для конкретных приложений, типов нагрузки, с рассмотрением экономического аспекта задачи. 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 зависимости от токового режима и температуры. Рассматривалось применение алгоритма как для электрических, так и гибридных автомобилей, в частности для Tesla Model S, тягача Tesla Semi и многоцелевого автомобиля повышенной проходимости.

Перечисленные и многие другие работы, исследующие технические схемы и решения по гибридным накопителям энергии, не затрагивают вопроса прямой оценки экономической эффективности гибридизации для различных видов нагрузки, в том числе для применения в энергетике и коммунальном хозяйстве.

В [11] представлена количественно-качественная модель оценки эффективности гибридизации, основанная на сравнении стоимости буферизации электроэнергии каждым типом АКБ и гибридным накопителем в целом. Введены понятия коэффициента синергетического эффекта гибридизации и степени внутренней буферизации электроэнергии. Предложен методический подход для расчета этих величин. Показано, что в общем случае ги-

бридизация СНЭ экономически эффективна, если стоимость буферизации электроэнергии дополнительным типом АКБ не более чем в 1,5–2 раза превышает соответствующую стоимость для АКБ основного блока. Так, дополнение литий-ионных блоков суперконденсаторами, как правило, экономически нецелесообразно, хотя может быть продиктовано требованиями по импульсной мощности СНЭ и в некоторых случаях обеспечить положительный экономический эффект.

Целью настоящей работы является продолжение начатой в [11] разработки методов технико-экономического обоснования использования той или иной схемы гибридизации для заданного применения СНЭ.

В статье моделируется взаимодействие блоков накопителей, исследуются различные варианты функционального взаимодействия блоков. В качестве базовых типов гибридных накопителей рассматриваются: 1) свинцово-кислотные АКБ, дополненные литий-ионными (Pb–Li); 2) свинцово-кислотные АКБ, дополненные СК (Pb–СК); 3) литий-ионные АКБ, дополненные СК (Li–СК). В качестве нагрузки СНЭ рассматриваются: вилочный электропогрузчик, 30-квартирный жилой дом, а также 300-квартирный жилой комплекс. Для всех объектов рассчитываются показатели, характеризующие экономическую эффективность буферизации электроэнергии гибридными СНЭ и анализируются преимущества каждой схемы взаимодействия блоков гибридной СНЭ. Полученные результаты позволяют количественно сравнивать эффект применения различных гибридных СНЭ для конкретных условий их эксплуатации. Рассмотренные модели и методы могут найти непосредственное применение при проектировании СНЭ и систем «генератор – накопитель – потребитель».

Взаимодействие блоков гибридного накопителя электроэнергии

Функциональное взаимодействие основного и дополнительного блоков СНЭ может иметь сложный характер и определяться характером нагрузки, емкостью блоков, ограничениями по току для каждого типа АКБ и т. п.

Разделение токовой нагрузки между блоками возможно осуществлять пропорционально их емкости или без сохранения этой пропорции, возможна также зарядка дополнительного блока за счет разрядки основного, и наоборот. Любые режимы с непропорциональным разделением тока назовем режимами с внутренней буферизацией электроэнергии, поскольку в общем случае при их осуществлении происходит перекачка электроэнергии из одного блока в другой.

Токовая нагрузка может распределяться между блоками в разных пропорциях в зависимости от силы тока, динамики его изменения, характера нагрузки, времени суток и т. д. От способа распределения нагрузки между блоками зависит синергетический эффект гибридизации. Рассмотрим некоторые простейшие модели распределения нагрузки между блоками.

Если *токовая нагрузка распределяется пропорционально* емкости блоков, внутренняя буферизация энергии отсутствует (рис. 1). Такой вид совместной работы не позволяет эффективно использовать функциональные особенности разнотипных АКБ.

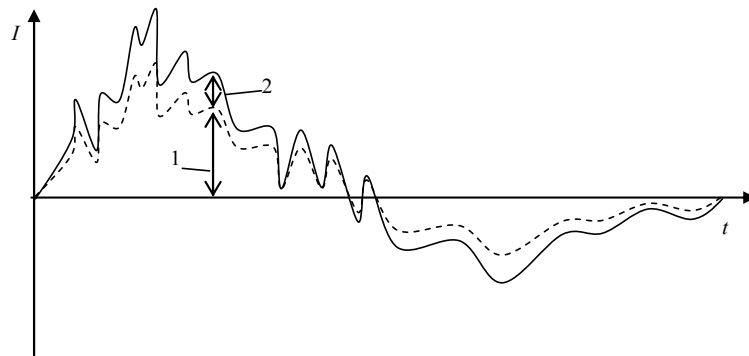


Рис. 1. Пропорциональное разделение нагрузки между основным и добавочным блоками:
1 – нагрузка основного блока; 2 – то же дополнительного

Fig. 1. Proportional separation of the load between the main and additional blocks:
1 – the load of the main block; 2 – the same additional

При пороговой схеме взаимодействия основной блок обеспечивает нагрузку до порогового уровня тока I_n . Пики нагрузки обслуживаются дополнительным блоком. Пороговый уровень тока I_n устанавливается так, чтобы в среднем согласовать емкость дополнительного блока и нагрузку. Зарядка-разрядка основного и дополнительного блоков не синхронна и не пропорциональна емкости, поэтому можно говорить о перетоках энергии между ними.

Пример реализации такого взаимодействия содержится в [12], где исследуется работа СНЭ для электропогрузчика, состоящего из блока свинцово-кислотных АКБ и суперконденсаторов. Работа СНЭ управляется микропроцессором, который ограничивает ток нагрузки основного блока, при этом блок суперконденсаторов забирает на себя быстропеременную часть нагрузки, обеспечивая смягчение режима работы основного блока (рис. 2).

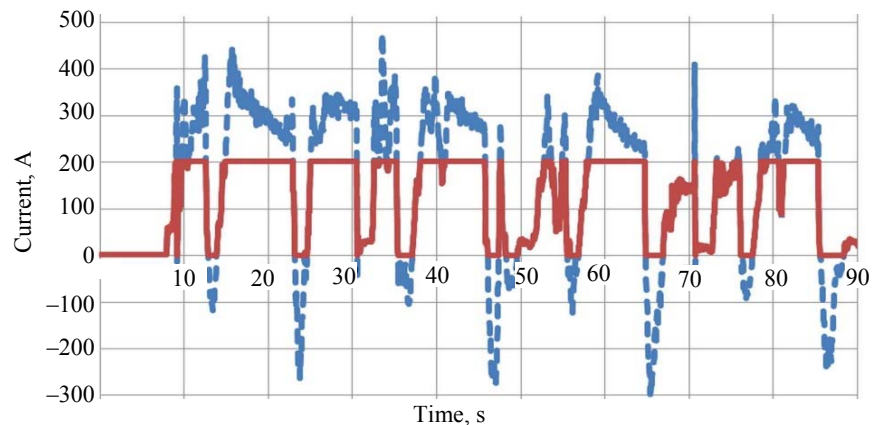


Рис. 2. Токковая нагрузка основного (свинцово-кислотные АКБ) накопителя энергии электропогрузчика [12]: голубая линия – без блока суперконденсаторов; красная – с блоком суперконденсаторов и ограничением по нагрузке

Fig. 2. Current load of the main (lead-acid batteries) energy storage of the electric loader [12]: the blue line – without a block of supercapacitors; the red line – with a block of supercapacitors and a load limit

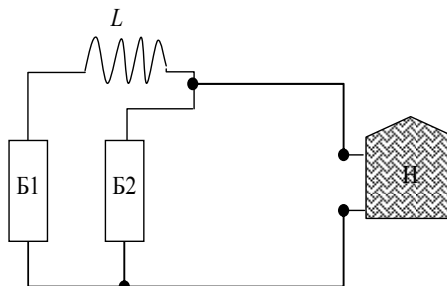
Пороговое по скорости изменение нагрузки – это подключение дополнительного блока при превышении порога скорости изменения тока нагрузки или плавно при приближении к этому порогу. Как и в случае порогового взаимодействия, зарядка и разрядка не синхронны, имеют место перетоки заряда между блоками. Работа в таком режиме близка к ситуации фильтрации низких частот для основного блока (например, L -фильтра) (рис. 3), или к пассивному параллельному включению блоков с существенно различающимися внутренними сопротивлениями и индуктивностями [8].

Рис. 3. Разделение нагрузки между основным и дополнительным блоками посредством L -фильтра:

Б1, Б2 – основной и дополнительный блоки накопителя; Н – активная нагрузка

Fig. 3. Load separation between the main and additional units by means of an L -filter:

Б1, Б2 – the main and additional storage units; Н – active load



Нелинейно-функциональное разделение нагрузки – разделение нагрузки определено нелинейной функцией от тока, например по закону

$$I_2 / I_1 = (I / I_0)^k, \quad (1)$$

где I_0 и k – константы. При $k = 1$ ток нагрузки дополнительного блока $I_2 = I|I|/(|I| + I_0)$, а ток основного $I_1 = I_0/(|I| + I_0)$ ни при каких обстоятельствах не превосходит значение I_0 . Знак модуля учитывает знакопеременность тока. Зарядка и разрядка основного и дополнительного блоков происходят синхронно, но не пропорционально емкости блоков.

Возможны другие способы разделения нагрузки, в том числе по смешанному градиентно-пороговому принципу.

Существенным моментом при выборе того или иного алгоритма взаимодействия блоков является стоимость его технической реализации. Для функционально сложного разделения нагрузки необходимы активные и полуактивные схемы управления [8], стоимость которых составляет существенную часть стоимости СНЭ.

Постановка задачи

Пусть имеется гибридная СНЭ, подключенная к нагрузке (в общем случае нагрузка и источник объединены, рис. 4).

Рассматриваем три варианта организации функционального взаимодействия основного и дополнительного блоков: пороговое разделение нагрузки, нелинейно-функциональное разделение нагрузки (1) и разделение нагрузки посредством L -фильтра (рис. 3).

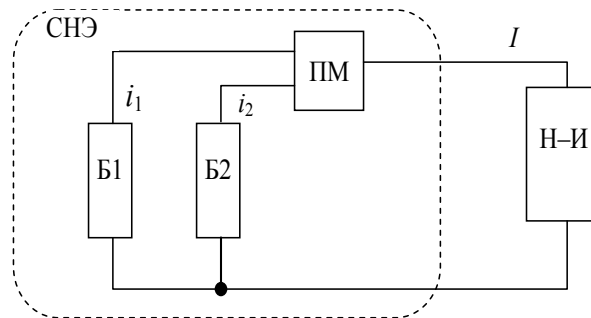


Рис. 4. Схема исследуемой системы:

Б1, Б2 – основной и дополнительный накопительные блоки;
 ПМ – преобразователь мощности; Н-И – нагрузка-источник

Fig. 4. Scheme of the system under study:

Б1, Б2 – main and additional storage units;
 ПМ – power converter; Н-И – load-source

Первые два варианта реализуются прямым алгебраическим расчетом, а третий – решением нестационарной электротехнической задачи с заданной дискретной функцией тока нагрузки I , где блоки Б1 и Б2 представляются схемами замещения (рис. 5). Для целей настоящей статьи используем наиболее простую схему замещения (рис. 5b). Значение индуктивности L устанавливается с учетом величины постоянной времени $\tau = L / R_l \sim 10$ с (табл. 1).

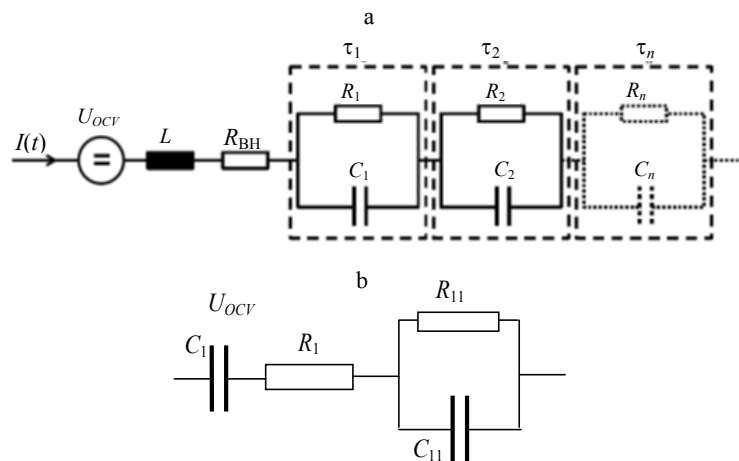


Рис. 5. Схема замещения аккумулятора с регулируемым источником напряжения (типа эквивалентной схемы Рендела) (а) и упрощенная схема (b) [13, 14]:

R_1 – внутреннее омическое сопротивление; R_{11} – динамическая часть сопротивления, связанная с поляризацией

Fig. 5. Battery replacement circuit with an adjustable voltage source (a kind of an equivalent Randall circuit) (a) and a simplified circuit (b) [13, 14]:

R_1 – internal ohmic resistance; R_{11} – the dynamic part of the resistance associated with polarization

Величина внутренней рекуперации электроэнергии [11] определяет степень интенсификации взаимодействия блоков относительно случая пропорционального распределения токовой нагрузки между ними. Определим эту величину как

$$\alpha \varepsilon(\alpha) \equiv \int_0^T |i_2 - \alpha I| dt \Big/ \int_0^T |I| dt, \quad (2)$$

где i_2 – ток дополнительного блока; I – то же нагрузки; α – степень гибридазации (доля емкости дополнительного блока в общей емкости СНЭ).

Величина $\varepsilon(\alpha)$ зависит от графика нагрузки $I(t)$, поэтому не является характеристикой только СНЭ. Расчеты показывают, что типичные зависимости $\varepsilon(\alpha)$ носят немонотонный характер – быстрый рост при малых α сменяется спадом и возможным незначительным подъемом при $\alpha \sim 0,5$. Наибольший интерес представляет оценка $\varepsilon(\alpha)$ при малых α , поскольку она характеризует возможность малой емкостью буферизировать значительный заряд при существенно нестационарном характере нагрузок. Соответствующие оценки, использующие спектральный анализ нагрузки, приведены в [11].

Для графиков нагрузки, заданных равномерным по времени массивом значений тока $\{I_1; \dots; I_N\}$, расчетные формулы для α в соответствии с определением (2) имеют следующий вид.

Для порогового разделения нагрузки вычисления производим по формуле

$$\varepsilon(\alpha) = \frac{\sum_N |i_{2,i} - \alpha I_i|}{\sum_N |I_i|}, \quad (3)$$

где i – номер значения тока в массиве, $i_{2,i}$ – рассчитывается по алгоритму

$$\begin{cases} \text{if } I_i > I_n \rightarrow i_{2,1} = I_i - I_n; \\ \text{if } 0 < I_i \leq I_n \rightarrow i_{2,1} = 0; \\ \text{if } I_i \leq 0 \rightarrow i_{2,1} = I_i. \end{cases} \quad (4)$$

В случае дефицита емкости АКБ дополнительного типа состояние его зарядки отслеживается, что определяет алгоритм расчета $i_{2,i}$:

$$\begin{cases} \text{if } |I_i| > I_n \rightarrow i_{2,i} = I_i - I_n; \quad \text{SOC}_i = \text{SOC}_{i-1} - i_{2,i} \Delta t; \\ \text{if } \text{SOC}_i \leq 0 \rightarrow i_{2,i} = 0; \\ \text{if } |I_i| \leq I_n \rightarrow i_{2,i} = I_i; \quad \text{SOC}_i = \text{SOC}_{i-1} + i_{2,i} \Delta t; \\ \text{if } \text{SOC}_i \geq 1 \rightarrow i_{2,i} = 0, \end{cases} \quad (5)$$

SOC – состояние заряда аккумуляторов дополнительного блока, $\text{SOC} \in [0; 1]$.

Для *нелинейно-функционального* разделения нагрузки (1) расчет проводится по формуле

$$\varepsilon(\alpha) = \sum_N \left| \frac{I_i |I_i|}{|I_i| + I_o} - \alpha I_i \right| / \sum_N |I_i|, \quad (6)$$

где I_o – параметр модели разделения нагрузки (1).

В случае дефицита емкости аккумуляторов дополнительного типа проводится контроль SOC и расчет тока $i_{2,i}$ по алгоритму, аналогичному (5).

Общая эффективность гибридизации [11] рассчитывается подстановкой функции $\varepsilon(\alpha)$ в формулу

$$\eta(\alpha) = \frac{1}{\frac{1-\alpha}{1+\sigma(\alpha+\varepsilon(\alpha))} + \frac{\delta_2}{\delta_{10}} \alpha} - 1, \quad (7)$$

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

Для $\alpha \ll 1$ выполняется приближенное равенство

$$\eta(\alpha) \cong \sigma e \alpha + \alpha \left[1 + \sigma(1 - e\alpha) - \frac{\delta_2}{\delta_{10}} \right]. \quad (8)$$

При необходимости аналитического исследования функции $\eta(\alpha)$ можно аппроксимировать $\varepsilon(\alpha)$ дробно-рациональной функцией типа $\varepsilon = \frac{e\alpha}{1+d\alpha^2}$.

Модельные графики нагрузки

Для оценки эффективности взаимодействия блоков необходимо рассмотреть реалистичные графики нагрузки или характерные участки таких графиков с высоким разрешением по времени. Получасовые и другие усредненные графики нагрузки энергопотребляющих объектов не применимы, поскольку не содержат информацию о быстропеременных составляющих нагрузки.

Для настоящего исследования используем три модельных графика нагрузок: 1) график нагрузки электрического вилочного погрузчика [12], с дискретизацией 0,2 с [11, 12] (сокращенно – ГН1); 2) десятиминутный модельный график 30-квартирного дома в вечерний пик нагрузки, сгенерированный по модели [15] с дискретизацией 0,2 с (ГН2); 3) аналогичный график нагрузки 300-квартирного жилого комплекса (ГН3). Графики представляют собой массив моментальных значений токов или мощности (рис. 2, 6, 7).

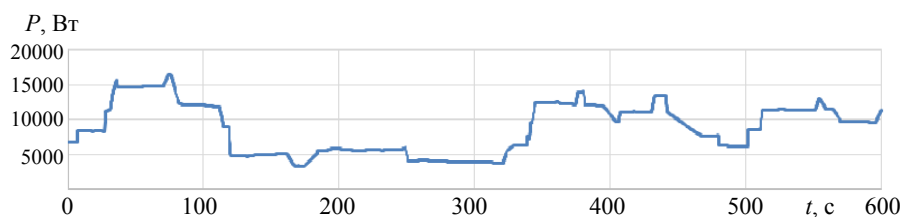


Рис. 6. Десятиминутный участок графика нагрузки 30-квартирного жилого дома в области вечернего пика

Fig. 6. A ten-minute section of the load graph of a 30-apartment residential building in the evening peak area

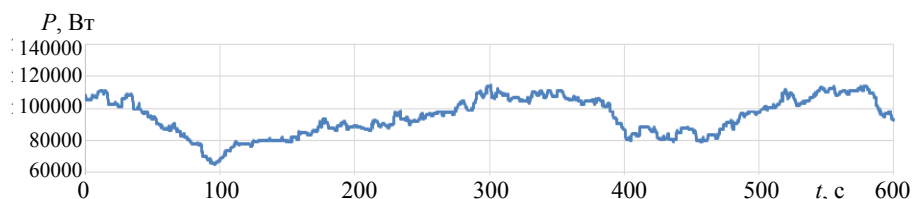


Рис. 7. Десятиминутный участок графика нагрузки 300-квартирного жилого дома в области вечернего пика

Fig. 7. A ten-minute section of the load graph of a 300-apartment residential building in the evening peak area

Очевидно, ГНЗ отличается от ГН2 большей средней величиной энергопотребления и меньшим относительным разбросом (дисперсией) мощности ввиду большего количества случайно включаемых-выключаемых потребителей.

Рассматриваются три варианта взаимодействия блоков гибридного накопителя: 1) пороговое разделение нагрузки, где величина порога включения дополнительного блока I_0 задается от уровня среднего значения нагрузки по рассматриваемому участку $\bar{I}$ с соответствующим коэффициентом: $I_n = \bar{I}K_{I_0}$; 2) нелинейно-функциональное разделение нагрузки по закону (1), где параметр I_0 задается по уровню среднего значения нагрузки по рассматриваемому участку $\bar{I}$; 3) L -разделение нагрузки, параметры схемы замещения для этого варианта даны в табл. 2.

Следует отметить, что значение K_{I_0} и другие параметры разделения нагрузки должны коррелировать с емкостью дополнительного блока АКБ для того, чтобы он не находился в постоянно заряженном или разряженном состоянии. Однако в настоящей статье будем придерживаться фиксированного значения K_{I_0} (и I_0) для всех рассматриваемых графиков нагрузок и степеней гибридизации α .

В качестве модельных гибридных СНЭ рассматриваем: 1) свинцово-кислотные АКБ, дополненные литий-ионными (Pb–Li); 2) свинцово-кислотные АКБ, дополненные СК (Pb–СК); 3) литий-ионные АКБ, дополненные СК (Li–СК).

При расчете экономической эффективности гибридизации используем характерные значения стоимости буферизации электроэнергии для каждого из указанных типов накопителей [11].

Очевидно, существенный практический интерес представляет зависимость эффективности гибридизации от параметров, количественно определяющих взаимодействие блоков гибридной СНЭ, таких как I_0 и L в схеме с индуктивным разделением нагрузки. Отдельные зависимости такого типа представлены ниже.

Результаты исследования

Для вышеперечисленных вариантов гибридных СНЭ были рассчитаны коэффициент внутренней буферизации электроэнергии $\varepsilon(\alpha)$ (рис. 8) и величина эффективности гибридизации $\eta(\alpha)$ (рис. 9–11) в зависимости от степени гибридизации α . Значения параметров модели, используемые при расчетах, представлены в табл. 1, 2.

Таблица 1

Значения параметров, используемые для расчетов по (1)–(7)

Parameter values used for calculations according to (1)–(7)

Тип гибридной СНЭ	Общая емкость C_0 ГН1, А·ч	Общая емкость C_0 ГН2, А·ч	Общая емкость C_0 ГН3, А·ч	δ_{10} , \$/(кВт·ч)	δ_{20} , \$/(кВт·ч)	I_0	L , Гн	σ
Pb–Li	300	3000	30000	0,4	0,085	$\bar{I}$	0,4	1,0
Pb–СК	300	3000	30000	0,4	1,0	$\bar{I}$	0,4	1,0
Li–СК	300	3000	30000	0,085	1,0	$\bar{I}$	0,004	0,6

Таблица 2

Значения параметров схем замещения АКБ, используемые для расчетов L -разделения нагрузки

Values of the parameters of the rechargeable acid batteries replacement circuits used for the calculations of L -load separation

Тип аккумулятора	C_1^*	R_1 , Ом	C_{11} , Ф	R_{11} , Ом	U_0 , В
Свинцово-кислотный	$(1 - \alpha) C_0$	$6 \cdot 10^{-3}$	100	$6 \cdot 10^{-3}$	50
Литий-ионный	$(1 - \alpha) C_0$	$2 \cdot 10^{-3}$	2500	$2 \cdot 10^{-3}$	50
Суперконденсатор	$(1 - \alpha) C_0$	$2 \cdot 10^{-4}$	–	–	50
* 1 А·ч = 3600 Ф.					

Заметим, что разделение нагрузки по формальным «пороговому» и «нелинейно-функциональному» алгоритмам, в отличие от разделения L -фильтром, не учитывает электрофизические особенности основного и дополнительного блоков.

Ниже приведены результаты расчета коэффициента внутренней буферизации электроэнергии, рассчитанного, согласно (1), для случая разделения нагрузки L -фильтром. Для наглядности графиков при малых α использована логарифмическая шкала (рис. 8).

Из графиков видно, что коэффициент ε сложным образом зависит от характера нагрузки и типа гибридной системы. Кривые $\varepsilon(\alpha)$ могут пересекаться при малых значениях α . При этом значение коэффициента внутренней буферизации выше для более амплитудных и высокочастотных графиков нагрузки. Наименьшее значение ε реализуется для «сглаженного» графика нагрузки ГН3.

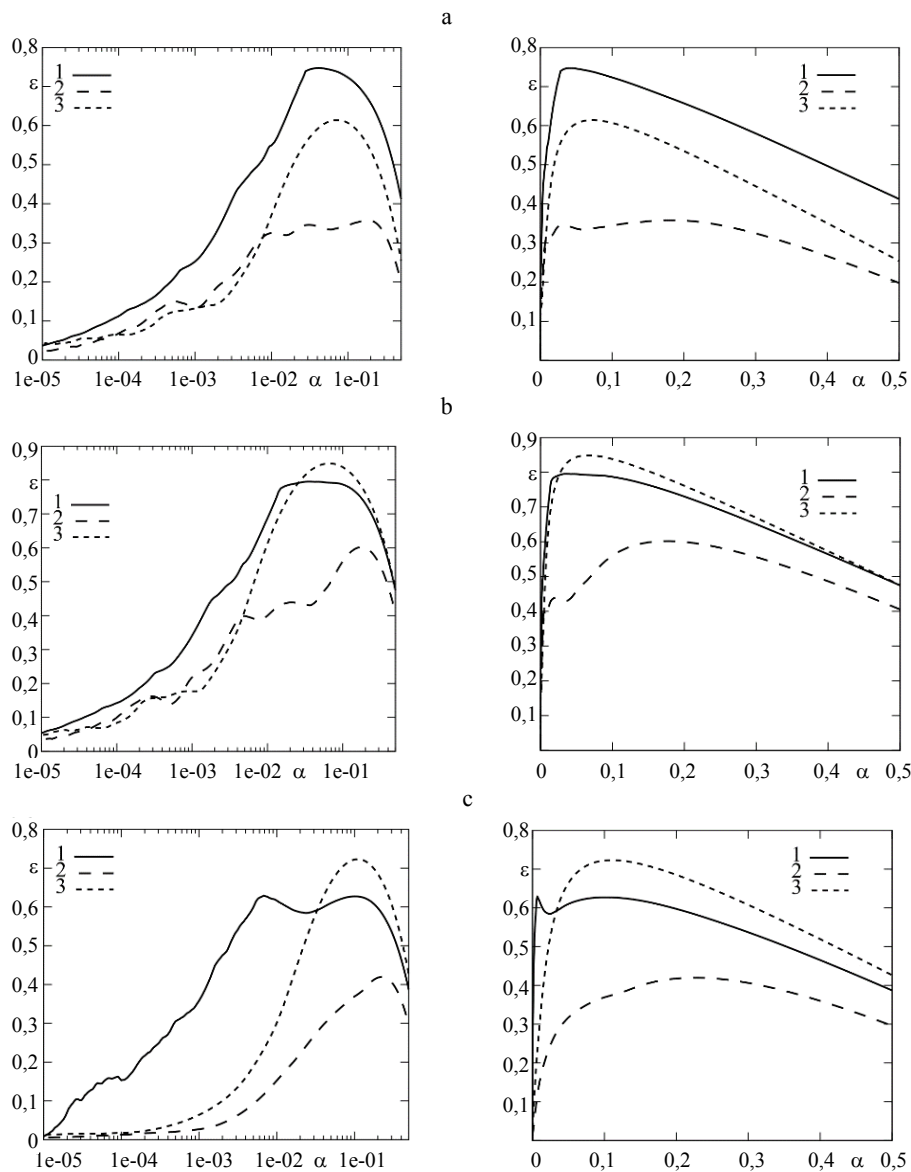


Рис. 8. Коэффициент внутренней буферизации электроэнергии как функция степени гибридации α при разделении нагрузки L -фильтром: а – система Pb–Li; б – Pb–СК; в – Li–СК; 1 – ГН1; 2 – ГН2; 3 – ГН3

Fig. 8. The coefficient of internal buffering of electricity as a function of the degree of hybridization α when the load is separated by an L -filter: а – Pb–Li system; б – Pb–SC; в – Li–SC; 1 – load graph – ГН1; 2 – load graph ГН2; 3 – load graph ГН3

Из графиков видно, что экономическая эффективность гибридации имеет монотонно возрастающий характер для системы Pb–Li и пикообразный характер для других рассмотренных систем. Данная закономерность объясняется тем, что стоимость буферизации литиевыми АКБ ниже, чем таковая свинцово-кислотными АКБ. Следовательно, создание Pb–Li систем обосновано лишь для снижения первоначальных инвестиций на СНЭ.

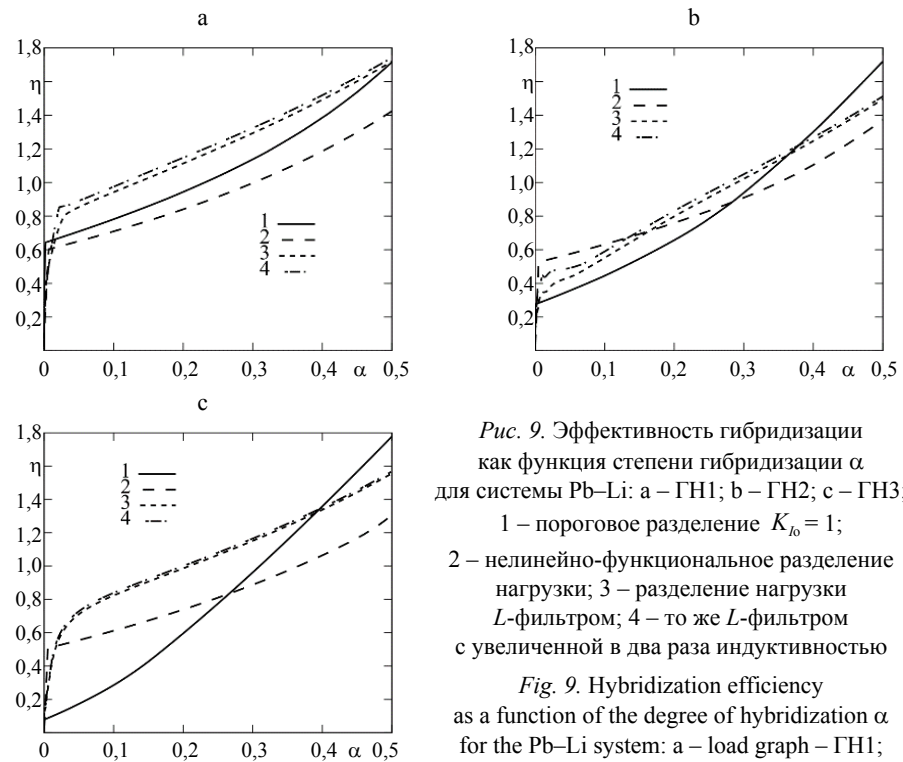


Рис. 9. Эффективность гибридизации как функция степени гибридизации α для системы Pb-Li: а – ГН1; б – ГН2; с – ГН3; 1 – пороговое разделение $K_0 = 1$; 2 – нелинейно-функциональное разделение нагрузки; 3 – разделение нагрузки L -фильтром; 4 – то же L -фильтром с увеличенной в два раза индуктивностью

Fig. 9. Hybridization efficiency as a function of the degree of hybridization α for the Pb-Li system: а – load graph ГН1; б – load graph ГН2; с – load graph ГН3;

1 – threshold separation $K_0 = 1$; 2 – nonlinear functional load separation; 3 – load separation by L -filter; 4 – the same with an L -filter with twice the inductance

Очевидной особенностью всех графиков является резкое возрастание экономической эффективности с ростом α в области малых значений α (малые емкости дополнительного блока). Использование суперконденсаторов с емкостью порядка десятых долей процента от общей емкости СНЭ оказывается экономически выгодным при отсутствии дополнительных затрат на управление гибридной системой. Пороговый алгоритм разделения нагрузки оказывается наименее эффективным для сглаженной нагрузки ГН3, и наиболее эффективным для работы по графику электропогрузчика ГН1. При электрообеспечении жилого дома несколько лучшую эффективность показывает нелинейно-функциональное разделение нагрузки (рис. 9с).

Однако в целом для менее «сглаженных» нагрузок ни один из исследованных алгоритмов взаимодействия блоков не имеет принципиального преимущества перед остальными и, следовательно, целесообразно использовать наиболее простой и экономичный алгоритм. При этом для максимального использования эффекта гибридизации необходимо согласование алгоритма и параметров управления гибридной СНЭ с режимом нагрузки.

Согласно расчетам наибольший эффект гибридизации (среди рассмотренных систем) реализуется для системы, построенной на свинцово-кислотных АКБ (рис. 10). Это объясняется относительно небольшой разницей в стоимости буферизации электроэнергии свинцово-кислотными АКБ и суперконденсаторами, а также значительным «синергетическим» эффектом (коэффициент σ).

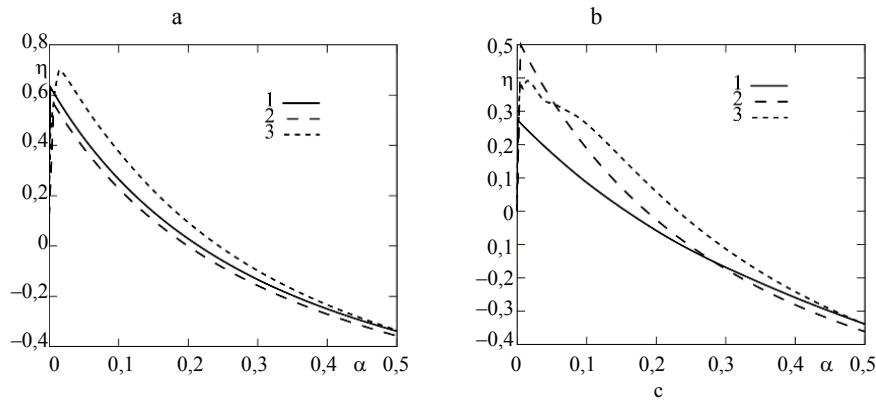


Рис. 10. Эффективность гибридизации как функция степени гибридизации α для системы Pb-СК: а – ГН1; б – ГН2; с – ГН3; 1 – пороговое разделение $K_{ю} = 1$; 2 – нелинейно-функциональное разделение нагрузки; 3 – разделение нагрузки L -фильтром

Fig. 10. Hybridization efficiency as a function of the degree of hybridization α for the Pb-SC system: а – load graph – ГН1; б – load graph ГН2; с – load graph ГН3; 1 – threshold separation $K_{ю} = 1$; 2 – nonlinear functional load separation; 3 – load separation by L -filter

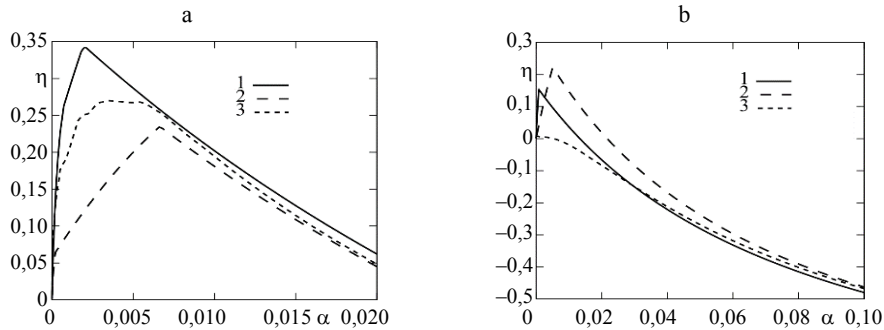


Рис. 11. Эффективность гибридизации как функция степени гибридизации α для системы Li-СК; а – ГН1; б – ГН2; с – ГН3; 1 – пороговое разделение $K_{ю} = 1$; 2 – нелинейно-функциональное разделение нагрузки; 3 – разделение нагрузки L -фильтром

Fig. 11. Hybridization efficiency as a function of the degree of hybridization α for the Li-SC system: а – load graph – ГН1; б – load graph ГН2; с – load graph ГН3; 1 – threshold separation $K_{ю} = 1$; 2 – nonlinear functional load separation; 3 – load separation by L -filter

Для демонстрации эффекта варьирования параметров моделей взаимодействия блоков на работу гибридного накопителя представим зависимости эффективности гибридизации для системы Pb–СК при различных уровнях порога разделения нагрузки I_n и графиках нагрузки (рис. 12).

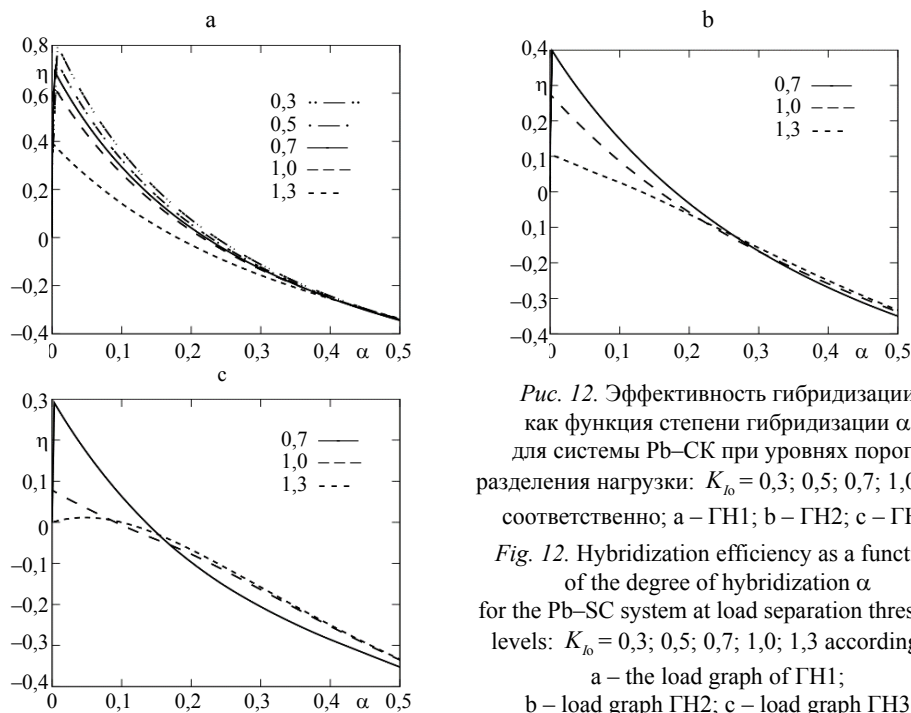


Рис. 12. Эффективность гибридизации как функция степени гибридизации α для системы Pb–СК при уровнях порога разделения нагрузки: $K_{ю} = 0,3; 0,5; 0,7; 1,0; 1,3$ соответственно; а – ГН1; б – ГН2; в – ГН3
 Fig. 12. Hybridization efficiency as a function of the degree of hybridization α for the Pb–SC system at load separation threshold levels: $K_{ю} = 0,3; 0,5; 0,7; 1,0; 1,3$ accordingly; а – the load graph of ГН1; б – load graph ГН2; в – load graph ГН3

Из графиков видно, что максимальная эффективность достигается при низших уровнях разделения нагрузки, т. е. в этих условиях блок суперконденсаторов принимает на себя большую нагрузку. Однако при $I_n < \bar{I}$ энергия, запасенная СК, постоянно убывает, и через определенное время эффективность его работы с основным блоком резко падает. Следовательно, для адекватной оценки эффективности гибридизации при низких порогах разделения нагрузки необходимо рассматривать работу (проводить моделирование) в течение полного времени разрядного полуцикла.

ВЫВОДЫ

1. Рассмотрена методика оценки эффективности гибридизации СНЭ для заданного графика нагрузки. Ее величина определена как относительное уменьшение стоимости буферизации электроэнергии при замещении части емкости СНЭ аккумуляторами дополнительного типа. Разработанная методика может использоваться для оценки экономической целесообразности гибридизации СНЭ и выбора оптимального алгоритма взаимодействия блоков.

2. Величина эффективности гибридизации демонстрирует специфическую нелинейную зависимость от степени гибридизации, вид которой зависит от типа используемых АКБ, характера графика нагрузки, а также от способа управления взаимодействием блоков. Характерной особенностью этой зависимости для рассмотренных вариантов взаимодействия и графиков нагрузок является резкое возрастание экономической эффективности при малых значениях $\alpha \ll 0,01$ с дальнейшим замедлением роста или падением графика.

3. Пороговый алгоритм разделения нагрузки оказывается наименее эффективным для сглаженной нагрузки (жилой комплекс) и наиболее эффективным для работы по графику электропогрузчика. При электроснабжении жилого дома несколько лучшую эффективность показывает нелинейно-функциональное разделение нагрузки. Однако ни один из рассмотренных алгоритмов взаимодействия блоков гибридной СНЭ не имеет универсального преимущества перед остальными в плане обеспечения экономической эффективности работы. Выбор алгоритма управления взаимодействием блоков должен осуществляться исходя из особенностей графика нагрузок потребителя. При этом стоимостная компонента электротехнического обеспечения взаимодействия может существенно влиять на итоговую экономическую эффективность гибридной СНЭ.

4. При проектировании СНЭ и оценке эффективности ее гибридизации, необходимо располагать информацией не только о стоимости АКБ и соответствующей стоимости буферизации электроэнергии, но также о предполагаемом графике нагрузки СНЭ, стоимости силового оборудования, реализующего тот или иной алгоритм взаимодействия блоков.

ЛИТЕРАТУРА

1. IHS 2023 Energy Storage Market Outlook [Electronic Resource]. Mode of access: <https://about.bnef.com/blog/Ih-2023-energy-storage-market-outlook>. Date of access: 07.04.2023
2. Ragone, D. V. Review of Battery Systems for Electrically Powered Vehicles / D. V. Ragone // SAE Technical Paper. 1968. No. 680453. <https://doi.org/10.4271/680453>.
3. Miller, J. R. Battery-Capacitor Power Source for Digital Communication-Simulations Using Advanced Electrochemical Capacitors, in *Electrochemical Capacitors*, F.M. Delnick and M. Tomkiewicz, Editors. PV95-29. P. 246. The Electrochemical Society Proceedings Series, Pennington, NJ (1996).
4. 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>.
5. Cericola, D. Hybridization of Rechargeable Batteries and Electrochemical Capacitors: Principles and Limits / D. Cericola, R. Kötz // *Electrochimica Acta*. 2012. Vol. 72. P. 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2012.03.151>.
6. 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, N 12. P. 3433–3438. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2011.07.013>.
7. Kuperman, A. Battery-Ultracapacitor Hybrids for Pulsed Current Loads: A Review / A. Kuperman, I. Aharon // *Renewable and Sustainable Energy Review*. 2011. Vol. 15, No 2. P. 981–992. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.010>.
8. Бельский, А. А. Применение гибридных накопителей электроэнергии для выравнивания графика нагрузки предприятий / А. А. Бельский, А. Н. Скамьин, О. С. Васильков // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2020. Т. 63, № 3. С. 212–222. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-3-212-222>.
9. Characterization Methods and Modelling of Ultracapacitors for Use as Peak Power Sources / W. Lajnef [et al.] // *Journal of Power Source*. 2007. Vol. 168, Iss. 2. P. 553–560. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.02.049>.
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. 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>.
12. Hybrid Battery-Supercapacitor Storage for an Electric Forklift: a Life-Cycle Cost Assessment / M. Conte [et al.] // *Journal of Applied Electrochemistry*. 2014. Vol. 44, No 4. P. 523–532. <https://doi.org/10.1007/s10800-014-0669-z>.
13. A critical Overview of Definitions and Determination Techniques of the Internal Resistance Using Lithium-Ion, Lead-Acid, Nickel Metal-Hydride Batteries and Electrochemical Double-Layer Capacitors as Examples / G. Pilatovich [et al.] // *Journal of Power Sources*. 2015. Vol. 296. P. 365–376. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.07.073>.

14. Гибридные электроникопителы на основе аккумуляторов и суперконденсаторов / Ю. В. Бондаренко [и др.] // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2014. № 4. С. 33–38.
15. 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>.

Поступила 21.04.2023 Подписана в печать 27.06.2023 Опубликована онлайн 29.09.2023

REFERENCES

1. *1H 2023 Energy Storage Market Outlook*. Available at: <https://about.bnef.com/blog/1h-2023-energy-storage-market-outlook> (accessed 07 April 2023).
2. Ragone D. V. (1968) Review of Battery Systems for Electrically Powered Vehicles. *SAE Technical Paper*, (680453). <https://doi.org/10.4271/680453>.
3. Miller J. R. (1996) Battery-Capacitor Power Source for Digital Communication-Simulations Using Advanced Electrochemical Capacitors, in Electrochemical Capacitors, F. M. Delnick and M. Tomkiewicz, Editors, PV95-29, 246. The Electrochemical Society Proceedings Series, Pennington, NJ.
4. 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>.
5. Cericola D., Kötz R. (2012) Hybridization of Rechargeable Batteries and Electrochemical Capacitors: Principles and Limits. *Electrochimica Acta* 2012, 72, 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2012.03.151>.
6. Kuperman A., Aharon I., Kara A., Malki Sh. (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>.
7. Kuperman A., Aharon I. (2011) Battery-Ultracapacitor Hybrids for Pulsed Current Loads: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Review*, 15 (2), 981–992. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.010>.
8. Belsky A. A., Skamyin A. N., Vasilkov O. S. (2020) The Use of Hybrid Energy Storage Devices for Balancing the Electricity Load Profile of Enterprises *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (3), 212–222. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-3-212-222>.
9. Lajnef W., Vinassa J.-M., Briat O., Azzopardi S., Woigard E. (2007) Characterization Methods and Modelling of Ultracapacitors for Use as Peak Power Sources. *Journal of Power Sources*, 168 (2), 553–560. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.02.049>.
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. 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).
12. 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 (4), 523–532. <https://doi.org/10.1007/s10800-014-0669-z>.
13. Pilatowicz G., Marongiu A., Drillkens J., Sinhuber Ph., Sauer D. U. (2015) A Critical Overview of Definitions and Determination Techniques Of the Internal Resistance Using Lithium-Ion, Lead-Acid, Nickel Metal-Hydride Batteries and Electrochemical Double-Layer Capacitors as Examples. *Journal of Power Sources*, 296, 365–376. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.07.073>.
14. Bondarenko Yu. V., Safronov P. S., Bondarenko O. F., Sydorets 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 = Technology and Design in Electronic Equipment*, (4), 33–38 (in Russian).
15. 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 Tekhnika = Science & Technique*, 16 (2), 160–170. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-2-160-170> (in Russian).

Received: 21 April 2023

Accepted: 27 June 2023

Published online: 29 September 2023