

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-5-393-410>

УДК 621.355:004.94

О методике расчета экономической эффективности применения систем накопления энергии

К. В. Доброго¹⁾, С. А. Фурсов¹⁾, С. С. Дубновицкий²⁾, В. Л. Червинский³⁾

¹⁾IAK-GROUP ООО «Актив ОМЗ» (Минск, Республика Беларусь),

²⁾IAK-GROUP ООО «Зубр энерджи» (Пинск, Республика Беларусь),

³⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

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

Реферат. В связи с ростом «зеленой» энергетики, необходимостью регулирования нагрузки крупных энергосистем, развитием электротранспорта в мире все шире применяются системы накопления электроэнергии (СНЭ). В Республике Беларусь и Российской Федерации разработаны концептуальные документы, констатирующие необходимость модернизации нормативно-правовой базы применения СНЭ, создания научного обеспечения развития технологий СНЭ, центров компетенции и реализации пилотных проектов. В настоящей статье дается пример расчета экономического эффекта применения СНЭ на промышленном предприятии. Предлагается методика, которая может быть использована для разработки стандартизированных методик расчета экономического эффекта применения СНЭ на предприятиях и в локальных энергетических системах потребителей различного типа. Охарактеризованы основные функции, выполняемые СНЭ на предприятии. Рассмотрены особенности расчета экономического эффекта выполнения указанных функций в условиях статистического характера режима нагрузки предприятия. Приведены расчеты простого срока окупаемости инвестиций на установку СНЭ для предприятия при нескольких вариантах условий оплаты за электроэнергию. Показано, что экономический результат использования СНЭ существенно зависит как от условий тарификации и графиков нагрузки предприятия, так и от специфических требований к качеству и надежности электроснабжения и должен оцениваться в каждом конкретном случае индивидуально.

Ключевые слова: система накопления энергии, аккумуляторные батареи, литий-ионные батареи, промышленное применение, экономическая эффективность, методика расчета

Для цитирования: О методике расчета экономической эффективности применения систем накопления энергии / К. В. Доброго [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2024. Т. 67, № 5. С. 393–410. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-67-5-393-410>

On the Methodology for Calculating the Economic Efficiency of Energy Storage Systems

K. V. Dobrego¹⁾, S. A. Fursov¹⁾, S. S. Dubnovitski²⁾, V. L. Charvinski³⁾

¹⁾IAK-GROUP LLC “Aktiv OMZ” (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾IAK GROUP LLC “Zubr energy” (Pinsk, Republic of Belarus),

³⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Due to the growth of “green” energy, the need to regulate the load on large power systems, and the development of electric transport, electricity storage systems (ESS) are increasingly

Адрес для переписки
Доброго Кирилл Викторович
IAK-GROUP, ООО «Актив-ОМЗ»
ул. Л. Толстого, 10,
220007, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 29 56-28-559
k.dobrego@aomz.lak.by

Address for correspondence
Dobrego Kirill V.
IAK-GROUP, LLC «Aktiv-OMZ»
10 L.Tolstogo str.,
220007, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 29 56-28-559
k.dobrego@aomz.lak.by

being used in the world. Conceptual documents have been developed in the Republic of Belarus and the Russian Federation stating the need to modernize the regulatory framework for the use of ESS, create scientific support for the development of ESS technologies, centers of competence and of the implementation of pilot projects. This article provides an example of calculating the economic effect of using ESS at an industrial enterprise. A methodology is proposed that can be used to develop standardized methods for calculating the economic effect of using ESS at enterprises and in local energy systems of consumers of various types. The main functions performed by the ESS at the enterprise are characterized. The features of calculating the economic effect of performing these functions under the conditions of the statistical nature of the load regime of the enterprise are considered. Calculations of the simple payback period for investments in the installation of an ESS for an enterprise with several options for payment terms for electricity are given. It is shown that the economic result of using ESS significantly depends on both the pricing conditions and load schedules of the enterprise, as well as on specific requirements for the quality and reliability of power supply and should be evaluated individually in each case.

Keywords: energy storage system, rechargeable batteries, lithium-ion batteries, industrial application, economic efficiency, calculation method

For citation: Dobrego K. V., Fursov S. A., Dubnovitski S. S., Charvinski V. L. (2024) On the Methodology for Calculating the Economic Efficiency of Energy Storage Systems. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 67 (5), 393–410. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-5-393-410> (in Russian)

Введение

В настоящее время в мире все шире применяются системы накопления электрической энергии (СНЭ). 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 BlumbergNEF [1], мощность и емкость систем накопления электроэнергии в мире выросла за 2022 г. на 16 ГВт / 35 ГВтч 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.

В России, Беларуси и других странах СНГ системы накопления электроэнергии в силу разных причин развиваются с опозданием относительно таких стран, как США, Австралия, Республика Корея, КНР и некоторые другие, однако имеется понимание необходимости развития данного научно-технического направления. В Российской Федерации в 2017 г. разработана Концепция развития рынка систем хранения электроэнергии. В Беларуси в 2022 г. разработана Концепция применения систем накопления энергии на базе литий-ионных аккумуляторов в Белорусской энергосистеме (далее – Концепция). Данные документы указывают на необходимость модернизации нормативно-правовой базы применения СНЭ, научного обеспечения развития технологий СНЭ, создания центров компетенций и реализации пилотных проектов.

Важнейшим условием для практического применения СНЭ в промышленности и коммунальном хозяйстве является наличие научно обоснованных методик расчета экономической эффективности их применения. Однако сегодня отсутствуют не только стандартизированные методики или методические рекомендации, но и экспериментальные методики и основа-

тельные научные публикации по данному вопросу. Как правило, производители СНЭ самостоятельно оценивают экономический эффект внедрения СНЭ у конкретного заказчика, не ссылаясь на методические источники. Такая практика оставляет открытым вопрос о корректности технико-экономических оценок и создает трудности для ее проверки.

В русскоязычной научно-технической литературе имеются исследования общего характера по эффективности применения СНЭ, как правило, касающиеся анализа их влияния на работу энергосистемы или крупных генерирующих станций [2–6]. При этом отсутствуют методики или примеры расчета экономической эффективности применения СНЭ в распределительных сетях, на объектах промышленности или коммунального хозяйства.

В [3] рассмотрен базовый аспект использования СНЭ в энергосистеме – выравнивание графика нагрузки. Предложен подход, позволяющий оценить границы экономической целесообразности применения СНЭ с этой целью. Модель ориентирована на расчет системного эффекта, носит оценочный характер, где принята норма амортизации СНЭ 0,033. В [4] проводится сравнительный анализ экономической эффективности конкурирующих проектов: внедрения СНЭ и использования электродвигателей для выравнивания графика нагрузки энергосистемы в условиях работы БелАЭС. В более современной работе [5] выполнен функциональный и экономический анализ использования СНЭ на тепловых электрических станциях. Прежде всего, оценивалась экономия на расходах на собственные нужды ТЭС при условии рыночной стоимости расходуемой на эти цели электроэнергии. Несмотря на то что многие компании и государственные организации в РФ активно продвигают технологии, направленные на эффективное применение СНЭ (например, технология «интеллектуального энергетического хаба» АО «Фонд «Форсайт»), методические разработки по данному вопросу не опубликованы.

В отчете о научно-исследовательской работе «Концепция применения систем накопления энергии на базе литий-ионных аккумуляторов в Белорусской энергосистеме» [7] содержатся разделы, посвященные обобщенному анализу экономической целесообразности использования СНЭ в различных системах: на тепловых электрических станциях; подстанциях системообразующих распределительных сетей напряжением 220 кВ и выше; в распределительных электрических сетях напряжением 110 кВ и ниже; в распределительных сетях промышленных предприятий; в системе с возобновляемыми источниками энергии; в зарядной инфраструктуре для электрического транспорта. Оценка экономической эффективности строится на Методических рекомендациях по составлению технико-экономических обоснований для энергосберегающих мероприятий, утвержденных Департаментом по энергоэффективности Государственного комитета по стандартизации Республики Беларусь [8], посредством определения величины экономии топлива от внедрения мероприятия, что не является прямой оценкой экономического эффекта и применимо прежде всего для системной макроэкономической оценки экономического эффекта, а не эффекта для отдельного хозяйствующего субъекта. Процедура расчета в [7] не детализи-

зируется. Имеются более узкие специализированные исследования, например касающиеся технико-экономической эффективности гибридации СНЭ [9, 10], не предлагающие методик оценивания экономической эффективности их конкретного применения.

Таким образом, разработка методических рекомендаций и методик определения экономического эффекта от внедрения СНЭ является актуальной задачей для реализации целей, сформулированных в Концепции, а также для целей экологической, энергетической безопасности и устойчивого развития нашей страны.

В настоящей статье формулируются подход и методическая основа для расчета экономической эффективности применения СНЭ на промышленном предприятии. Приводится пример соответствующего расчета, базирующийся на данных и технико-экономических показателях реального предприятия. Показано, что эффекты, связанные с надежностью энергоснабжения, могут вносить существенный вклад в общий экономический эффект и требуют основательного анализа. Приведенная методика может быть использована для расчета экономической эффективности применения СНЭ на предприятиях со сложной структурой энергоснабжения и энергопотребления, например включающих ВИЭ и разнородных потребителей (с различными требованиями по надежности электроснабжения и суточными графиками потребления).

Исходные данные для расчета эффективности использования СНЭ

Исходные данные для расчета эффективности использования СНЭ можно разделить на блоки: 1) конфигурация системы потребителя, 2) экономические условия электроснабжения, 3) данные о нормальных режимах нагрузки (генерации) и статистике нарушений электроснабжения, 4) технические и экономические параметры СНЭ, условия и ограничения ее работы, 5) прочие существенные условия.

Если говорить о промышленном предприятии, то конфигурация системы – это схема электроснабжения, сведения о количестве блоков однородных потребителей (с одинаковыми требованиями по качеству электроснабжения, сходными графиками нагрузки), о наличии и типе собственных источников генерации и т. п. Экономические условия электроснабжения – прежде всего тарифы и другие условия, оговоренные договором об электроснабжении. Данные о режиме нагрузки (генерации) включают в себя графики нагрузки и иную статистику по каждому блоку однородных потребителей (зимний рабочий и выходной день, летний рабочий и выходной день) и каждому генератору (при наличии). Для метеозависимых генераторов приводятся статистические характеристики мощности генерации. Данные о статистике перерывов электроснабжения используются для расчета экономического эффекта, связанного с обеспечением надежности и бесперебойности электроснабжения предприятия. К техническим и экономическим параметрам СНЭ относятся допустимые производителем токовые режимы зарядки-разрядки, рекомендуемая рабочая глубина раз-

рядки (DOD) или связь DOD с эксплуатационным ресурсом СНЭ, стоимостные показатели СНЭ, ожидаемый эксплуатационный ресурс и т. п. Прочие существенные условия могут включать сведения о возможности энергетической кооперации с другими юридическими лицами (например, арендаторами), о необходимости и возможности увеличения подключенной мощности в связи с развитием предприятия и др. В последнем случае задача о применении СНЭ может ставиться как альтернатива модернизации линии электроснабжения или электроснабжающей подстанции.

Рассмотрим предприятие А (далее – предприятие), характеризующееся простой конфигурацией, не имеющее особых требований к качеству электричества. Оно не имеет собственных источников генерации и снабжается электроэнергией как энергоемкое предприятие при потреблении электрической энергии до 25 млн кВт·ч включительно. Основная плата (за мощность) $C_{\text{max}} = 31,43$ руб./кВт. Понижающий коэффициент на основную плату $K_m = 0,5$ устанавливается, если в течение учетного месяца вечерний пик не превышает утреннего и при отсутствии случаев превышения максимальной выделенной мощности. Дифференцированный тариф за электроэнергию по двум временным периодам: $C_{\text{день}} = 0,19478$ руб./(кВт·ч) (с 6:00 до 23:00) и $C_{\text{ночь}} = 0,16936$ руб./(кВт·ч) (с 23:00 до 6:00). Иные существенные условия отсутствуют.

Функции СНЭ в системе

Важнейшим элементов методики расчета экономической эффективности применения СНЭ является определение функций накопителя, имеющих экономически значимый эффект. Для предприятия актуальны четыре функции (табл. 1). Для систем со сложной конфигурацией таких функций может быть больше.

Таблица 1

Функции СНЭ, имеющие экономически значимый эффект
ESS functions of an economically significant effect

	Функция СНЭ	Способ оценки эффекта	Приоритет	Жесткость
1	Потребительское тарифное маневрирование	Прямой расчет с учетом тарифов	4	Нет
2	Снижение пиков потребления	Снижение максимальной мощности	1	Да
3	Гарантирование выполнения условия $P_{\text{веч}} < P_{\text{утр}}$	Расчет по статистике случаев $P_{\text{веч}} > P_{\text{утр}}$	3	Да
4	Обеспечение аварийной бесперебойности	Расчет по статистике перебоев электроснабжения	2	Да

Будем называть функции, имеющие бинарный характер (выполнение / невыполнение), жесткими, или качественными, а функции, всегда выполняющиеся в большей или меньшей мере, – мягкими, или количественными. Например, потребительское тарифное маневрирование приводит к большему или меньшему эффекту в зависимости от режима нагрузки в кон-

кретный день. Функция гарантирования исполнения условия $P_{\text{веч}} < P_{\text{утр}}$, наоборот, либо исполняется, либо нет в каждом конкретном случае. Функция не реализуется, если для ее выполнения не хватило запаса емкости. Функция снижения пикового потребления также жесткая, поскольку для ее выполнения должен быть достигнут фиксированный порог снижения мощности, обеспечивающий для предприятия выполнение требований регламента. Жесткие функции СНЭ должны быть обеспечены определенным запасом емкости, гарантирующим высокую вероятность выполнения заданных параметров.

Важным методическим моментом рассматриваемой проблемы является статистический характер как графиков нагрузки промышленных предприятий, так и ожидаемого экономического эффекта от реализации функций СНЭ. В связи с этим величины экономического эффекта от выполнения каждой из функций (C_{T1} , C_{T2} , C_{T3} и C_{T4}) должны трактоваться как ожидаемые статистические величины. Оценка среднеквадратичных отклонений этих и других расчетных величин необходима для оценки запаса емкости СНЭ, требуемого для выполнения установленных функций в условиях статистических флуктуаций параметров энергопотребления.

Целесообразно ранжировать функции СНЭ по приоритету. Это может быть сделано на основании оценок их экономического эффекта и использовано для: 1) определения выделяемых для их реализации емкостей, 2) выстраивания алгоритмов управления СНЭ.

Расчет экономического эффекта

Расчет экономического эффекта проводится в несколько этапов.

1. На основании исходных данных (рис. 1 и др.) производятся расчеты типичных, усредненных характеристик потребления, другие предварительные расчеты, устанавливаются статистические характеристики потребления и генерации (если таковые имеются). В табл. 2 приведены некоторые характеристики суточных графиков потребления электроэнергии предприятия.

2. Последовательно оценивается экономический эффект каждой из рассматриваемых функций СНЭ в зависимости от энергетической емкости, выделенной для ее выполнения.

3. Определяется взаимное соответствие выделенных для каждой функции емкостей и общей емкости СНЭ. При выполнении соответствующих оценок необходимо иметь в виду, что в силу совместности выполнения некоторых функций и особенностей графиков нагрузки общая емкость СНЭ меньше суммы емкостей, выделенных для реализации каждой из функций. После выполнения вышеуказанных этапов становится возможным выразить общий экономический эффект использования СНЭ в зависимости от ее емкости $C_T(Q_{\text{СНЭ}})$.

4. Расчет экономических показателей использования СНЭ. Так простой срок окупаемости без учета эксплуатационных расходов находится как частное от инвестиционной стоимости и суммарного экономического эффекта.

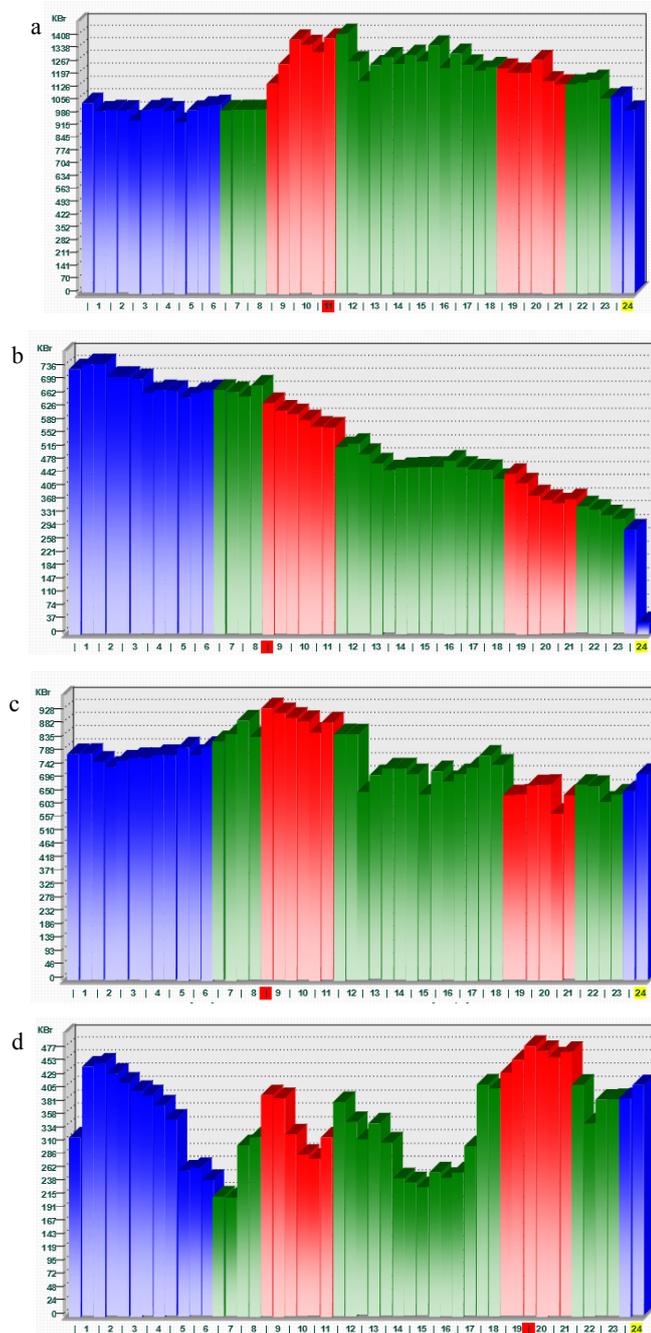


Рис. 1. Характерный график нагрузки предприятия А: а, б – в зимние рабочие и выходные дни; с, д – в летние рабочие и выходные дни (синие столбцы – время минимального тарифа, красные – утренний и вечерний пики нагрузки)

Fig. 1. Typical load schedule of the enterprise A: a, b – in winter working and weekend days; c, d – in summer working and weekend days (blue columns indicate the time of the minimum tariff, while red ones indicate morning and evening load peaks)

Таблица 2

Характеристики суточных графиков нагрузки предприятия*
Characteristics of the daily load schedules of the enterprise

	Рабочий день	Выходной день
Зима	$P_{\max} = 1408$ кВт $P^* = 1146,7$ кВт $\Delta P = P_{\max} - P^* = 234,1$ кВт $Q = 27520,8$ кВт·ч $\Delta Q = 1422$ кВт·ч	$P_{\max} = 736$ кВт $P^* = 518,7$ кВт $\Delta P = P_{\max} - P^* = 113,3$ кВт $Q = 12448,8$ кВт·ч $\Delta Q = 1516$ кВт·ч
Лето	$P_{\max} = 928$ кВт $P^* = 744,5$ кВт $\Delta P = P_{\max} - P^* = 183,5$ кВт $Q = 17867,2$ кВт·ч $\Delta Q = 871$ кВт·ч	$P_{\max} = 477$ кВт $P^* = 346,27$ кВт $\Delta P = P_{\max} - P^* = 130,5$ кВт $Q = 8310,4$ кВт·ч $\Delta Q = 798$ кВт·ч
* Условные обозначения даны на с. 409.		

Дополнительно может быть выполнена оценка среднеквадратичного отклонения величины экономического эффекта от ожидаемого значения. На основании сделанных оценок может быть принято обоснованное решение о целесообразности или нецелесообразности внедрения СНЭ на предприятии.

Произведем расчеты экономического эффекта СНЭ, используя данные предприятия.

Функция 1. Потребительское тарифное маневрирование. Месячный экономический эффект от тарифного маневрирования в общем виде рассчитывается с учетом использованной для этой функции энергетической емкости Q_{li}

$$C_{\text{т1}} = \sum_i Q_{li} (K_{\text{эф}} C_{\text{день}} - C_{\text{ночь}}), \text{ руб./мес.}, \quad (1)$$

где i – нумерация дней месяца.

Формула (1) может быть переписана с использованием среднемесячного значения емкости, используемой для реализаций функции Q_1 :

$$C_{\text{т1}} = 30Q_1 (K_{\text{эф}} C_{\text{день}} - C_{\text{ночь}}), \text{ руб./мес.}$$

Среднее значение Q_1 должно учитывать недельный график работы предприятия и базироваться на фактических графиках нагрузки. В случае предприятия принимаем, что 26 дней в месяце оно работает по графикам рабочего дня и 4 – по графикам выходного дня, представленным на рис. 1. Таким же образом может быть получено и среднегодовое значение емкости Q_1 .

Оценим максимальные объемы электроэнергии, которые могут быть экономически эффективно перемещены с дневного на ночное потребление с помощью СНЭ. Согласно данным табл. 2, для зимнего рабочего дня смещение потребления 1422 кВт·ч энергии позволяет выровнять суточный график. Большее смещение нецелесообразно, так как при этом снижается экономический эффект от приоритетной функции 2. Поскольку энергопотребление смещается на 7-часовой интервал (23:00–6:00), снижение эффекта функции произойдет при меньшей энергии смещения (1200 кВт·ч). Анализируя графики нагрузки, легко показать, что в летние рабочие и в выходные дни возможно большее чем 1200 кВт·ч смещение потребления на ночное время. В летнее время и в выходные дни возможно перераспределение ем-

кости СНЭ, зарезервированной для функций 1 и 2 в пользу функции 1. В связи с этим в некоторых случаях может быть целесообразным рассчитывать экономический эффект отдельно для летнего и зимнего периодов

$$C_{T1} = N_z Q_{1z} (K_{эф} C_{день} - C_{ночь}) + N_l Q_{1л} (K_{эф} C_{день} - C_{ночь}), \quad (1'')$$

где N_z, N_l – количество дней, оцениваемых по графику нагрузки зимнего и летнего рабочего дней соответственно.

В разделе, посвященном отношению между емкостями, выделенными для обеспечения функций СНЭ, показано, что в силу совместности функций 1 и 2 необходимости такого деления нет.

Для предприятия при незначительном (~13 %) относительном размахе дифференцированного тарифа функция потребительского тарифного маневрирования малосущественна. Оценочно при энергетической эффективности СНЭ (КПД = 95 % для литий-ионных АКБ) и емкости 1000 кВт·ч месячный экономический эффект составит $C_{T1} = 1000 \cdot 0,0156 \cdot 30 = 468$ руб., в предположении 11 полноценных рабочих месяцев 5148 руб. в год.

Функция 2. Снижение пиков потребления. Применяя получасовые графики нагрузки (рис. 1), можно рассчитать величину снижения нагрузки предприятия ΔP_{max} в зависимости от энергии, использованной для компенсации пикового потребления Q_2 (рис. 2).

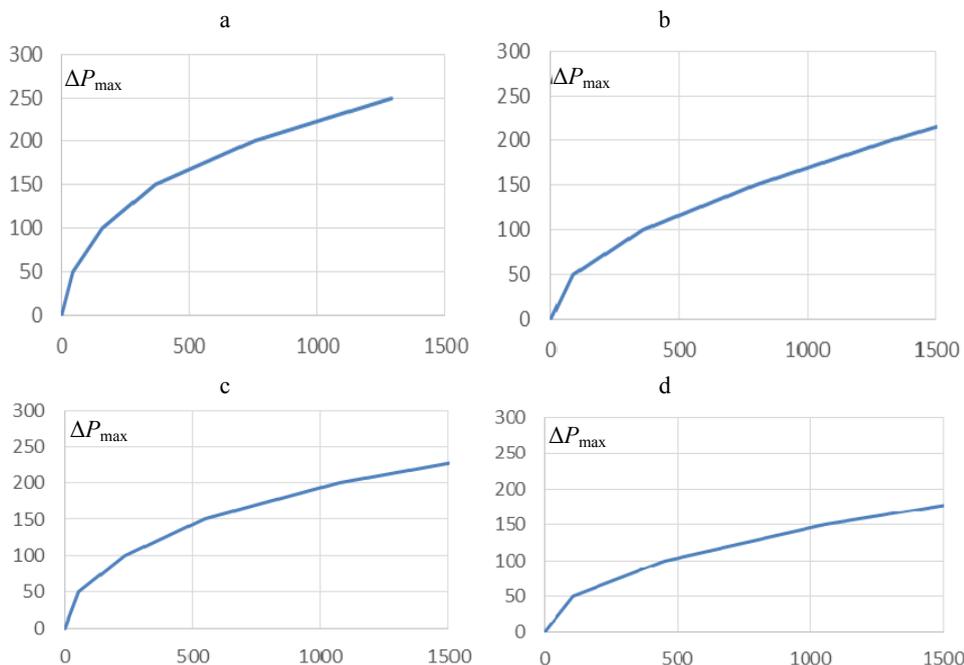


Рис. 2. Снижения пиковой нагрузки ΔP_{max} в зависимости от энергии компенсации пикового потребления Q_2 : а – зимний рабочий день (отрезки соответствуют статистическому разбросу в два стандартных отклонения); б – зимний выходной день; с – летний рабочий день; д – летний выходной день

Fig. 2. Reduction of peak load ΔP_{max} depending on the energy compensation of peak consumption Q_2 : а – winter working day (segments correspond to a statistical spread of two standard deviations); б – winter day off; с – summer working day; д – summer day off

Графики рис. 2 показывают, что ΔP_{\max} повышается с ростом Q_2 , а пиковая нагрузка падает. Эффект сильнее выражен при малых энергиях Q_2 . Фактические зависимости, представленные на рис. 2, с высокой точностью (за исключением малых значений Q_2) аппроксимируются дробно-степенной функцией

$$\Delta P_{\max} = \frac{a \cdot \sqrt{Q_2}}{1 + b \cdot \sqrt{Q_2}}, \text{ кВт.} \quad (2)$$

Для кривой, соответствующей зимнему рабочему дню, коэффициенты (2) принимают следующие значения: $a = 8,53$; $b = 0,006$.

Экономический эффект от снижения пикового потребления найдем по формуле

$$C_{т2} = C_{\max} K_M \Delta P_{\max}. \quad (3)$$

Поскольку наибольшее пиковое потребление имеет место в зимние рабочие дни, расчет экономического эффекта проводится по соответствующему графику нагрузки. Из графика рис. 2а видно, что подкачка порядка 150 кВт·ч энергии от СНЭ обеспечивает снижение потребляемой от сети пиковой мощности на 100 кВт. Подкачка 200 кВт·ч снижает пиковую мощность потребления на 110–115 кВт, а подкачка 400 кВт·ч – на 150 кВт. Эффект снижения пиков прекращается при величине энергии подкачки 1422 кВт·ч.

Статистический анализ выборки 10 графиков нагрузки в зимний рабочий день показывает стандартное отклонение по оси ординат, соответствующее 6 % среднего значения ΔP_{\max} , а стандартное отклонение по энергии компенсации пикового потребления $\text{Sig}2 = 0,12Q_2$.

Оценим величины экономического эффекта. При величине энергии, выделенной на компенсацию пиков нагрузки $Q_2 = 150$ кВт·ч, $\Delta P_{\max} = 100$ кВт $C_{т2} = C_{\max} K_M \Delta P_{\max} = 1572$ руб./мес., или 17292 руб./год.

Функция 3. Гарантирование выполнения условия $P_{\text{веч}} < P_{\text{утр}}$ ($K_M = 0,5$). Основой для расчета экономического эффекта от данной функции СНЭ является статистика нарушения требования $P_{\text{веч}} < P_{\text{утр}}$ за период использования данного тарифа и данные о связанных с этим финансовых издержках предприятия. Количество случаев нарушения условия потребления электроэнергии $P_{\text{веч}} < P_{\text{утр}}$ $N_{3н}$ должно быть достаточно большим для достоверной оценки вероятности данного события. Максимальный экономический эффект данной функции СНЭ $C_{т3\max}$ оценивается как

$$C_{т3\max} = \frac{C_{т3н}}{T_k}, \quad (4)$$

где $C_{т3н}$ – издержки предприятия, связанные с нарушением условия потребления электроэнергии $P_{\text{веч}} < P_{\text{утр}}$ за контрольный период T_k .

Для определения реального экономического эффекта от реализации данной функции необходимо учесть статистический характер случаев

нарушения условия $P_{\text{веч}} < P_{\text{утр}}$. На основании соответствующих графиков нагрузки предприятия определяются: 1) средняя величина энергии, необходимой для компенсации превышения $P_{\text{веч}} < P_{\text{утр}}$, $Q_{3\text{mst}}$; 2) среднеквадратичное отклонение этой величины $\text{Sig}3$. Величина экономического эффекта $C_{\text{т3}}$ определяется как сглаженная ступенчатая функция (используем экспоненциальную сигмоиду) от емкости Q_3

$$C_{\text{т3}} = \frac{C_{\text{т3max}}}{1 + \exp\left(-\frac{Q_3 - Q_{3\text{mst}}}{\text{Sig}3}\right)}. \quad (5)$$

Формула (5) обеспечивает приближенное выполнение характерного для нормально распределенных случайных величин условия – попадание 95 % случаев необходимой энергии компенсации в интервал $[Q_{3\text{mst}} - 2\text{Sig}3; Q_{3\text{mst}} + 2\text{Sig}3]$.

Изучение статистики нарушения условия $P_{\text{веч}} < P_{\text{утр}}$ для предприятия дало следующие оценки для модели (5): $C_{\text{т3max}} = 3000$ руб./год; $Q_{3\text{mst}} = 50$ кВт·ч; $\text{Sig}3 = 6$ кВт·ч. Величина экономического эффекта от энергетической емкости СНЭ, выделенной для гарантирования выполнения условия $P_{\text{веч}} < P_{\text{утр}}$, рассчитанная согласно (5), приведена на рис. 3. Физический смысл выражения (5) – вероятность получения максимального экономического эффекта, однако для простоты определим $C_{\text{т3}}$ как экономический эффект от функции 3 СНЭ.

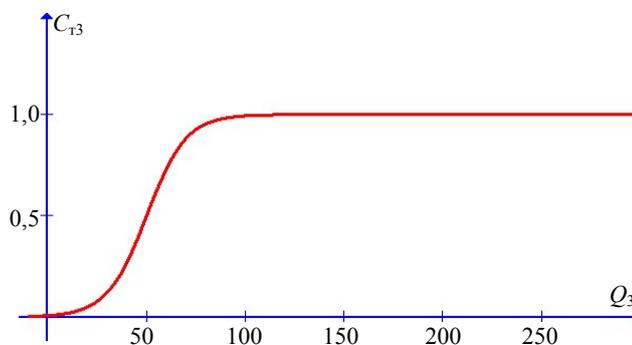


Рис. 3. Экономический эффект выполнения функции 3 СНЭ в зависимости от выделенной энергетической емкости

Fig. 3. The economic effect of performing function 3 of the ESS depending on the allocated energy capacity

Поскольку формула (5) описывает вероятность получения максимального оцененного эффекта функции 3, запас емкости для обеспечения высокой вероятности ее выполнения не рассматривается.

Функция 4. Обеспечение бесперебойности электроснабжения. Функция обеспечения бесперебойности электроснабжения предприятия по своей организации аналогична рассмотренной выше функции 3. Расчет максимального экономического эффекта $C_{\text{т4max}}$ проводится по имеющейся стати-

стике аварийного нарушения подачи электроэнергии за период, по которому можно судить о статистике данных событий. Проводится оценка финансовых потерь, связанных с перерывом электропитания, которые рассматриваются как ожидаемый экономический эффект реализации функции $C_{т4max}$. Путем анализа случаев нарушения электропитания определяются: 1) значения средней величины энергии, необходимой для обеспечения бесперебойности питания или уменьшения экономических потерь при остановке всего производства или отдельных технологических участков, Q_{4mst} ; 2) среднеквадратичное отклонение этой величины по рассмотренной статистике $Sig4$. В некоторых случаях целесообразно рассматривать отдельно случаи внешнего аварийного отключения электроснабжения и случаи, связанные со срабатыванием собственной защитной и аварийной автоматики.

Математическое выражение экономического эффекта аналогично (5) представляет собой сглаженную ступенчатую функцию

$$C_{т4} = \frac{C_{т4max}}{1 + \exp\left(-\frac{Q_4 - Q_{4mst}}{Sig4}\right)}. \quad (6)$$

Изучение статистики нарушений электроснабжения предприятия и отдельных технологических участков приводит к следующим оценкам: $C_{т4max} = 30\ 000$ руб./год; $Q_{4mst} = 180$ кВт·ч; $Sig4 = 35$ кВт·ч. Величина экономического эффекта от энергетической емкости СНЭ, выделенной для обеспечения аварийной бесперебойности энергоснабжения, рассчитанная по (6), приведена на рис. 4.

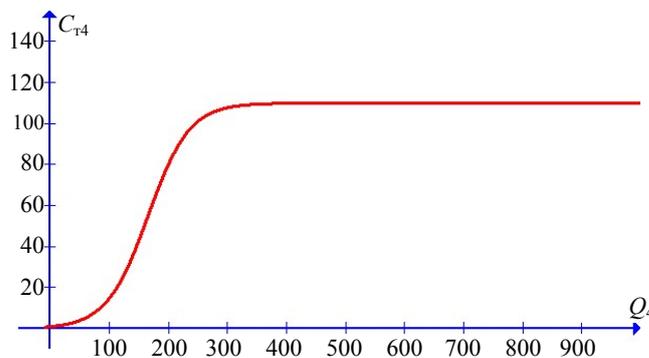


Рис. 4. Экономический эффект функции 4 СНЭ в зависимости от выделенной емкости
 Fig. 4. The economic effect of function 4 of the ESS depending on the allocated energy capacity

Взаимное соответствие емкостей и общая емкость СНЭ

В силу закономерного или случайного совпадения по времени выполнения рассматриваемых функций, а также ввиду их совместности (получения результата нескольких функций за счет ресурса одной) энергетические

емкости, выделенные для их реализации, могут относиться друг к другу как пересекающиеся множества: $Q_{\text{СНЭ}} < Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4$. Для расчета экономического эффекта СНЭ необходимо выразить емкости Q_1 , Q_2 , Q_3 и Q_4 как доли общей емкости $Q_{\text{СНЭ}}$. Точный статистический анализ взаимодействия функций не может быть произведен ввиду сложности задачи и отсутствия достаточного статистического материала. Поэтому целесообразно количественно-качественное определение отношений между емкостями на основе анализа: 1) их совместности, 2) приоритетности, 3) предполагаемого алгоритма работы СНЭ, 4) данных по стандартному отклонению режимных параметров системы.

Согласно рис. 1а, энергопотребление в дневной период (включая утренний и вечерний пики) приблизительно равномерное, поэтому график состояния зарядки СНЭ может иметь вид, представленный на рис. 5а.

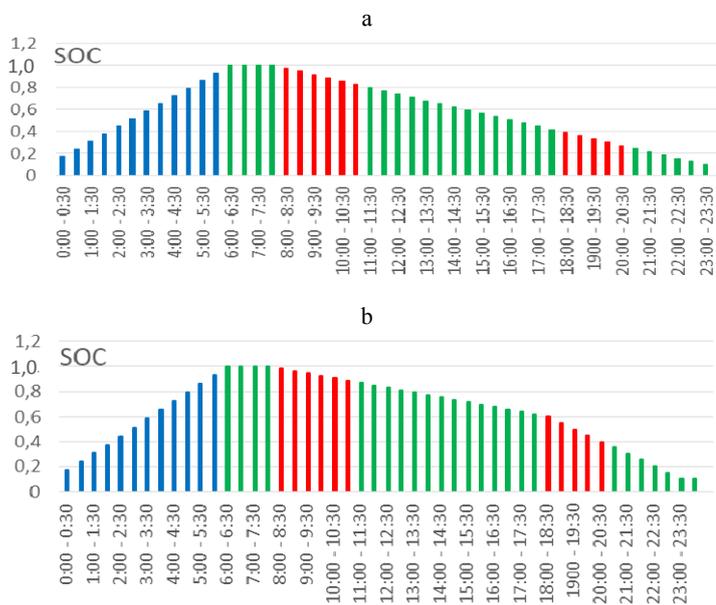


Рис. 5. График состояния зарядки СНЭ на литий-ионных АКБ:
а – равномерная разгрузка СНЭ, б – оптимизированная разгрузка
(синий цвет диаграммы – время ночного тарифа,
красный – утренний и вечерний пики энергопотребления)

Fig. 5. Graph of the charging status of the ESS on lithium-ion rechargeable batteries:
а – uniform discharge of the ESS, б – optimized discharge
(the blue color of the chart is the time of the night tariff, the red one is morning
and evening peaks of energy consumption)

В соответствии с техническими характеристиками СНЭ определяем величину допустимой рабочей глубины разрядки СНЭ – DOD_w . Принимаем $DOD_w = 90\%$ для литий-ионных и $DOD_w = 70\%$ – для свинцово-кислотных АКБ. Для аварийных случаев и случаев редкой необходимости допускаем $DOD_w = 100\%$. Поскольку запасание и выдача энергии СНЭ для

функций 1 и 2 проводятся по одинаковому временному графику, они полностью совместны. Поэтому выделяемые для их реализации емкости одинаковы и соответствуют максимально возможной для суточного циклирования емкости

$$Q_1 = Q_2 \leq 0,9Q_{\text{СНЭ}}. \quad (7)$$

Выполнение функции 3 может быть несовместно или частично совместно с выполнением функций 1 и 2 в зависимости от алгоритма работы СНЭ. В общем случае компенсация превышения $P_{\text{веч}} < P_{\text{утр}}$ может быть выполнена из объема, соответствующего среднему запасу энергии в период вечернего пика энергопотребления. При равномерной разгрузке СНЭ в дневное время (рис. 5а), $Q_3 = 0,27Q_{\text{СНЭ}}$. Если СНЭ работает по оптимизированному графику и снижает нагрузку лишь до необходимого уровня в утренний пик и дневной полупик, то с высокой степенью вероятности для гарантирования выполнения условия $P_{\text{веч}} < P_{\text{утр}}$ может быть выделена большая доля емкости СНЭ (для случая, соответствующего рис. 5б: $Q_3 = 0,45Q_{\text{СНЭ}}$). При дальнейших расчетах принимаем последний вариант.

Функция 4 независима от остальных функций, поскольку при аварийном отключении электроснабжения функции 1–3 не осуществляются. Так как время аварийного отключения не может быть спрогнозировано, ожидаемая емкость для осуществления функции 4 соответствует средней величине SOC в течение рабочего времени. Эта величина зависит от алгоритма работы СНЭ. Для случая равномерной разгрузки СНЭ: $Q_4 = 0,6Q_{\text{СНЭ}}$, для случая оптимизированной разгрузки: $Q_4 = 0,7Q_{\text{СНЭ}}$.

Для «жестких» функций СНЭ должен предусматриваться запас емкости, обеспечивающий высокую вероятность ее реализации. Выше было указано, что в связи с вероятностным характером моделей (5) и (6) запас емкости для функций 3 и 4 не предусматривается. Запас емкости для функции 2 должен быть предусмотрен ввиду статистического характера величины снижения пиковой нагрузки ΔP_{max} (рис. 2а). Статистический разброс в два стандартных отклонения как по оси абсцисс, так и по оси ординат изображен на графике. Стандартное отклонение по ΔP_{max} соответствует 6 % среднего значения, стандартное отклонение от среднего значения экономического эффекта (3) также составит 6 %. Соответствующее стандартное отклонение по оси абсцисс в линейном приближении $\text{Sig}2 = 0,12Q_2$.

Имеются два способа учесть запас емкости для выполнения функции 2: 1) увеличение выделенной емкости Q_2 на величину одного или двух стандартных отклонений; 2) уменьшение ожидаемого экономического эффекта от данной функции на соответствующие стандартные отклонения. Увеличение выделенной емкости для функции 2 обеспечивается пропорциональным уменьшением выделенной емкости для остальных функций. Соответствующая оценка выделенных емкостей для предприятия:

$$\begin{cases} Q_1 = 0,9Q_{\text{СНЭ}} - 0,45\text{Sig}2; \\ Q_2 = 0,9Q_{\text{СНЭ}} + \text{Sig}2; \\ Q_3 = 0,9Q_{\text{СНЭ}} - 0,2\text{Sig}2; \\ \text{Sig}2 = 0,12Q_2. \end{cases} \quad (8)$$

Оценка экономического эффекта

Общий годовой экономический эффект применения СНЭ получаем суммированием эффектов от всех учтенных функций

$$C_T = C_{T1} + C_{T2} + C_{T3} + C_{T4}, \quad (9)$$

где величины C_{T1} , C_{T2} , C_{T3} , C_{T4} рассчитываются по формулам (1)–(8). Поскольку величины емкостей Q_1 , Q_2 , Q_3 , Q_4 связаны с $Q_{\text{СНЭ}}$ (8), возможно построение зависимости $C_T = f(Q_{\text{СНЭ}})$, дающей наглядное представление о связи емкости СНЭ и экономическом эффекте ее применения (рис. 6).

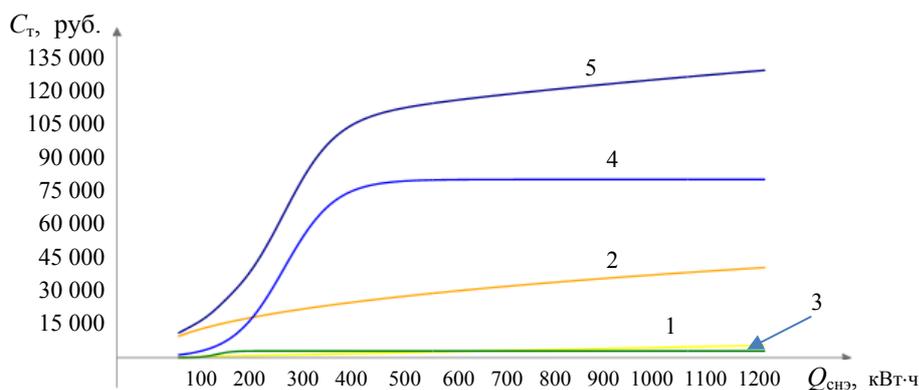


Рис. 6. Зависимость общего экономического эффекта, руб./год, от емкости СНЭ (кривая 5):
1–4 – вклад функций 1–4 соответственно

Fig. 6. Dependence of the overall economic effect, rubles/year, on the capacity of the ESS (curve 5):
1–4 – contribution of functions 1–4 respectively

Простой срок окупаемости инвестиций без учета амортизации и эксплуатационных затрат рассчитаем по формуле

$$T_{\text{оки}} = \frac{C_{\text{т,инв}}}{C_T}. \quad (10)$$

Полагаем, что инвестиционные затраты линейно связаны с общей энергетической емкостью СНЭ:

$$C_{\text{т,инв}} = \text{Ц}_{\text{СНЭ}} Q_{\text{СНЭ}}, \text{ руб.}, \quad (11)$$

где $\text{Ц}_{\text{СНЭ}}$ – стоимость установки 1 кВт·ч номинальной емкости СНЭ.

Для расчетов принято $\text{Ц}_{\text{СНЭ}} = 1000$ руб., что приблизительно соответствует 330 дол. США. Для создания более полной картины кроме базового случая был рассчитан простой срок окупаемости СНЭ при условии отсут-

ствия понижающего коэффициента за максимальную мощность ($K_M = 1$), а также вариант увеличенного размаха дифференцированного тарифа $C_{\text{день}}/C_{\text{ночь}} = 2$ с тем же средним значением, рис. 7.

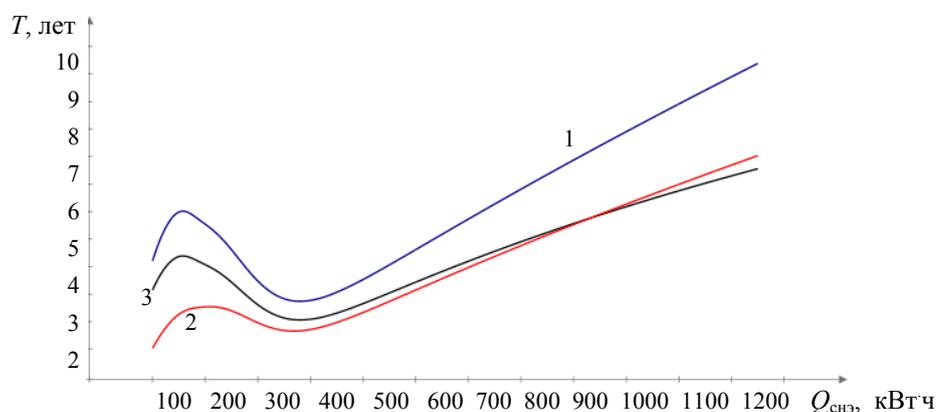


Рис. 7. Простой срок окупаемости (лет) как функция от энергетической емкости СНЭ:
 1 – основной расчет для предприятия; 2 – расчет при $K_M = 1$;
 3 – расчет при условии $C_{\text{день}}/C_{\text{ночь}} = 2$

Fig. 7. Simple payback period (years) as a function of the energy capacity of the ESS:
 1 – the main calculation for the enterprise; 2 – calculation at $K_M = 1$;
 3 – calculation provided that $C_{\text{day}}/C_{\text{night}} = 2$

Срок окупаемости инвестиций представляет собой сложную функцию от энергетической емкости СНЭ. Экономическая эффективность существенно зависит как от тарификации услуг энергоснабжения, так и от издержек от нарушения электроснабжения. В случае полной стоимости тарифа за подключенную мощность ($K_M = 1$) и сохранения прочих условий работы предприятия минимальный эффективный простой срок окупаемости инвестиций составит 3,2 года. В рассмотренном случае размах дифференцированного тарифа мал (~13 %) и эффект соответствующей функции СНЭ незначительный. При двукратном отношении максимального и минимального тарифов минимальный эффективный срок окупаемости составит 3,5 года. В случае особо чувствительного к качеству электроснабжения производства эффективный срок окупаемости может быть еще ниже.

ВЫВОДЫ

1. Представлена методика расчета экономической эффективности использования СНЭ на промышленном предприятии, поясняемая оценками и расчетами на основании данных по конкретному предприятию.

2. Приведены расчеты простого срока окупаемости инвестиций на установку СНЭ для предприятия, а также при возможных вариантах условий оплаты электроэнергии. Показано, что экономический результат использования СНЭ существенно зависит как от условий тарификации и графиков нагрузки предприятия, так и от специфических требований к бесперебойности электроснабжения (оцениваются в каждом конкретном случае индивидуально). Коммерческая привлекательность применения СНЭ на промышленных предприятиях существенно возрастает при снижении рыночной стоимости установленного киловатт-часа энергетической емкости.

3. Предложенная методика может быть использована при разработке стандартизированных методик для применения к более широкому классу потребителей. При этом методики могут быть дополнены примерными формами опросных листов для предприятий. Методика легко формализуется и может быть использована для создания калькулятора окупаемости инвестиций в СНЭ для предприятий. Принципы и формулы, предложенные в данной статье, могут быть использованы для создания «интеллектуальных» алгоритмов управления работой СНЭ.

Условные обозначения:

- $Q_{\text{СНЭ}}$ – номинальная емкость СНЭ;
 Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 – энергетическая емкость СНЭ, требуемая для выполнения функций 1–4 соответственно, кВт·ч;
 $K_{\text{эф}}$ – коэффициент энергетической эффективности СНЭ;
 $C_{\text{день}}, C_{\text{ночь}}$ – максимальный (дневной) и минимальный (ночной) тариф при дифференцированной по двум периодам тарификации, руб./(кВт·ч);
 C_{max} – основная плата за мощность, руб./(кВт·ч);
 $\Delta C = C_{\text{день}} - C_{\text{ночь}}$ – размах дифференцированного тарифа, руб./(кВт·ч);
 K_M – понижающий коэффициент платы за мощность;
 $P_{\text{веч}}$ – максимальная мощность вечернего пика энергопотребления;
 $P_{\text{утр}}$ – то же утреннего пика энергопотребления;
 $\Pi_{\text{СНЭ}}$ – стоимость единицы энергетической емкости СНЭ, руб./(кВт·ч);
 P^* – среднесуточная мощность потребления электроэнергии по получасовому графику, кВт;
 P_{max} – максимальная суточная мощность потребления электроэнергии по получасовому графику, кВт.
 $\Delta P = P_{\text{max}} - P^*$ – превышение максимальной мощности над среднесуточной, кВт;
 ΔP_{max} – снижение пиковой нагрузки за счет применения СНЭ, кВт;
 Q – общее суточное потребление электроэнергии, кВт·ч;
 ΔQ – суммарная энергия превышения среднесуточной мощности, кВт·ч.

ЛИТЕРАТУРА

1. IН 2023 Energy Storage Market Outlook [Electronic Resource]. Mode of access: <https://about.bnef.com/blog/1h-2023-energy-storage-market-outlook>. Date of access: 07.04.2023.
2. Гуртовцев, А. А. Выравнивание графиков электрической нагрузки энергосистемы / А. А. Гуртовцев, Е. П. Забелло // Энергетика и ТЭК. 2008. № 7/8. С. 13–20.
3. Доброго, К. В. Об обосновании экономической целесообразности использования электрохимических накопителей энергии в энергетической системе / К. В. Доброго // Энергетическая стратегия. 2022. № 5 (89). С. 28–32.
4. Чернецкий, А. М. Оценка экономической эффективности использования накопителей электроэнергии в энергосистеме / А. М. Чернецкий. Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2013. № 4. С. 21–28.
5. К вопросу использования электрохимических накопителей энергии в условиях Белорусской энергосистемы / Е. О. Воронов [и др.] // Энергетическая стратегия. 2017. № 4. С. 14–17.
6. Анализ применения систем накопления электроэнергии на тепловых электрических станциях [Электронный ресурс] / Д. И. Менделеев [и др.] // Международная научно-практическая конференция «Развивая энергетическую повестку будущего» для представителей сообщества молодых инженеров ТЭК: Препринт, сб. докладов, Санкт-Петербург, 10–11 дек., 2021 г. СПб.: Невская Типография, ООО «Добрые коммуникации». Режим доступа: <https://eaf.etu.ru/assets/files/eaf21/index.htm>.

7. Концепция применения систем накопления энергии на базе литий-ионных аккумуляторов в Белорусской энергосистеме: отчет о НИР (заключ.) / ГПО «Белэнерго», РУП «БелТЭИ»; А. Ф. Молочко [и др.]. Минск, 2022. Т. 1–3. № Б 22-3/4.
8. Методические рекомендации по составлению технико-экономических обоснований для энергосберегающих мероприятий (ред. от 11.11.2020) [Электронный ресурс] // Департамент по энергоэффективности Государственного комитета по стандартизации Республики Беларусь. Режим доступа: https://energoeffect.gov.by/programs/forming/20201118_tepem.
9. 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>.
10. 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>.

Поступила 15.05.2024 Подписана в печать 16.07.2024 Опубликована онлайн 30.09.2024

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. Gurtovtsev A. A., Zabello E. P. (2008) Alignment of Electrical Load Schedules of the Power System. *Energetika i TEK* [Power Engineering and Fuel-and-Energy Complex], (7/8), 13–20 (in Russian).
3. Dobrego K. V. (2022) On the Justification of the Economic Feasibility of Using Electrochemical Energy Storage Devices in the Energy System. *Energeticheskaya Strategiya* [Energy Strategy], (5), 28–32 (in Russian).
4. Chernetsky A. M. (2013) Assessment of Economic Efficiency Pertaining to Application of Energy Storage Units in Power System. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (4), 21–28 (in Russian).
5. Voronov E. O., Kovalev D. V., Sivak A. V., Kudryavtsev D. I., Negod'ko A. Z., Dragun A. A. (2017) On the Issue of the Use of Electrochemical Energy Storage in the Conditions of the Belarusian Energy System. *Energeticheskaya Strategiya* [Energy Strategy], (4), 14–17 (in Russian).
6. Mendeleev D. I., Rossikhin D. A., Galimzyanov L. A., Fedotov A. Yu. (2021) Analysis of the Application of Energy Storage Systems at Thermal Power Plants. *International Scientific and Practical Conference "Developing the Energy Agenda of the Future" for Representatives of the Community of Young Fuel and Energy Engineers. Preprint of the Collection of Presentations. St. Petersburg, December 10–11, 2021*. St. Petersburg, Nevsky Printing House, LLC "Dobrye kommunikatsii". Available at: <https://eaf.etu.ru/assets/files/eaf21/index.htm> (in Russian).
7. Molochko A. F., Privalov A. S., Zhuchenko E. A., Ivashko E. V. [et al.] (2022) *The Concept of Using Energy Storage Systems Based on Lithium-Ion Batteries in the Belarusian Energy System*. Report on the Research Work (Final). Vol. 1–3. No. Б 22-3/4. Minsk (in Russian).
8. Methodological Recommendations for the Preparation of Feasibility Studies for Energy-Saving Measures (as amended on 11.11.2020). *Department for Energy Efficiency of the State Committee for Standardization of the Republic of Belarus*. Available at: https://energoeffect.gov.by/programs/forming/20201118_tepem (in Russian).
9. 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).
10. 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).

Received: 15 May 2024

Accepted: 16 July 2024

Published online: 30 September 2024