

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Жилин Е.В.^{1,3}, Долгаль С.В.², Малышева А.Д.³

¹НИТУ МИСИС, г. Москва

² Филиал ПАО «Россети Центр» – «Воронежэнерго», г. Воронеж

³БГТУ им. В.Г. Шухова, г. Белгород

Аннотация

В работе исследуется возможность использования накопителей электроэнергии различных типов в энергетических системах. Проводится сравнительный анализ таких типов накопителей как: электрохимические, электрические, электромагнитные, механические. Анализируются свойства свинцово-кислотных, никель-кадмиевых, натрий-серных, литий-ионных аккумуляторов, суперконденсаторов, сверхпроводящих магнитов, кинетических накопителей с выявлением преимуществ и недостатков их использования; рассматриваются области их применения. Рассматривается возможность интеграции накопителей с возобновляемыми источниками энергии. Выполняется анализ усредненных графиков нагрузки для зимнего и летнего периодов; обосновывается актуальность использования накопителя для сглаживания пиков графиков нагрузки потребления. Предлагается схемное решение подключения накопителя электроэнергии с системой управления для сети электроснабжения среднего класса напряжения. Подключение накопителя в такой системе предусмотрено на стороне 0,4 кВ с использованием преобразовательных устройств. Использование AC-DC преобразователя с системой управления в такой системе осуществляет регулирование потоков активной мощности с тем, выполняя двустороннее преобразование энергии в случае накопления энергии накопителем и отдачи энергии в сеть.

Ключевые слова: накопитель электроэнергии, система управления накопителем, альтернативная энергетика, возобновляемые источники энергии, повышение энергоэффективности, система электроснабжения.

THE PERSPECTIVES OF ELECTRIC POWER STORAGE DEVICES USING IN ENERGY SYSTEMS

Evgenij Zhilin^{1,3}, Stanislav Dolgal², Alvina Malysheva³

¹National University of Science and Technology «MISIS», Russia, Moscow

²PJSC «Rosseti Center «Voronezhenergo», Voronezh

³Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod

Abstract

This paper explores the possibility of using different types of electric power storage devices in energy systems. A comparative analysis of such types of storage devices as: electrochemical, electrical, electromagnetic, mechanical. The properties of lead-acid, nickel-cadmium, sodium-sulfur, lithium-ion batteries, supercapacitors, superconducting magnets, kinetic storage devices are analyzed with the identification of advantages and disadvantages of their use; the fields of their application are considered. The possibility of integrating storage devices with renewable energy sources is being considered. The analysis of the averaged load schedules for the winter and summer periods is performed; the feasibility of using the drive to smooth out the peaks of the consumption load schedules is justified. A schematic solution for connecting an electric power storage device with a control system for a medium-voltage power supply network is proposed. The connection of the drive in such a system is provided on the 0.4 kV side using converter devices. The using of an AC-DC converter with a control system in such a system regulates the flows of active power in order to perform a two-way



energy conversion in the case of energy accumulation by the storage device and energy return to the network.

Keywords: alternative energy, renewable energy sources, energy storage, energy efficiency improvement, power supply system, storage management system.

Введение

В современном мире, охваченном стремительным развитием технологий и повышенным спросом на энергию, проблема эффективного хранения и использования электроэнергии становится одним из ключевых вопросов энергетики [1, 2]. Энергетические системы сталкиваются с вызовами, связанными с внедрением в производство энергии возобновляемых источников, которые являются причиной нестабильности в сетях электроснабжения, и потребительскими требованиями к поставкам энергии [3]. В этом контексте роль накопителей электроэнергии становится все более важной и актуальной [4].

Накопители электроэнергии представляют собой технологические системы, предназначенные для сбора и хранения электрической энергии с целью последующего ее использования. Их внедрение в энергетические системы может значительно улучшить энергоэффективность системы электроснабжения, обеспечить стабильность в энергосистеме и смягчить воздействие периодов пониженной генерации [5].

Цель исследования – провести анализ различных типов и перспектив применения накопителей электроэнергии в электроэнергетических системах.

Существует множество различных технологий накопления электроэнергии, каждая из которых обладает своими преимуществами и недостатками [6-9]. Наиболее распространенные типы систем накопления электроэнергии представлены на рис. 1.

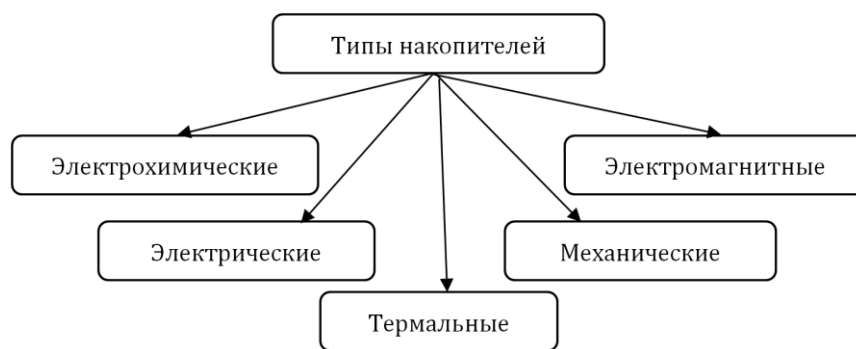


Рис. 1. Типы накопителей электроэнергии

В табл. 1 приведены характеристики различных типов накопителей электроэнергии; выполнено сравнение их химических и физических свойств.

К электрохимическим накопителям относится один из самых распространенных и широко используемых типов накопителей электроэнергии – литий-ионные аккумуляторные батареи [10]. При малых массо-габаритных показателях они характеризуются простотой управления; обеспечивают высокую энергетическую плотность и длительный срок службы (табл. 1). Такие аккумуляторы нашли широкое применение в электромобилях, портативных устройствах и стационарных энергетических системах. Свинцово-кислотные аккумуляторные батареи также используются для хранения электрической энергии, но имеют ограничения по своей массе и объему [11, 12].

Суперконденсаторы обладают высокой мощностью и длительным сроком службы за счет устойчивости к большим токам, а также способны осуществлять быстрый перезаряд. Этот тип накопителей находит свое применение в сфере транспорта, особенно в тех случаях, когда требуется эффективное управление энергией во время торможения и ускорения. Графеновые суперконденсаторы обладают высокой плотностью энергии и способны поддерживать высокую мощность, что делает их идеальными для электрических транспортных средств [13, 14].



Таблица 1

Характеристики накопителей электроэнергии

Тип накопителя	Преимущества	Недостатки
1. Электрохимические аккумуляторы		
Свинцово-кислотные (Lead-Acid)	– относительно низкая скорость саморазряда	– низкая энергетическая плотность (Вт·ч/л); – опасные материалы
Никель-кадмиевые (Ni-Cd)	– высокая энергетическая плотность (Вт·ч/л); – широкий температурный диапазон эксплуатации	– крупногабаритные; – пожароопасны; – высокий уровень саморазряда
Натрий-серные (Sodium-sulfur)	– высокая энергетическая плотность (Вт·ч/л); – быстрая реакция системы на внешнее воздействие; – большое количество рабочих циклов	– пожарная опасность расплавленного натрия;
Литий-ионные (Li-Ion)	– высокая энергетическая плотность (до 400 Вт·ч/л); – большее количество рабочих циклов в сравнении с другими типами АКБ	– относительно высокая стоимость; – возможность перегрева
2. Электрические		
Суперконденсаторы	– неограниченное число рабочих циклов; – выдерживают большие токи	– достаточно высокая стоимость; – высокая скорость саморазряда; – низкая удельная плотность энергии (Дж/кг)
3. Электромагнитные		
Сверхпроводящие магниты и катушки	– быстрая отдача накопленной энергии; – высокая скорость перезаряда; – долгий срок эксплуатации	– низкая плотность энергии (Вт·ч/л); – высокая стоимость сверхпроводящих материалов
4. Механические		
Кинетические накопители	– быстрая реакция системы на внешнее воздействие; – низкие требования в техническом обслуживании; – долгий срок эксплуатации	– крупногабаритные; – переменная скорость вращения по мере отдачи энергии; – дополнительные требования к точности регулирования
5. Термальные		
Тепловые аккумуляторы переменной температуры	– линейный процесс изменения температуры при процессах перезаряда; – высокая теплопроводность ($> 0,3 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$); – полная обратимость в течение всего срока службы накопителя	– зависимость от физических свойств среды хранения (материала); – ограниченные температурные диапазоны (в сравнении с электрохимическим типом)
Латентные	– высокая плотность энергии (Вт·ч/л)	– высокая стоимость системы; – возможность переохлаждения; – низкая теплопроводность



Сверхпроводящие магниты накапливают энергию магнитного поля, создаваемого током, который циркулирует в сверхпроводящей катушке. При температурах ниже критического значения перехода электрическое сопротивление сверхпроводника падает до нуля, что позволяет магниту пропускать большие токи без омических потерь. При зарядке устройства ток увеличивается, что приводит к увеличению плотности магнитного поля, и наоборот. Помимо катушки, устройство электромагнитного накопителя включает в себя холодильную подсистему, блок кондиционирования электроэнергии, а также подсистему мониторинга и управления. Такая система обладает высоким КПД (до 95%), длительным сроком службы (более 100 000 циклов), высокой удельной мощностью (более 2000 Вт/кг для сверхпроводящих магнитов) и быстрым временем отклика (до 1 мс). Это делает ее подходящим решением для систем с высокой мощностью и быстрым временем отклика (систем повышения качества и стабильности питания, источников бесперебойного питания и энергетических сетей [15]).

Принцип работы кинетического накопителя (маховика) основан на механической инерции вращающегося тела; кинетическая энергия накапливается в роторе, который, представляет собой большой вращающийся цилиндр, изготовленный из композитных материалов или сплава. В некоторых случаях ротор может представлять собой ленту, намотанную в направлении вращения [16].

Термальные накопители используют различные тепловые процессы для хранения энергии. Это может быть тепловое хранение в материалах с фазовыми переходами, тепловые насосы или системы теплового аккумулирования. Такие накопители часто применяются в системах с возобновляемыми источниками, для генерации в сеть электроэнергии и тепла [17].

Одним из перспективных направлений является сочетание накопителей электроэнергии с возобновляемыми источниками электрической энергии. Солнечные батареи эффективно выполняют одностороннее преобразование, но их основной недостаток заключается в непостоянстве выработки энергии в течение дня из-за внешних факторов, к примеру, таких как облачность. Внедрение накопителей решает эту проблему, аккумулируя избыточную энергию в периоды высокой продуктивности и отдавая ее в сеть в периоды низкой продуктивности солнечных батарей. Еще одним направлением является интеграция накопителей с ветрогенераторами. Подобно солнечным батареям, ветрогенераторы генерируют переменную энергию, и использование накопителей позволяет сбалансировать динамические процессы при производстве электроэнергии, обеспечивая стабильность в энергетической системе [18].

Несмотря на такие недостатки литий-ионных аккумуляторных батарей как высокая стоимость, подверженность перегреву и возможность внутренних коротких замыканий при процессе перезаряда, данный тип аккумуляторных батарей получил наиболее широкое распространение в энергетических системах.

Материалы и методы

Использование накопителей электроэнергии в энергетических системах позволяет модернизировать сеть электроснабжения без реконструкции сети, а также решить проблему с часами повышенного спроса на электроэнергию.

Применение накопителей электроэнергии способствует сглаживанию пиков потребления графиков нагрузки (рис. 1), повышению устойчивости переходных процессов в системах электроснабжения [19].

На графиках нагрузки сети электроснабжения (рис. 1) можно выделить неравномерные участки; характер потребления резкопеременный; имеют место резкое увеличение и провалы.



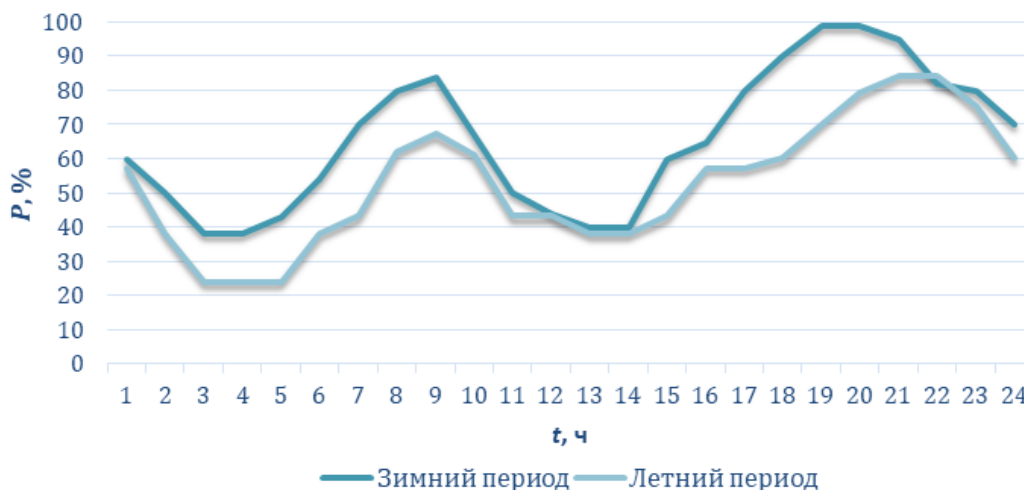


Рис. 1. Усредненные почасовые значения потребления электрической мощности в сети электроснабжения в зимний и летний периоды

Для рис. 1 можно определить коэффициент неравномерности графиков нагрузки как¹:

$$\alpha = P_{\min}/P_{\max}, \quad (1)$$

где $P_{\min}$, $P_{\max}$ – минимальное значение мощности потребления суточного графика нагрузки, %; – максимальное значение мощности потребления суточного графика нагрузки, %.

Для использования накопителя электроэнергии в качестве устройства хранения энергии в составе энергетической системы необходимо выполнить анализ определенных технических параметров накопителя, таких как:

- номинальная емкость (А·ч);
- номинальное выходное напряжение (В);
- максимальный выходной ток (А);
- количество рабочих циклов (шт).

Исходя из вышеприведенных параметров выбирается накопитель согласно требованиям и характеристикам энергетической системы.

В данной работе анализ возможности подключения накопителя электроэнергии к энергетической системе выполнен для сети электроснабжения 10/0,4 кВ. На рис. 2 приведен участок схемы электроснабжения сети 10 кВ с подключенным накопителем электроэнергии.

Как показано на схеме электроснабжения (рис. 2) подключение накопителя электроэнергии, представленного литий-ионной аккумуляторной батареей АБ, выполняется на стороне 0,4 кВ посредством AC-DC преобразователя с системой управления СУ (рис. 3), которая синхронизирует работу накопителей электроэнергии с сетью. Преобразователь энергии используется для преобразования энергии переменного тока в постоянный в случае накопления энергии накопителем; и обратного преобразования в случае отдачи энергии в сеть для питания бытовых и электротехнических устройств. Принцип работы системы управления накопителем электроэнергии заключается в том, чтобы максимизировать эффективность использования накопителя и обеспечить его надежную работу.

¹ ГОСТ 19431-2023. Энергетика и электрификация. Термины и определения. Введ. в действие Приказом Росстандарта от 24 октября 2023 г. № 1218-ст: взамен ГОСТ 19431-84: дата введ. 1 декабря 2023 г. – 12 с.



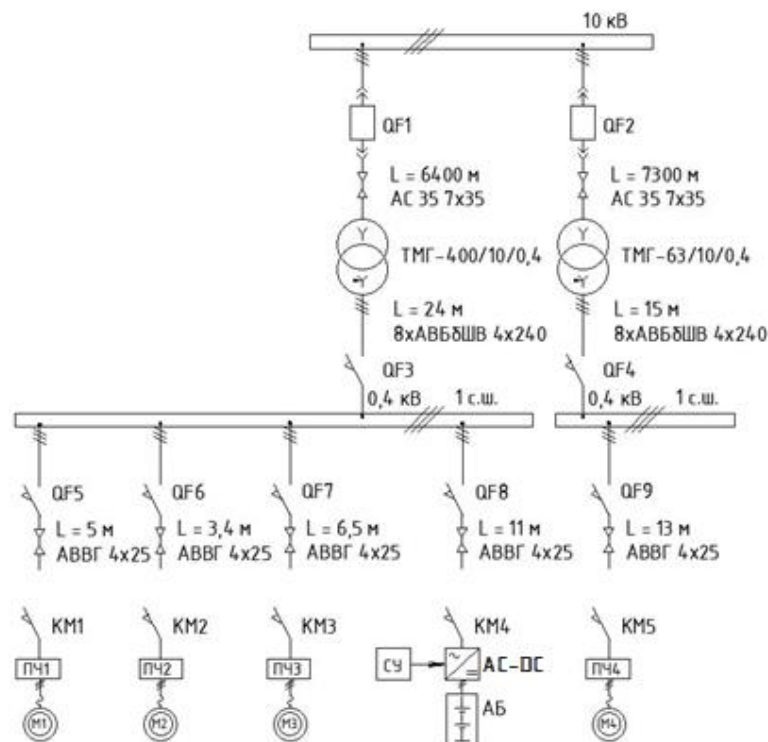


Рис. 2. Схема электроснабжения сети 10 кВ с подключенным накопителем электроэнергии

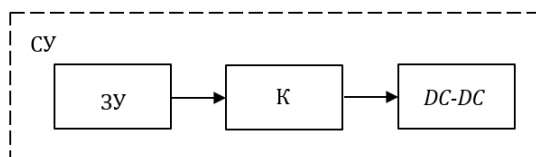


Рис. 3. Устройство системы управления

Система управления накопителями электроэнергии, представленная на рис. 3, включает в себя следующие элементы: зарядное устройство ЗУ, контроллер управления К и *DC-DC*-преобразователь, который выполняет функцию синхронизации накопителя с сетью 0,4 кВ по напряжению. Зарядное устройство заряжает накопитель от источника электропитания – сети электроснабжения. Контроллер управления является центральным устройством системы управления накопителем электроэнергии. Он состоит из микроконтроллера, датчиков, программируемой логики и соединительных интерфейсов. Контроллер собирает данные от датчиков о состоянии накопителя, управляет работой инвертора и зарядного устройства, а также принимает решения об оптимальном использовании накопителя в соответствии с требованиями системы. Контроллер управления отслеживает состояние накопителя и определяет, когда его следует заряжать, а когда – использовать сохраненную энергию. Он также осуществляет управление потреблением энергии в системе, чтобы снизить пиковые нагрузки и улучшить качество электроснабжения.

Результаты

Растущее использование накопителей электроэнергии в течение последнего десятилетия привело к совершенствованию технологий, топологий и методов управления накопителями. Основываясь на проведенных исследованиях, можно сделать вывод



о некоторых очевидных и других более спорных тенденциях. Несмотря на то, что электрохимические накопители хорошо зарекомендовала себя в энергосистемах, все еще существуют некоторые проблемы, которые необходимо решить при их использовании в энергетических системах. Наблюдается растущая тенденция в использовании литий-ионных аккумуляторных батарей в качестве элемента управляемой системы накопления электроэнергии из-за их длительного срока службы и высокой энергетической плотности. Использование свинцово-кислотных никель-кадмиевых и натрий-серных аккумуляторных батарей для энергетических систем большой мощности не представляется возможным из-за их пожароопасности аккумуляторов данных типов.

Использование суперконденсаторов для накопления энергии в энергетических системах наибольший интерес представляет при совместном использовании с другим типом накопителя, к примеру, таким как литий-ионный аккумулятор.

Для заключения о влиянии каждого из типов накопителей на энергетическую систему необходимо проведение дополнительного исследования. Анализ характеристик накопителей (табл. 2) показал наиболее доступным и эффективным к использованию литий-ионный тип аккумуляторных батарей.

Выводы

В статье были рассмотрены различные типы накопителей электроэнергии, такие как электрохимические, электрические, электромагнитные, механические и тепловые системы. Исследование этих технологий является ключевым шагом в создании более эффективных и универсальных энергетических систем.

Особое внимание уделено системам управления, регулирующим процессы заряда, разряда и хранения электроэнергии. Эффективные системы управления являются критическим компонентом для обеспечения надежной и стабильной работы накопителей. Для максимизации производительности и продолжительности службы накопителей необходимо совершенствовать системы управления. Это включает в себя разработку более точных алгоритмов, способных адаптироваться к изменяющимся условиям и эффективно реагировать на динамику потребления электроэнергии.

Для детального исследования процессов взаимодействия накопителей с энергетическими системами необходимо применение имитационного моделирования. Использование современных инструментов моделирования позволяет предсказывать поведение системы в различных сценариях и оптимизировать ее работу.

Развитие систем управления также направлено на повышение устойчивости и надежности работы накопителей электроэнергии. Это необходимо для обеспечения синхронизации их с сетью, стабильности энергосистем и удовлетворения роста потребления нагрузок.

Библиографический список

1. Соснина Е.Н., Шалухо А.В., Эрдили Н.И. Повышение эффективности использования возобновляемых источников энергии в составе виртуальной электростанции на основе мультитентного управления // Вестник Чувашского университета. – 2022. – № 3. – С. 103-113. DOI: [10.47026/1810-1909-2022-3-103-113](https://doi.org/10.47026/1810-1909-2022-3-103-113). EDN: [HDVPGG](https://www.edn.ru/HDVPGG)
2. Белоусов А.В., Жилин Е.В., Прасол Д.А. Разработка имитационной модели распределительной электрической сети 10 кВ для исследования возможности применения систем накопления электроэнергии с целью повышения энергоэффективности // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2022. – № 10. – С. 45-54. EDN: [UHUTFS](https://www.edn.ru/UHUTFS)
3. Анализ влияния возобновляемых источников энергии с силовыми преобразователями на процессы в современных энергосистемах / Н.Ю. Рубан, А.Б. Аскаров, М.В. Андреев и др. // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета.



- Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2020. – № 36. – С. 7-30. DOI: [10.15593/2224-9397/2020.4.01](https://doi.org/10.15593/2224-9397/2020.4.01). EDN: [WNUSQG](https://www.edn.ru/wnusqg)
4. Доброго К.В. К вопросу создания гибридных систем накопления электроэнергии // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2023. – Т. 66, № 3. – С. 215-232. DOI: [10.21122/1029-7448-2023-66-3-215-232](https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-3-215-232). EDN: [AVOTey](https://www.edn.ru/avotey)
 5. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Суслов К.В. Исследование режимов работы изолированной системы электроснабжения с управляемыми установками распределенной генерации, накопителями электроэнергии и двигательной нагрузкой // Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23, № 5. – С. 184-194. DOI: [10.30724/1998-9903-2021-23-5-184-194](https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-5-184-194). EDN: [DUEYAC](https://www.edn.ru/dueyac)
 6. Eroğlu F., Kurtoglu M., Vural A. M. Bidirectional DC–DC converter based multilevel battery storage systems for electric vehicle and large-scale grid applications: A critical review considering different topologies, state-of-charge balancing and future trends // IET Renewable Power Generation. – 2021. – Vol. 15, Is. 4. – P. 915-938. DOI: [10.1049/rpg2.12042](https://doi.org/10.1049/rpg2.12042)
 7. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Суслов К.В. Изолированная система электроснабжения с энергетическими роутерами и возобновляемыми источниками // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. – 2021. – Т. 24, № 2. – С. 124-134. DOI: [10.22213/2413-1172-2021-2-124-134](https://doi.org/10.22213/2413-1172-2021-2-124-134). EDN: [VUQWJO](https://www.edn.ru/vuqwjo)
 8. Мухаметова Л.Р., Ахметова И.Г., Стриелковски В. Инновации в области хранения энергии // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2019. – Т. 21, № 4. – С. 33-40. DOI: [10.30724/1998-9903-2019-21-4-33-40](https://doi.org/10.30724/1998-9903-2019-21-4-33-40). EDN: [KXSNJW](https://www.edn.ru/kxsnjw)
 9. Beeker É., Lavergne R. Le stockage de l'électricité: la solution à l'intégration des EnR intermittentes? // Annales des Mines-Responsabilité et environnement. – 2019. – Vol. 93, Is. 1. – P. 33-40. DOI: [10.3917/re1.093.0033](https://doi.org/10.3917/re1.093.0033)
 10. Electrochemical energy storage devices working in extreme conditions / M. Chen, Y. Zhang, G. Xing et al. // Energy & Environmental Science. – 2021. – Vol. 14, Is. 6. – P. 3323-3351. DOI: [10.1039/D1EE00271F](https://doi.org/10.1039/D1EE00271F)
 11. Yudhistira R., Khatiwada D., Sanchez F. A comparative life cycle assessment of lithium-ion and lead-acid batteries for grid energy storage // Journal of Cleaner Production. – 2022. – Vol. 358. – P. 13199. DOI: [10.1016/j.jclepro.2022.131999](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131999)
 12. A new dual-ion hybrid energy storage system with energy density comparable to that of ternary lithium ion batteries / He S., Wang S., Chen H. et al. // Journal of Materials Chemistry A. – 2020. – Vol 8, Is. 5. – P. 2571-2580. DOI: [10.1039/C9TA12660K](https://doi.org/10.1039/C9TA12660K)
 13. Yang Z., Zhu F., Lin F. Deep-reinforcement-learning-based energy management strategy for supercapacitor energy storage systems in urban rail transit // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2020. – Vol. 22, Is. 2. – P. 1150-1160. DOI: [10.1109/IESES53571.2023.10253686](https://doi.org/10.1109/IESES53571.2023.10253686)
 14. Korkmaz S., Kariper İ. A. Graphene and graphene oxide based aerogels: Synthesis, characteristics and supercapacitor applications // Journal of Energy Storage. – 2020. – Vol. 27. – P. 101038. DOI: [10.1109/IESES53571.2023.10253686](https://doi.org/10.1109/IESES53571.2023.10253686)
 15. Zimmermann A.W., Sharkh S.M. Design of a 1 MJ/100 kW high temperature superconducting magnet for energy storage // Energy Reports. – 2020. – Vol. 6. – P. 180-188. DOI: [10.1016/j.egyr.2020.03.023](https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.03.023)
 16. Andriyanov S.D., Zhuravleva L.A. Electric Drive of Kinetic Energy Storage // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). – Vladivostok: IEEE, 2020. – P. 9271185. DOI: [10.1109/FarEastCon50210.2020.9271185](https://doi.org/10.1109/FarEastCon50210.2020.9271185). EDN: [FGJKCW](https://www.edn.ru/fgjkcw)
 17. Latent thermal energy storage technologies and applications: A review / H. Jouhara, A. Żabnieńska-Góra, N. Khordeghah et al. // International Journal of Thermofluids. – 2020. – Vol. 5. – P. 100039. DOI: [10.1016/j.ijft.2020.100039](https://doi.org/10.1016/j.ijft.2020.100039)
 18. Юферев Л.Ю. Разработка базового источника напряжения для микросети на возобновляемых источниках энергии // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. – 2021. – Том 68, № 1(42). – С. 39-43. DOI: [10.22314/2658-4859-2021-68-1-39-43](https://doi.org/10.22314/2658-4859-2021-68-1-39-43). EDN: [LEOYXT](https://www.edn.ru/leoyxt)



19. Рыжова Е.Л. Повышение энергоэффективности на железнодорожном транспорте путем применения систем накопления энергии // Интеллектуальная электротехника. – 2023. – № 2(22). – С. 36-48. DOI: [10.46960/2658-6754_2023_2_36](https://doi.org/10.46960/2658-6754_2023_2_36). EDN: [BIOAFN](https://www.edn.ru/BIOAFN)

References

- Sosnina, E. N., Shaluho, A. V., & Jerdili, N. I. (2022). Povyshenie jeffektivnosti ispol'zovaniya vozobnovljaemyh istochnikov jenerгии v sostave virtual'noj jelektrostantsii na osnove mul'tia-gentnogo upravlenija [Increasing the efficiency of using renewable energy sources as part of a virtual power plant based on multi-agent control]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 3, 103-113. <https://doi.org/10.47026/1810-1909-2022-3-103-113> [In Russian]
- Belousov, A. V., Zhilin, E. V., & Prasol D. A. (2022). Razrabotka imitacionnoj modeli raspredeli-tel'noj jelektricheskoy seti 10 kV dlja issledovaniya vozmozhnosti primeneniya sistem nakoplenija jel-ektroenerгии s cel'ju povysheniya jenergojeffektivnosti [Development of a simulation model of a 10 kV electrical distribution network to study the possibility of using electricity storage systems to improve energy efficiency]. *Jelektroobo-rudovanie: jekspluatacija i remont*, No 10, 45-54. [In Russian]
- Ruban, N. Ju., Askarov, A. B., Andreev, M. V., Kievec, A. V., & Rudnik, V. E. (2020). Analiz vlijanija vozobnovljaemyh istochnikov jenerгии s silovymi preobrazovateljami na processy v sovremen-nyh jenergosistemah [Analysis of the influence of renewable energy sources with power con-verters on processes in modern energy systems]. *Vestnik Permskogo nacional'nogo issle-dovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. Jelektrotehnika, informacionnye tehnologii, sistemy upravlenija*, 36, 7-30. <https://doi.org/10.15593/2224-9397/2020.4.01> [In Russian]
- Dobrego K. B. (2023). K voprosu sozdaniya gibridnyh sistem nakoplenija jelektroenerгии [On the is-sue of creating hybrid electricity storage systems]. *Jenergetika. Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij i jenergeticheskikh ob#edinenij SNG*, 66(3), 215-232. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-3-215-232> [In Russian]
- Bulatov, Ju. N., Krjukov, A. V., & Suslov, K. V. (2021). Issledovanie rezhimov raboty izolirovannoj sis-temy jelektrosnabzhenija s upravljaemymi ustanovkami raspredelennoj generacii, nakopiteljami jelektroenerгии i dvigatel'noj nagruzkoj [Study of operating modes of an isolated power supply system with controlled distributed generation installations, electricity storage devices and mo-tor load]. *Problemy jenergetiki*, 23(5), 184-194. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-5-184-194> [In Russian]
- Eroğlu, F., Kurtoğlu, M., & Vural, A.M. (2021). Bidirectional DC–DC converter based multilevel bat-tery storage systems for electric vehicle and large-scale grid applications: A critical review con-sidering different topologies, state-of-charge balancing and future trends. *IET Renewable Power Generation*, 15(5), 915-938. <https://doi.org/10.1049/rpg2.12042>
- Bulatov, Ju. N., Krjukov, A. V., & Suslov, K. V. (2021). Izolirovannaja sistema jelektrosnabzhenija s jenergeticheskimi routerami i vozobnovljaemymi istochnikami [Isolated power supply system with energy routers and renewable sources]. *Vestnik IzhGTU ime-ni M.T. Kalashnikova*, 24(2), 124-134. <https://doi.org/10.22213/2413-1172-2021-2-124-134> [In Russian]
- Muhametova L. R., Ahmetova I. G., & Strielkovski V. (2019). Innovacii v oblasti hraneniya jenerгии [In-novation in Energy Storage]. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Problemy jenergetiki*, 21(4), 33-40. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2019-21-4-33-40> [In Russian]
- Beeker, É., & Lavergne, R. (2019). Le stockage de l'électricité: la solution à l'intégration des EnR in-termittentes?. *Annales des Mines-Responsabilité et environnement*, 93(1), 33-40. <https://doi.org/10.3917/re1.093.0033> [In French]
- Chen, M., Zhang, Y., Xing, G., Chou, S. L., & Tang, Y. (2021). Electrochemical energy storage devices working in extreme conditions. *Energy & Environmental Science*, 14(6), 3323-3351. <https://doi.org/10.1039/D1EE00271F>
- Yudhistira, R., Khatiwada, D., & Sanchez, F. (2022). A comparative life cycle assessment of lithium-ion and lead-acid batteries for grid energy storage. *Journal of Cleaner Production*, 358, 131999.



<http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131999>

12. He, S., Wang, S., Chen, H., Hou, X., & Shao, Z. (2020). A new dual-ion hybrid energy storage system with energy density comparable to that of ternary lithium ion batteries. *Journal of Materials Chemistry A*, 8(5), 2571-2580. <https://doi.org/10.1039/C9TA12660K>
13. Yang, Z., Zhu, F., & Lin, F. (2020). Deep-reinforcement-learning-based energy management strategy for supercapacitor energy storage systems in urban rail transit. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 22(2), 1150-1160. <https://doi.org/10.1109/IESES53571.2023.10253686>
14. Korkmaz, S., & Kariper, İ. A. (2020). Graphene and graphene oxide based aerogels: Synthesis, characteristics and supercapacitor applications. *Journal of Energy Storage*, 27, 101038. <https://doi.org/10.1109/IESES53571.2023.10253686>
15. Zimmermann, A. W., & Sharkh, S. M. (2020). Design of a 1 MJ/100 kW high temperature superconducting magnet for energy storage. *Energy Reports*, 6, 180-188. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.03.023>
16. Andriyanov, S. D., & Zhuravleva, L. A. (2020, October). Electric Drive of Kinetic Energy Storage. In *2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)* (pp. 1-4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/FarEastCon50210.2020.9271185>
17. Jouhara, H., Żabnieńska-Góra, A., Khordehghah, N., Ahmad, D., & Lipinski, T. (2020). Latent thermal energy storage technologies and applications: A review. *International Journal of Thermofluids*, 5, 100039. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2020.100039>
18. Juferev L.Ju. (2021). Razrabotka bazovogo istochnika naprjazhenija dlja mikroseti na vozobnovljaemyh istochnikah jenerгии [Development of a basic voltage source for a microgrid using renewable energy sources]. *Jelektrotehnologii i jelectrooborudovanie v APK*, 68(1). 39-43. <https://doi.org/10.22314/2658-4859-2021-68-1-39-43> [In Russian]
19. Ryzhova E.L. (2023). Povyshenie jenergojeffektivnosti na zheleznodorozhnom transporte putem primeneniya sistem nakoplenija jenerгии [Increasing energy efficiency in railway transport through the use of energy storage systems]. *Intellectual'naja jelektrotehnika*, 2(22). 36-48. https://doi.org/10.46960/2658-6754_2023_2_36 [In Russian]

Сведения об авторах

Жилин Евгений Витальевич, канд. техн. наук, доцент, кафедра энергетики и энергоэффективности горной промышленности, Университет науки и технологий МИСИС, e-mail: zhilinevg@mail.ru.

Долгаль Станислав Владимирович, диспетчер, участок оперативного технологического управления основной сетью диспетчерской службы центра управления сетями, филиал ПАО «Россети Центр» – «Воронежэнерго».

Малышева Альвина Дмитриевна, аспирант, кафедра технической кибернетики, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, e-mail: kuznetsova.alvina@yandex.ru.

Authors about

Zhilin Evgeny Vitalievich, Cand. of Tech. Sciences, associate professor, Energy and Energy Efficiency of the Mining Industry Department, National University of Science and Technology «MISIS», e-mail: zhilinevg@mail.ru.

Dolgal Stanislav Vladimirovich, dispatcher, a site for operational technological management of the main network of the dispatching service of the network management center, PJSC «ROSSETI Center «Voronezhenergo».

Malysheva Alvina Dmitrievna postgraduate student, Technique Cybernetics Department, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, e-mail: kuznetsova.alvina@yandex.ru.

