

ЭНЕРГЕТИКА



УДК 621.311.26

DOI:10.30724/1998-9903-2021-23-1-3-17

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ АВТОНОМНОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ РАСХОДА ТОПЛИВА ЭНЕРГОУСТАНОВОК

А.И. Федотов, Е.А. Федотов, А.Ф. Абдуллазянов

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

e-mail:fed.ai@mail.ru, e-mail:evfedotov2002@yandex.ru

e-mail:ainyr1582@mail.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. На удаленных территориях при отсутствии централизованного электроснабжения энергосбережение является одним из ключевых факторов успешного развития региона. Применение электрохимических накопителей энергии способствует экономии жидкого или газообразного топлива энергоустановок, используемых в автономных системах электроснабжения. Отечественные производители создали мобильные системы накопления энергии модульного типа, предназначенные к быстрому их развертыванию практически на любой территории и работающие в диапазоне от нескольких сотен киловатт в единичном исполнении до комплексов в десятки мегаватт. МЕТОД. Использован метод неопределенных множителей Лагранжа в приложении к профилям мощности нагрузки дискретного вида для выбора параметров электрохимического накопителя энергии, обуславливающих минимизацию расхода топлива. Полученная математическая модель использует профили мощности нагрузки, сформированные по её продолжительности, и ориентирована на простейший алгоритм численного поиска экстремума функции путем изменения её аргумента, не решая оптимизационного нелинейного уравнения. В методику включен выбор длительности разряда накопителя энергии. РЕЗУЛЬТАТ. Показано влияние накопителя энергии на снижение расхода топлива. Методика справедлива для выпуклых расходных характеристик энергоустановок. В условиях прогнозируемых изменений профилей мощности (рабочий/выходной дни) сценарии оптимального управления рассчитываются индивидуально. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Использование предложенной математической модели обеспечивает быстрые расчеты экономической оценки использования электрохимических накопителей энергии. Для газопоршневых энергоустановок, где они обязательны для стабилизации параметров качества электроэнергии, их коммерческая привлекательность существенно выше, чем для энергоустановок другого вида.

Ключевые слова: электрохимический накопитель энергии, литий-ионная аккумуляторная батарея, энергоустановка, система электроснабжения, профиль мощности нагрузки, экономия топлива.

Для цитирования: А.И. Федотов, Е.А. Федотов, А.Ф. Абдуллазянов. Использование электрохимических накопителей энергии в системах автономного электроснабжения для снижения расхода топлива энергоустановок // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 1. С. 3-17. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-1-3-17.

USE OF ELECTROCHEMICAL ENERGY STORAGE SYSTEMS IN AUTONOMOUS POWER SUPPLY SYSTEMS TO REDUCE FUEL CONSUMPTION OF POWER INSTALLATIONS

AI. Fedotov, EA. Fedotov, AF. Abdullazyanov

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

e-mail:fed.ai@mail.r, e-mail:evfedotov2002@yandex.ru

e-mail:ainyr1582@mail.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* In remote areas in the absence of centralized power supply, energy conservation is one of the key factors for the successful development of the region. The use of electrochemical energy storage systems contributes to the saving of liquid or gaseous fuel of power plants used in autonomous power supply systems. Domestic manufacturers have created modular-type mobile energy storage systems designed for their rapid deployment in almost any territory and operating in the range from several hundred kilowatts in a single design to complexes of tens of megawatts. *METHOD.* The method of indefinite Lagrange multipliers was used in application to the power profiles of the load of a discrete form to select the parameters of the electrochemical energy storage, causing the minimization of fuel consumption. The obtained mathematical model uses the power profiles of the load, formed by its duration, and is focused on the simplest algorithm for the numerical search for the extremum of a function by changing its argument, without solving the optimization nonlinear equation. The method includes the choice of the duration of the discharge of the energy storage. *RESULTS.* The influence of the energy storage device on the reduction of fuel consumption is shown. The technique is valid for convex consumption characteristics of power plants. In the context of predicted changes in power profiles (work / weekend days), optimal control scenarios are calculated individually. *CONCLUSION.* The use of the proposed mathematical model provides quick calculations of the economic assessment of the use of electrochemical energy storage. For gas piston power plants, where they are required to stabilize the parameters of power quality, their commercial attractiveness is significantly higher than for power plants of another type.

Key words: *electrochemical energy storage, lithium-ion storage battery, power plant, power supply system, load power profile, fuel economy.*

For citation: Fedotov AI, Fedotov EA, Abdullazyanov AF. Use of electrochemical energy storage systems in autonomous power supply systems to reduce fuel consumption of power installations. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021;23(1):3-17. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-1-3-17.

Введение

В последние годы наблюдается высокая скорость распространения по всему миру электрохимических накопителей энергии (НЭ), при этом имеет место как рост мощности/энергоемкости отдельных установок до сотен мегаватт и мегаватт-часов с целью размещения в крупных энергосистемах, так и их разукрупнение до нескольких десятков киловатт/киловатт-часов для использования в частных домохозяйствах [1, 2]. Так, американская проектная компания *8minute Solar Energy* объявила о подписании договора со швейцарской инвестиционной компанией *Capital Dynamics* о совместном финансировании и долевом участии в строительстве на юге штата Калифорния совмещенного энергокомплекса (*solar-plus-storage*) *Eland Solar & Storage Center*. В состав энергокомплекса войдут СЭС мощностью 400 МВт и накопитель энергии мощностью 300 МВт и энергоемкостью 1200 МВт·ч [3].

С другой стороны, австралийская компания *Western Power* подключила накопитель энергии *Tesla* мощностью 116 кВт и энергоемкостью 464 кВт·ч к электрическим сетям населенных пунктов Элленбрук и Фалькон. В результате они предоставили возможность владельцам местных домохозяйств зарезервировать за собой ячейки «виртуального» хранилища электроэнергии энергоемкостью 6 кВт·ч или 8 кВт·ч по цене \$ 1,60 или \$ 1,90 в день соответственно. За указанную плату участники проекта могут использовать «зарезервированные» ячейки *PowerBank* для аккумуляции избыточной электроэнергии, выработанной установленными у них солнечными панелями, в часы высокой солнечной активности и потреблять электроэнергию в зарезервированном объеме в часы низкой солнечной активности, тем самым экономя на приобретении собственной системы хранения энергии [3].

Современная архитектура российской электроэнергетики представляет собой сочетание централизованного энергоснабжения от крупных электростанций с мощными блоками, соединёнными высоковольтными магистральными электрическими сетями напряжением 220 кВ и выше, и локальных энергетических систем с распределённой генерацией от энергоустановок малой мощности (менее 25 МВт) [4].

Согласно экспертным оценкам, на долю распределенной генерации к настоящему времени приходится около 5-10% от суммарной выработки электроэнергии в России, что можно рассматривать как устойчивый тренд формирования новой энергетики, основанной

на цифровых технологиях. Основным фактором, способствующим смене технологической парадигмы, является растущая неэффективность российского централизованного электроэнергетического сектора вследствие общего снижения загрузки крупных электростанций с соответствующим ростом себестоимости производимой электроэнергии. Существенный фактор, повышающий привлекательность распределенной генерации для представителей самых разных отраслей – это динамика цен на мощность и динамика роста тарифов на услуги по передаче электроэнергии [5, 6].

В связи с тенденцией роста цены на газ и энергоносители значимость высокоэффективных технологий, к которым относится формирование локальных систем электроснабжения на базе применения дизельных, газопоршневых и газотурбинных энергоустановок, будет постоянно повышаться. Драйвером роста их эффективности может стать применение электрохимических НЭ на основе литий-ионных аккумуляторных батарей. Наличие энергоемких и мощных накопителей в качестве промежуточного устройства между генерацией энергии и её потреблением позволило бы освободиться от жесткого баланса между её производством и потреблением и обеспечить наиболее экономичные режимы работы энергоустановок. Экономия жидкого топлива особенно актуальна для северных территорий страны, где в его доставке участвуют практически все виды транспорта [7-11].

Постановка задачи

Наличие попутного нефтяного газа даже при необходимости его очистки делает безальтернативным использование на этих территориях газопоршневых и газотурбинных энергоустановок для электроснабжения промышленных и бытовых потребителей электроэнергии [12]. Применение электрохимических НЭ эффективно на объектах нефтегазовой промышленности, поскольку позволяет обеспечить:

- запуск электростанции «с нуля» после ее внезапного выхода из работы из-за аварии в сети (остановка турбин);
- снять перегрузки распределительной сети при прохождении максимумов нагрузки (особенно экстраординарных: резкое похолодание, в режимах высокого риска нарушения электроснабжения из-за природных факторов или аварийного состояния сети);
- обеспечить устойчивую работу газопоршневых энергоустановок (ГПУ) при набросах нагрузки (например, при пусках электродвигателей) [3, 13];
- в режимах форсировки реактивной мощности при провалах напряжения поддерживать напряжение на нагрузке в целях предотвращения «опрокидывания» асинхронных двигателей и отключения электромагнитных расцепителей автоматов 0,4 кВ [10, 14].

– Развитие и совершенствование технологий создания и производства новых типов литий-ионных батарей способствует их практически безальтернативному применению в промышленных накопителях, предназначенных к выработке электроэнергии продолжительностью от нескольких десятков секунд и выше [15-21].

ООО «Системы накопления энергии», г. Новосибирск, является лидером в Российской Федерации по разработке электрохимических систем НЭ. Компанией разработаны технические решения НЭ на основе литий-ионных аккумуляторных батарей в шкафом и контейнерном исполнении [23], последнее из которых наиболее предпочтительно для быстрого развертывания систем локальной генерации, рис. 1.



а)



б)

Рис. 1 Контейнерное исполнение электрохимического НЭ
а – контейнер с кондиционером; б – стойка с аккумуляторными батареями

Fig.1. Container version of the electrochemical device
a – container with air conditioning; б – battery rack

Методы

Ниже предлагается методика выбора оптимальных параметров НЭ, используемых в составе энергоустановок, в целях снижения расхода топлива.

Рассмотрим параллельную работы электростанции в локальной системе электроснабжения с одним общим накопителем энергии, рис. 2, где приняты обозначения: BS – выключатель накопителя энергии, TS – согласующий трансформатор, I – двунаправленный инвертор, EB – аккумуляторная батарея. Все эти элементы образуют в совокупности электрохимический накопитель энергии ES . В двигатели энергоустановок $M1, \dots, MN$ поступает топливо $Q1, \dots, QN$. В общем случае энергоустановки могут быть разными по мощности и типу. В действительности такой случай в малой энергетике при электроснабжении изолированных территорий встречается крайне редко и далее будем считать, что все энергоустановки однотипные. Поэтому их можно условно считать одной эквивалентной энергоустановкой при решении и задачи минимизации расхода топлива. Отключение одной или нескольких энергоустановок при определенных условиях также способствует энергосбережению, но этот вопрос в настоящей статье не рассматривается.

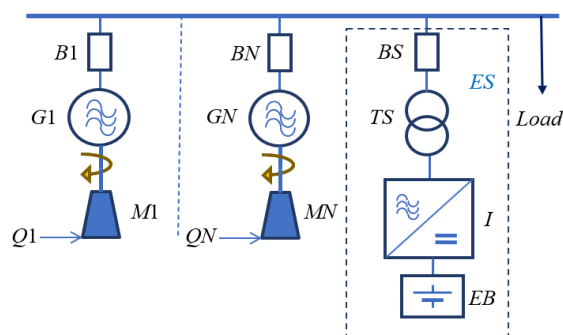


Рис. 2. Принципиальная схема электростанции с электрохимическим НЭ
Fig.2. Schematic diagram of a power plant with an electrochemical device

Предварительно необходимо определиться, на каком интервале времени рассматривается задача и каким образом стал известен график нагрузки на этом периоде. Последнее обстоятельство является главным неопределенным фактором, т.к. режим работы НЭ необходимо задавать «сейчас», а изменение нагрузки наступает «потом». Если не сформировать заранее некоторый приближенный закон управления накопителем, то можно столкнуться с ситуацией, когда НЭ уже разряжен, а именно «сейчас» необходима дополнительная генерация мощности либо по условию сохранения устойчивой работы ГПУ, либо по условию экономии топлива.

Первый фактор диктует сохранение определенного заранее заданного резерва мощности, который практически не сказывается на емкости НЭ. ГПУ чувствительны к резким изменениям нагрузки [3, 13]. На рис. 3 в качестве примера приведена нагрузочная диаграмма конкретной ГПУ типа MTU 8V4000L32 номинальной мощностью 776 кВт [23]. Диаграмма показывает максимальную величину наброса/сброса нагрузки при условии соблюдения стандарта ISO 8528-5, согласно которому для класса энергоустановок G1 допускается диапазон отклонения частоты $+18/-25\%$ (время восстановления частоты 10 с), а для класса энергоустановок G3 допускается диапазон $+10/-15\%$ (время восстановления частоты 3 с).

Так, при работе ГПУ с нагрузкой от 13% до 94% допустимо подключать ступенчато не более 5,8% мощности, что составит только 45 кВт, а для ГПУ, нагруженной на 70%, допустим сброс нагрузки 3,2%, т.е. 24,8 кВт. В динамике НЭ компенсирует нагрузку в течение нескольких секунд, которых достаточно для отработки возмущения системой регулирования газопоршневого двигателя и принятия полной нагрузки на ГПУ.

Второй фактор обуславливает необходимость формирования интервалов заряда – разряда НЭ, предполагающие достижение максимальной экономии топлива, под которые уже выбираются параметры НЭ [24, 25]. Далее выполняется технико-экономический расчет, который может их скорректировать с учетом заданного срока окупаемости инвестиций [26]. Применительно к ГПУ в качестве базового варианта, не включаемого в дополнительные затраты, принимается НЭ, обеспечивающий стабилизацию режима ГПУ при максимальном набросе нагрузки. Применительно к дизельгенераторной энергоустановке стоимость любого НЭ сразу включается в дополнительные затраты.

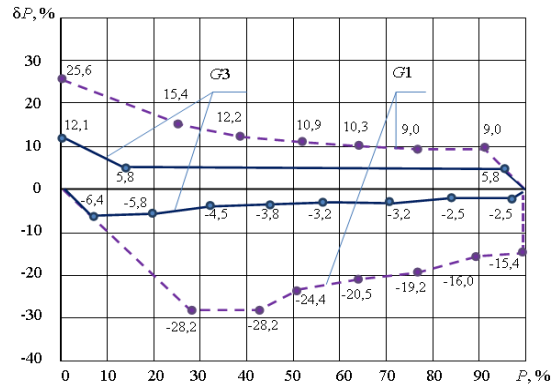


Рис. 3. Диаграмма допустимых нагрузок ГПУ MTU 8V4000L32
Fig 3. GPU load Tolerance Diagram MTU 8V4000L32

Математическая модель

Рассмотрим математическую сторону вопроса достижения максимальной экономии топлива при использовании НЭ. На рассматриваемом интервале времени повторяемости графика нагрузки $[0; T]$ должен выполняться баланс между энергией заряда W_c (отдала сеть) и разряда W_{dc} (приняла сеть) с учетом КПД, т.е. НЭ может отдать только столько энергии, сколько в него поступило, иначе от разрядится:

$$\eta \int_0^T P_c dt = \eta W_c = \frac{1}{\eta} W_{dc} = \frac{1}{\eta} \int_0^T P_{dc} dt, \quad (1)$$

где η – КПД системы накопления энергии, P_c – мощность, направляемая из сети в НЭ; ηP_c – принятая НЭ зарядная мощность; P_{dc} – мощность, принимаемая сетью от НЭ.

На практике имеют дело с дискретными замерах, когда суточные профили мощности записывается с усреднением на получасовых интервалах времени. По результатам измерений удобно переходить к профилю мощности по её продолжительности, рис. 4.

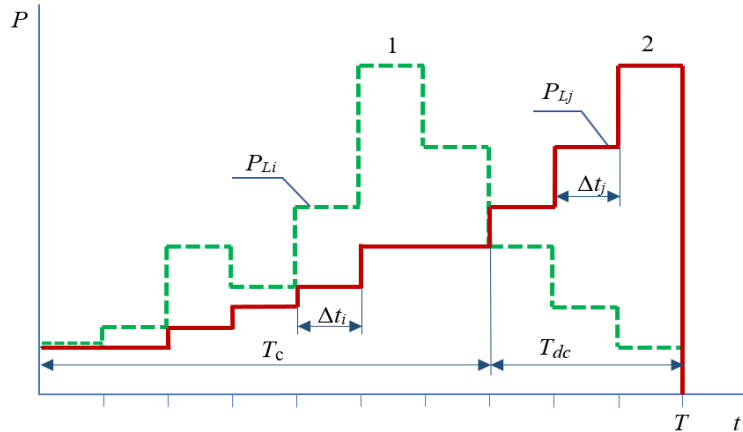


Рис. 4. Диаграммы профиля мощности нагрузки
1 – профиль мощности нагрузки на интервале наблюдения T ,
2 – профиль мощности нагрузки по её продолжительности,
 P_L – мощность нагрузки.

Fig.4. Load Power profile diagrams
1– load power profile at the observation interval T ,
2– load power profile by its duration
3– P_L -load capacity

Считаем, что на интервале времени T_c происходит заряд НЭ постоянным по величине током (ООО «Лиотех» рекомендует ток заряда 0,2С [27]), а на интервале времени T_{dc} происходит его разряд. Баланс энергии (1) можно записать в следующем виде

$$\eta \sum_i P_{ci} \Delta t_i = \frac{1}{\eta} \sum_j P_{dcj} \Delta t_j. \quad (2)$$

Поскольку при постоянном токе заряда питающее напряжение практически не изменяется (на общих шинах оно поддерживается автоматическим регулятором возбуждения генератора), то мощность заряда P_c также постоянная. Тогда левая часть выражения (2) может быть преобразована к следующему виду

$$\eta \sum_i P_{ci} \Delta t_i = \eta P_c T_c. \quad (3)$$

Полагая на рис. 2, что $N=1$ (или же рассматривается эквивалентная энергоустановка), запишем оптимизационное уравнение Лагранжа

$$S = \sum_{i,j} q_{i,j} \Delta t_{i,j} + \sum_i \lambda_i L_i + \sum_j \lambda_j L_j + \lambda_E L_E, \quad (4)$$

где $\lambda_i, \lambda_j, \lambda_E$ – неопределенные множители Лагранжа; L, L_j, L_E – уравнения ограничений, i, j – индексы, соответствующие режиму заряда НЭ и режиму его разряда, q_i, j – удельный расход топлива энергоустановки в режимах заряда – разряда НЭ, м³/час.

Баланс мощностей на общих шинах электростанции, рис. 2, на i -ом интервале заряда НЭ описывается уравнением

$$L_i = P_i - P_{Li} - P_c = 0, \quad (5)$$

где P_i – генерируемая мощность энергоустановкой в режиме заряда НЭ;

P_{Li} – потребляемая нагрузкой мощность.

Баланс мощностей на общих шинах электростанции, рис. 2, на j -ом интервале разряда НЭ описывается уравнением

$$L_j = P_j - P_{Lj} + P_{dcj} = 0, \quad (6)$$

Баланс энергии W в цикле разряд-заряд НЭ (2) с учетом выражения (3) принимает следующий вид

$$L_E = \eta^2 P_c T_c - \sum_j P_{dcj} \Delta t_j = 0 \quad (7)$$

Таким образом, независимыми переменными являются мощность заряда P_c на всем временном интервале заряда НЭ, мощности разряда P_{dcj} на каждом интервале времени Δt_j разряда НЭ, генерируемые мощности P_i на каждом интервале времени Δt_i заряда НЭ и на P_j каждом интервале времени Δt_j разряда НЭ.

Запишем условия экстремума функции (4):

$$\frac{\partial S}{\partial P_{gi}} = \frac{\partial Q_i}{\partial P_{gi}} + \lambda_i = \frac{\partial q_i}{\partial P_{gi}} \Delta t_i + \lambda_i = 0, \quad (8)$$

$$\frac{\partial S}{\partial P_{gj}} = \frac{\partial Q_j}{\partial P_{gj}} + \lambda_j = \frac{\partial q_j}{\partial P_{gj}} \Delta t_j + \lambda_j = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial S}{\partial P_c} = -\sum_i \lambda_i + \lambda_E \eta^2 T_c = 0, \quad (10)$$

$$\frac{\partial S}{\partial P_{dcj}} = \lambda_j - \lambda_E \eta^2 \Delta t_j = 0 \quad (11)$$

Формулы (8)–(11) обеспечивают нахождение экстремума функции. Для конкретизации необходимо использовать расходную характеристику. Распространенной является аналитическая аппроксимация вида

$$q = a + bP^\beta \quad (12)$$

Если $\beta > 1$, то по уравнениям (8) – (11) находится минимальный расход топлива. Если $\beta < 1$, минимизация расхода топлива сопряжена с отключением энергоустановки в часы минимальной нагрузки и с её зарядом в часы максимальной нагрузки. Далее полагаем $\beta > 1$.

Исключая λ_j из уравнений (9) и (11), получаем

$$\frac{\partial q_j}{\partial P_{gj}} = -\lambda_E \eta^2. \quad (13)$$

Выражение (13) показывает, что на интервале времени разряда НЭ должно выполняться условие постоянства генерируемой мощности P_g :

$$P_j = P_g. \quad (14)$$

Для того, чтобы рассчитать эту мощность, свяжем её с мощностью заряда НЭ P_c , используя уравнения (6), (7) и равенство (14):

$$\eta^2 P_c T_c - \sum_j P_{dcj} \Delta t_j = \eta^2 P_c T_c - \sum_j (P_{Lj} - P_g) \Delta t_j = 0 \quad (15)$$

Отсюда получаем

$$P_g = \frac{\sum_j P_{Lj} \Delta t_j}{T_{dc}} - \eta^2 P_c \frac{T_c}{T_{dc}}. \quad (16)$$

Из уравнений (3) и (5) находим

$$-\lambda_E = \frac{1}{k_p T_c} \sum_i \frac{\partial q_i}{\partial P_i} \Delta t_i = \frac{\partial q_j}{\partial P_j} = \frac{\partial q}{\partial P_g}. \quad (17)$$

После чего, используя уравнения (5), (8) и (10), формируем систему нелинейных уравнений

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{\eta^2 T_c} \sum_i \frac{\partial q(P_i)}{\partial P_i} \Delta t_i &= \frac{\partial q(P_g)}{\partial P_g}, \\ P_i &= P_{Li} + P_c, \\ P_g &= \frac{\sum_j P_{Lj} \Delta t_j}{T_{dc}} - \eta^2 P_c \frac{T_c}{T_{dc}}. \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Если использовать аналитическую аппроксимацию расходной топливной характеристики вида (12), то систему уравнений (18) можно свести к нелинейному уравнению относительно одной переменной

$$\frac{1}{\eta^2 T_c} \sum_i (P_{Li} + P_c)^{\beta-1} \Delta t_i - \left(\frac{\sum_j P_{Lj} \Delta t_j}{T_{dc}} - \eta^2 P_c \frac{T_c}{T_{dc}} \right)^{\beta-1} = 0 \quad (19)$$

Представляется, что в численных расчетах проще использовать уравнения (18), в которых под знаками сумм изменяется количество слагаемых: например, при расширении зоны разряда НЭ нагрузка P_{Li} переходит в зону разряда и конечное значение i индекса i уменьшается на 1, а конечное значение J индекса j увеличивается на 1.

Пример расчета параметров НЭ

Покажем способ определения параметров НЭ и режима работы энергоустановки без решения нелинейного уравнения (19) на конкретном примере в разрезе суток, когда заранее назначена продолжительность разряда НЭ. Энергоустановка номинальной мощностью 0,422 МВт совместно с электрохимическим НЭ работает на нагрузку, рис. 2. Профиль мощности нагрузки по её продолжительности представлен на рис. 5.

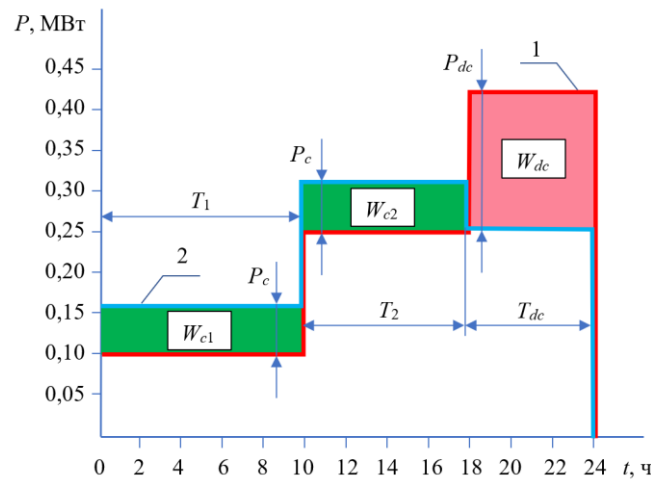


Рис. 5. Диаграмма мощностей при $\eta^2 = 0,9$

1 – профиль мощности нагрузки; 2 – профиль генерируемой мощности

Fig.5. Power diagram at $\eta^2 = 0,9$

Мощность нагрузки первой ступени равна $P_{L1} = 0,1$ МВт; второй ступени – $P_{L2} = 0,25$ МВт; третьей ступени – $P_{L3} = 0,422$ МВт; их продолжительность соответственно равна $T_1 = 10$ ч, $T_2 = 8$ ч, $T_c = T_1 + T_2 = 18$ ч, $T_3 = T_{dc} = 6$ ч. Общая продолжительность работы равна $T = 24$ ч. Для НЭ первоначально принимаем $\eta^2 = 0,75$.

Удельная расходная характеристика (12) для рассматриваемой ДЭС (размерность мощности P – мегаватты) имеет вид

$$q = a + bP^{\beta} = 22,31 + 368,57 \cdot P^{1,45}, \text{ л/ч.} \quad (20)$$

Рассчитаем мощности заряда и разряда НЭ, обеспечивающие максимальную суточную экономию топлива. Для этого составляем следующее выражение для расчета суточного расхода топлива

$$Q = a \cdot T + b \cdot \left[(P_{L1} + P_c, 45 \cdot T_1) + (P_{L2} + P_c) + P_c, 45 \cdot T_2 \right. \quad (21)$$

Подставляя в формулу (21) численные значения параметров, получаем

$$Q = 535,44 + 368,57 \cdot \left[(0,1 + P_c)^{1,45} \cdot 10 + (0,25 + P_c)^{1,45} \cdot 8 + \right. \quad (22)$$

$$\left. + (0,422 - P_{dc})^{1,45} \cdot 6 \right] \text{ л / сут}$$

Для конкретного графика нагрузки, рис. 5, из формулы (15) имеем

$$P_{dc} = \eta^2 P_c (T_1 + T_2) / T_3. \quad (23)$$

Подставляя выражение (23) в формулу (22), получаем зависимость суточного расхода топлива от величины зарядной мощности. Далее путем простого последовательного перебора значений P_c от 0 до 0,1 МВт с шагом 0,001 МВт находим минимум функции $Q(P_c)$, рис. 6.

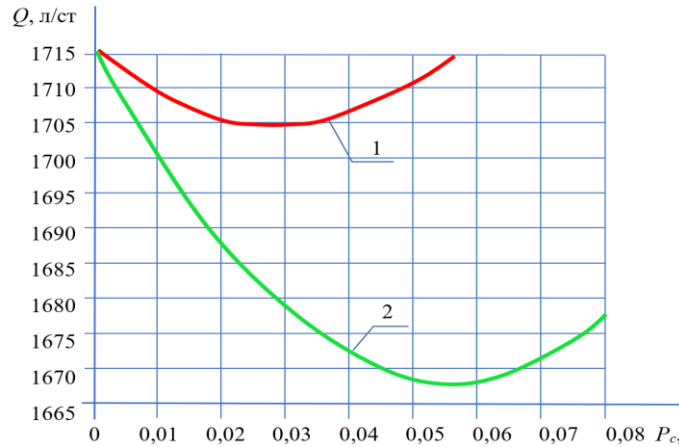


Рис. 6. Суточные расходные характеристики топлива ДЭС:

1 – характеристика при $\eta^2 = 0,75$; 2 – характеристика при $\eta^2 = 0,9$

Fig 6. Daily consumption characteristics of DES fuel:

1. – characteristics of the application $\eta^2 = 0,75$; 2– characteristics of the application $\eta^2 = 0,9$

Оба графика на рис. 6 имеют явно выраженный экстремум, который обеспечивает минимальный расход топлива при соответствующей организации процессов заряда – разряда НЭ. Оптимальному режиму работы ДГУ, график 2 на рис. 6, соответствует максимальная вырабатываемая мощность 0,305 МВт, рис. 5, на интервале времени T_2 .

Исходя из этих данных выбор параметров НЭ производится следующим образом. ООО «ЛИОТЕХ» [27] рекомендует оптимальный ток заряда для литий-ионных аккумуляторных батарей величиной 0,2С. Для рассмотренных примеров выбор накопителя осуществляется по току заряда, т.к. разряд происходит при токе, меньшем номинального:

$$I_{EC} = P_c / U_{EC} \quad (24)$$

где I_{EC} – ток аккумуляторной батареи, U_{EC} – напряжение на аккумуляторной батарее.

При $U_{EC} = 700$ В и $P_c = 56$ кВт получаем $I_{EC} = 80$ А.

Тогда номинальный ток аккумуляторной батареи в пять раз больше и составит 400 А, емкость батареи 400 А*ч. Теперь необходимо проверить её емкость на интервале T_{dc} . НЭ в режиме разряда работает 6 часов, рис. 5, и ток разряда равен $80 \cdot 2,43 \approx 200$ А, отдаваемая энергия составит 1200 А*ч. С учетом того, что аккумуляторная батарея разряжается не полностью, необходимо установить параллельно 4 батареи каждая емкостью 400 А*ч, или же путем технико-экономических расчетов проверить целесообразность установки меньшего количества батарей параллельно, но на больший номинальный ток.

В рассмотренном выше примере продолжительность разряда была фиксированной. Если расширить постановку задачи по минимизации расхода топлива на заданном временном интервале, то следует считать эту величину заранее неизвестной. На приведенном ниже примере покажем, как решается эта задача. На рис. 7 приведен суточный профиль мощности нагрузки 1, перестроенный по её продолжительности, график 2. Для упрощения расчетов каждая ступень профиля мощности нагрузки имеет одинаковую длительность – 4 часа.

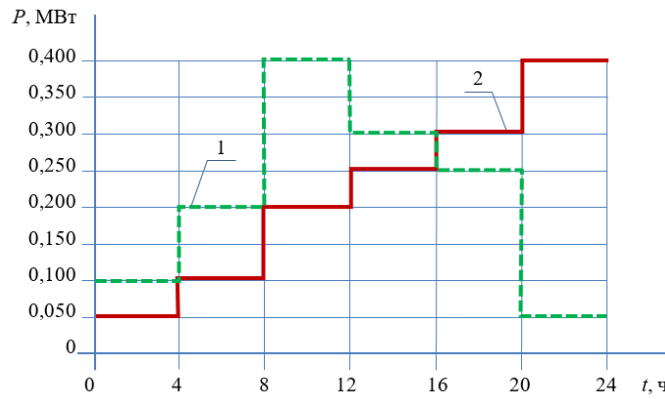


Рис. 7. Суточные профили мощности нагрузки:

1 – исходный профиль мощности нагрузки;

2 – профиль мощности нагрузки по её продолжительности

Fig 7. Daily load capacity profiles:

1– initial load power profile; 2– load power profile by its duration

Положим вначале продолжительность разряда НЭ минимальной: $T_{\max} = 4$ ч (интервал от 20 ч до 24 ч). Тогда во втором уравнении системы (18) верхнее значение индекса j равно 1

$$P_g = \frac{\sum_{j=1}^1 P_{Lj} \Delta t_j}{T_{\max}} - \eta^2 P_C \frac{T_C}{T_{\max}} = \frac{0,4 \cdot 4}{4} - 0,9 \cdot \frac{20}{4} \cdot P_C = 0,4 - 4,5 \cdot P_C \quad (28)$$

Суточный расход топлива Q_4 рассчитывается по формуле

$$Q_4 = 535,4 + 1474,28 \cdot \left[(0,05 + P_C)^{1,45} + (0,1 + P_C)^{1,45} + (0,2 + P_C)^{1,45} + (0,25 + P_C)^{1,45} + (0,3 + P_C)^{1,45} + (0,4 - 4,5 \cdot P_C)^{1,45} \right] \quad (29)$$

На рис. 8 построены расходные характеристики топлива, рассчитанные при $T_{\max} = 4$ ч, а также при $T_{\max} = 8$ ч и $T_{\max} = 12$ ч (последовательное увеличение продолжительности разряда НЭ, соответствующее интервалам часов [16; 24] и [12; 24] на графике 2, рис. 7).

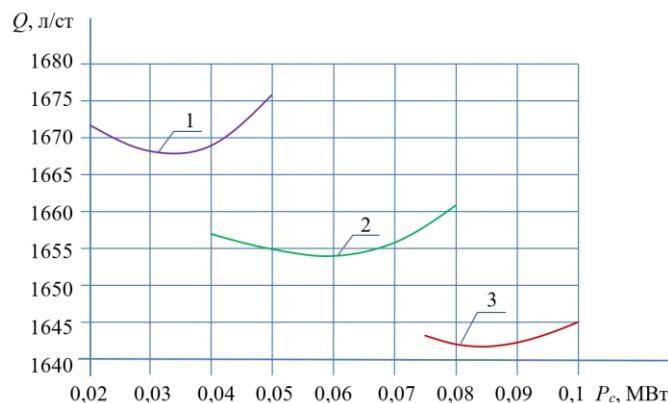


Рис. 8. Расход топлива энергоустановки при увеличении продолжительности разряда НЭ: 1 – $T_{\max} = 4$ ч; 2 – $T_{\max} = 8$ ч; 3 – $T_{\max} = 12$ ч

Fig 8. Fuel consumption of the power plant with an increase in the duration of the NE discharge: 1 – $T_{\max} = 4$ h; 2 – $T_{\max} = 8$ h; 3 – $T_{\max} = 12$ h

Очевидно, рис. 8, что минимальный расход топлива соответствует третьему варианту, когда $T_{\max} = 12$ ч. Дальнейшее увеличение $T_{\max}$ приводит опять к росту расхода топлива.

На рис. 9 приведены суточные профили мощности нагрузки и генерации для оптимального варианта.

Зарядная мощность равна 82 кВт, и поскольку ток заряда 0,2С, то номинальная мощность НЭ должна быть порядка 410 кВт, а энергоемкость – порядка 1000 кВт*ч.

Таким образом, не решая напрямую нелинейную дискретную задачу, можно путем простой алгоритмизацией численных расчетов найти оптимальный вариант величины и длительности разряда НЭ, приводящий к максимальной экономии топлива.

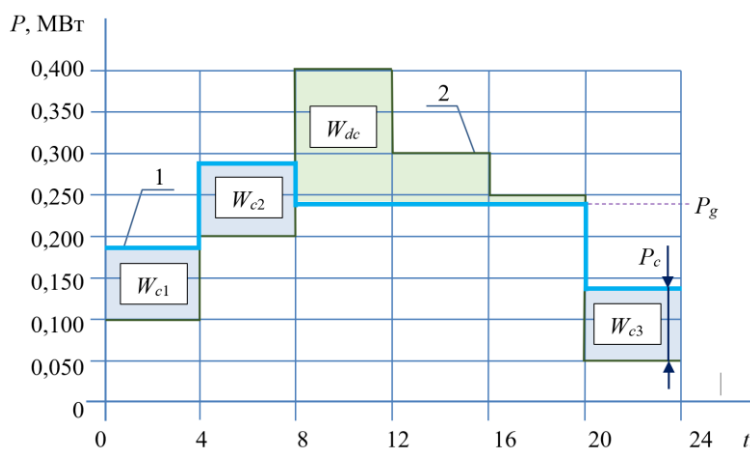


Рис. 9. Суточные профили мощности при $T_{\max} = 12$ ч
1 – профиль генерируемой мощности; 2 – профиль мощности нагрузки
Fig.9 Daily Power capacity profiles by $T_{\max} = 12$ h
1-generated power profile; 2 – load power profile

Заклучение

В общем виде рассмотренная выше методика выглядит следующим образом. Записываются выражения баланса мощности в режимах заряда и разряда НЭ на основе получасового суточного профиля нагрузки. Далее они используются при вычислении суточного расхода топлива по известной расходной характеристике энергоустановки. На первом шаге задается минимально приемлемая длительность разряда НЭ в соответствии с имеющимся профилем мощности нагрузки. Далее путем вариации мощности заряда НЭ находится точка минимального расхода топлива на заданном интервале времени. Следующий шаг заключается в увеличении продолжительности разряда в соответствии профилем мощности, ранжированной по её продолжительности, и т.д. Такой простой метод перебора вариантов легко программируется и основан на простых вычислениях. В первую очередь удобство его применения обуславливается дискретным видом исходной информации – получасовыми профилями мощности нагрузки. Вариации суточных профилей мощности должны быть учтены либо настройкой НЭ на некоторый усредненный график (жесткая фиксация продолжительности разряда), либо использованием различных сценариев управления (рабочие/выходные дни), либо применением адаптивной самообучающейся системы регулирования накопителем энергии.

В условиях северного завоза жидкого топлива на удаленные от централизованного электроснабжения территории, когда его стоимость многократно возрастает, актуальны энергосберегающие технологии. Использование нефтяного попутного газа обуславливает существенные затраты на системы его предварительной очистки перед сжиганием в газотурбинных или газопоршневых двигателях. И в этих случаях уменьшение его расхода позволяет в целом снизить стоимость произведенного киловатт-часа электроэнергии. Поскольку для газопоршневых энергоустановок в автономных системах электроснабжения применения НЭ технически необходимо для компенсации влияния набросов/сбросов нагрузки на качество электроэнергии, увеличение их энергоемкости в целях экономии топлива экономически вполне оправдано.

Литература

1. Зырянов В.М., Кирьянова Н.Г., Коротков И.Ю и др. Системы накопления энергии: российский и зарубежный опыт // Энергетическая политика. 2020. № 6. С. 76-87.

2. Российский национальный комитет СИГРЭ. Мониторинг событий, оказывающих существенное влияние на функционирование и развитие мировых энергосистем (еженедельный обзор) [Электронный ресурс] Доступно по: www.cigre.ru/ (Ссылка активна на: январь 2020- январь 2021 гг).

3. Мельников В.Д., Зырянов В.М., Нестеренко Г.Б. Системы накопления электрической энергии для повышения технических и экономических характеристик газопоршневых электростанций // Энергоэксперт. 2020. №3. С. 40-43.

4. Распределенная энергетика в России: потенциал развития [Электронный ресурс] / Энергетический центр Московской школы управления СКОЛКОВО. 2018. Доступно по: URL: https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO_EneC_DE R-3.0_2018.02.01.pdf. Ссылка активна на: сентябрь 2020.

5. Андронов М. Распределенная генерация: будущее энергетики или тупик [Электронный ресурс] / М. Андронов // Деловой журнал Инвест–Форсайт. 2018. Доступно по URL: <https://www.if24.ru/budushhee-energetiki>. Ссылка активна на: декабрь 2018.

6. Накопители в электроэнергетике [Электронный ресурс] // Энергетический бюллетень / Аналитический центр при Правительстве российской Федерации. – Выпуск № 60, 2018. Доступно по URL: <http://ac.gov.ru/files/publication/a/16882.pdf>. Ссылка активна на сентябрь 2019.

7. Газовая электростанция в комбинации с накопителем энергии. [Электронный ресурс]. 2017. Доступно по URL: <http://renen.ru/gas-power-plant-in-combination-with-an-energy-storage-unit/> Ссылка активна на: декабрь 2019.

8. Гладков Д.С., Зырянов В.М. Снижение установленной мощности дизельных генераторов с помощью накопителей энергии / Наука. Технологии. Инновации: сб. науч. тр. в 9 ч. / под ред. Гадюкиной А.В. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. Ч. 4. С. 16-20.

9. Bakhteev K., Fedotov A, Misbakhov R. The improving efficiency of electric receivers on the industrial enterprises in case of short-term power outages // Proceedings of the 2019 20th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). Ostrava. Czech Republic. 2019, pp. 347-352.

10. Bakhteev K., Fedotov A., Misbakhov R., et al. Influence of voltage dips on the stability of excitation of synchronous machines // Proceedings of the 2019 20th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). Ostrava. Czech Republic. 2019, pp. 330-335.

11. Bakhteev K., Fedotov A., Misbakhov R. The Improving quality of power supply to industrial consumers using high-power energy storage // 59th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON). Riga. 2018, pp. 1-5.

12. Попутный нефтяной газ: переработка и использование или утилизация [Электронный ресурс] // Пронедра.Ру. 2020. Доступно по URL: <https://pronedra.ru/gas/2017/03/03/pererabotka-poputnogo-neftyanogo-gaza/> Ссылка активна на сентябрь 2020.

13. Бачурин П.А., Гладков Д.С., Зырянов В.М. и др. Испытания промышленного образца системы накопления энергии СНЭ-10-1200-400 при совместной работе с ГПУ в составе экспериментальной энергосистемы / Электроэнергия. Передача и распределение. 2020. № 2, март-апрель. С. 18-24.

14. Бахтеев К.Р. Создание гибридного накопителя электроэнергии большой мощности для предотвращения кратковременных нарушений электроснабжения промышленных потребителей // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. № 3-4. С. 36-44.

15. Аккумуляторные батареи большой мощности (АББМ) [Электронный ресурс]. 2019. Доступно по URL: <http://wiki2.gridology.ru> Ссылка активна на июль 2019.

16. Фрэн Хоффард. Правильная эксплуатация может продлить жизнь литий-ионного аккумулятора. Доступно по http://powerelectronics.com/portable_power_management/battery_charger_ics/804PET22_li-ion-battery-life.pdf.

17. Аккумуляторные батареи большой мощности (АББМ). Системы накопления энергии (СНЭ) [Электронный ресурс]. 2020. Доступно по URL: <http://perepad.net/abbm-for-energo>. Ссылка активна на июнь 2020.

18. Кузнецова Н.Д., Митрофанов С.В. Анализ эффективности применения различных типов аккумуляторных батарей в автономных системах электроснабжения / Вестник ПНИПУ: Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2018. № 25. С. 48-56.

19. Рынок литий-ионных накопителей энергии будет расти на 55% в год до 2022 г [Электронный ресурс]. 2018. Доступно по URL: <https://gisprofi.com/gd/documents/rynok-litij-ionnyh-nakopitelej-energii-budet-rasti-na-55-v-god-do-2022-g.html>. Ссылка активна на сентябрь 2020.

20. The Battery Revolution is About to Begin [Электронный ресурс]. 2018. Доступно по URL: <https://gisprofi.com/gd/documents/krupnyj-nakopitel-energii-na-osnove-svintsovo-uglerodnyh-akkumulyatorov.html> Ссылка активна на сентябрь 2020.

21. A Behind the Scenes Take on Lithium-ion Battery Prices [Электронный ресурс]. – 2019. Доступно по URL: <https://about.bnef.com/blog/behind-scenes-take-lithium-ion-battery-prices> Ссылка активна сентябрь 2020.

22. ООО «Системы накопления энергии». Официальный сайт компании: <https://estorsys.ru>.

23. IEC Energy. Официальный сайт компании: <https://iec-energy.ru>.

24. Fedotov A., Vagapov G., Abdullazyanov R., et al. Rated power determination for autonomous micro combined heat and power and rechargeable battery system // Latvian journal of physics and technical sciences. 2020. № 6. Riga. P. 12-22.

25. Fedotov A., Misbakhov R., Bakhteev K and Rustem Abdullazyanov. Economic Assessment Of The Efficiency Of The Application Of Energy Storage System To Compensate The Load Rise And Shedding Of Gas Piston Installation / 2020 IEEE 61st International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON). RTUCON 2020 5–6 Nov., Riga, Latvia & Tallinn, Estonia. 7 p.

26. Bakhteev K., Fedotov A., Chernova N. Methodological Approaches to the Choice of Energy Storage and Optimization of Their Parameters to Improve the Electric Power Quality in Various Types of Electric Power Systems // Proceedings of the 10th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering ELEKTROENERGETIKA 2019. Stará Lesná. Slovak Republic. 2019. P. 488-493.

27. ООО «Лиотех». Официальный сайт компании: <https://www.liotech.ru>.

Авторы публикации

Федотов Александр Иванович – докт. техн. наук, проф., профессор кафедры электрических станций им. В.К. Шибанова, Казанский государственный энергетический университет.

Федотов Евгений Александрович – канд. техн. наук, доц., доцент кафедры электрических станций им. В.К. Шибанова, Казанский государственный энергетический университет.

Абдуллазянов Айнура Фоатович – аспирант, Казанский государственный энергетический университет» (КГЭУ).

References

1. Zyryanov VM, Kiryanova NG, Korotkov IYu., et al. Energy storage systems: Russian and foreign experience. *Energy Policy*. 2020;6:76-87.

2. Russian National Committee CIGRE. *Monitoring of events that have a significant impact on the functioning and development of world energy systems (weekly review)* [Electronic resource]: Available at: www.cigre.ru/ Accessed to: January 2020 - January 2021.

3. Melnikov VD, Zyryanov VM, Nesterenko GB. Electric energy storage systems to improve the technical and economic characteristics of gas piston power plants. *Energexpert*. 2020;3:40-43.

4. *Distributed energy in Russia: development potential* [Electronic resource] / Energy Center of the Moscow School of Management SKOLKOVO 2018. Available at: URL: https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO_EneC_DER-3.0_2018.02.01.pdf. Accessed to: September 2020.

5. Andronov M. Distributed generation: the future of power engineering or a dead end [Electronic resource]. *Business journal Invest-Foresight*. 2018. Available at: URL: <https://www.if24.ru/budushhee-energetiki>. Accessed to: December 2018.

6. Storage units in the power industry «Electronic resource». *Energy Bulletin. Analytical Center under the Government of the Russian Federation*. Issue No. 60, 2018. Available at: URL: <http://ac.gov.ru/files/publication/a/16882.pdf>. Accessed to: September 2019.

7. *Gas power plant in combination with energy storage*. [Electronic resource]. 2017. Available at: URL: <http://renen.ru/gas-power-plant-in-combination-with-an-energy-storage-unit/>. Accessed to: December 2019.

8. Gladkov DS, Zyryanov VM. Reducing the installed capacity of diesel generators using energy storage. *Science. Technologies. Innovations: Sat. scientific. tr.* at 9 o'clock. Novosibirsk: Publishing house of NSTU. 2018;4:16-20.

9. Bakhteev K, Fedotov A, Misbakhov R. *The improving efficiency of electric receivers on the industrial enterprises in case of short-term power outages*. Proceedings of the 2019 20th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). Ostrava. Czech Republic. 2019, pp. 347-352.

10. Bakhteev K, Fedotov A, Misbakhov R. *Influence of voltage dips on the stability of excitation of synchronous machines*. Proceedings of the 2019 20th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). Ostrava. Czech Republic. 2019. pp. 330-335.

11. Bakhteev K, Fedotov A, Misbakhov R. *The Improving quality of power supply to industrial consumers using high-power energy storage*. 59th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON). Riga. 2018, pp. 1-5. doi: 10.1109/RTUCON.2018.8659834.

12. Associated petroleum gas: processing and use or utilization «Electronic resource» Pronedra.Ru. 2020. Available at: URL: <https://pronedra.ru/gas/2017/03/03/pererabotka-poputnogo-neftyanogo-gaza/>. Accessed to: September 2020.

13. Bachurin PA, Gladkov DS, Zyryanov VM, et al. Tests of an industrial design of the SNE-10-1200-400 energy storage system in conjunction with the GPU as part of an experimental power system. *Electricity. Transmission and distribution*. 2020;2:18-24.

14. Bakhteev KR. Creation of a hybrid high-power electric energy storage device to prevent short-term power supply disruptions to industrial consumers. *Izvestiya vysshikh educational institutions. Energy problems*. 2018;3-4:36-44.

15. *Rechargeable batteries of high power (ABBM)* «Electronic resource». 2019. Available at: URL: <http://wiki2.gridology.ru>. Accessed to: July 2019.

16. Fran Hoffard. *Correct use can prolong the life of the lithium-ion battery*. http://powerelectronics.com/portable_power_management/battery_charger_ics/804PET22_li-ion-battery-life.pdf

17. Large capacity storage batteries (ABBM). *Energy storage systems (SNE)* «Electronic resource». 2020. Available at: URL: <http://perepada.net/abbm-for-energo>. Accessed to: June 2020.

18. Kuznetsova ND, Mitrofanov SV. Analysis of the effectiveness of using different types of storage batteries in autonomous power supply systems. *Bulletin PNRPU: Electrical engineering, information technology, control systems*. 2018;25:48-56.

19. *The market for lithium-ion energy storage will grow by 55% per year until 2022* [Electronic resource]. 2018. Available at: URL: <https://gisprofi.com/gd/documents/rynok-litij-ionnyh-nakopitelej-energii-budet-rasti-na-55-v-god-do-2022-g.html>. Accessed to: September 2020.

20. *The Battery Revolution is About to Begin*. 2018. Available at: URL: <https://gisprofi.com/gd/documents/krupnyj-nakopitel-energii-na-osnove-svintsovo-uglerodnyh-akkumulyatorov.html>. Accessed to: September 2020.

21. *A Behind the Scenes Take on Lithium-ion Battery Prices* [Электронный ресурс]. – 2019. Available at: URL: <https://about.bnef.com/blog/behind-scenes-take-lithium-ion-battery-prices>. Accessed to: September 2020.

22. *Energy Storage Systems LLC*. Official site of the company: <https://estorsys.ru>.

23. *IEC Energy*. Official site of the company: <https://iec-energy.ru>.

24. Fedotov A, Vagapov G, Grackova L and Abdullazyanov R. Rated power determination for autonomous micro combined heat and power and rechargeable battery system. *Latvian journal of physics and technical sciences*. 2020;6:12-22.

25. Fedotov A, Misbakhov R, Bakhteev K and Abdullazyanov R. Economic Assessment Of The Efficiency Of The Application Of Energy Storage System To Compensate The Load Rise And Shedding Of Gas Piston Installation / 2020 IEEE 61st International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON). RTUCON 2020 5-6 Nov., Riga, Latvia & Tallinn, Estonia. 7 p.

26. Bakhteev K, Fedotov A, Chernova N. Methodological Approaches to the Choice of Energy Storage and Optimization of Their Parameters to Improve the Electric Power Quality in Various Types of Electric Power Systems. *Proceedings of the 10th International Scientific*

Authors of the publication

Alexander I. Fedotov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Evgeny A. Fedotov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Ainur F. Abdullazyanov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Получено

26 февраля 2021г.

Отредактировано

03 марта 2021г.

Принято

04 марта 2021г.