

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ, ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ДЛЯ ПОКРЫТИЯ ПИКОВЫХ НАГРУЗОК ЖИЛЫХ И ОБЩЕСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ

Солуянов Ю.И.¹, Федотов Е.А.², Федотов А.И.², Ахметшин А.Р.², Солуянов В.И.¹

¹ООО Ассоциация «РЭМ», г. Москва, Россия

²Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
fed.ai@mail.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ. Аккумуляторные системы накопления энергии позволяют снижать пиковые нагрузки в системах внешнего электроснабжения, это способствует снижению потерь электроэнергии при эксплуатации и позволяет на этапе проектирования выбирать трансформаторы меньшей мощности. Для жилых и общественных зданий появляется возможность снижения расходов на оплату электроэнергии в часы максимальной нагрузки, а также подключения электроразрядных станций, устанавливаемых на придомовых территориях. ЦЕЛЬ. Разработка методики выбора мощности и энергоёмкости аккумуляторных систем накопления энергии, используемых в городской инфраструктуре для ограничения потребляемой из питающей сети мощности в часы пиковых нагрузок, а также последующая разработка предложений по внесению изменений в СП 256.1325800.2016 «Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа». МЕТОДЫ. В работе использованы натурные измерения суточных графиков нагрузок жилых и общественных зданий, а именно: многоквартирных домов с электрическими плитами высотностью от 11 до 25 этажей, детских садов и школ, а также общественных зданий культурно-досугового назначения и торговых центров. Для многоквартирных домов сформирован типовой суточный график нагрузок. На его примере показано использование баланса энергии заряда и разряда накопителя для расчёта максимальных значений требуемой мощности и энергоёмкости. РЕЗУЛЬТАТЫ. Рассмотрены особенности подключения системы накопления электроэнергии к системам городского электроснабжения. Показано, что максимальная выдача накопителем электроэнергии достигается при его заряде в режиме потребления постоянной мощности из сети. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Заряд аккумуляторных батарей стабилизированным пониженным током, продлевающий их ресурс, целесообразен для систем накопления энергии, работающих в кратковременном режиме разряда. На основе полученного типового графика нагрузок МКД предложены расчетные формулы для выбора параметров системы накопления электроэнергии, устанавливаемых на объектах, имеющих повторяющиеся графики нагрузки.

Ключевые слова: система накопления электроэнергии; аккумуляторная батарея; электрическая мощность; электроэнергия; график нагрузок; пиковая нагрузка; типовой график; система электроснабжения.

Благодарности: Работа выполнена за счет средств, выделяемых Федеральным центром нормирования, стандартизации и технической оценки соответствия в строительстве по договору № 32514965236-1/2025 от 21.07.2025 г. на выполнение НИОКР на тему «Проведение исследования с целью разработки методики расчета определения мощности и энергоёмкости накопителей электроэнергии для потребителей с установленными суточными графиками электропотребления с целью оптимизации заявленной электрической нагрузки в жилых и общественных зданиях».

Для цитирования: Солуянов Ю.И., Федотов Е.А., Федотов А.И., Ахметшин А.Р., Солуянов В.И. Выбор параметров системы накопления электроэнергии, используемой для покрытия пиковых нагрузок жилых и общественных зданий // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 5. С. 86-105. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-5-86-105.

**SELECTION OF PARAMETERS OF AN ELECTRICITY STORAGE SYSTEM USED
TO COVER PEAK LOADS OF RESIDENTIAL AND PUBLIC BUILDINGS**

Soluyanov Yu.I.¹, Fedotov E.A.², Fedotov A.I.², Akhmetshin A.R.², Soluyanov V.I.¹

¹LLC Association "REM", Moscow, Russia

²Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

fed.ai@mail.ru

Abstract: *THE RELEVANCE.* Battery energy storage systems reduce peak loads in external power supply systems, which helps reduce operational energy losses and allows for the selection of lower-power transformers during the design stage. Residential and public buildings benefit from reduced electricity bills during peak hours, as well as the ability to connect to electric charging stations installed in adjacent areas. *THE PURPOSE.* Developing a methodology for selecting the capacity and energy capacity of battery energy storage systems used in urban infrastructure to limit power consumed from the power grid during peak load hours, as well as the subsequent development of proposals for amending SP 256.1325800.2016 "Electrical Installations of Residential and Public Buildings. Design and Installation Rules." *METHODS.* The study utilized in-kind measurements of daily power profiles for residential and public buildings, specifically apartment buildings with electric stoves ranging from 11 to 25 stories tall, kindergartens and schools, as well as public buildings serving cultural and leisure purposes and shopping centers. A typical daily power profile was generated for apartment buildings. This profile demonstrates the use of the energy balance of the storage device's charge and discharge to calculate the maximum required power and energy capacity. *RESULTS.* The specifics of connecting an energy storage system to the city's power grid are discussed. It is shown that the storage system achieves its maximum output when charged while drawing constant power from the grid. *CONCLUSION.* Charging batteries with a stabilized, reduced current, which extends their lifespan, is beneficial for energy storage systems operating in short-term discharge modes. Based on the obtained typical power profile of an apartment building, calculation formulas are proposed for selecting the parameters of energy storage systems installed at facilities with recurring load patterns.

Keywords: *energy storage system; battery; electric power; electric energy; power profile; peak load; typical schedule; power supply system.*

Acknowledgments: *The work was carried out using funds allocated by the Federal Center for Regulation, Standardization and Technical Assessment of Conformity in Construction under contract No. 32514965236-1/2025 dated July 21, 2025, for the implementation of R&D on the topic of "Conducting research to develop a methodology for calculating the power and energy capacity of electricity storage devices for consumers with established daily electricity consumption schedules in order to optimize the declared electrical load in residential and public buildings".*

For citation: Soluyanov Yu.I., Fedotov E.A., Fedotov A.I., Akhmetshin A.R., Soluyanov V.I. Selection of parameters of an electricity storage system used to cover peak loads of residential and public buildings. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (5): 86-105. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-5-86-105.

Введение (Introduction)

В настоящее время наблюдается широкое распространение аккумуляторных систем накопления электроэнергии (СНЭЭ), и в первую очередь, для стабилизации частоты в энергосистемах, где используются возобновляемые источники электроэнергии, характеризующиеся нестабильностью её выработки [1-7]. Мощность и энергоёмкость наиболее крупных балансирующих хабов достигает 850 МВт и 1680 МВт·ч (рис. 1) [8]. Одновременно наблюдается применение СНЭЭ относительно небольшой мощности на уровне нескольких десятков или сотен киловатт для частных домовладений, имеющих ВИЭ [9-15], в функции хранителей электроэнергии (ЭЭ) с целью её последующей продажи на розничном рынке на интервалах с наиболее высокими тарифами (рис. 2).



Рис. 1. СНЭЭ проекта «супербатареи» Waratah, Австралия
Fig. 1. Waratah Super Battery Energy Storage System Project, Australia

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.



а)



б)

Рис. 2. Аккумуляторные СНЭЭ для домохозяйств: а – централизованная стационарная СНЭЭ на несколько сотен кВт; б – мачтовая СНЭЭ на 30 кВт для нескольких домохозяйств, проект Symphony, Австралия

Fig. 2. Battery energy storage systems for households: a – centralized stationary energy storage system with a capacity of several hundred kW; b – 30 kW pole-mounted energy storage system for multiple households, Symphony Project, Australia

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Существуют и другие области применения СНЭЭ, в частности, для обеспечения устойчивой работы газопоршневых энергоустановок в локальных энергосистемах при набросах и сбросах нагрузки [16-21], для экономии жидкого топлива дизель-генераторов в условиях его северного завоза и т.д. ПАО «Россети» активно развивает направление по созданию мобильных СНЭЭ, используемых для питания точечных поселений на территориях, удаленных от централизованного электроснабжения. Для экономичного технического решения по выбору мощности и энергоёмкости мобильных СНЭЭ в этих случаях необходимо располагать информацией по закономерностям электропотребления (ЭП) объектов, подключаемых к накопителю, чтобы правильно спрогнозировать периодичность замены подвижной части СНЭЭ, т.е. аккумуляторных батарей (АБ) [22-27]. В условиях уже функционирующих объектов это не вызывает каких-либо принципиальных затруднений. Однако на этапе проектирования электротехнического комплекса «объект жилого/общественного назначения – СНЭЭ» приходится сталкиваться с отсутствием нормативной информации об их суточных графиках электрических нагрузок (ГЭН).

Экономическая эффективность снижения потребляемой мощности из сети в часы максимального отпускного тарифа на ЭЭ была оценена промышленными предприятиями еще несколько десятилетий тому назад. К наиболее ярким примерам середины 80-х годов можно отнести испытательную установку завода корабельных двигателей в г. Николаев, где в качестве нагрузки двигателей служил синхронный генератор мощностью 30 МВт, работающий на внешнюю сеть, а также Казанский моторостроительный завод, где для снижения потребляемой из сети мощности в часы максимальных нагрузок использовались несколько автономных газотурбинных электростанций мощностью по 2,5 МВт. В наше время малая генерация на промышленных предприятиях становится обыденной, но на объектах городской инфраструктуры её применение ограничивается только в виде

резервных источников питания. Такая ситуация вполне закономерная, т.к. при постоянной эксплуатации энергоустановок требуется, помимо непрерывной подачи топлива, еще и квалифицированный обслуживающий персонал с соответствующей оплатой труда. Причем удельная часть расходов на его содержание тем выше, чем ниже мощность энергоустановок. Появление на электротехническом рынке аккумуляторных СНЭЭ в диапазоне мощностей от нескольких десятков до нескольких тысяч киловатт позволяет рассмотреть вопрос об их использовании в жилых и общественных зданиях как в качестве компенсатора локальных набросов нагрузки, так и на длительных интервалах времени для снижения оплаты за ЭЭ посредством выдачи её потребителям в часы максимального тарифа. Одновременно с этим выравнивание ГЭН в городских распределительных сетях способствует снижению потерь ЭЭ, т.е. имеет место энергосберегающий эффект. К электрохимическим СНЭЭ относятся и суперконденсаторные установки [1, 2], но преимущественная сфера их применения – тяговый электротранспорт, и в этой связи они далее не рассматриваются. Ниже приводятся методики выбора мощности и энергоёмкости аккумуляторных СНЭЭ (рис. 3) в зависимости от функционала здания.



Рис. 3. Принципиальная схема аккумуляторной СНЭЭ Fig. 3. Schematic diagram of a battery energy storage system

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Графики электрической нагрузки жилых и общественных зданий

Для выбора параметров СНЭЭ с целью их установки как на уже действующих объектах, так и на этапе их интеграции в проектируемые системы электроснабжения, главной информацией служат суточные ГЭН. Нормативно-технические документы^{1,2}, определяющие методики расчета электрических нагрузок непромышленных объектов, содержат только значения расчётных удельных мощностей жилых и общественных зданий, по которым, в конечном счёте, выбираются проводники, силовые трансформаторы (СТ) и коммутационные аппараты, а также рассчитывается мощность технологического присоединения [28-32]. Использование СНЭЭ ставит задачу оценки нагрузки во времени, т.к. необходимо согласовывать режимы заряда и разряда АБ. Во-первых, израсходовать накопитель может только то, что в нём предварительно запасено, причём с учётом ряда ограничений, о которых будет изложено ниже. Во-вторых, уже в процессе его работы система управления должна опираться на некоторую прогнозную модель ГЭН [28-32], иначе АБ можно разрядить раньше, чем необходимо. Ни в современной нормативной^{1,2}, ни в справочной литературе ГЭН городских жилых и общественных зданий не приводятся, т.к. до настоящего времени не были востребованы проектировщиками. В последние годы был выполнен ряд исследований в этом направлении [28-32]. На рисунках 4-8 представлены суточные ГЭН ряда объектов городской инфраструктуры, полученные Ассоциацией «Росэлектромонтаж» в процессе мониторинга ЭП жилых и общественных зданий с получасовым усреднением результатов измерений. Вначале представлены графики удельной нагрузки объектов, имеющие выраженный максимум нагрузки. К ним относятся многоквартирные жилые дома (МКД), детские и школьные образовательные учреждения (ДОУ и СОШ) (рис. 4-8). Записывалась суммарная нагрузка МКД двух строительных кластеров (с газовыми плитами, МКД 5-10 этажей (рис. 4)), включающая в себя ЭП квартир, общедомовых нужд (ОДН) и коммерческих потребителей, расположенных на первых этажах зданий (с электрическими плитами, МКД 11 этажей и выше (рис. 5)).

¹ СП 256.1325800.2016 «Энергоустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа».

² РД 34.20.185-94 «Инструкция по проектированию городских электрических сетей».

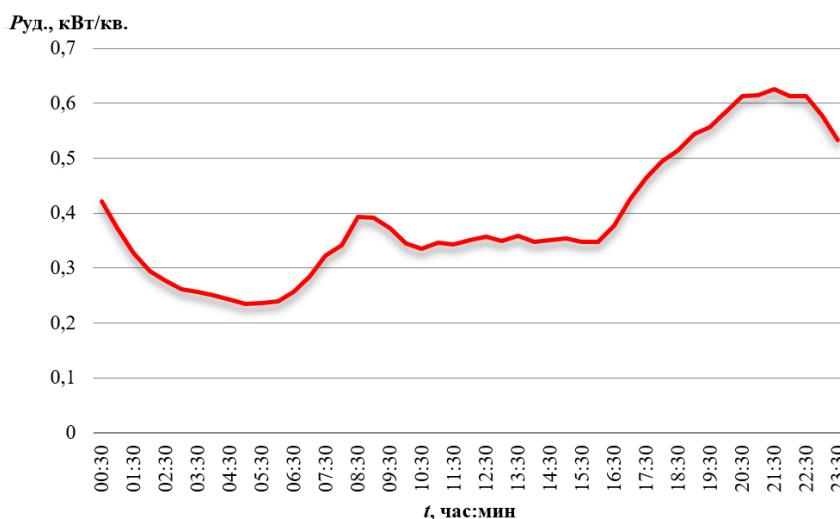


Рис. 4. Суточный график удельной нагрузки 9-этажного дома Fig. 4. Daily power density profile of a 9-story building

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

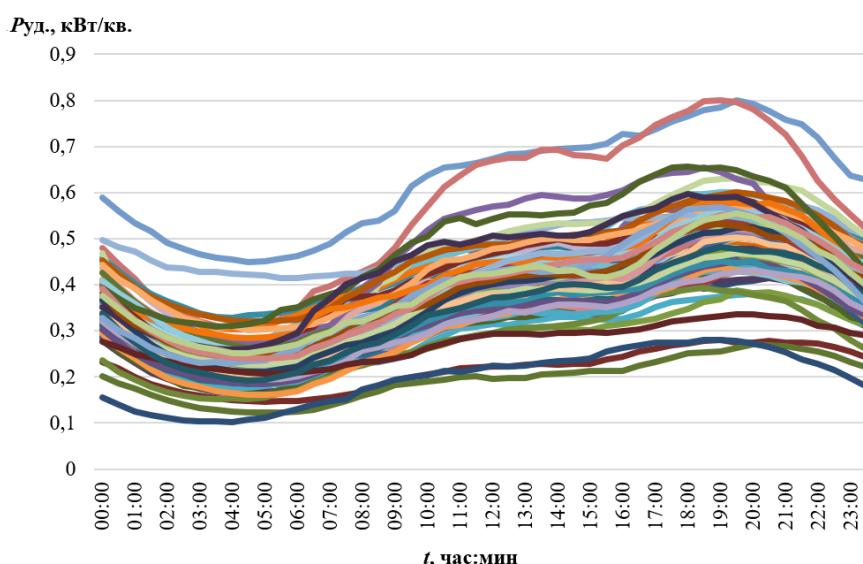


Рис. 5. Суточные графики удельной нагрузки МКД 19-25 этажей Fig. 5. Daily power density profiles for 19-25-story apartment buildings

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

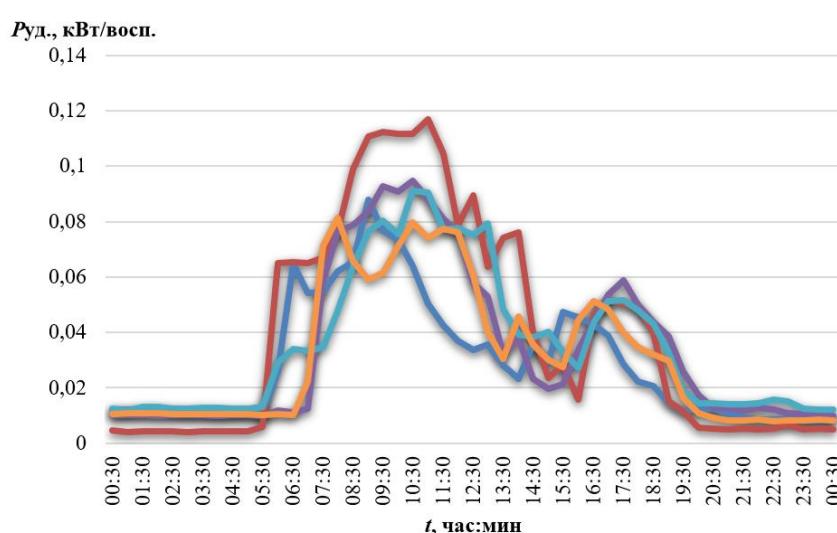


Рис. 6. Суточный график удельной нагрузки ДОУ Fig. 6. Daily profile of specific capacity of kindergartens

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

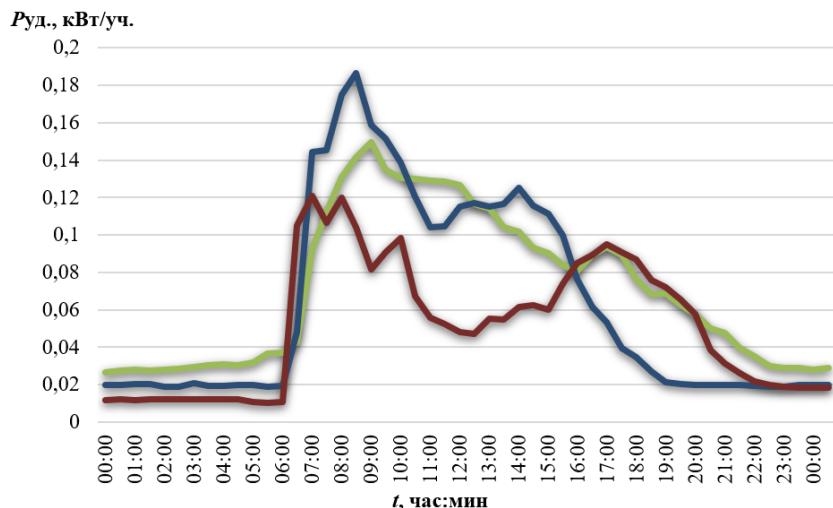


Рис. 7. Суточный график удельной нагрузки СОШ
Fig. 7. Daily profile of specific capacity of schools

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

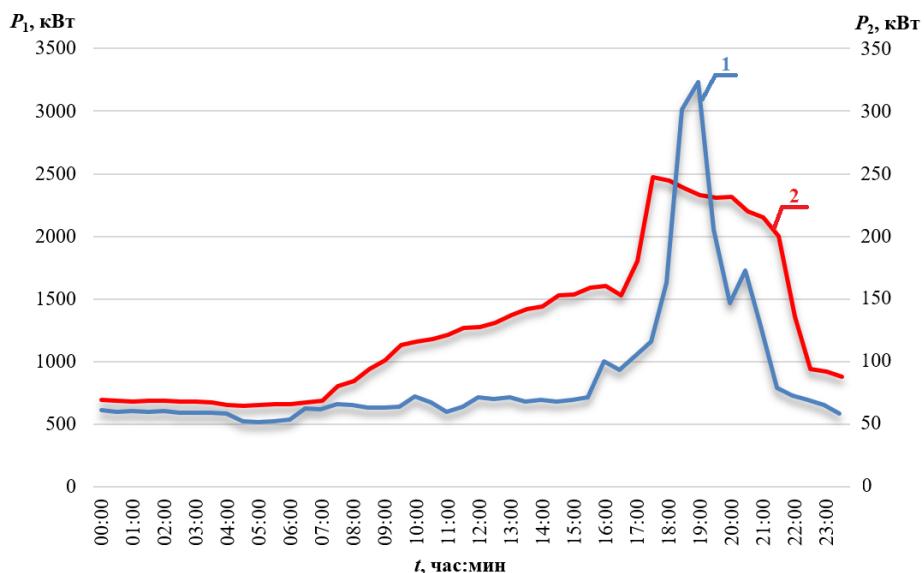


Рис. 8. Суточные ГЭН зданий культурного и оздоровительного назначения: 1 – спортивно-оздоровительный комплекс (P_1); 2 – театр оперы и балета (P_2)
Fig. 8. Daily power profiles of cultural and recreational buildings: 1 – sports and training complex (P_1); 2 – opera and ballet theatre (P_2)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Несмотря на отличие в абсолютных значениях удельной мощности МКД (рис. 4 и 5), наблюдается устойчивый максимум нагрузки в вечернее время и частично локальный максимум нагрузки в утренние часы.

Для ДОУ и СОШ максимум нагрузки приходится на утренние часы, а локальные максимумы смещены ближе к вечеру (рис. 6 и 7).

Для театрально-концертных зданий характерен вечерний максимум нагрузки в силу специфики их работы, как и для спортивно-тренировочных комплексов (рис. 8).

Помещения и здания общественного назначения характеризуются относительно ровными ГЭН в рабочие часы (рис. 9-13).



Рис. 9. Суточный ГЭН магазина «Пятерочка»

Fig. 9. Daily load profile of the Pyaterochka store

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

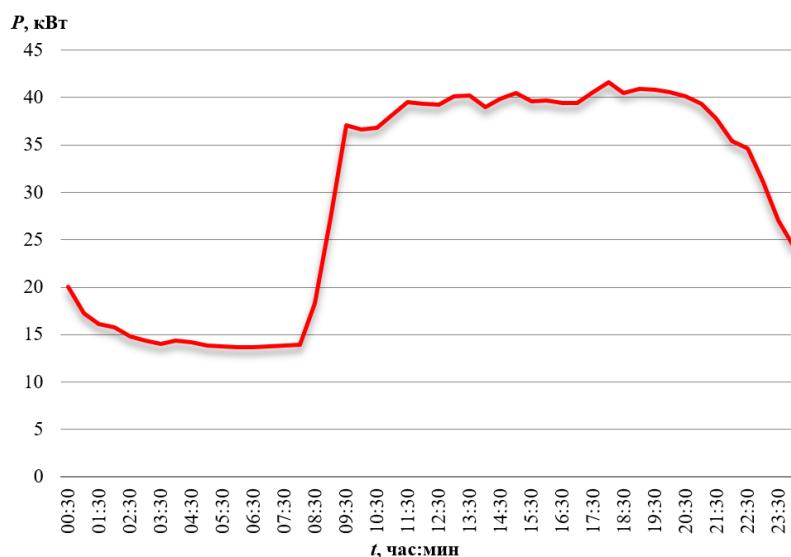


Рис. 10. Суточный ГЭН кафе

Fig. 10. Daily load profile of the cafe

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

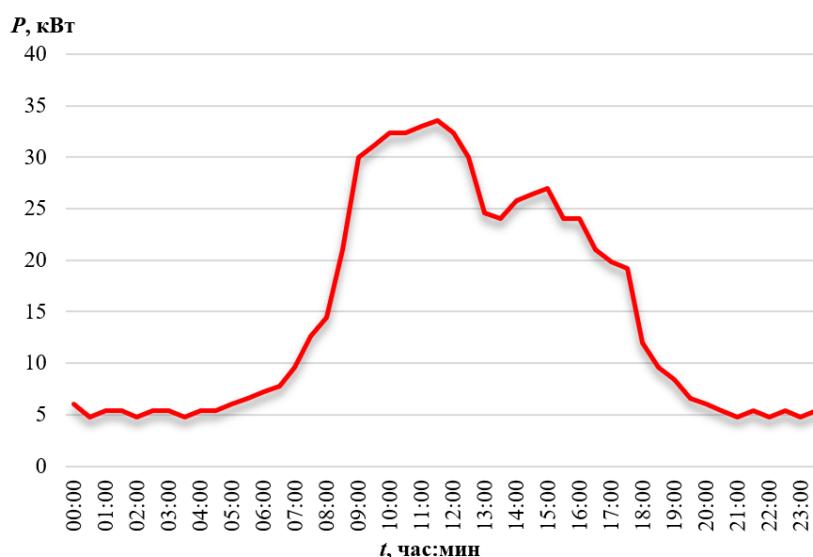


Рис. 11. Суточный ГЭН поликлиники

Fig. 11. Daily capacity profile of the clinic

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

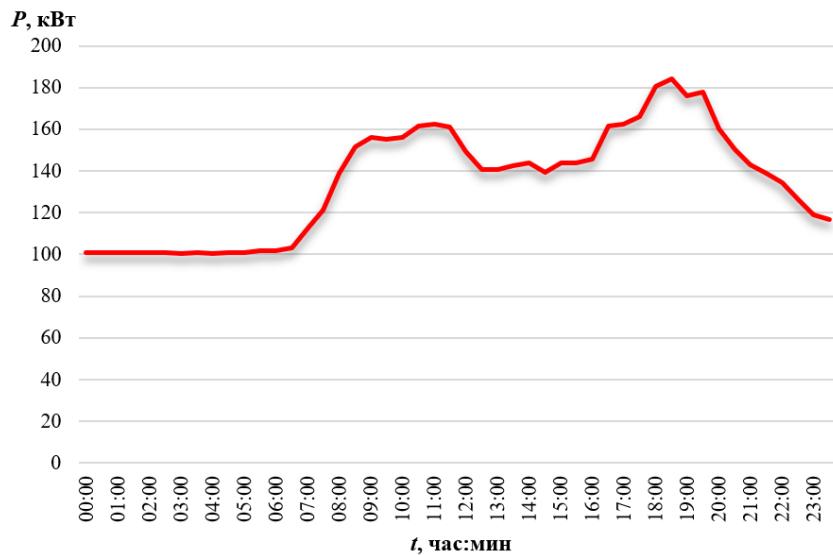


Рис. 12. Суточный ГЭН физкультурно-оздоровительного комплекса *Fig. 12. Daily power profile of the multifunctional complex*

*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

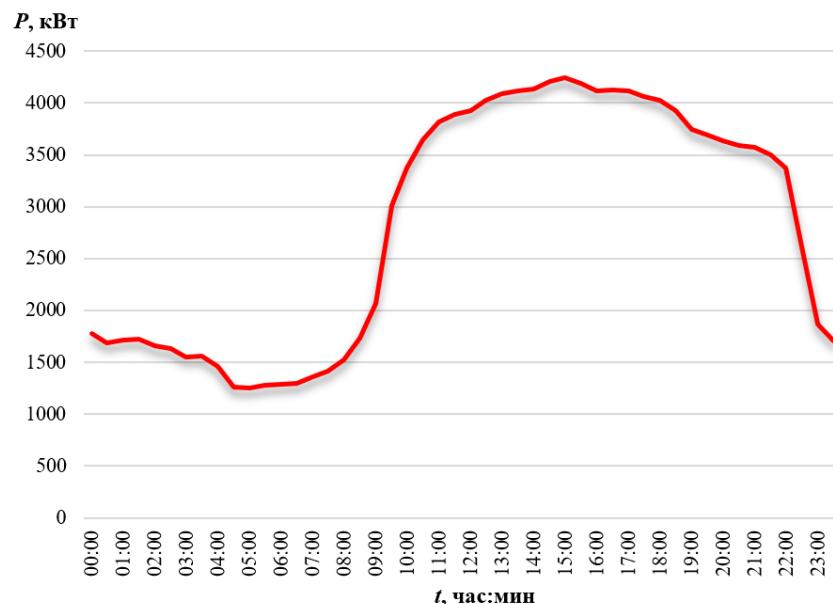


Рис. 13. Суточный ГЭН торгового центра *Fig. 13. Daily power profile of the shopping center*
*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

Определенная общность ГЭН относится к их форме, максимальная нагрузка при этом может значительно отличаться, что иллюстрирует применительно к МКД кластера 19-25 этажей (рис. 5). Распределение по времени суток значений максимальной нагрузки всех обследованных образовательных учреждений и МКД представлены на рисунке 14 в виде точечных диаграмм. Из них видно, что для некоторых МКД (без их разделения по строительным кластерам) наблюдается глобальный максимум нагрузки в первой половине дня, но в целом максимальной нагрузке соответствуют вечерние часы в интервале от 18 до 23 часов. Для всех ДОУ и СОШ максимумы нагрузки наблюдались только в первой половине дня от 6 до 12 часов.

На шинах трансформаторных подстанций (ТП) суточный ГЭН сильно зависит от состава нагрузок и их относительной мощности. Так, на рисунке 14 для одной из ТП, питающей МКД и СОШ, максимум нагрузки приходится на 14:30 ч, а для одной из ТП, питающей МКД и ДОУ, суточный максимум смешен на 10:30 ч (рис. 15), что характерно именно для ДОУ.

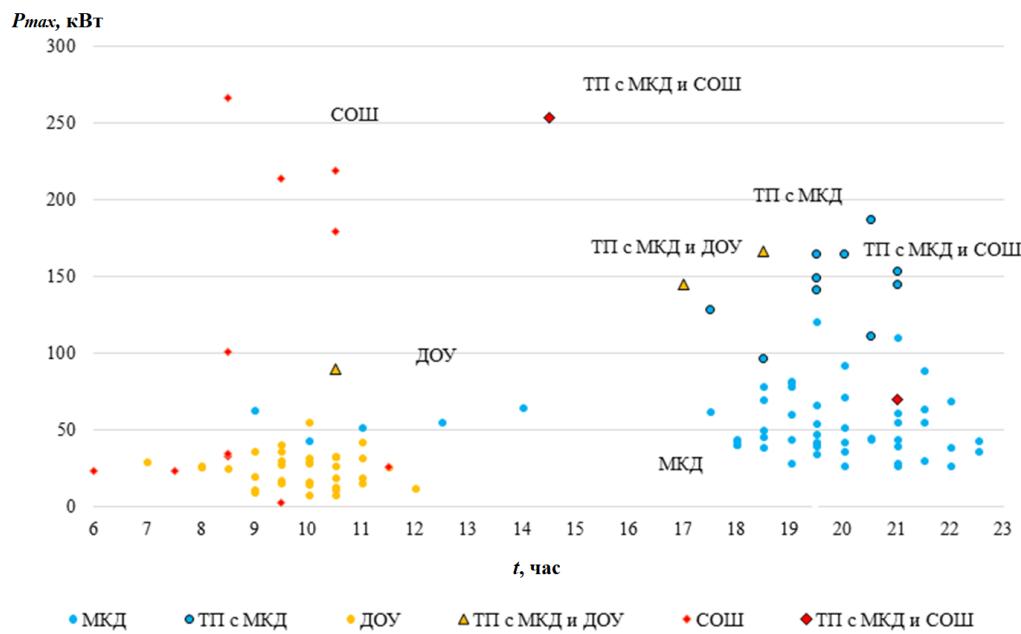


Рис. 14. Диаграмма распределения максимальной нагрузки по времени суток *Fig. 14. Diagram of distribution of maximum load by time of day*

*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

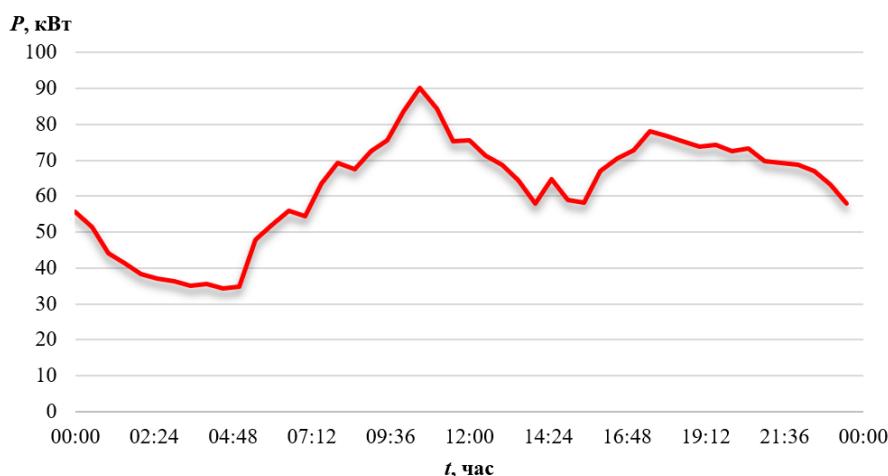


Рис. 15. Суточный ГЭН на ТП, питающей МКД и ДОУ *Fig. 15. Daily power profile at the transformer substation supplying an apartment building and a kindergarten*

*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

В общем случае на этапе проектирования для оценки величины суммарной мощности на шинах ТП следует использовать коэффициенты одновременности максимальной нагрузки^{1,2}, при этом временная зона его проявления диктуется наибольшей из складываемых нагрузок.

Подключение СНЭЭ к системе электроснабжения

При проектировании непромышленных объектов городской инфраструктуры для снижения затрат на оплату мощности технологического присоединения можно предусмотреть использовать СНЭЭ. На этапе их эксплуатации СНЭЭ также могут обеспечить снижение затрат на оплату потребляемой ЭЭ, если использовать разницу в тарифах на отпускаемую ЭЭ по времени суток. Экономический эффект будет зависеть от ГЭН объектов. Так, для МКД явно выражен вечерний максимум нагрузки (рис. 4 и 5), и поскольку наибольший тариф приходится на часы максимальной нагрузки МКД, то одновременно при выдаче энергии от СНЭЭ будут выполняться и условия договора на соблюдение предельной потребляемой из сети мощности. Для объектов с достаточно ровным ГЭН (рис. 9-13) экономический эффект может быть получен за счет питания электроразрядных станций (ЭЗС) в вечерние часы, используя накопленную в ночные часы ЭЭ. В любом случае, необходимо рассмотреть вопрос, куда именно может быть подключена СНЭЭ, и как она может повлиять на проектирование системы электроснабжения объекта.

Рассмотрим примеры конкретных проектных решений. На рисунке 16 приведена принципиальная схема электроснабжения одного МКД, СОШ и дренажной насосной станции (ДНС) от общей подстанции. Представлена типовая схема, где от шин подстанции радиально питаются вводные распределительные устройства (ВРУ) каждого объекта.

Схемы питания ВРУ «двойная сквозная магистраль» практически не применяются в современных системах городского электроснабжения. Поскольку электрическая нагрузка каждого объекта примерно равномерно распределяется между СТ, а секционный выключатель 0,4 кВ в нормальном режиме отключен (он включается по команде автоматики аварийного включения резерва (рис. 16)), то необходима установка двух СНЭЭ, подключаемых либо непосредственно на секции шин 0,4 кВ, либо на вводах объектов. С позиции решения вопроса среза максимальной нагрузки на подстанции нет разницы между способами подключения накопителей. Однако имеет значение, какой именно объект по договору заявляет максимальную нагрузку. Если СНЭЭ подключаются на шины ТП, то потребуется заключение отдельного договора с поставщиком ЭЭ, по которому мощности заряда и разряда СНЭЭ суммируются (алгебраически) с потребляемой мощностью самого объекта. Если СНЭЭ объекта подключаются после своих вводных электросчетчиков во ВРУ, которые имеют связь по информационным каналам с электроснабжающей организацией, то отслеживание условий выполнения договорных обязательств осуществляется автоматически, при этом необходимо предусмотреть установку двунаправленного прибора учета электроэнергии (ПУЭЭ) во ВРУ, где подключается накопитель. Количество ВРУ одного объекта может быть и больше 2-х, как видно из схемы (рис. 17).

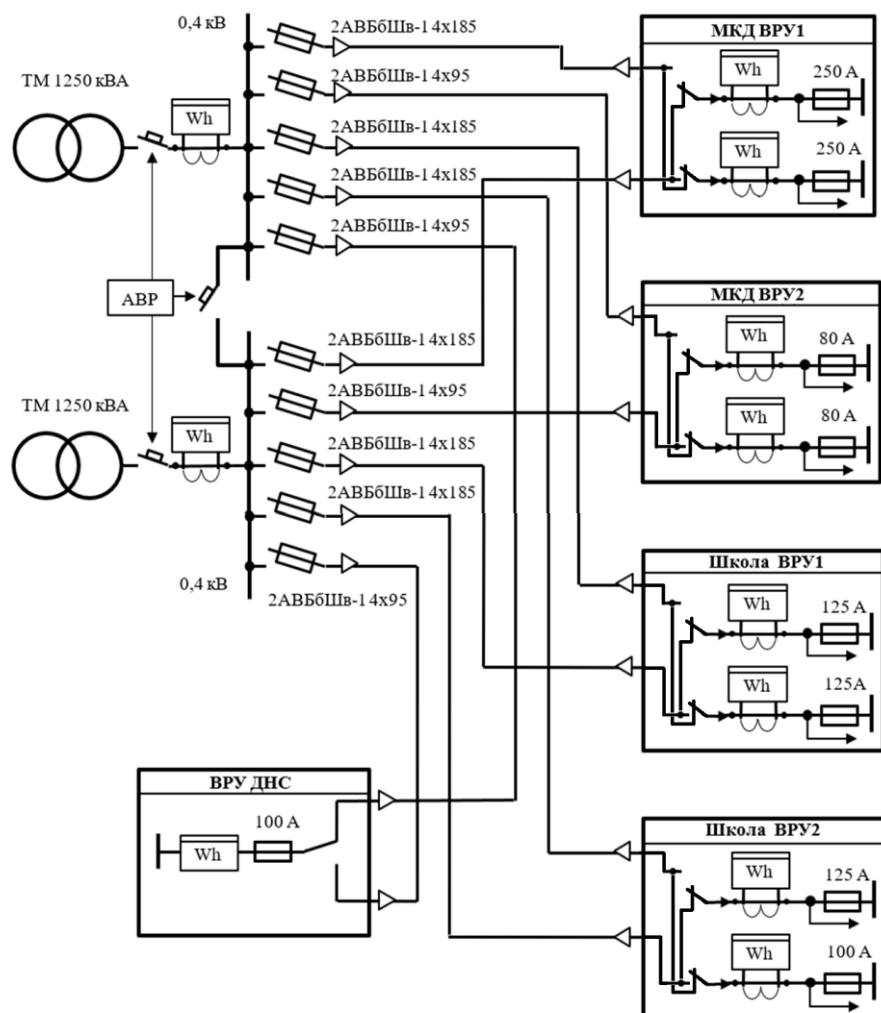


Рис. 16. Принципиальная схема электроснабжения МКД и СОШ

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Fig. 16. Schematic diagram of the power supply of an apartment building and a school

Из представленных схем видно, что непосредственно к «вводу» МКД подключить СНЭЭ невозможно, т.к. вводов несколько (рис. 16 и 17). Аналогичная ситуация и для СОШ (рис. 16). Причем, если для МКД можно выделить ВРУ1, которые обеспечивают питание большей части нагрузки, и именно к нему целесообразно подключать СНЭЭ для среза потребляемой мощности МКД из сети, то применительно к СОШ оба ВРУ рассчитаны на одинаковую нагрузку. Индивидуальное подключение СНЭЭ к каждому ВРУ технически осуществимо, где точки подключения должны выбираться за ПУЭЭ ВРУ, но этот вариант требует столько же помещений для размещения СНЭЭ и является наиболее затратным. Ограничиться одной СНЭЭ на МКД нельзя, т.к. ВРУ распределены по питанию между разными секциями шин 0,4 кВ ТП, и тогда все ВРУ будут электрически связаны между собой через СНЭЭ. Тем самым исчезает главное преимущество радиальной схемы электроснабжения – независимое раздельное питание каждого ВРУ. Если же связать СНЭЭ с одной секцией шин 0,4 кВ ТП, то будет создаваться значительное неравномерное распределение мощности между СТ, что приводит к увеличению потерь ЭЭ. Таким образом, оптимальным решением является установка двух СНЭЭ, которые могут в интересах электроснабжающей компании работать в режиме поддержания одинаковой передаваемой мощности в каждом СТ и при этом в сумме обеспечивать договорной уровень потребляемой МКД (или другим объектом) из питающей сети мощности.

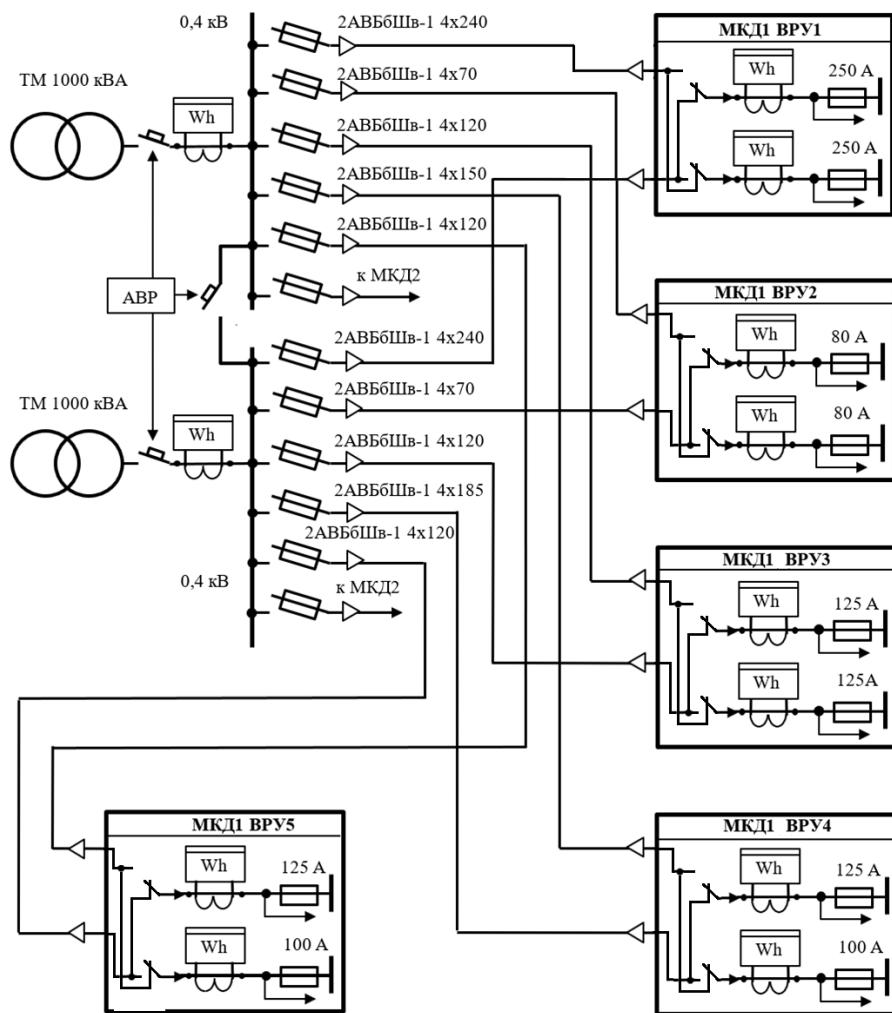


Рис. 17. Фрагмент принципиальной схемы электроснабжения двух МКД
Fig. 17. A fragment of the basic diagram of the power supply of two apartment buildings

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Если СНЭЭ подключить к наиболее мощному ВРУ, необходима дополнительная проверка сечения кабелей (рабочий и резервный), связывающих ВРУ с ТП, в режимах генерации мощности СНЭЭ и заряда АБ по допустимому максимальному току (рис. 18), где через P_{L1}, \dots, P_{LN} обозначены мощности нагрузки каждого ВРУ, $P_{\Sigma} = P_{L1} + \dots + P_{LN}$ – поступающая мощность из сети при отключенном накопителе, P_{st} – мощность накопителя

(генерируемая со знаком «плюс» или зарядная со знаком «минус»), P_T – поступающая из сети мощность. При этом во ВРУ1 должен устанавливаться двунаправленный ПУЭЭ. Обратная связь ПУЭЭ, устанавливаемых в ВРУ, с СНЭЭ необходима, т.к. система управления накопителем сравнивает фактическую мощность с заданной уставкой.

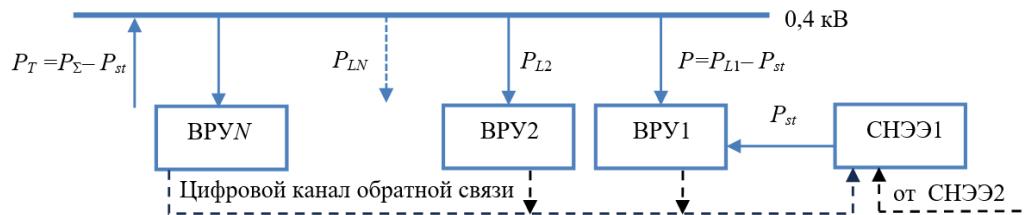


Рис. 18. Распределение активной мощности при подключении СНЭЭ к ВРУ

Fig. 18. Distribution of active power when connecting power supply systems to the input distribution device

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Как видно из рисунка 18, кабель к ВРУ1 требуется проверять в двух режимах: в режиме заряда АБ номинальным током и в режиме максимальной выдачи мощности от СНЭЭ1. В первом случае используется минимальная нагрузка объекта, во втором случае – его максимальная нагрузка, для чего необходима информация об изменении нагрузки во времени.

Поскольку литий-ионные АБ пожароопасны, то для размещения СНЭЭ требуются отдельные боксы. С учётом этого фактора предпочтительным представляется вариант их совмещения с ТП и, соответственно, подключение накопителей к её шинам 0,4 кВ. Для того, чтобы от ВРУ не прокладывать контрольные кабели до СНЭЭ, достаточно установить дополнительные ПУЭЭ на отходящих к нужному объекту силовых кабелях в ТП.

Выбор мощности и энергоёмкости СНЭЭ, используемых для «среза» пика мощности на ТП

При выборе параметров СНЭЭ при их использовании в целях ограничения потребляемой пиковой нагрузки на ТП объектами городской инфраструктуры ключевой является проблема расчёта требуемой энергоёмкости накопителя. В директивных документах^{1,2} приводятся нормативные значения максимальных расчётных электрических нагрузок жилых и общественных зданий, которые служат основой для выбора проводников и аппаратов в системах электроснабжения. Информация о закономерностях изменения нагрузки по времени суток отсутствует, т.к. она прежде была не востребована. Приведенные на рисунках 4-13 суточные ГЭН ряда городских объектов показывают, что не для всех из них может быть выделен явно выраженный максимум электрической нагрузки. Среди тех потребителей, у которых устойчиво наблюдаются пики мощности, тоже имеются свои особенности. Для МКД установлено, что в вечерние часы в рабочие и выходные дни наблюдается максимальная нагрузка, вочные часы нагрузка минимальная, и правомерна постановка задачи о разработке типового суточного ГЭН [31]. Там же отмечается, что для ДОУ и СОШ, в отличие от МКД, повторяемость ГЭН не прослеживается. Таким образом, можно сформировать три группы объектов, для которых необходима индивидуальная методика выбора параметров СНЭЭ: группа МКД, для которых существует типовой ГЭН; группа объектов, таких как ДОУ и СОШ, для которых отсутствует типовой ГЭН, но доказано наличие выраженных максимумов нагрузки; группа объектов с относительно ровным ГЭН в рабочие часы.

Рассмотрим полные нагрузки МКД, включающие в себя мощность квартир, ОДН и нагрузки небольших коммерческих объектов, располагаемых на первых этажах зданий. На рисунках 16 и 17 видно, что от ТП кабели походят непосредственно к ВРУ дома, от которых уже могут быть питаны сторонние потребители в нежилых помещениях. На рисунке 19 приведены суточные ГЭН, полученные для удельных электрических нагрузок кластеров 11-18 этажей и 19-25 этажей [28-32], но перестроенные в относительных единицах, где за базисные значения приняты максимальные значения суточной нагрузки.

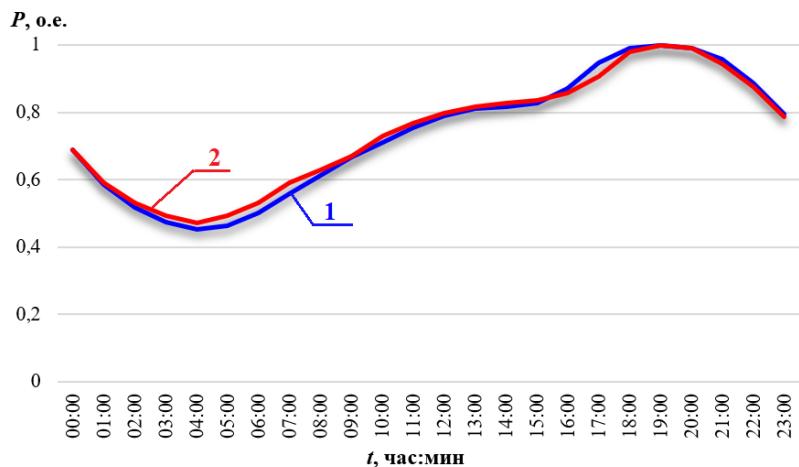


Рис. 19. Суточные ГЭН МКД для кластеров 11-18 этажей (1), 19-25 этажей (2)

Fig. 19. Daily power profiles of apartment buildings for clusters of 11-18 floors (1), 19-25 floors (2)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В абсолютных значениях максимумы ГЭН 1 и 2 (рис. 19) отличаются, как показано в [31], на 0,016 кВт за счет увеличения ОДН в домах большей этажности. Но в относительных единицах расчет по норме (1), характеризующей среднеквадратическое отклонение по отношению к среднему значению, показывает их практическую идентичность.

$$\delta = 100 \sqrt{\frac{1}{48} \sum_{i=1}^{48} \left[\frac{P_{1i} - P_{2i}}{(P_{1i} + P_{2i})/2} \right]^2} < 2\%, \quad (1)$$

где P_{1i}, P_{2i} – получасовые отсчеты мощности МКД 1-го и 2-го кластеров.

Гармонический анализ ГЭН 1 и 2 (рис. 19), выполненный в соответствии с [31], также показывает их однотипность, поскольку и гармонический коэффициент, и первые четыре гармоники отличаются менее, чем на 2%.

В формуле (1) учтено, что исходная информация получена в дискретном виде посредством усреднения мощности на получасовых интервалах измерения ЭП. На рисунке 20 приведен итоговый усредненный ГЭН МКД в относительных единицах, и показаны интервалы заряда и разряда СНЭЭ, где заливые площади соответствуют энергии заряда W_{ch} и разряда W_{dc} аккумуляторных батарей СНЭЭ. Принят режим заряда АБ с поддержанием постоянной мощности потребления МКД, чему соответствует точки t_{ch} и t_{dc} .

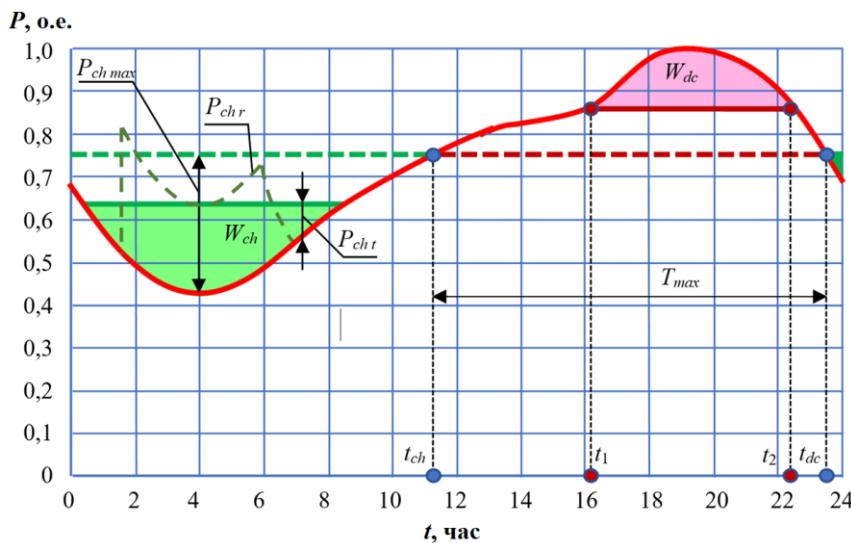


Рис. 20. Распределение во времени режимов заряда и разряда СНЭЭ

Fig. 20. Distribution of charge and discharge modes of energy storage systems over time

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Соотношение энергий описывается следующей формулой:

$$W_{dc} = \eta \cdot W_{ch}, \quad (2)$$

где η – коэффициент полезного действия (КПД) СНЭЭ в цикле «заряд-разряд».

Из формулы (2) следует, что положение точки t_k зависит от коэффициента полезного действия СНЭЭ. Очевидно, что при этом мощность (соответственно, и ток) заряда и разряда изменяются во времени и применительно к данной форме графика должно быть выдержано следующее условие выбора паспортной мощности накопителя

$$P_r \geq P_{ch\max}, \quad (3)$$

где $P_{ch\max}$ – максимальное значение мощности заряда.

Неполный заряд литий-ионных АБ продлевает их ресурс, разряд АБ автоматика ограничивает примерно на уровне 10% от номинальной энергоёмкости, поэтому с учётом условий эксплуатации СНЭЭ минимальная энергоёмкость её АБ должна удовлетворять условию:

$$W_{r\min} = \eta \cdot k_w \cdot W_{ch}, \quad (4)$$

где коэффициент $k_w = 0,7 \div 0,9$ учитывает неполные заряд и разряд АБ. Наименьшее его значение отвечает наибольшему ресурсу АБ.

Паспортное значение W_r ёмкости СНЭЭ должно удовлетворять условию

$$W_r \geq W_{r\min} \quad (5)$$

Таким образом, алгоритм выбора номинальной энергоёмкости СНЭЭ, обеспечивающей наиболее продолжительный режим её работы, следующий. Зная КПД (η) СНЭЭ в режиме работы АБ с неполным зарядом и задавая желаемый коэффициент k_w , по формуле (4) получаем соотношение между энергией заряда и разряда. По оцифрованному типовому графику (рис. 20) находим значения t_{ch} и t_{dc} и определяем максимальную длительность разряда T_{\max} . Если предполагается работа СНЭЭ на более коротком интервале времени, то его начало t_1 и конец t_2 задаются на типовом графике (рис. 20) вычисляется площадь под графиком, соответствующая энергии разряда W_{dc} , и рассчитывается необходимая энергоёмкость по формулам (4) и (5). Интервал заряда может смещаться во времени, а сам заряд большую часть времени производится мощностью P_{chr} , соответствующей номинальному току СНЭЭ, причём потребляемая мощность из сети может быть выше оговоренной максимальной мощности в часы пиковых нагрузок в сети.

На рисунке 21 показаны в относительных единицах зависимости максимальной мощности и энергии разряда от продолжительности среза максимума нагрузки, полученные из графика (рис. 20). Переход к именованным единицам осуществляется путем умножения параметров рисунка 21 на расчетную мощность P_n МКД, которая определяется^{1,2} как

$$P_n = n \cdot p_0 + 0,9 \cdot P_c, \quad (6)$$

где n – количество квартир в МКД, p_0 – соответствующая удельная нагрузка, P_c – силовая нагрузка.

Поскольку типовой ГЭН (рис. 20) получен как средний график между ГЭН в о.е. кластеров МКД 11-18 и 19-25 этажей (рис. 19) целесообразно формулу (5) применять для МКД большей этажности, а для означенных кластеров использовать зависимости максимальной расчетной нагрузки от количества квартир в группе, приведенные в [28-32], которые, как это сделано применительно к нагрузкам квартир агломерации «Москва – Московская область», увеличить с целью создания запаса в 1,5-2 раза.

Для объектов вида ДОУ, СОШ, у которых отсутствуют типовые ГЭН, срез потребляемой максимальной мощности за счет использования СНЭЭ также возможен, как и для МКД, но выбор мощности и энергоёмкости следует жестко привязать к продолжительности разряда, тогда как для МКД задается величина предельной потребляемой из сети мощности (ограничение по пиковой нагрузке) и продолжительность разряда (работа СНЭЭ в интервале времени действия максимального тарифа на ЭЭ). Формулы (2) и (4) остаются в силе, а формула (3) принимает следующий вид:

$$P_r \geq P_{dc\max}. \quad (7)$$

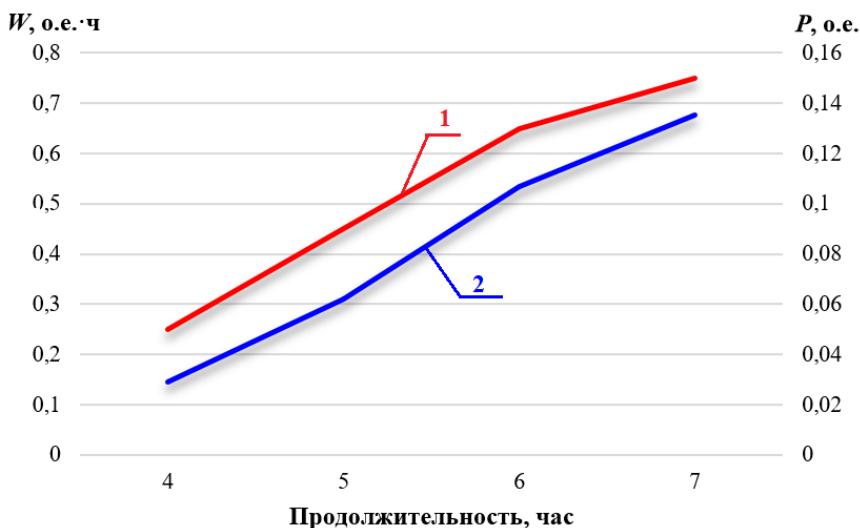


Рис. 21. Зависимость максимальной мощности (1) и энергии разряда (2) в зависимости от продолжительности среза потребляемой мощности

Fig. 21. Dependence of maximum power (1) and discharge energy (2) on the duration of the cutoff of consumed power

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Для объектов, характеризующихся относительно ровным ГЭН в рабочие часы, применение СНЭЭ может быть привязано к тарифным зонам. Тогда заданной считается продолжительность зоны наибольшего тарифа на ЭЭ, а мощность СНЭЭ определяется на основе технико-экономических расчётов.

Обсуждение (Discussions)

Выбор параметров СНЭЭ в отрыве от суточных ГЭН возможен в таких редких случаях, когда они используются для среза кратковременных пиковых нагрузок, например, в локальных энергосистемах, где в качестве генераторов используются газопоршневые установки, чувствительные по стабилизации частоты к набросам и сбросам мощности потребителей. В ряде случаев они находят применение в системах резервного электроснабжения. На постоянной основе в городской инфраструктуре их использование сдерживается не столько стоимостными показателями, сколько отсутствием методики выбора их параметров (мощности и энергоёмкости), которая, в свою очередь, требует осознания закономерностей изменения во времени суток электрических нагрузок различных объектов, где могли бы быть установлены СНЭЭ. Как отмечено выше, для МКД с электроплитами такие закономерности установлены, и получен типовой ГЭН, который в относительных единицах не зависит от этажности дома. Необходимо пояснить, что получен усредненный ГЭН, который построен за сутки с максимальным ЭП на протяжении всего года. Если сравнить отношение его минимальной нагрузки к максимальной с аналогичными величинами по всем ГЭН МКД, вошедших в мониторинг, то будут значения как большие, так и меньшие. Последнее может оказаться на нехватке продолжительности времени заряда применительно к конкретному МКД уже в процессе его эксплуатации, но данный фактор компенсируется использованием формулы (5). Объясняется это тем, что нормативные значения удельной электрической нагрузки¹ в сравнении с фактическими максимальными значениями для агломерации «Москва – Московская область» завышены примерно в 1,5 раза и более, что видно из результатов мониторинга, опубликованных в [29], где отмечено, что предельные удельные мощности групп квартир получены для суток с максимальным ЭП за год. Для остальных регионов завышение ещё больше. Таким образом, приведённая методика обеспечивает запас для СНЭЭ по мощности и энергоёмкости. Максимальный ток двунаправленного преобразователя должен быть не ниже номинального зарядного тока АБ.

Использование максимальных возможностей по энергоёмкости СНЭЭ вступает в противоречие с желанием увеличения ресурса АБ, поскольку их заряд в этом случае происходит током, величина которого изменяется во времени совершенно не так, как показано на диаграммах (рис. 21), а в соответствии с формой ГЭН в зоне заряда АБ (рис. 20). Завышение номинальной энергоёмкости накопителя с целью снижения относительной величины зарядного тока в таком режиме экономически может быть оправдано только при наличии достоверной апробированной модели деградации АБ при

переменном токе заряда. Наиболее эффективное использование СНЭЭ происходит, если по договорным условиям выполняется ограничение потребляемой мощности не на протяжении суток (рис. 20), а только в часы пиковых нагрузок, тогда в другое время для заряда АБ доступная вся электроэнергия, ограниченная нагрузкой МКД и мощностью технологического присоединения.

Выводы (Conclusions)

Подключение СНЭЭ к какому-либо объекту городской инфраструктуры в действительности означает в большинстве случаев подключение либо к ТП, либо к одному из нескольких ВРУ. Последнее требует, пересмотр сечений питающих кабелей данного ВРУ. Охват каналами связи с СНЭЭ всех ПУЭЭ ВРУ объекта, подключенных общей секцией шин, либо ПУЭЭ на кабелях в ТП, необходим, поскольку накопитель должен получать информацию о полной нагрузке объекта. Информационная связь со второй СНЭЭ служит для согласованной работы обоих накопителей по ограничению потребляемой объектом из сети мощности и одновременно позволяет выравнивать электрические нагрузки СТ, что снижает в них потери ЭЭ. Предложенное выше размещение ПУЭЭ в ТП, обеспечивающих СНЭЭ информацией о текущей мощности объекта, позволяет сократить длину контрольных кабелей и исключить их прокладку в земле, но при этом собственник накопителей должен учитывать, что СНЭЭ будут работать в режиме разряда с некоторым перерегулированием, т.к. точками раздела балансовой принадлежности являются вводы в ВРУ, и потери мощности в питающих кабелях не будут учитываться системой управления накопителей.

Дискретность 1-5 минут съема информации серийными ПУЭЭ представляется вполне достаточной для регулирования мощности разряда накопителя на сеть. Однако этот вопрос на нормативном уровне пока не решен и требует отдельной проработки, т.к. он напрямую связан с выполнением договорных обязательств собственника СНЭЭ по выдерживанию уровня потребляемой объектом мощности в часы пиковых нагрузок.

Аварийная ситуация полного погашения подстанции 10/0,4 кВ приводит к выдаче энергии СНЭЭ всем потребителям независимо от того, куда они подключены. Их избирательное использование собственником возможно только при серьезном пересмотре схемы электроснабжения, что потребует технико-экономического обоснования.

Установка на придомовых территориях ЭЗС только начинается, но данный процесс неизбежен. В этой связи перед СНЭЭ открываются новые перспективы по их интеграции в системы городского электроснабжения, при этом необходима разработка соответствующей методики выбора параметров накопителя, которая учитывает как характеристики нагрузки городских объектов, так и специфику работы на этих территориях ЭЗС.

Литература

1. Федотов А. И. Использование электрохимических накопителей энергии в системах автономного электроснабжения для снижения расхода топлива энергоустановок / А. И. Федотов, Е. А. Федотов, А. Ф. Абдуллазянов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23, № 1. С. 3-17. DOI 10.30724/1998-9903-2021-23-1-3-17. EDN BITFGX.
2. Бахтеев К. Р. Создание гибридного накопителя электроэнергии большой мощности для предотвращения кратковременных нарушений электроснабжения промышленных потребителей / К. Р. Бахтеев // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т. 20, № 3-4. С. 36-44. EDN XWBLRR.
3. Mushid F. C. Khan M. F. Battery Energy Storage for Ancillary Services in Distribution Networks: Technologies Applications, and Deployment Challenges—A Comprehensive Review / F. C. Mushid, M. F. Khan // Energies. 2025. Vol. 18(20). Art. no 5443. DOI 10.3390/en18205443.
4. Шамарова Н. А. Анализ методов оценки уровня заряда аккумуляторных батарей / Н. А. Шамарова // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2022. Т. 14, № 1(53). С. 24-33. EDN LOJLRC.
5. Hesse H. C. Lithium-Ion Battery Storage for the Grid—A Review of Stationary Battery Storage System Design Tailored for Applications in Modern Power Grids / H. C. Hesse, M. Schimpe, D. Kucevic, A. Jossen // Energies. 2017. Vol. 10. DOI 10.3390/en10122107.
6. Булатов Ю. Н. Исследование режимов работы изолированной системы электроснабжения с управляемыми установками распределенной генерации, накопителями электроэнергии и двигательной нагрузкой / Ю. Н. Булатов, А. В. Крюков, К. В. Суслов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23, № 5. С. 184-194. DOI 10.30724/1998-9903-2021-23-5-184-194. EDN DUEYAC.

7. Dunn B. Electrical Energy Storage for the Grid: A Battery of Choices / B. Dunn, H. Kamath, J. M. Tarascon // *Science*. 2011. Vol. 334. P. 928–935.
8. Сайт журнала Energy [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.energymagazine.com.au> (дата обращения: 10.09.2025).
9. Илюшин П. В. Повышение надежности функционирования распределительных электрических сетей за счет эффективного применения систем накопления электроэнергии / П. В. Илюшин // Электроэнергия. Передача и распределение. 2022. № 6(75). С. 64–74.
10. Luo X. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation / X. Luo, J. Wang, M. Dooner, J. Clarke // *Appl. Energy*. 2015. Vol. 137. P. 511–536.
11. Li J. Research on Optimal Configuration Strategy of Energy Storage Capacity in Grid-Connected Microgrid / J. Li, Y. Xue, L. Tian, X. Yuan // Published in: *Protection and Control of Modern Power Systems*. 2017. Vol. 2. Iss. 4. P. 1 7. DOI 10.1186/s41601-017-0067-8.
12. Суворов А. А. Модернизация алгоритма виртуального синхронного генератора для управления системой накопления электроэнергии в микросети / А. А. Суворов, П. В. Илюшин // Электричество. 2024. № 7. С. 14-29.
13. Boya M. Exploring The Methods and Future Directions of Direct Electrical Energy Storage Systems: A Systematic Review / M. Boya, K. Tekaya, U. Spaeth, B. Schmuelling // 2025 International Conference on Clean Electrical Power. ICCEP 2025. 2025. DOI 10.1109/ICCEP65222.2025.11143769.
14. Непомнящий В. А. Новые подходы в обеспечении надежности электроснабжения потребителей электрической энергии / В. А. Непомнящий, П. В. Илюшин // Надежность и безопасность энергетики. 2013. № 4(23). С. 14-25. EDN PYRNRC.
15. Patsios C. An integrated approach for the analysis and control of grid connected energy storage systems / C. Patsios, B. Wu, E. Chatzinikolaou, D. J. Rogers, N. Wade, N. P. Brandon, P. Taylor // *J. Energy Storage*. 2016. Vol. 5. P. 48–61.
16. Илюшин П. В. Анализ опыта применения систем накопления электроэнергии для повышения гибкости электроэнергетических систем / П. В. Илюшин, И. Д. Георгиевский // Релейная защита и автоматизация. 2024. № 3(56). С. 46-54. EDN ZCOCPI.
17. Бойко Е. Е. Роль накопителей электрической и тепловой энергии в системах энергоснабжения / Е. Е. Бойко, Ф. Л. Бык, П. В. Илюшин, Л. С. Мышкина // Электрические станции. 2024. № 5(114). С. 50-57. DOI 10.34831/EP.2024.1114.5.006. EDN ANHAPD.
18. Папков Б. В. Smart grid: интеллектуальные сети - технология и применение. Часть 3 силовая электроника и хранение энергии / Б. В. Папков, П. В. Илюшин, А. Л. Куликов // Библиотечка электротехника. 2025. № 7-8 (319-320). С. 1-151.
19. Булатов Ю. Н. Согласованное управление накопителями электроэнергии и установкой распределенной генерации с прогностическими регуляторами в системе электроснабжения с пониженным качеством электроэнергии / Ю. Н. Булатов, А. В. Крюков, К. В. Суслов, В. В. Кижин // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2023. Т. 25, № 6. С. 3-13. DOI 10.30724/1998-9903-2023-25-6-3-13. EDN HQLXTA.
20. Харитонов М. С. Оценка эффективности использования накопителя энергии для регулирования электропотребления промышленных предприятий / М. С. Харитонов, Р. В. Зубавичюс, И. Е. Кажекин // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2023. Т. 15, № 3(59). С. 70-81. EDN IXUZKW.
21. Мельников В. Д. Проблемы, перспективы применения и методика расчета нормированной стоимости накопления электрической энергии / В. Д. Мельников, Г. Б. Нестеренко, Д. Е. Лебедев [и др.] // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2019. Т. 11, № 4(44). С. 30-36. EDN CJIUA.
22. Сердечный Д. В. Особенности эксплуатации накопителя энергии на базе многоэлементной литий-ионной аккумуляторной батареи / Д. В. Сердечный, Ю. Б. Томашевский // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. Т. 19, № 9-10. С. 140-145. EDN YPSXXR.
23. Смоленцев Н. И. Результаты разработки и экспериментальных исследований накопительного комплекса с накопителем энергии СПЭНЭ-1 / Н. И. Смоленцев, В. Ю. Бондарева // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2024. Т. 26, № 6. С. 121-131. DOI 10.30724/1998-9903-2024-26-6-121-131. EDN EMOQFG.
24. Савина Н. В. Накопители электрической энергии как средство повышения надёжности и экономичности функционирования электрической сети / Н. В. Савина, Л. Н. Лисогурская, И. А. Лисогурский // Международный научно-исследовательский журнал. 2020. № 2-1(92). С. 63–70.
25. Токарев И. С. Определение зависимости параметров системы накопления электроэнергии от степени выравнивания графика электрических нагрузок / И. С. Токарев, Я. Э. Шклярский, Т. В. Пудкова, А. Н. Назарычев // Электричество. 2024. № 9. С. 45-51. DOI 10.24160/0013-5380-2024-9-45-51. EDN GCGXYH.

26. Гусев Ю. П. Влияние накопителей электроэнергии на пропускную способность распределительных сетей напряжением 6-10 кВ / Ю. П. Гусев, П. В. Субботин // Электричество. 2018. № 1. С. 13-18. DOI 10.24160/0013-5380-2018-1-13-18. EDN ZXYUYN.
27. Воронин В. А. О возможном пути развития ЕЭС России на базе широкого использования накопителей энергии / В. А. Воронин, Д. Р. Любарский, С. Н. Макаровский, В. Н. Подъячев // Электрические станции. 2012. № 5. С. 14-19. EDN OYOLHT.
28. Солуянов Ю. И., Федотов А. И., Галицкий Ю. Я., и др. Актуализация нормативных значений удельной электрической нагрузки многоквартирных домов в Республике Татарстан / Ю. И. Солуянов, А. И. Федотов, Ю. Я. Галицкий и др. // Электричество. 2021. № 6. С. 62-71. DOI 10.24160/0013-5380-2021-6-62-71. EDN RRSRRX.
29. Солуянов Ю. И. Актуализация удельных электрических нагрузок многоквартирных жилых домов Москвы и Московской области / Ю. И. Солуянов, А. И. Федотов, А. Р. Ахметшин и др. // Электричество. 2023. № 7. С. 52-65. DOI 10.24160/0013-5380-2023-7-52-65. EDN IQAFRE.
30. Солуянов Ю. И. Анализ удельных электрических нагрузок коттеджных поселков / Ю. И. Солуянов, А. И. Федотов, А. Р. Ахметшин и др. // Электричество. 2024. № 4. С. 36-50. DOI 10.24160/0013-5380-2024-4-36-50.
31. Солуянов Ю. И. Выбор зарядных станций, согласованный с действующими системами электроснабжения многоквартирных домов и образовательных учреждений мегаполиса / Ю. И. Солуянов, А. И. Федотов, В. И. Солуянов и др. // Электричество. 2025. № 1. С. 32-44. DOI 10.24160/0013-5380-2025-1-32-44. EDN HOCOCV.
32. Федотов А. И. Совершенствование расчета электрической нагрузки многоквартирных домов по их удельной мощности / А. И. Федотов, А. Р. Ахметшин, Е. А. Федотов и др. // Электричество. 2025. № 5. С. 28-38. DOI 10.24160/0013-5380-2025-5-28-38. EDN XBSYUC.

Авторы публикации

Солуянов Юрий Иванович – д-р техн. наук, профессор, заслуженный профессор Казанского государственного энергетического университета, президент ООО Ассоциация «РЭМ», г. Москва, Россия, председатель совета директоров АО «Татэлектромонтаж». *soluyanov39@mail.ru*

Федотов Евгений Александрович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Электрические станции» им. В.К. Шибанова Казанского государственного энергетического университета, г. Казань, Россия. *eyfedotov2008@mail.ru*

Федотов Александр Иванович – д-р техн. наук, профессор, заслуженный профессор Казанского государственного энергетического университета, профессор кафедры «Электрические станции» им. В.К. Шибанова Казанского государственного энергетического университета, г. Казань, Россия. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4235-8038>. *fed.ai@mail.ru*

Ахметшин Азам Ринатович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Энергетическое машиностроение» Казанского государственного энергетического университета, г. Казань, Россия. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4424-7761>. *ahmetshin.ar@mail.ru*

Солуянов Владимир Иванович – ст. науч. сотр. ООО Ассоциация «РЭМ», г. Москва, Россия. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0004-7509>. *vs@tatem.ru*

References

1. Fedotov A. I. Use of electrochemical energy storage devices in autonomous power supply systems to reduce fuel consumption of power plants / A. I. Fedotov, E. A. Fedotov, A. F. Abdullazyanov // News of higher educational institutions. Problems of energy. 2021. Vol. 23, No. 1. pp. 3-17. DOI 10.30724/1998-9903-2021-23-1-3-17. EDN BITFGX.
2. Bakhteyev K. R. Creation of a high-power hybrid energy storage device to prevent short-term power supply outages for industrial consumers / K. R. Bakhteyev // News of higher educational institutions. Problems of energy. 2018. Vol. 20, No. 3-4. pp. 36-44. EDN XWBLRR.
3. Mushid F. C. Khan, M. F. Battery Energy Storage for Ancillary Services in Distribution Networks: Technologies Applications, and Deployment Challenges—A Comprehensive Review / F. C. Mushid, M. F. Khan // Energies. 2025. Vol. 18(20). Art. no. 5443. DOI 10.3390/en18205443.

4. Shamarova N. A. Analysis of methods for assessing the charge level of batteries / N. A. Shamarova // Bulletin of the Kazan State Power Engineering University. 2022. Vol. 14, No. 1(53). Pp. 24-33. EDN LOJLRC.
5. Hesse H. C. Lithium-Ion Battery Storage for the Grid—A Review of Stationary Battery Storage System Design Tailored for Applications in Modern Power Grids / H. C. Hesse, M. Schimpe, D. Kucevic, A. Jossen // Energies. 2017. Vol. 10. DOI 10.3390/en10122107.
6. Bulatov Yu. N. Study of Operating Modes of an Isolated Power Supply System with Controlled Distributed Generation Units, Electric Power Storage Systems, and a Motor Load / Yu. N. Bulatov, A. V. Kryukov, K. V. Suslov // News of Higher Educational Institutions. Problems of Energy. 2021. Vol. 23, No. 5. pp. 184-194. DOI 10.30724/1998-9903-2021-23-5-184-194. EDN DUEYAC.
7. Dunn B. Electrical Energy Storage for the Grid: A Battery of Choices / B. Dunn, H. Kamath, J. M. Tarascon // Science. 2011. Vol. 334. P. 928–935.
8. Energy magazine website [Electronic resource]. – URL: <http://www.energymagazine.com.au> (accessed: 10.09.2025).
9. Ilyushin P. V. Improving the reliability of distribution electric networks through the efficient use of electricity storage systems / P. V. Ilyushin // Electric Power. Transmission and Distribution. 2022. No. 6 (75). P. 64–74.
10. Luo X. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation / X. Luo, J. Wang, M. Dooner, J. Clarke // Appl. Energy. 2015. Vol. 137. P. 511–536.
11. Li J. Research on Optimal Configuration Strategy of Energy Storage Capacity in Grid-Connected Microgrid / J. Li, Y. Xue, L. Tian, X. Yuan // Published in: Protection and Control of Modern Power Systems. 2017. Vol. 2. Iss. 4. P. 1 7. DOI 10.1186/s41601-017-0067-8.
12. Suvorov A. A. Modernization of the virtual synchronous generator algorithm for controlling the electric power storage system in a microgrid / A. A. Suvorov, P. V. Ilyushin // Electricity. 2024. No. 7. Pp. 14-29.
13. Boya M. Exploring the Methods and Future Directions of Direct Electrical Energy Storage Systems: A Systematic Review / M. Boya, K. Tekaya, U. Spaeth, B. Schmuelling // 2025 International Conference on Clean Electrical Power. ICCEP 2025. 2025. DOI 10.1109/ICCEP5222.2025.11143769.
14. Nepomnyashchy V. A. New approaches to ensuring the reliability of power supply to consumers of electrical energy / V. A. Nepomnyashchy, P. V. Ilyushin // Reliability and safety of energy. 2013. No. 4(23). Pp. 14-25. EDN PYRNRC.
15. Patsios C. An integrated approach for the analysis and control of grid-connected energy storage systems / C. Patsios, B. Wu, E. Chatzinikolaou, D. J. Rogers, N. Wade, N. P. Brandon, P. Taylor // J. Energy Storage. 2016. Vol. 5. Pp. 48–61.
16. Ilyushin P. V. Analysis of the experience of using energy storage systems to increase the flexibility of electric power systems / P. V. Ilyushin, I. D. Georgievskiy // Relay protection and automation. 2024. No. 3(56). P. 46-54. EDN ZCOCPI.
17. Boyko E. E. The role of electric and thermal energy storage devices in power supply systems / E. E. Boyko, F. L. Byk, P. V. Ilyushin, L. S. Myshkina // Electric stations. 2024. No. 5(1114). P. 50-57. DOI 10.34831/EP.2024.1114.5.006. EDN ANHAPD.
18. Papkov B. V. Smart grid: intelligent networks - technology and application. Part 3. power electronics and energy storage / B. V. Papkov, P. V. Ilyushin, A. L. Kulikov // Library of electrical engineering. 2025. No. 7-8 (319-320). P. 1-151.
19. Bulatov Yu. N. Coordinated control of electricity storage units and a distributed generation unit with predictive controllers in a power supply system with reduced power quality / Yu. N. Bulatov, A. V. Kryukov, K. V. Suslov, V. V. Kizhin // News of higher educational institutions. Problems of energy. 2023. Vol. 25, No. 6. P. 3-13. DOI 10.30724/1998-9903-2023-25-6-3-13. EDN HQLXTA.
20. Kharitonov M. S. Evaluation of the efficiency of using energy storage to regulate electricity consumption of industrial enterprises / M. S. Kharitonov, R. V. Zubavichyus, I. E. Kazhekin // Bulletin of Kazan State Power Engineering University. 2023. Vol. 15, No. 3(59). Pp. 70-81. EDN IXUZKW.
21. Melnikov V. D. Problems, prospects of application and methodology for calculating the standardized cost of electrical energy storage / V. D. Melnikov, G. B. Nesterenko, D. E. Lebedev [et al.] // Bulletin of Kazan State Power Engineering University. 2019. Vol. 11, No. 4(44). Pp. 30-36. EDN CJGIUA.
22. Serdechny D. V. Features of Operation of an Energy Storage Unit Based on a Multi-Element Lithium-Ion Battery / D. V. Serdechny, Yu. B. Tomashevsky // News of Higher Educational Institutions. Problems of Power Engineering. 2017. Vol. 19, No. 9-10. Pp. 140-145. EDN YPSXXR.
23. Smolentsev N. I. Results of the Development and Experimental Studies of the Storage Complex with the SPENE-1 Energy Storage Unit / N. I. Smolentsev, V. Yu. Bondareva // News of Higher Educational Institutions. Problems of Power Engineering. 2024. Vol. 26, No. 6. Pp. 121-131. DOI 10.30724/1998-9903-2024-26-6-121-131. EDN EMOQFG.

24. Savina N. V. Electric energy storage devices as a means of increasing the reliability and efficiency of electrical grid operation / N. V. Savina, L. N. Lisogurskaya, I. A. Lisogursky // International Research Journal. 2020. No. 2-1 (92). Pp. 63–70.
25. Tokarev I. S. Determining the dependence of the parameters of an electric energy storage system on the degree of alignment of the electrical load schedule / I. S. Tokarev, Ya. E. Shklyarsky, T. V. Pudkova, A. N. Nazarichev // Electricity. 2024. No. 9. Pp. 45–51. DOI 10.24160/0013-5380-2024-9-45-51. EDN GCGXYH.
26. Gusev Yu. P. The Impact of Electric Power Storage Devices on the Capacity of 6-10 kV Distribution Networks / Yu. P. Gusev, P. V. Subbotin // Electricity. 2018. No. 1. pp. 13-18. DOI 10.24160/0013-5380-2018-1-13-18. EDN ZXYUYN.
27. Voronin V. A. On a Possible Path of Development of the Unified Energy System of Russia Based on the Widespread Use of Energy Storage Devices / V. A. Voronin, D. R. Lyubarsky, S. N. Makarovsky, V. N. Pod'yachev // Electric Power Stations. 2012. No. 5. pp. 14-19. EDN OYOLHT.
28. Soluyanov Yu. I., Fedotov A. I., Galitsky Yu. Ya., et al. Updating the standard values of the specific electrical load of apartment buildings in the Republic of Tatarstan / Yu. I. Soluyanov, A. I. Fedotov, Yu. Ya. Galitsky, et al. // Electricity. 2021. No. 6. pp. 62-71. DOI 10.24160/0013-5380-2021-6-62-71. EDN RRSRRX.
29. Soluyanov Yu. I. Updating the specific electrical loads of apartment buildings in Moscow and the Moscow region / Yu. I. Soluyanov, A. I. Fedotov, A. R. Akhmetshin, et al. // Electricity. 2023. No. 7. pp. 52-65. DOI 10.24160/0013-5380-2023-7-52-65. EDN IQAFRE.
30. Soluyanov Yu. I. Analysis of specific electrical loads of cottage villages / Yu. I. Soluyanov, A. I. Fedotov, A. R. Akhmetshin, et al. // Electricity. 2024. No. 4. pp. 36-50. DOI 10.24160/0013-5380-2024-4-36-50.
31. Soluyanov Yu. I. Selection of charging stations, coordinated with the existing power supply systems of apartment buildings and educational institutions of a megalopolis / Yu. I. Soluyanov, A. I. Fedotov, V. I. Soluyanov, et al. // Electricity. 2025. No. 1. P. 32-44. DOI 10.24160/0013-5380-2025-1-32-44. EDN HOCOCV.
32. Fedotov A. I. Improving the calculation of the electrical load of apartment buildings based on their specific power / A. I. Fedotov, A. R. Akhmetshin, E. A. Fedotov, et al. // Electricity. 2025. No. 5. P. 28-38. DOI 10.24160/0013-5380-2025-5-28-38. EDN XBSYUC.

Authors of the publication

Yuri I. Soluyanov – LLC "Association REM", Moscow, Russia. *soluyanov39@mail.ru*

Eugenii A. Fedotov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. *evfedotov2008@mail.ru*

Alexander I. Fedotov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. *ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4235-8038. fed.ai@mail.ru*

Azat R. Akhmetshin – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. *ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4424-7761. ahmetshin.ar@mail.ru*

Vladimir I. Soluyanov – LLC "Association REM", Moscow, Russia. *ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0004-7509. vs@tatem.ru*

Шифр научной специальности: 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Получено *25.08.2025 г.*

Отредактировано *24.09.2025 г.*

Принято *15.10.2025 г.*