

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ГРАФИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК НА ЭНЕРГОЕМКОСТЬ СИСТЕМЫ НАКОПЛЕНИЯ В ГИБРИДНОМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ

© 2023 А. Б. Лоскутов^а, И. А. Липужин^б, А. В. Шалухо^с

Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева, ул. Минина, 24, г. Нижний Новгород 603155, Россия

E-mails: ^аloskutov@nntu.ru, ^бlipuzhin@nntu.ru, ^сshaluho@nntu.ru

В современных условиях ключевое направление обеспечения энергетической безопасности критически важных инфраструктурных объектов связано с применением локальных источников генерации, объединяемых с системами накопления электроэнергии на основе аккумуляторных батарей в гибридные энергетические комплексы. Актуальной проблемой при проектировании таких комплексов является определение их оптимальных параметров, в том числе номинальной энергоемкости системы накопления. Для решения конкретных задач могут применяться методики из руководящих документов или научные методы, основанные на динамическом программировании, генетических алгоритмах и другие. Единый подход к расчету энергоемкости систем накопления отсутствует. В статье рассматривается гибридный энергетический комплекс на базе топливного элемента. Цель работы и ее научный вклад заключается в исследовании влияния вида и характеристик графиков электрических нагрузок потребителя на номинальную энергоемкость системы накопления для энергетического комплекса с топливным элементом, работающим в режиме выдачи постоянной мощности. Разработан алгоритм, позволяющий определить энергоемкость аккумуляторных батарей на основе графиков электрических нагрузок потребителя, задаваемых с определенной дискретизацией. Критериями выбора номинальной энергоемкости аккумуляторных батарей являются: максимум разрядного тока, покрытие пика и суммы пиков нагрузки, уровень заряда. Алгоритм реализован в программе MS Excel, а сбор и анализ полученных результатов автоматизирован с помощью Python. Для гибридного энергетического комплекса с топливным элементом получены зависимости энергоемкости литий-железо-фосфатных аккумуляторных батарей от показателей графика электрических нагрузок.

Ключевые слова: моделирование, алгоритм, система накопления электроэнергии, аккумуляторная батарея, топливный элемент, гибридный энергетический комплекс, график электрических нагрузок, энергоемкость.

Работа выполнена в рамках государственного задания на оказание государственных услуг (тема №FSWE-2022-0006).

1. ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях одна из составляющих обеспечения энергетической безопасности страны заключается в надежном и эффективном электроснабжении критически важных инфраструктурных потребителей (предприятий добывающей отрасли, пищевой промышленности, отдельных особо ответственных установок и т.д.) [1]. С учетом того, что наиболее уязвимыми компонентами систем электроснабжения являются электрические сети и распределительные устройства, решение данной задачи основано на

применении локальных источников электроэнергии, обеспечивающих работу потребителя даже при полном отключении внешней электрической сети.

В зависимости от предъявляемых потребителями требований (высокая эффективность, компактность, экологичность) в качестве локальных источников могут применяться газовые мини-электростанции, возобновляемые источники энергии (ВИЭ), топливные элементы (ТЭ) и др. Вместе с тем, большинство источников используются совместно с системой накопления электроэнергии (СНЭЭ) на основе аккумуляторных батарей (АБ). Применение АБ позволяет: обеспечить бесперебойное питание потребителя при стохастическом характере генерации ВИЭ; уменьшить установленную мощность источника (например, ТЭ); увеличить ресурс работы источника [2].

Локальные источники электроэнергии, объединенные с СНЭЭ электрическими связями и системой управления, представляют собой гибридные энергетические комплексы (ГЭК). Определение оптимальных параметров ГЭК, в том числе СНЭЭ в его составе, является важнейшей задачей на стадии проектирования.

Для комплектации СНЭЭ в начале определяется тип АБ. В настоящее время развиваются технологии изготовления различных типов АБ: свинцово-кислотных, литий-ионных, никель-кадмиевых, натрий-ионных и др [3]. Наибольшее распространение получили литиевые аккумуляторы, которые характеризуются высокой плотностью энергии и низким показателем саморазряда [3]. При выборе типа АБ следует учитывать их достоинства и недостатки применительно к условиям работы конкретного ГЭК.

После выбора типа АБ следующим этапом является определение номинальной энергоемкости СНЭЭ. Единая методика решения данной задачи отсутствует. При рассмотрении конкретных ГЭК требуется адаптация уже имеющихся методик и алгоритмов или разработка новых.

2. ОБЗОР МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГОЕМКОСТИ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Проектирование СНЭЭ регламентируется рядом стандартов [4], [5], в которых отмечены основные требования и рекомендации к системам, в том числе к их энергоемкости. Однако для более точного определения энергоемкости СНЭЭ требуется учитывать особенности конкретных ГЭК и их потребителей.

Среди исследований зарубежных и отечественных научных коллективов наиболее распространенной задачей является выбор энергоемкости СНЭЭ для использования в ГЭК совместно с ВИЭ, которые характеризуются стохастическим характером генерации электроэнергии (например, солнечные электростанции, ветроэнергетические установки).

Для решения данной задачи часто применяются различные вариации метода роя частиц. Так в [6], [7] на основе данного метода решены задачи выбора параметров СНЭЭ, которая используется в микросети совместно с несколькими типами ВИЭ. Исследование [8] посвящено использованию метода роя частиц для выбора оптимального состава оборудования и параметров ГЭК в районе города Владивостока. Другой распространенный подход основан на использовании генетических алгоритмов. В [9] с помощью генетических алгоритмов выбраны параметры СНЭЭ для совместной работы с ветроэнергетическими установками и солнечными электростанциями.

Также для выбора энергоемкости СНЭЭ применяются методы численного моделирования [10] и динамического программирования [11], [12]. Отдельно можно выделить подход, основанный на создании и исследовании цифровых двойников ГЭК [13]. Достоинства подхода заключаются в возможности учета многих факторов и воздействий, но при этом требуется построение сложных моделей.

При этом в качестве критериев оптимизации, как правило, рассматриваются экономические показатели применения СНЭЭ: срок окупаемости проекта, себестоимость

электрической энергии, капитальные затраты на ГЭК, общие затраты на энергетическую систему.

Другую группу работ составляют исследования, в которых при определении энергоёмкости СНЭЭ приоритет отдается графикам электрических нагрузок (ГЭН). Так в [14] представлена методика выбора параметров СНЭЭ, основанная на анализе амплитудно-частотных характеристик ГЭН. Метод определения параметров накопителя электроэнергии на основе Фурье-анализа ГЭН приведен в [15].

Отсутствие единого подхода к определению энергоёмкости СНЭЭ свидетельствует об актуальности данной задачи.

Статья развивает тематику учета параметров ГЭН при выборе энергоёмкости СНЭЭ. В работе исследуется ГЭК, в котором источником электроэнергии является водородный топливный элемент с протонообменной мембраной. Для выбора энергоёмкости СНЭЭ предложен алгоритм, учитывающий тип АБ, установленную мощность ТЭ и характер потребления электроэнергии по ГЭН потребителя. Отличительная особенность алгоритма заключается в возможности использования для расчета двух способов задания ГЭН потребителя: фактического, если ГЭН заранее известен, или случайного, если ГЭН не задан. Это позволяет выполнить исследование зависимости требуемой энергоёмкости СНЭЭ от показателей ГЭН путем итерационного моделирования случайных реализаций ГЭН.

3. ГИБРИДНЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС

Структурная схема исследуемого ГЭК представлена на рис. 1. СНЭЭ выполнена на основе литий-железо-фосфатных аккумуляторных батарей.

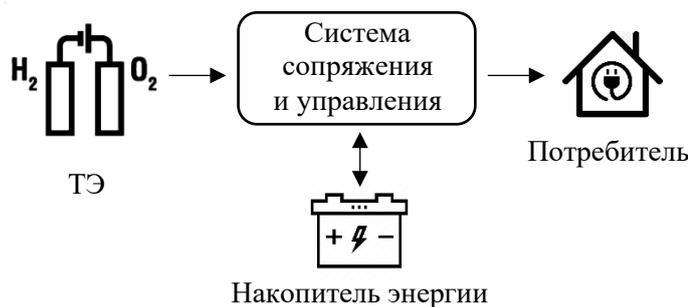


Рисунок 1 – Структурная схема исследуемого ГЭК

По своим характеристикам топливные элементы отличаются как от традиционных мини-электростанций, так и от ВИЭ. В отличие от ВИЭ процесс производства электроэнергии ТЭ является управляемым. Но для достижения наибольшей энергетической эффективности целесообразным является работа ТЭ в режиме с постоянной мощностью. По сравнению с традиционными мини-электростанциями ТЭ характеризуются гораздо более высокими капитальными затратами. С учетом этого установленную мощность ТЭ целесообразно выбирать не по пиковой мощности, а близкой к средней мощности нагрузки потребителя. Возникающий небаланс между генерируемой и потребляемой электрической мощностью в течение суток должен уравниваться СНЭЭ. При этом СНЭЭ должна обеспечивать возможность применения ГЭК для питания потребителей с различным характером суточных ГЭН.

Совместная работа ТЭ и СНЭЭ описана на примере суточного ГЭН, приведенного на рис. 2.

На суточном графике нагрузки можно выделить 3 зоны: базисная, полупиковая и пиковая.

В базисной зоне (от 0 до $P_{н.мин}$) ТЭ питает нагрузку и заряжает АБ. Если заряд АБ полный, то ТЭ отключается и АБ питает нагрузку. В полупиковой зоне (от $P_{н.мин}$ до $P_{н.ср}$)

ТЭ питает нагрузку. Излишки генерации поступают на заряд АБ. Если мощности ТЭ для питания нагрузки недостаточно, то дополнительная мощность поступает от АБ. В пиковой зоне (от $P_{н.ср}$ до $P_{н.маx}$) питание нагрузки осуществляется совместно от ТЭ и АБ.

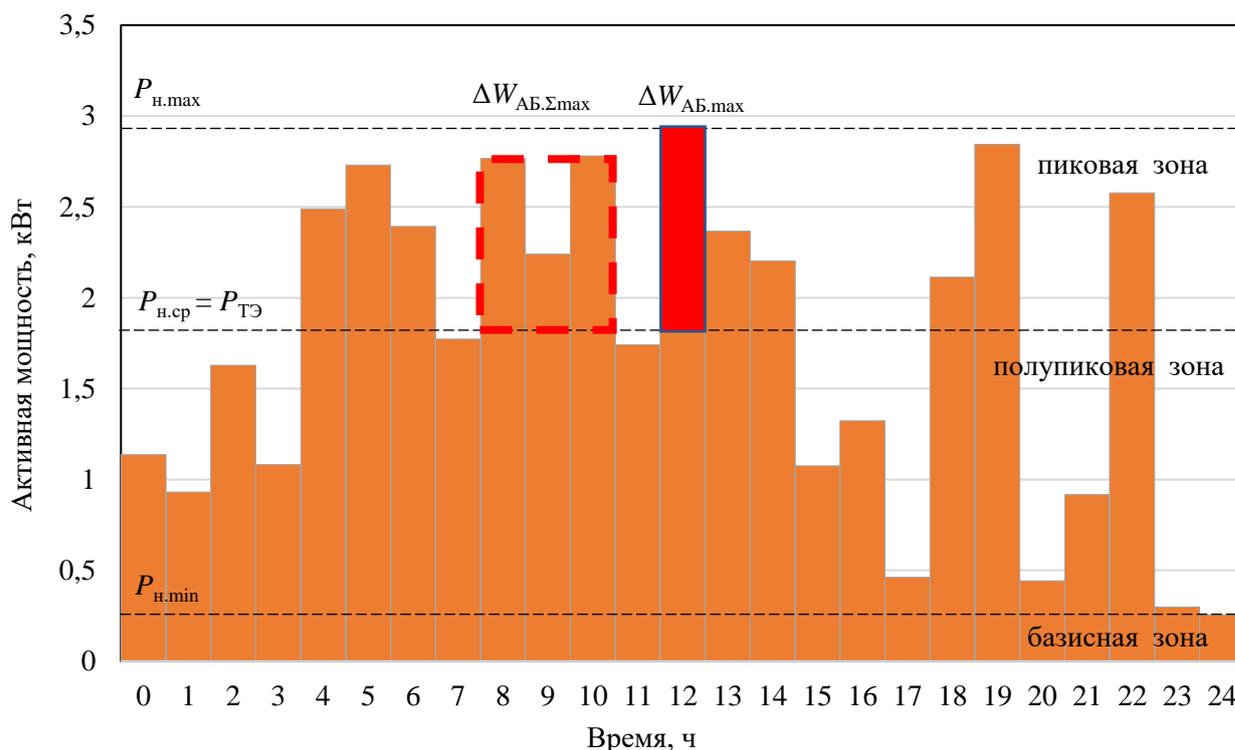


Рисунок 2 – Пример суточного ГЭН (период дискретизации 1 час).

Энергоемкость АБ должна выбираться таким образом, чтобы запасенных излишков генерации ТЭ было достаточно для покрытия пиков нагрузки.

4. АЛГОРИТМ ВЫБОРА ЭНЕРГОЕМКОСТИ СНЭЭ В СОСТАВЕ ГЭК

Для выбора энергоемкости СНЭЭ в составе исследуемого ГЭК разработан алгоритм, представленный на рис. 3. Алгоритм позволяет определить требуемую для бесперебойного электроснабжения потребителей энергоемкость СНЭЭ с учетом типа АБ, установленной мощности ТЭ, характера потребления электроэнергии.

Исходные данные:

1) ГЭН потребителя в течении суток ($P_{н.т}$, кВт), максимальная и минимальная мощности нагрузки ($P_{н.маx}$ и $P_{н.мин}$, кВт);

2) установленная мощность топливного элемента ($P_{ТЭ}$, кВт);

3) параметры АБ:

– единичная емкость элемента АБ ($C_{эл}$, Ач) и его сопротивление ($R_{эл}$, мОм);

– номинальное, минимальное и максимальное напряжение элемента АБ ($U_{эл.ном}$, $U_{эл.мин}$ и $U_{эл.маx}$, В);

– номинальное напряжение аккумуляторной сборки ($U_{АБ.ном}$, В);

– уровень заряда в начальный момент моделирования ($SOC_{нач}$, %);

– допустимая кратность тока разряда элемента (I/C , о.е.).

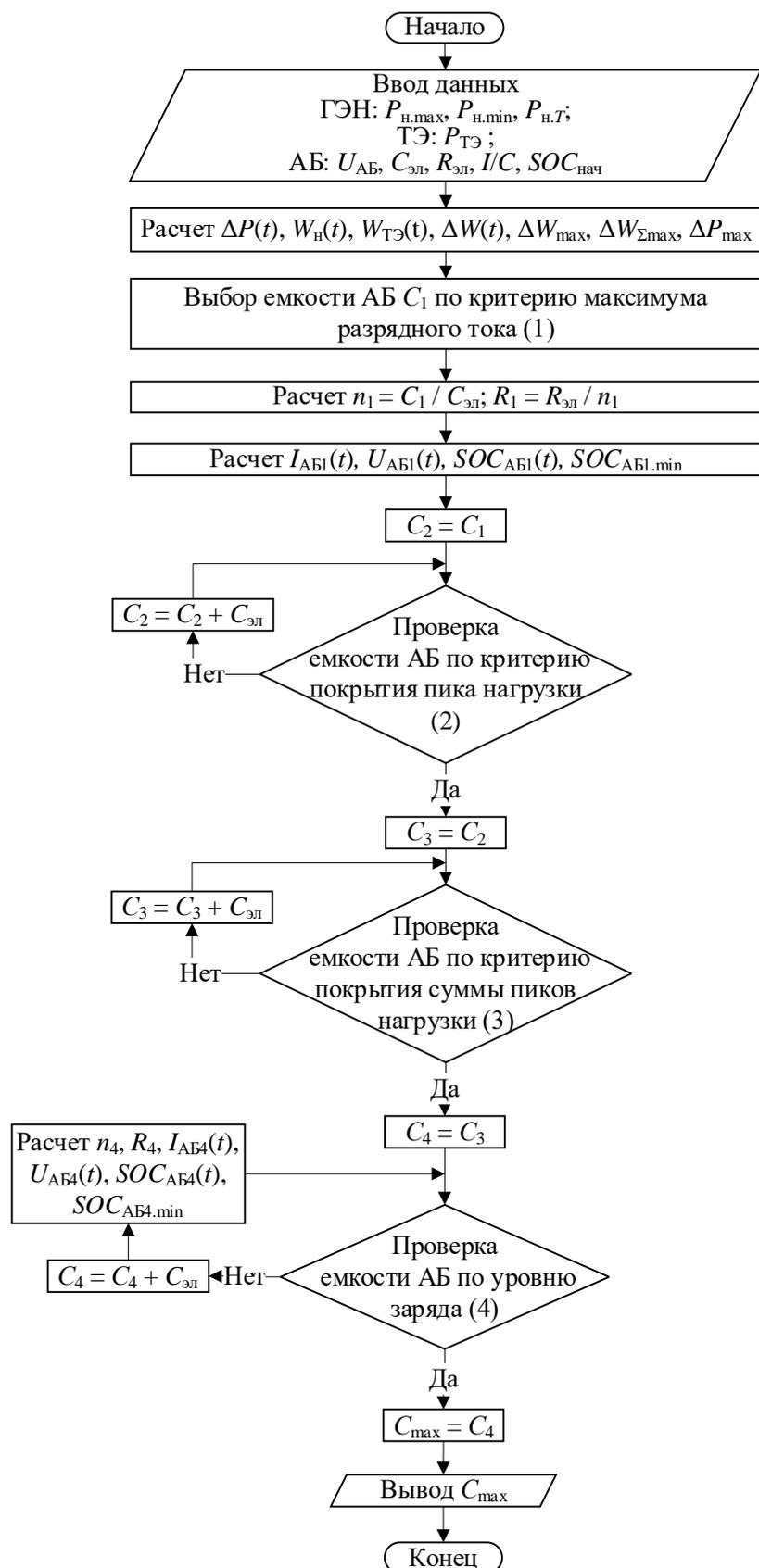


Рисунок 3 – Алгоритм выбора энергоемкости СНЭЭ ГЭК

Данные параметры АБ, позволяют рассчитать полную емкость и напряжение СНЭЭ:

$$C_{\text{АБ}} = C_{\text{эл}} \cdot n;$$

$$U_{\text{АБ.ном}} = U_{\text{эл.ном}} \cdot k.$$

где k – количество последовательно соединенных элементов АБ; n – количество параллельно соединенных элементов АБ.

Выбор энергоемкости СНЭЭ по разработанному алгоритму основан на четырех критериях.

Критерий 1 – максимум разрядного тока. Ток, потребляемый от АБ, должен быть меньше либо равен максимально допустимому току разряда. Это условие будет выполняться, если:

$$C_1 \geq \frac{\Delta P_{\max}}{U_{\text{АБ.ном}} \cdot I / C} = \frac{P_{\text{н.мах}} - P_{\text{ТЭ}}}{kU_{\text{эл.ном}} \cdot I / C}. \quad (1)$$

Критерий 2 – покрытие пика нагрузки. Энергии, запасенной в АБ, должно быть достаточно для покрытия наибольшего пика на ГЭН:

$$C_2 \geq \frac{\Delta W_{\text{АБ.мах}}}{U_{\text{АБ.ном}}} = \frac{\max(P_{\text{н.мах}} - P_{\text{ТЭ}}) \cdot t}{kU_{\text{эл.ном}}}, \quad (2)$$

где $t = 1$ – период дискретизации ГЭН (ч).

Критерий 3 – покрытие суммы пиков нагрузки. Энергии, запасенной в АБ, должно быть достаточно для покрытия нескольких последовательных пиков на ГЭН:

$$C_3 \geq \frac{\Delta W_{\text{АБ.}\Sigma\text{мах}}}{U_{\text{АБ.ном}}} = \frac{\max \sum (P_{\text{н.мах}} - P_{\text{ТЭ}}) \cdot t}{kU_{\text{эл.ном}}}. \quad (3)$$

Критерий 4 – уровень заряда. Уровень заряда АБ в течение суток не должен опускаться ниже минимально допустимого уровня (в работе принят 0%). На каждом периоде дискретизации ГЭН рассчитывается ток и фактическое напряжение аккумуляторной ячейки, по значению которого определяется уровень заряда (SOC):

$$SOC_{\text{АБ.мин}} \geq 0. \quad (4)$$

Если ранее выбранные емкости АБ ($C_1 - C_3$) не удовлетворяют критерию 4, то необходимо увеличить емкость СНЭЭ до значения C_4 .

Суть выбора энергоемкости по приведенному алгоритму заключается в следующем. По каждому критерию определяется минимально необходимая емкость СНЭЭ. Принято, что критерий ограничения разрядного тока является базовым. Рассчитанное значение емкости C_1 проверяется на соответствие остальным критериям. Если емкости $C_2 - C_4$ больше, чем C_1 , то выбирается наибольшее значение. Результатом расчета является наибольшее значение из $C_1 - C_4$.

Для реализации алгоритма в Excel разработана программа, позволяющая рассчитать требуемую емкость СНЭЭ для ГЭК с ТЭ. Программа основана на моделировании суточного ГЭН и прогнозе циклов заряда-разряда АБ.

Программа предусматривает два способа задания ГЭН:

Способ 1 – ГЭН известен. В этом случае расчет требуемой энергоемкости выполняется один раз и полученное в результате значение считается минимально необходимым для обеспечения бесперебойного электроснабжения потребителя.

Способ 2 – ГЭН моделируется на основе известных значений минимальной и максимальной активной мощности потребителя $P_{\text{н.мин}}$ и $P_{\text{н.мах}}$ (кВт). В этом случае, расчет требуемой энергоемкости СНЭЭ выполняется путем итерационного моделирования случайных реализаций ГЭН. Для каждой итерации ГЭН определяется минимально необходимая энергоемкость СНЭЭ. Количество итераций существенно влияет на полученный результат, и задается в начале расчета. Эмпирически установлено необходимое количество итераций – 1000. Увеличение количества итераций не влечет к дальнейшему изменению итогового результата. Результатом расчета является максимальное значение энергоемкости СНЭЭ, полученное среди всех выполненных итераций.

Если мощность ТЭ не задана, программа позволяет рассчитать его рекомендуемую мощность с учетом ГЭН:

$$P_{\text{ТЭ}} = P_{\text{н.ср}},$$

где $P_{н.ср} = \frac{\sum_{t=0}^{23} P_{н.t}}{24}$ – средняя активная мощность нагрузки в течении суток (кВт); $P_{н.t}$ – мощность нагрузки в момент времени t .

В программе использованы следующие допущения:

- 1) ГЭН задается дискретно с заданным периодом дискретизации t (по умолчанию выбирается одно из четырех заданных значений: 1, 5, 10 или 60 мин);
- 2) нагрузка представляется активной мощностью (P_n) и ее значение в момент времени t ($P_{н.t}$) постоянно внутри заданного периода дискретизации (рис. 2);
- 3) максимальная выработка мощности ТЭ в течении суток постоянна и равна его установленной мощности (при этом, если $P_{н.t} < P_{ТЭ}$, а уровень заряда АБ равен 100%, то генерация ТЭ ограничивается до $P_{н.t}$);
- 4) уровень заряда АБ определяется по напряжению на их зажимах на основе линейной зависимости: полностью заряженное состояние (100 %) соответствует напряжению $U_{АБ.маx}$, а полностью разряженное состояние (0 %) – $U_{АБ.мин}$. В начале расчета АБ по умолчанию заряжены до 100 %.
- 5) рассчитанные значения энергоемкости округляются в большую сторону с заданным уровнем точности.

Результаты работы программы представляют собой набор графических зависимостей, которые наглядно отображают ход работы алгоритма, а пользователь получает значения требуемой энергоемкости СНЭЭ. На рис. 4, 5 приведены результаты визуализации работы программы для ГЭН, представленного на рис. 2.

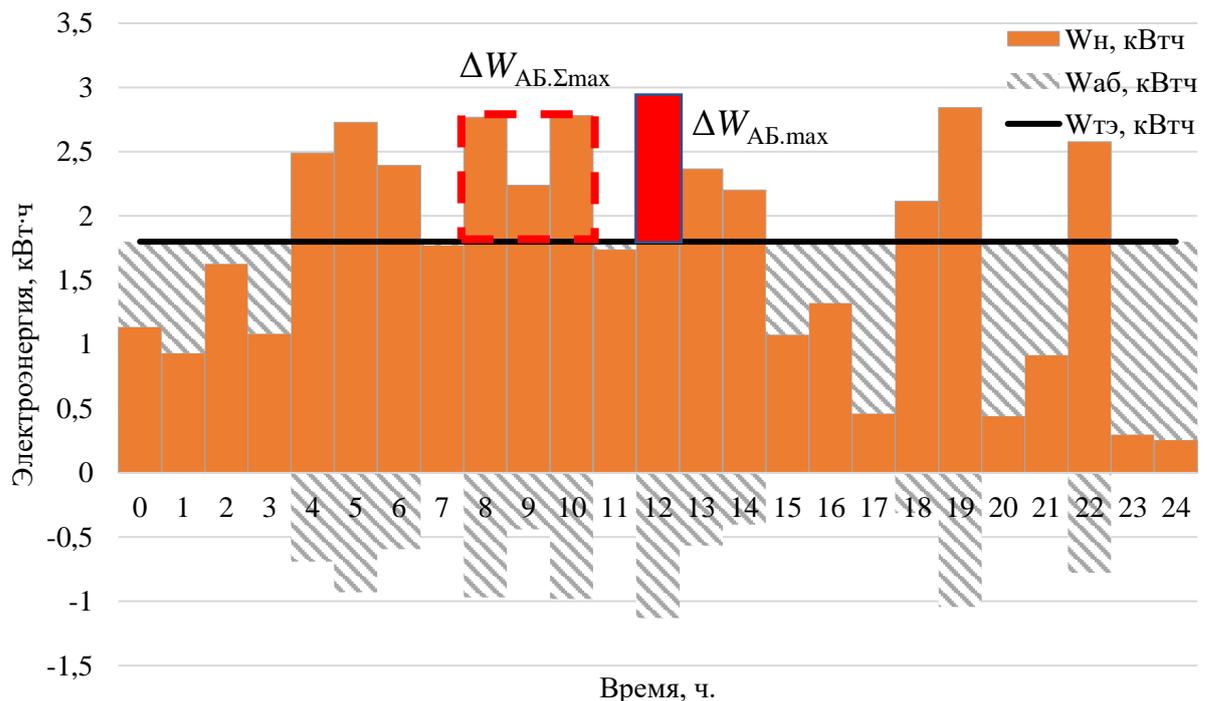


Рисунок 4 – Суточный ГЭН: потребление нагрузки W_n ; генерация ТЭ $W_{ТЭ}$; требуемая электроэнергия от СНЭЭ $W_{АБ}$ (отрицательные значения соответствуют режиму заряда)

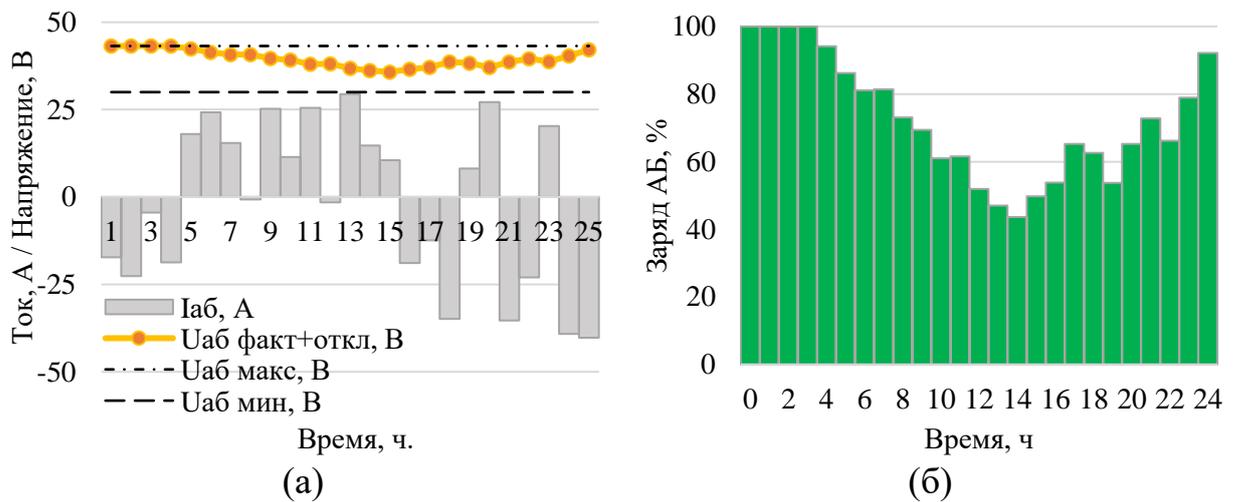


Рисунок 5 – Изменение напряжения АБ в течении суток (а): напряжения $U_{AB.факт}$; максимально и минимально допустимый уровень напряжения $U_{AB.макс}$ и $U_{AB.мин}$; ток I_{AB} (отрицательные значения тока соответствуют режиму заряда); уровень заряда АБ (б)

5. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ГЭН НА ТРЕБУЕМУЮ ЭНЕРГОЕМКОСТЬ СНЭЭ В СОСТАВЕ ГЭК

На этапе проектирования реальных энергообъектов, зачастую, невозможно предугадать фактический ГЭН. Поэтому для выбора энергоемкости СНЭЭ могут быть использованы только ориентировочные значения максимальной и минимальной нагрузки, а также справочные значения коэффициентов, характеризующих ГЭН потребителей данного типа:

– коэффициент максимума:

$$K_m = \frac{P_{н.макс.ф}}{P_{н.ср}}$$

где $P_{н.макс.ф}$ – фактическая максимальная активная мощность нагрузки, которая при случайном задании ГЭН может отличаться от заданной ($P_{н.макс.ф} \leq P_{н.макс}$);

– коэффициент запаса:

$$K_{зап} = \frac{24P_{н.макс.ф}}{\sum_0^{23} W_n}$$

где W_n – количество электроэнергии, потребленное нагрузкой за 24 часа (кВт·ч);

– коэффициент формы:

$$K_\phi = \sqrt{\frac{1 + 2K_{зап}}{3K_{зап}}}$$

– коэффициент неравномерности графика нагрузки:

$$K_{нр} = \frac{P_{н.мин.ф}}{P_{н.макс.ф}}$$

где $P_{н.мин.ф}$ – фактическая минимальная активная мощность нагрузки ($P_{н.мин.ф} \geq P_{н.мин}$);

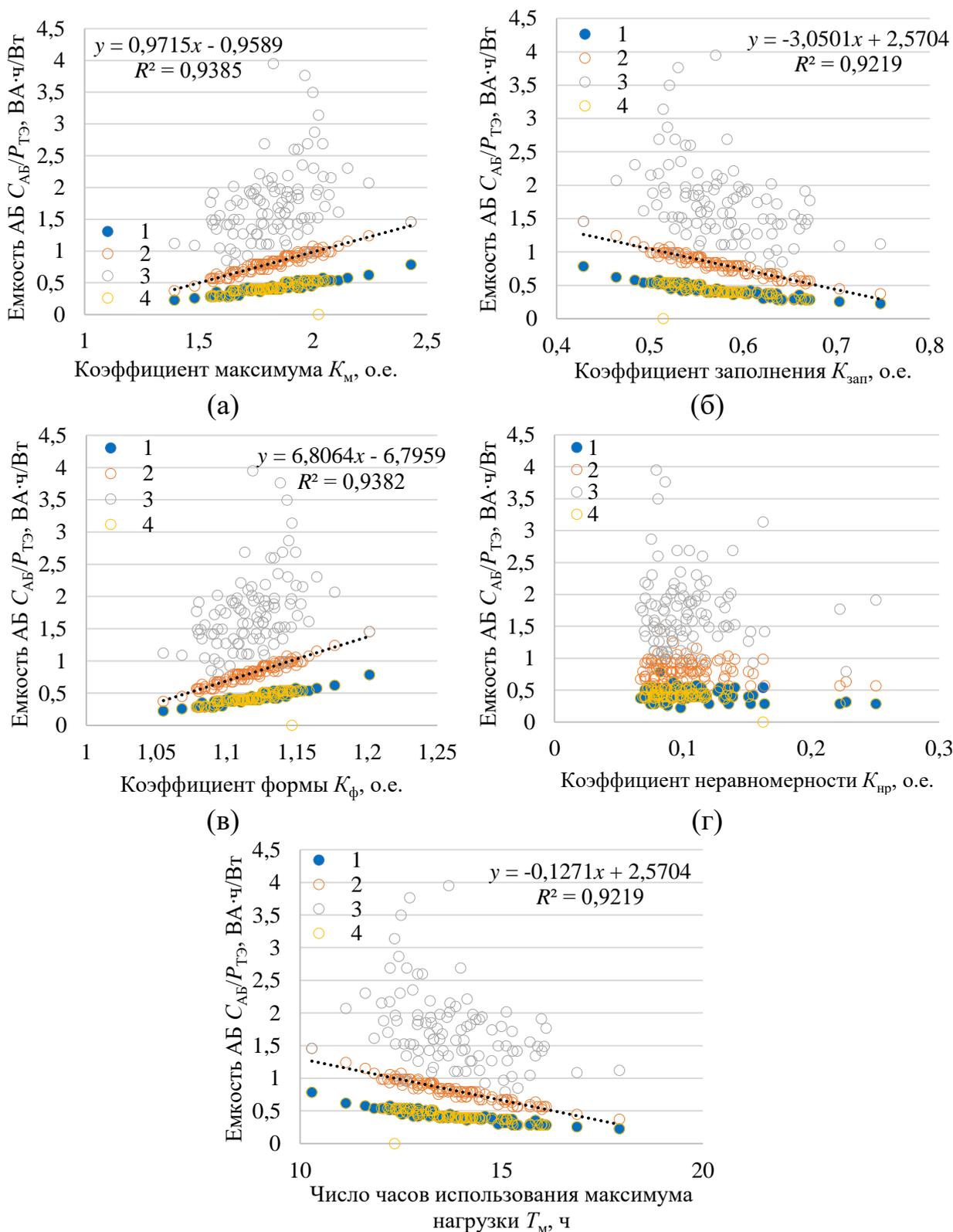
– число часов использования максимума нагрузки:

$$T_m = \frac{W_n}{P_{н.макс.ф}}$$

Проведены исследования влияния показателей ГЭН на требуемую энергоемкость СНЭЭ с помощью разработанной программы. Для этого ГЭН задавался случайным образом с заранее определенными значениями $P_{н.мин}$ и $P_{н.макс}$. Для автоматизации процесса сбора

данных использован скрипт, написанный в Python 3.10 с помощью библиотеки xlwings. В результате моделирования получены зависимости влияния коэффициентов, характеризующих ГЭН, на энергоёмкость СНЭЭ (рис. 6).

Представленные зависимости получены при одинаковых исходных данных: $P_{н.маx} = 3$ кВт; $P_{н.мин} = 0,2$ кВт; $C_{эл} = 3,5$ Ач; $R_{эл} = 18$ мОм; $U_{эл.ном} = 3,2$ В; $U_{эл.мин} = 2,5$ В; $U_{эл.маx} = 3,6$ В; $U_{АБ.ном} = 38,4$ В; $I/C = 2$ о.е.; период дискретизации задан $t = 1$ час; число итераций – 1000 шт. Для получения зависимостей в общем виде энергоёмкости АБ приведены в относительных единицах (ВА·ч/Вт) по отношению к установленной мощности ТЭ.



(д)

Рисунок 6 – Зависимость энергоёмкости СНЭЭ по критериям 1–4 от коэффициента максимума (а); коэффициента запаса (б); коэффициента формы (в); числа часов использования максимума нагрузки (д); коэффициента неравномерности графика нагрузки (г)

Результаты исследований показали следующее.

На полученный результат существенно влияет выбор как периода дискретизации, так и число реализаций ГЭН. При заданном периоде 1 час значения рассчитанной емкости по критерию уровня заряда C_4 почти всегда являются минимальными и совпадают на рис. 6 с энергоёмкостями C_1 . При уменьшении времени дискретизации критерий уровня заряда уже становится определяющим.

Максимальное значение энергоёмкости определяется критерием покрытия суммы пиков нагрузки. Энергоёмкость, определенная с помощью данного критерия – C_2 , может превышать емкости C_1 , C_3 , C_4 почти в 10 раз. Поэтому применение данного критерия при выборе энергоёмкости СНЭЭ может быть экономически не оправдано при питании потребителей, допускающих кратковременные перерывы электроснабжения. Для них выбор энергоёмкости может осуществляться по критерию покрытия пика нагрузки и использоваться значение энергоёмкости C_2 . Это значение энергоёмкости было использовано для дальнейшего анализа.

Полученные зависимости относительной энергоёмкости от коэффициентов ГЭН имеют линейную зависимость. На рис. 6 приведены результаты аппроксимации полученных зависимостей и соответствующие величины достоверности R^2 . С ростом коэффициента формы и коэффициента максимума увеличивается требуемая энергоёмкость СНЭЭ. Зависимость энергоёмкости от числа часов использования максимума нагрузки и коэффициента запаса обратно-пропорциональная. Коэффициент неравномерности ГЭН почти не влияет на энергоёмкость СНЭЭ.

В общем случае, энергоёмкость СНЭЭ можно определить упрощенно с помощью аналитически полученных зависимостей для критерия покрытия пика нагрузки (рис. 7).

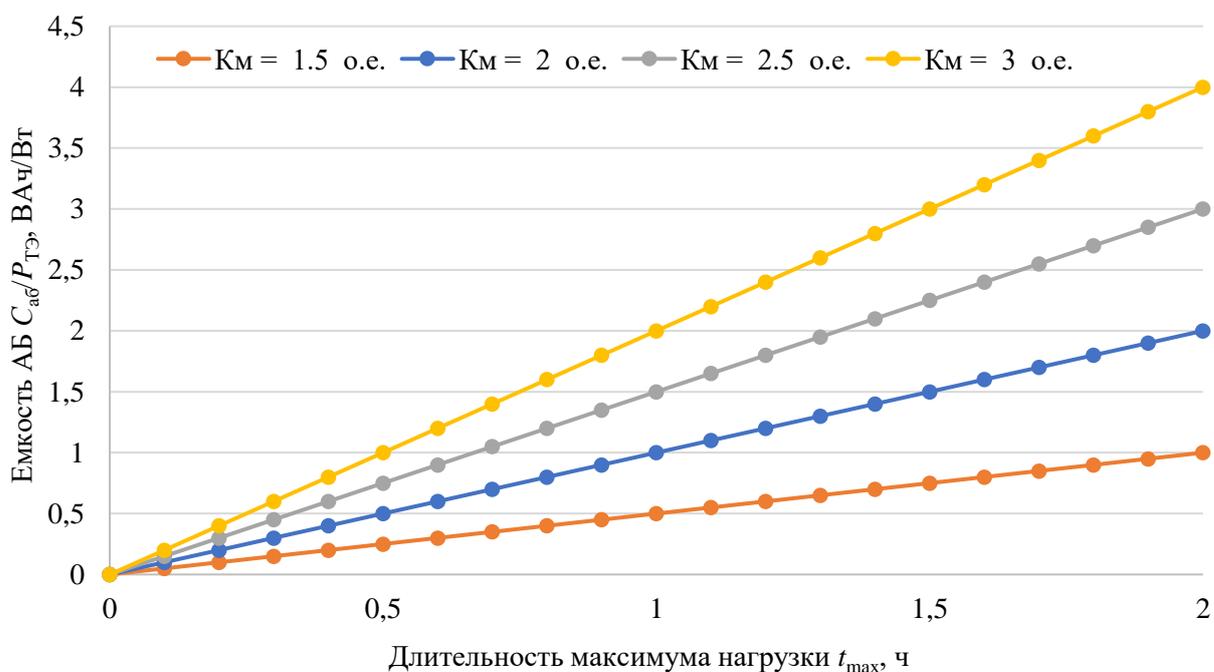


Рисунок 7 – Зависимость энергоёмкости СНЭЭ от длительности максимума нагрузки t_{\max} при изменении коэффициента максимума K_M

На рис. 7 t_{\max} – длительность самого продолжительного совпадения пиков нагрузки на ГЭН (ч). Представленные зависимости справедливы при соотношении допустимой кратности тока разряда элемента $I/C = 2$.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Правильный выбор СНЭЭ позволяет эффективно использовать ГЭК для питания потребителей с различными режимами работы (суточными ГЭН). Выбор энергоемкости СНЭЭ зависит от характера потребления электроэнергии и типа АБ.

На величину требуемой энергоемкости влияет вид и характеристики ГЭН потребителя, которые необходимо учитывать на этапе проектирования системы. Установлено, что определяющим критерием, в большинстве случаев, является критерий покрытие суммы пиков нагрузки, а полученное значение емкости C_3 является максимальным. Однако выбор итоговой энергоемкости СНЭЭ с учетом данного критерия целесообразен только для критически важных инфраструктурных объектов (потребителей первой и особой категории по бесперебойности электроснабжения, перерыв в электроснабжении которых не допустим).

Предложенный в статье подход, рассмотренный на примере ГЭК с водородным топливным элементом, может быть применен к решению большинства типов задач, где необходимо определить энергоемкость СНЭЭ для ГЭК с другим составом источников. Полученные при этом результаты могут быть уточнены путем более детального расчета экономических критериев с помощью методов оптимизации, адаптированных под эту задачу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гаськова Д.А., Массель А.Г. Технология анализа киберугроз и оценка рисков нарушения кибербезопасности критической инфраструктуры // Вопросы кибербезопасности. 2019. Т. 30. № 2. С. 42-49. DOI: 10.21681/2311-3456-2019-2-42-49. https://cyberurus.info/wp-content/uploads/2019/07/42-49-230-19_6.-Gaskova.pdf
2. Ouyang Q., Wang F., Chen J., Li X. Power management of PEM fuel cell hybrid systems // Proceedings of the 33rd Chinese Control Conference. 2014. P. 7082-7087. DOI: 10.1109/ChiCC.2014.6896169. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6896169>
3. Marracci M., Bolognesi P., Buffi A., Caposciutti G., Tellini B. Analysis of current ripple effect on lithium batteries // Proceedings of the 2020 IEEE 20th Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON). 2020. P. 109-113. DOI: 10.1109/MELECON48756.2020.9140598. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9140598>
4. ГОСТ Р 58092.3.2-2023. Системы накопления электрической энергии. Проектирование и оценка рабочих параметров. Применения с преимущественным использованием мощности и интеграция с возобновляемыми источниками энергии. Введ. 01.07.2023. М.: Российский институт стандартизации, 2023. – 82 с.
5. ГОСТ Р 58092.3.1-2020. Системы накопления электрической энергии (СНЭЭ). Проектирование и оценка рабочих параметров. Общие требования. Введ. 01.11.2020. М.: Стандартинформ, 2020. – 39 с.
6. Wang H., Wang T., Xie X., Ling Z., Gao G., Dong X. Optimal capacity configuration of a hybrid energy storage system for an isolated microgrid using quantum-behaved particle swarm optimization // Energies. 2018. Vol. 11 (2), 454. DOI: 10.3390/en11020454. <https://doi.org/10.3390/en11020454>
7. Karve G.M., Kurundkar K.M., Vaidya G.A. Implementation of analytical method and improved particle swarm optimization method for optimal sizing of a standalone PV/wind and battery energy storage hybrid system // Proceedings of the 2019 IEEE 5th International Conference

for Convergence in Technology (I2CT). 2019. P. 1-5. DOI: 10.1109/I2CT45611.2019.9033540. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9033540>

8. Обухов С.Г., Ибрагим А. Оптимизация состава оборудования гибридных энергетических систем с возобновляемыми источниками энергии // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2020. Т. 20. № 2. С. 64-76. DOI: 10.14529/power200206. <https://doi.org/10.14529/power200206>

9. Fossati J., Galarza A., Martín-Villate A., Fontan L. A method for optimal sizing energy storage systems for microgrids // *Renewable Energy*. 2015. Vol. 77. P. 539-549. DOI: 10.1016/j.renene.2014.12.039. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.12.039>

10. Dulout J., Jammes B., Alonso C., Anvari-Moghaddam A., Luna A., Guerrero J.M. Optimal sizing of a lithium battery energy storage system for grid-connected photovoltaic systems // *Proceedings 2017 IEEE Second International Conference on DC Microgrids (ICDCM)*. 2017. P. 582-587. DOI: 10.1109/ICDCM.2017.8001106. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8001106>

11. Sioshansi R., Madaeni S.H., Denholm P. A dynamic programming approach to estimate the capacity value of energy storage // *IEEE Transactions on Power Systems*. 2014. Vol. 29. No. 1. P. 395–403. DOI: 10.1109/TPWRS.2013.2279839. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6601729>

12. Rurgladdapan J., Uthaichana K., Kaewkham-ai B. Optimal Li-Ion battery sizing on PEMFC hybrid powertrain using dynamic programming // *Proceedings 2013 IEEE 8th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*. 2013. P. 472-477. DOI: 10.1109/ICIEA.2013.6566415. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6566415>

13. Тягунов М., Шевердиев Р. Применение цифрового двойника для исследования и оптимизации локальных гибридных энергокомплексов с генерацией на основе ВИЭ // *Энергетические системы*. 2022. Т. 7. № 1. С. 60–71. DOI: 10.34031/ES.2022.1.007. <https://j-es.ru/index.php/journal/article/view/2022-1-007>

14. Пранкевич Г.А. Разработка математической модели и методики выбора параметров накопителя энергии как элемента энергосистемы: автореферат дис. к.т.н.: 05.14.02 // Новосибирский государственный технический университет. Новосибирск, 2021. https://www.nstu.ru/files/dissertations/avtoreferat_prankevich_ga_164086446525.pdf

15. Смоленцев Н.И. Разработка устройств накопления электрической энергии с применением эффекта сверхпроводимости, способов управления и методов оптимизации энергетических потоков в системах электроснабжения: автореферат дис. д.т.н.: 05.09.03 // ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)». Челябинск, 2021. https://www.susu.ru/sites/default/files/dissertation/2020_01_10tekstdissertaciismolencev_0.pdf

MODELING THE INFLUENCE OF ELECTRIC LOAD CURVE INDICATORS ON STORAGE SYSTEM CAPACITY IN HYBRID POWER SYSTEM

© 2023 A. B. Loskutov^a, I. A. Lipuzhin^b, A. V. Shalukho^c

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev,
24 Minin St., Nizhny Novgorod, 603155 Russia

E-mails: ^aloskutov@nntu.ru, ^blipuzhin@nntu.ru, ^cshalukho@nntu.ru

Abstract. In modern conditions, the key direction of ensuring the energy security of critical infrastructure facilities is associated with the use of local generation sources combined with battery energy storage systems into hybrid power systems. An urgent problem in the design of such systems is the determination of their optimal parameters, including the nominal capacity of storage system. Methods from guidance documents or scientific methods based on dynamic programming, genetic algorithms, and others can be used to solve these problems. There is no unified approach to calculating the energy capacity of storage systems. The paper deals with a hybrid power system based on a fuel cell. The purpose of the work and its scientific contribution is to study the influence of the type and characteristics of consumer electrical load curves on the nominal capacity of the storage system for a hybrid power system with a fuel cell operating in a constant power mode. An algorithm for determination the energy capacity of batteries based on consumer electrical load curves specified with a certain discretization has been developed. The criteria for choosing the nominal capacity of batteries are: maximum discharge current, peak coverage and the sum of load peaks coverage, charge level. The algorithm is implemented in MS Excel, and the collection and analysis of the obtained results is automated using Python. The dependences of the energy capacity of lithium iron phosphate batteries on the indicators of the electric load curve were obtained for a hybrid power system with a fuel cell.

Keywords: modeling, algorithm, energy storage system, battery, fuel cell, hybrid power system, load curve, energy capacity.

This work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (state task No. FSWE-2022-0006).

REFERENCES

1. Gaskova D.A., Massel A.G. The technology of cyber threat analysis and risk assessment of cybersecurity violation of critical infrastructure, *Voprosy kiberbezopasnosti*, 2019, vol. 30, no. 2, pp. 42-49. DOI: 10.21681/2311-3456-2019-2-42-49. https://cyberrus.info/wp-content/uploads/2019/07/42-49-230-19_6.-Gaskova.pdf
2. Ouyang Q., Wang F., Chen J., Li X. Power management of PEM fuel cell hybrid systems, *Proceedings of the 33rd Chinese Control Conference*, Nanjing, China, 2014, pp. 7082-7087. DOI: 10.1109/ChiCC.2014.6896169. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6896169>
3. Marracci M., Bolognesi P., Buffi A., Caposciutti G., Tellini B. Analysis of current ripple effect on lithium batteries, *Proceedings of the 2020 IEEE 20th Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON)*, Palermo, Italy, 2020, pp. 109-113. DOI: 10.1109/MELECON48756.2020.9140598. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9140598>

4. GOST R 58092.3.2-2023 (IEC TS 62933-3-2:2023, NEQ). Electric energy storage systems. Planning and performance assessment. Power intensive applications and renewable energy sources integration.
5. GOST R 58092.3.1-2020 (IEC TS 62933-3-1:2018). Electric energy storage (EES) systems. Planning and performance assessment. General requirements.
6. Wang H., Wang T., Xie X., Ling Z., Gao G., Dong X. Optimal capacity configuration of a hybrid energy storage system for an isolated microgrid using quantum-behaved particle swarm optimization, *Energies*, 2018, vol. 11 (2), 454. DOI: 10.3390/en11020454. <https://doi.org/10.3390/en11020454>
7. Karve G.M., Kurundkar K.M., Vaidya G.A. Implementation of analytical method and improved particle swarm optimization method for optimal sizing of a standalone PV/wind and battery energy storage hybrid system, *Proceedings of the 2019 IEEE 5th International Conference for Convergence in Technology (I2CT)*, Bombay, India, 2019. pp. 1-5. DOI: 10.1109/I2CT45611.2019.9033540. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9033540>
8. Obukhov S.G., Ibrahim A. Optimization of equipment composition of hybrid energy systems with renewable energy sources, *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2020, vol. 20, no. 2, pp. 64-76. DOI: 10.14529/power200206. <https://doi.org/10.14529/power200206>
9. Fossati J., Galarza A., Martín-Villate A., Fontan L. A method for optimal sizing energy storage systems for microgrids, *Renewable Energy*, 2015, vol. 77, pp. 539-549. DOI: 10.1016/j.renene.2014.12.039. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.12.039>
10. Dulout J., Jammes B., Alonso C., Anvari-Moghaddam A., Luna A., Guerrero J.M. Optimal sizing of a lithium battery energy storage system for grid-connected photovoltaic systems, *Proceedings 2017 IEEE Second International Conference on DC Microgrids (ICDCM)*, Nuremberg, Germany, 2017, pp. 582-587. DOI: 10.1109/ICDCM.2017.8001106. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8001106>
11. Sioshansi R., Madaeni S.H., Denholm P. A dynamic programming approach to estimate the capacity value of energy storage, *IEEE Transactions on Power Systems*, 2014, vol. 29, no. 1, pp. 395–403. DOI: 10.1109/TPWRS.2013.2279839. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6601729>
12. Rurgladdapan J., Uthaichana K., Kaewkham-ai B. Optimal Li-Ion battery sizing on PEMFC hybrid powertrain using dynamic programming, *Proceedings 2013 IEEE 8th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, Melbourne, VIC, Australia, 2013, pp. 472-477. DOI: 10.1109/ICIEA.2013.6566415. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6566415>
13. Tyagunov M., Sheverdiev R. Application of a digital twin for research and optimization of local hybrid power complexes with RES-based generation, *Energy Systems*, 2022, vol. 7, no. 1, pp. 60–71. DOI: 10.34031/ES.2022.1.007. <https://j-es.ru/index.php/journal/article/view/2022-1-007>
14. Prankevich G.A. Razrabotka matematicheskoy modeli i metodiki vybora parametrov nakopitelya energii kak elementa energosistemy [Development of a mathematical model and methodology for selecting parameters of an energy storage device as an element of the power system]: Cand. of Tech. S. thesis, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia, 2021. https://www.nstu.ru/files/dissertations/avtoreferat_prankevich_ga_164086446525.pdf (in Russian).
15. Smolentsev N.I. Razrabotka ustrojstv nakopleniya elektricheskoy energii s primeneniem efekta sverxprovodimosti sposobov upravleniya i metodov optimizacii energeticheskix potokov v sistemax elektrosnabzheniya [Development of electrical energy storage devices using the superconductivity effect, control methods and methods for optimizing energy flows in power supply systems]: Doctor of Tech. S. thesis, South Ural State University (national research university), Chelyabinsk, Russia, 2021. https://www.susu.ru/sites/default/files/dissertation/2020_01_10tekstdissertaciismolencev_0.pdf (in Russian).