

ЯДЕРНАЯ, РАДИАЦИОННАЯ И  
ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ  
NUCLEAR, RADIATION AND  
ENVIRONMENTAL SAFETY

УДК 621.311: 621.039.58  
DOI 10.26583/gns-2023-03-02  
EDN EOODDO



Перспективы применения систем накопления энергии в системах  
электрообеспечения собственных нужд АЭС

В.В. Карчин<sup>1</sup> , Е.В. Мельдин<sup>2</sup> , А.Н. Питев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Чебоксарский институт (филиал) московского политехнического университета, г. Чебоксары,  
Чувашская Республика, Россия

<sup>2</sup> Калининская атомная станция – филиал АО «Концерн Росэнергоатом»,  
г. Удомля, Тверская обл., Россия  
 evg-meldin@ya.ru

**Аннотация.** В настоящее время реализуется энергетическая стратегия, одной из черт которой является развитие атомной энергетики и увеличение доли энергоблоков атомных станций в составе генерирующих объектов энергосистемы страны. В связи со сложностью борьбы с последствиями аварий, безопасности эксплуатации атомных станций уделяется значительное внимание. Для поддержания работы систем безопасности в условиях потери внешнего энергоснабжения используются автономные источники питания – дизель-генераторные установки, однако их использование сопряжено с рядом трудностей эксплуатации и обслуживания, а развивающиеся в настоящее время технологии позволяют реализовывать новые процессы преобразований энергии. В статье выполнено сравнение современных систем накопления и преобразования энергии, основанных на различных физических принципах, а также выполнен анализ ключевых преимуществ и недостатков, присущих каждой технологии. Описаны эксплуатационные преимущества современных электрохимических систем накопления и их влияние на безопасность и оптимизацию циклов технического обслуживания и повышения степени интегрируемости в цифровые системы контроля и управления, а также повышение экономической эффективности генерации электроэнергии и маневренность при эксплуатации атомных энергоблоков. Сделаны выводы о возможности перспективного использования систем накопления электрической энергии в качестве экономически эффективной альтернативы существующим автономным источникам с учетом диверсификации и развития производств, а также их замыкания внутри предприятий государственной корпорации «Росатом».

**Ключевые слова:** надежность электрообеспечения, блэкаут, автономная система электрообеспечения, системы накопления энергии, статком, инверторы напряжения, безопасность АЭС, система плавного пуска, сглаживание пиков, оптимизация ТО.

**Для цитирования:** Карчин В.В., Мельдин Е.В., Питев А.Н. Перспективы применения систем накопления энергии в системах электрообеспечения собственных нужд АЭС. *Глобальная ядерная безопасность*. 2023;13(3):17–25. <https://doi.org/10.26583/gns-2023-03-02>

Prospects for the application of battery energy storage systems in NPP auxiliary power  
supply systems

Viktor V. Karchin<sup>1</sup> , Ievheniy V. Meldin<sup>2</sup> , Alexei N. Pitev<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Cheboksary Institute, Moscow Polytechnic University, Cheboksary, Chuvashia region, Russia

<sup>2</sup> Kalinin Nuclear Power Plant the branch of Rosenergoatom Concern JSC, Udomlya, Tver region, Russia  
 karchinvv@gmail.com

**Abstract.** One of the characteristics of energy strategy, which currently implementing is atomic energy elaboration and NPP development with rising part of atomic generation in national energy system. Of course one of the most important property of atomic generation is safety (Chernobyl, Three Mile Island, Fukushima Daiichi accidents). To maintain the operation of security systems in conditions of loss of external power supply, autonomous power sources - diesel-generator sets are used, but their use is associated with a number of difficulties of operation and maintenance, and currently developing technologies allow to realize new processes

of energy transformation. And on the other hand modern technologies are providing access to new energy saving technologies. In this article we will try to compare energy storage systems, which use different physical principles and try to review their advantages and particularities. Also we especially explore operational advantages of battery energy storage systems and their influence on atomic safety and maintenance cycles and also integrating to digital control system and more effective generation and flexibility during NPP operation with conclusion about new business for «Rosatom» company.

**Keywords:** power system reliability, blackout, independent power system, energy storage systems, STATCOM, multilevel voltage invertors, NPP safety, variable frequency drive, peaks smoothing, maintenance optimization.

**For citation:** Karchin V.V., Meldin I.V., Pitev A.N. Prospects for the application of battery energy storage systems in NPP auxiliary power supply systems. *Global nuclear safety*. 2023;13(3):17–25 (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/gns-2023-03-02>

## Введение

В настоящее время перспективным источником генерации электрической энергии для обеспечения жизнедеятельности населения и развития народного хозяйства являются атомные электростанции, позволяющие вырабатывать значительное количество электрической энергии и мощности при незначительном нарушении баланса окружающей среды. Однако незначительный урон окружающей среде в процессе безопасной генерации оборачивается возможностями значительного (если не сказать катастрофического) нарушения экологической безопасности при нарушении технологического процесса генерации. Отклонение в технологическом процессе, представляющее угрозу безопасности АЭС, вызывает срабатывание элементов систем безопасности, как, например, работа быстродействующих редуционных устройств, система аварийного впрыска бора и др. Хотя в системах безопасности атомных станций предусмотрены пассивные (не требующие вмешательства человека в исполнение защитных функций) элементы защиты (например, система управления и защиты реактора), но для комплексного выполнения функций (контроль технологических параметров, управление аварией и др.) необходимо наличие источников, обеспечивающих наличие электрической энергии при отсутствии электрической связи с энергосистемой. В настоящее время для автономной работы систем безопасности используются дизель-генераторные установки (ДГУ).

## Современное состояние вопроса

В настоящее время основным источником питания оборудования систем безопасности АЭС (в отечественной атомной промышленности) являются ДГУ – технические решения проектирования типовых (наиболее часто встречающихся в отечественной энергетике) атомных энергоблоков I поколения берут свое начало в работах ОКБ «Гидропресс» 1970-1980 гг. и учитывали реалии и передовые возможности того времени [1]. Их запуск и включение на нагрузку систем безопасности происходит по алгоритму ступенчатого пуска, основная суть которого в следующем:

- а) при потере напряжения собственных нужд происходит выделение канала системы аварийного электроснабжения на автономную работу;
- б) происходит запуск дизель-генератора и выход на номинальные параметры работы (~10-15 с.);
- в) взятие и несение нагрузки I ступени (особо ответственных потребителей первого контура и реакторного отделения);
- г) взятие и несение нагрузки II ступени (ответственных потребителей второго контура и систем обеспечения);
- д) взятие и несение нагрузки III ступени (ответственные потребители собственных нужд).

В настоящий момент после потери электроснабжения собственных нужд перерыв питания потребителей может достигать нескольких минут (в случае неуспешного первого запуска ДГУ), что является значительным промедлением при нарушениях технологических параметров первого контура. Использование автономных систем на основе преобразования энергии дизельного топлива в электрическую обладает как рядом преимуществ, так и недостатками (табл. 1).

Таблица 1. Преимущества и недостатки использования автономных систем на основе преобразования энергии дизельного топлива в электрическую

Table 1. Advantages and disadvantages of using autonomous systems based on diesel-to-electric energy conversion

№	Преимущества	Недостатки
1	– полная автономность работы дизельного генератора (для работы необходимы только рабочие среды, при возможности подвоза топлива и отсутствии аварийных ситуаций в системе водяного охлаждения, а также сети собственных нужд предел работы практически неограничен)	– усложнение генераторной системы из-за наличия множественных системных связей в установке (подача топлива для работы двигателя, воздуха для поддержания процесса горения топлива, подача тех. воды для обеспечения корректного теплового режима работы установки, электрической энергии от постороннего источника\подсистемы для поддержания работоспособности системы управления и возбуждения генератора) и трудоемкость обслуживания и поддержания установки в режиме готовности
2	– высокая перегрузочная способность ДГУ, связанная с электромеханическим устройством генератора	– как следствие – снижение надежности системы (часты явления отказов запуска ДГУ из-за отсутствия или неприемлемых значений параметров одной из необходимых рабочих сред)
3	– надежность электрической части генераторной установки	– низкий КПД дизельных двигателей (50-70%)
4	-	– наличие значительных последствий при возникновении пожара в системе ДГУ, а, следовательно, необходимость усиленного контроля и управления рисками при эксплуатации дизельных систем
5	-	– экологические последствия от сжигания значительного количества дизельного топлива

Подробный анализ систем ДГУ проведен в работе М. Джанг и др. «Моделирование и анализ надежности на этапе проектирования дизельного двигателя на основе технологии интеграции 4F» [2], результаты которой выделяют более чем один режим отказа в каждой механической подсистеме ДГУ. В исследовании «Анализ режимов, последствий и критичности отказов (FMECA) механических подсистем дизель-генератора на АЭС» [3] авторы описывают примеры и последствия отказов ДГУ САЭ.

### Перспективные решения для обеспечения надежного электроснабжения

В настоящее время получают все большее применение и развитие системы накопления энергии (СНЭ), основанные на преобразовании в электрическую энергию энергий различного типа: а) энергии сжатого воздуха (Compressed Air Energy System); б) энергии жидкого воздуха (Liquid Air Energy System); в) химической энергии, запасенной в аккумуляторах или энергию электрического поля, запасаемую в т.н. суперконденсаторах (ионисторах). А также ее хранение и высвобождение (обратное преобразование) в необходимые моменты.

Основными компонентами пневмокомпрессионных систем являются механизмы накопления воздуха – как правило это насосы, закачивающие воздух, а также

резервуары, в которых выполняется его сжатие и хранение, а затем (в необходимые моменты времени) выпуск воздуха и приведение в движение турбины, воздействующей на генератор и получение электрической энергии [4,5]. Аналогичная система (т.н. система пускового воздуха) используется для запуска и прохождения пускового режима дизель-генераторной установки.

Криогенные системы, работающие на сжиженном воздухе, используют также сосуды для запасаания воздуха, но он не закачивается в сосуды под давлением, а сжижается путем охлаждения и хранится при низкой температуре в жидком виде. А при необходимости выдачи энергии – воздух перестает охлаждаться и подогревается, этот процесс сопровождается значительным увеличением объема газа и совершением полезной работы при воздействии на лопатки турбины [6].

Основными компонентами электрохимических и систем накопления энергии в электрическом поле являются преобразовательные системы (выпрямительные и инверторные установки, а также совмещенные выпрямительно-инверторные, двунаправленные преобразователи) и батареи запасаания энергии (батареи ионисторов или аккумуляторов). В зависимости от параметров системы выбираются необходимые технологии и топологии преобразовательных установок с использованием современных электронных устройств – запираемых тиристоров (IGCT) или транзисторов различных технологий, а также химические соединения, лежащие в основе источников энергии [7]. Наиболее технологичным современным решением являются системы хранения и накопления энергии на литий-ионных элементах аккумуляторных батарей (ЛИАБ) с использованием Литий-Железо-Фосфорных элементов. В настоящее время в системы среднего напряжения внедряется значительное количество систем накопления большой емкости, позволяющих изменять конфигурацию энергосистемы в различных режимах и эффективно управлять элементами и связями сети. Пилотные проекты использования СНЭ на объектах отечественной электроэнергетики также реализованы в филиалах и ДЗО ПАО «Россети» и показали свою экономическую эффективность, а также надежность эксплуатации, что позволяет приступить к рассмотрению систем накопления энергии как альтернативы дизель-генераторным системам [8,9].

В связи с используемым уровнем напряжения оборудования систем безопасности, а также учитывая значительное количество энергии, необходимой к запасанию, источник автономной работы в составе САЭ должен проектироваться со значением выходного напряжения среднего класса (в настоящее время значение напряжения в сетях собственных нужд АЭС с типами реакторов ВВЭР-1000/1200 составляет 10 кВ, это обуславливает необходимость приведения входного/выходного напряжения накопителя к данному значению). Для реализации этого требования существуют различные способы построения преобразовательной техники: например, типовым проектным решением для СНЭ среднего напряжения является организация СНЭ уровня 0,4 кВ с использованием согласующего силового трансформатора необходимой мощности с напряжениями обмоток 10 и 0,4 кВ; также стоит отметить возможность использования бестрансформаторных преобразователей различных топологий (преимущественно – топологии многоуровневых инверторов напряжения) [10,11].

Важно учесть также, что возможно проектирование системы из распределенных блоков ограниченной мощности, что позволит выполнить систему модульного типа с резервированием любого заданного наперед проектом типа («2n», «n+2» и др.), что повышает надежность системы (отказ одного блока позволит ввести в работу резервные преобразовательные блоки, а отказ резервных – позволит работать системе без отключения, снизив лишь перегрузочную способность к несению нагрузки. В то же время блочное исполнение позволяет сократить время восстановления работоспособности системы (замена неисправного блока, идентификация системой контроля и управления установленного преобразовательного блока и автоматический ввод блока в синхронную работу).

### **Эксплуатационные особенности предлагаемых электрохимических систем**

В настоящее время освоены типовые решения преобразовательных установок с возможностью выдачи мощности до 10 МВт с использованием безжидкостных систем охлаждения, что позволяет говорить о повышении надежности работы преобразовательного оборудования с учетом требований к тепловому режиму силовых ключей в связи с современными применяемыми решениями в области вращающихся механизмов теплоотводящих систем (магнитные и газовоздушные подшипники, частотное регулирование и контроль ресурса и пр.). Также стоит учитывать следующие недостатки типовых решений с согласующим трансформатором:

- высокие токовые нагрузки преобразователя на стороне 0,4 кВ и, как следствие, тяжесть последствий при нарушениях его работы (потеря контроля проводимости ключа или одного из ключей в плече, высокие токи КЗ, необходимость конструирования специальных кабельных связей между элементами и электромагнитная совместимость оборудования преобразователя);

- низкое напряжение накопительного модуля (батареи аккумуляторов, ионисторов) неизбежно приводит к росту габаритов помещений накопителей. Решением в таком случае является организация стоек/сборок запаасающих элементов с напряжением, близким к номинальному входному напряжению инверторного преобразователя. Но напряжение стойки ограничено входным напряжением (при одинаковой энергоемкости потребуется большее количество элементов).

Именно в связи с топологией преобразовательного решения значительным эксплуатационным параметром, влияющим на СНЭ является напряжение накопительного модуля (стойки, кассеты элементов). С одной стороны, низкое напряжение модуля позволит улучшить его эксплуатационные свойства (выравнивание параметров заряда батарей и контроль разрядных характеристик элементов модуля позволят системам контроля и управления анализировать работу модулей, а использование предиктивной аналитики в информационных системах поддержки и принятия решений – цифровых двойниках АЭС позволит рассмотреть возможность к переходу на техническое обслуживание системы по состоянию, оптимизировать выполнение работ и повысить надежность работы оборудования и готовность к несению нагрузки). С другой стороны, увеличение напряжения стойки осложняет процесс контроля и управления ее ресурсными характеристиками (накопленным количеством энергии, напряжением заряда и разряда и др.). В связи с этим в настоящий момент актуальной темой является изучение и проектирование новых накопительных элементов, совмещающих в себе достоинства накопительных элементов различных типов.

В настоящее время трансформаторные решения способны обеспечивать работу СНЭ с номинальной выходной мощностью 5 МВт (без учета масштабирования систем).

К преимуществам эксплуатации систем накопления энергии можно отнести следующие их свойства:

- 1) отсутствие сложных связей в системе (отсутствие систем и трубопроводов подачи масла, воды, топлива, воздуха), что повышает надежность систем и простоту эксплуатации и обслуживания. В настоящее время преобразовательные системы до 5 МВт способны поддерживать температурный режим благодаря системам воздушного охлаждения. Ресурс подшипников вращающихся элементов систем составляет от 1000 до 2000 часов, однако применяемые в настоящее время воздушные или магнитные подшипники позволяют значительно увеличить этот ресурс;

- 2) возможность безостановочного подхвата нагрузки системы безопасности без необходимости выделения пускового режима позволяет повысить надежность электроснабжения;

3) возможность автоматической синхронизации автономного источника с напряжением сети делает возможным мгновенное включение источника питания без ударных нагрузок на силовое электрооборудование.

Стоит также отметить существенную особенность литий-ионных накопительных элементов, способную повлиять на оптимизацию технологического процесса АЭС – снижение деградационных характеристик аккумуляторов при выполнении периодических тренировочных циклов (разрядов до 30-50% емкости) [12-14].

В случае использования этой особенности повышается маневренность СНЭ и достигаются лучшие экономические и технологические показатели, а именно:

**1. Выделение СНЭ канала СБ для работы в режиме УПП/ПЧ.** Применяемые в настоящее время главные циркуляционные насосные агрегаты обладают значительным моментом инерции, что приводит к трудному (а иногда и ударному) режиму пуска электродвигателей ГЦН с просадками напряжения собственных нужд, а также отсутствию контроля параметров пускового режима электродвигателя. Рациональным решением в таком случае является организация пуска ГЦН путем выделения СНЭ одного из каналов на работу в режиме устройства плавного пуска ГЦН. Топология преобразователей без согласующего трансформатора в настоящее время позволяет выполнять такие задачи (а именно, реализация в системе управления преобразователя алгоритмов ШИМ и цифровой обработки сигналов), а современные технические решения устройств автоматики (органы контроля и улавливания синхронизма, системы телемеханики и контроллеры присоединений) позволяют выполнять безударный перевод электродвигателя на основную сеть после выхода на номинальные параметры. Попутно решаются задачи осциллографирования параметров пускового режима, улучшается контроль над ресурсными характеристиками оборудования. [15]

**2. Работа СНЭ в режиме статического компенсатора с высоким быстродействием (СТАТКОМ).** Поддержание параметров энергосистемы, а также обеспечение устойчивости при переходных режимах требует использование быстродействующей автоматики (УПАЭ, АПНУ, ЦСПА) для предотвращения аварийных режимов. Важным условием синхронизма системы является сохранение угла вдоль линии электропередачи. При отключении линии устройствами РЗА и ПА возможно резкое снижение потребляемой мощности нагрузки. В таком случае СНЭ включается в режиме заряда и принимает (а при необходимости – рассеивает) излишнюю мощность для сохранения устойчивости энергосистемы. [16,17]

**3. Сглаживание суточных колебаний режима генерации.** В настоящее время энергоблоки активно участвуют в регулировании параметров режима работы энергосистемы (выдача мощности, контроль перетоков в сечениях, регулирование баланса мощностей и пр.). В связи с этим при суточных колебаниях потребляемой мощности происходит регулирование выдачи мощности непосредственно воздействием на основное технологическое оборудование – турбоагрегат и реакторную установку. При использовании СНЭ возможна оптимизация, изменение методов регулирования: при снижении необходимого уровня генерации (диспетчерских ограничениях) возможен ввод в работу СНЭ в режиме заряда (запасания энергии) и отбор мощности энергоблока без необходимости снижения генерации активной мощности (как это реализуется в настоящее время), а при повышении потребления в пиковые моменты – включение СНЭ в режиме выдачи запасенной энергии в энергосистему. В таком случае решаются несколько задач:

а) выполнение контрольных циклов заряда-разряда для мониторинга состояния батареи;

б) поддержание режима энергосистемы [18,19];

в) повышение экономической эффективности генерации электрической энергии энергоблоками АЭС.

Стоит заметить, что наличие в настоящее время в контуре ГК «Росатом» предприятий, способных принимать участие на каждом этапе жизненного цикла систем накопления (исследование и анализ свойств применяемых материалов, полный производственный цикл, эксплуатация, сервис, утилизация), позволит замкнуть внутри корпорации и упростить процессы контроля качества изготовления, проектирования, анализа работы систем и механизмы получения обратной связи между предприятиями отрасли, что позволит развивать и оттачивать технологические решения с учетом опыта эксплуатации, а также прогнозировать производство на длительные сроки.

### Заключение

Электрохимические системы накопления электрической энергии в качестве перспективного автономного источника для собственных нужд систем безопасности АЭС можно охарактеризовать как высокоманевренные, масштабируемые системы с высокой степенью резервирования, а также с возможностями мониторинга и управления ресурсными характеристиками. Систематизированный анализ систем накопления энергии представлен в таблице 2.

Таблица 2. Результаты анализа систем накопления энергии

Table 2. Results of the analysis of energy storage systems

Технология системы	КПД накопителя	Преимущества метода	Недостатки метода	Ссылки на источники
Криогенная (Liquid Air Energy Storage)	45-60	<ul style="list-style-type: none"> <li>– возможность запасаения значительного количества энергии;</li> <li>– возможность легкого интегрирования в системы различных конфигураций.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– значительное количество рабочих сред;</li> <li>– сложность и опасность эксплуатации на АЭС;</li> <li>– высокая степень инерционности.</li> </ul>	[20] [21] [22]
Пнеumoкомпрессионная (Compressed Air Energy Storage)	35-70	<ul style="list-style-type: none"> <li>– небольшое количество необходимых рабочих сред;</li> <li>– взрывобезопасность.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– необходимость контроля параметров процесса;</li> <li>– низкая надежность эксплуатации.</li> </ul>	[5] [23] [24]
Электрохимическая (Battery energy storage)	80-95	<ul style="list-style-type: none"> <li>– малое количество необходимых рабочих сред;</li> <li>– высокое быстродействие;</li> <li>– возможность интегрирования в процессы цифровизации.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– рост требований к квалификации персонала.</li> </ul>	[19] [16] [12]

В настоящее время происходит цифровизация технологических процессов, процедур, оцифровывание методов взаимодействия оборудования. Наличие же систем удаленного мониторинга и самодиагностики электрооборудования, развитие концепции цифровых подстанций и предиктивная аналитика (цифровые двойники) оборудования АЭС, позволят интегрировать данные в автоматизированную систему поддержки и принятия решений, а в будущем – вывести эксплуатацию оборудования систем безопасности АЭС на новый уровень, улучшая также экологические процессы влияния деятельности АЭС на окружающую среду.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Андрущечко С.А., Афров А.М., Васильев Б.Ю., Генералов В.Н., Косоуров К.Б. и др. АЭС с реактором типа ВВЭР-1000. От физических основ эксплуатации до эволюции проекта. Москва: Логос, 2010. 604 с. URL: [http://elib.biblioatom.ru/text/andrushechko\\_aes-s-reaktorom-vver-1000\\_2010/go,0/](http://elib.biblioatom.ru/text/andrushechko_aes-s-reaktorom-vver-1000_2010/go,0/)
2. Zhang M., Liu S., Hou X., Dong H., Cui C., Li Y. Reliability modeling and analysis of a diesel engine design phase based on 4F integration technology. *Applied Sciences*. 2022;(12)13:6513. <https://doi.org/10.3390/app12136513>
3. Kim T., Singh B., Sung T., Park J., Lee Y. Failure mode, effect and criticality analysis (FMECA) on mechanical subsystems of diesel generator at NPP. Korea Atomic Energy Research Institute, Daeduk. June, 1996. 31 p. URL: [https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig\\_q=RN:28018603](https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:28018603) (accessed: 04.04.2023).
4. Succar S.S., Williams R.H., Cavallo A., Christopher C.K., Nrel P.D. et al. Compressed air energy storage: theory, resources, and applications for wind power. *Princeton environmental institute report*. 2008;8:81. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Compressed-Air-Energy-Storage-%3A-Theory-%2C-Resources-Succar-Williams/07b1c66eba1504846d7b49bc4fffc5725a17e57e>
5. Wang J., Lu K., Ma L., Wang J., Dooner M. et al. Overview of compressed air energy storage and technology development. *Energies* 2017;10:991. <https://doi.org/10.3390/en10070991>
6. Визгалов С.В., Шарапов И.И., Хисамеев И.Г. Системы хранения энергии на основе криогенных технологий сжижения воздуха. *Вестник Международной академии холода*. 2022;2:21–26. DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-2-21-26
7. Lach J., Wróbel K., Wróbel J., Czerwiński A. Applications of carbon in rechargeable electrochemical power sources: a review. *Energies*. 2021;(14)9:2649. <https://doi.org/10.3390/en14092649>
8. Бушуев В.В., Новиков Н.Л. Инфраструктурные накопители в энергетике. *Энергетическая политика*. 2020;10:74–89. URL: <https://energypolicy.ru/v-bushuev-n-novikov-infrastrukturnye-nakopiteli-v-energetike/energetika/2020/14/20/> (дата обращения: 04.04.2023).
9. Stecca M., Elizondo L.R., Soeiro T.B., Bauer P., Palensky P. A comprehensive review of the integration of battery energy storage systems into distribution networks. *IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society*. 2020;1:46–65. <https://doi.org/10.1109/OJIES.2020.2981832>
10. Макаров В.Г., Хайбрахманов Р.Н. Многоуровневые инверторы напряжения. Обзор топологий и применение. *Вестник Казанского технологического университета*. 2016;(19)22:134–138. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/mnogourovnevye-invertory-napryazheniya-obzor-topologiy-i-primenenie> (дата обращения: 04.04.2023).
11. Мальнев А.И., Баховцев И.А., Зиновьев Г.С. Обзор многоуровневых инверторов тока ветроэнергетических станций. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2015;(7)326:15–26. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-mnogourovnevyyh-invertorov-toka-vetroenergeticheskikh-stantsiy> (дата обращения: 04.04.2023).
12. Бушкова О.В., Ярославцева Т.В., Добровольский Ю.А. Новые соли лития в электролитах для литий-ионных аккумуляторов (обзор). *Электрохимия*. 2017;(53)7:763–787. <https://doi.org/10.7868/S0424857017070015>
13. Podder S., Khan M.Z.R. Comparison of lead acid and Li-ion battery in solar home system of Bangladesh. *IEEE 2016 5th International Conference on Informatics, Electronics and Vision (ICIEV)*. Dhaka, Bangladesh, 2016. P. 434–438. <https://doi.org/10.1109/ICIEV.2016.7760041>
14. Si J., Tang Y., Li X., Zhang L. Comprehensive reliability assessment method for lithium battery energy storage systems. *Journal of Physics: Conference Series, Volume 2474, The 2nd International Conference on New Energy and Power Engineering 2022*. Qingdao, China. IOP Publishing. 2023;(2474)1:012009. <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/2474/1/012009>
15. Barie E.Z., Chang C. Application of variable frequency drive on the condensate pump motors of APR1400 nuclear power plants for energy savings. *Journal of International Council on Electrical Engineering*. 2018;8(1):179–189. <https://doi.org/10.1080/22348972.2018.1515691>
16. Рашитов П.А., Серегин Д.А., Аникин М.Д., Вершанский Е.А. Применение многоуровневых инверторов напряжения в распределенных устройствах продольной компенсации. *Вестник МЭИ*. 2021;3:58–66. <https://doi.org/10.24160/1993-6982-2021-3-58-66>
17. He B., Ren Y., Xue Y., Fang Ch., Hu Zh., Dong X. Research on the frequency regulation strategy of large-scale battery energy storage in the power grid system. *International Transactions on Electrical Energy Systems*. V.2022. Article ID 4611426. 13 p. 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/4611426>
18. Li X., Wang S. Energy management and operational control methods for grid battery energy storage systems. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*. 2021;(7)5:1026–1040. <https://doi.org/10.17775/CSEEJPES.2019.00160>
19. Rui F., Haitao L., Ling J. Operation analysis and optimization suggestions of user-side battery energy storage systems. *The Proceedings of the 5th International Conference on Energy Storage and Intelligent Vehicles*. ICEIV 2022. Lecture Notes in Electrical Engineering. 2023. V.1016. Springer, Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-99-1027-4\\_37](https://doi.org/10.1007/978-981-99-1027-4_37)



20. Liang T., Zhang T., Lin X., Tafone A., Legrand M. et al. Liquid air energy storage technology: a comprehensive review of research, development and deployment. *Progress in Energy*. 2023;5(1):012002. DOI:10.1088/2516-1083/aca26a
21. Marchionni M., Cipollone R. Liquid CO<sub>2</sub> and Liquid Air energy storage systems: a thermodynamic analysis. *Energies*. 2023;16(13):4941. <https://doi.org/10.3390/en16134941>
22. Liu Z., Kim D., Gundersen T. Optimization and analysis of different liquid air energy storage configurations. *Computers & Chemical Engineering*. 2023;169:108087.
23. Bullough C., Gatzen C., Jakiel Ch., Koller M., Nowi A., Zunft S. Advanced adiabatic compressed air energy storage for the integration of wind energy. *Proceedings of the European wind energy conference, EWEC*, 22-25 November, 2004, London, UK. 2004;(22):25. URL: [https://www.researchgate.net/publication/224797562\\_Advanced\\_adiabatic\\_compressed\\_air\\_energy\\_storage\\_for\\_the\\_Integration\\_of\\_wind\\_energy](https://www.researchgate.net/publication/224797562_Advanced_adiabatic_compressed_air_energy_storage_for_the_Integration_of_wind_energy).
24. Chen X. iaojiao Chen, Huang L., Liu J., Song D., Yang Sh. Peak shaving benefit assessment considering the joint operation of nuclear and battery energy storage power stations: Hainan case study. *Energy*. 2022;239:121897. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121897>

**ВКЛАД АВТОРОВ:**

**Карчин В.В.** – анализ особенностей систем электроснабжения АЭС;  
**Мельдин Е.В.** – изучение схемотехнических решений для возможности реализации, анализ международного опыта;  
**Питев А.Н.** – изучение и анализ современных технологий (химических источников тока) для возможности реализации систем накопления энергии.

**БЛАГОДАРНОСТИ:**

Авторы благодарят компанию «РЭНЕРА» за предоставление информации и участия в тематических мероприятиях.

**ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:**

Без дополнительного финансирования.

**КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:**

**Виктор Васильевич Карчин**, к.т.н., доцент кафедры транспортно-энергетических систем, Чебоксарский институт (филиал) Московского политехнического университета, г. Чебоксары, Чувашская Республика, Российская Федерация.  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4604-6173>  
e-mail: karchinvv@gmail.com

**Евгений Валерьевич Мельдин**, инженер службы электроавтоматики, магистрант 1 г. о., Калининская атомная станция – филиал АО «Концерн Росэнергоатом», г. Удомля, Тверская обл., Российская Федерация.  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0134-7693>  
e-mail: evg-meldin@ya.ru

**Алексей Николаевич Питев**, руководитель службы автоматики, Калининская атомная станция – филиал АО «Концерн Росэнергоатом», г. Удомля, Тверская обл., Российская Федерация.  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-4481-2599>  
e-mail: pittyaalex@mail.ru

**AUTHORS' CONTRIBUTION:**

**Karchin V.V.** – NPP power supply systems analysis and their features;  
**Meldin I.V.** – study circuit solutions and devices design, international experience analysis;  
**Pitev A.N.** – study and analysis of modern electrochemical power sources for the possibility of using battery energy storage systems.

**ACKNOWLEDGMENTS:**

The authors thank «RENERA» company for information about battery energy storage systems.

**FUNDING:**

No additional funding.

**CONFLICT OF INTEREST:**

The authors declare no conflict of interest

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:**

**Viktor V. Karchin**, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Department of Transport and Energy Systems, Cheboksary Institute of Moscow Polytechnic University, Cheboksary, Chuvash Republic, Russian Federation.  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4604-6173>  
e-mail: karchinvv@gmail.com

**Ievheniy V. Meldin**, engineer-electrician, M. Sc. Student, Kalinin Nuclear Power Plant the branch of Rosenergoatom Concern JSC, Udomlya, Tver region, Russian Federation.  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0134-7693>  
e-mail: evg-meldin@ya.ru

**Alexei N. Pitev**, deputy chief of electrical department, Kalinin Nuclear Power Plant the branch of Rosenergoatom Concern JSC, Udomlya, Tver region, Russian Federation.  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-4481-2599>  
e-mail: pittyaalex@mail.ru

Поступила в редакцию 04.05.2023

После доработки 30.08.2023

Принята к публикации 05.09.2023

Received 04.05.2023

Revision 30.08.2023

Accepted 05.09.2023