

Перспективы применения литий-ионных СНЭЭ на АЭС

Prospects for the use of lithium-ion energy storage systems at nuclear power plants

Алексей Ефимов

Главный Эксперт Отдела Главного Инженера, Ао «Прорыв»
E-Mail: Eaol@Pnproryv.ru

Aleksei EFIMOV

Chief expert, Department of Chief Engineer, Proryv JSC
E-mail: eaol@pnproryv.ru

Александр Максимов

Начальник Отдела Главного Инженера, Ао «Прорыв», К. Ф.-М. Н.
E-Mail: Mayu@Proryv2020.Ru

Aleksandr MAKSIMOV

Head of Department, Department of Chief Engineer, Proryv JSC
E-mail: mayu@proryv2020.ru

Роман Фролов

Руководитель Направления, Ооо «Рэнера»

Roman FROLOV

Head of direction, LLC «RENERA»

Дмитрий Лебедев

Руководитель Проекта, Ооо «Рэнера»

Dmitry LEBEDEV

Project Manager, RENERA LLC

Курская АЭС

Источник: «Росатом»



Аннотация. В статье представлена информация о спектре существующих и перспективных технологий накопления энергии, краткое описание эволюции литий-ионной технологии, их доступность, популярность, аспекты безопасности. Рассмотрены перспективы применения литий-ионных накопителей энергии в атомной отрасли.

Ключевые слова: аккумулятор, система накопления электрической энергии, регулирование частоты, нормативно-техническая документация.

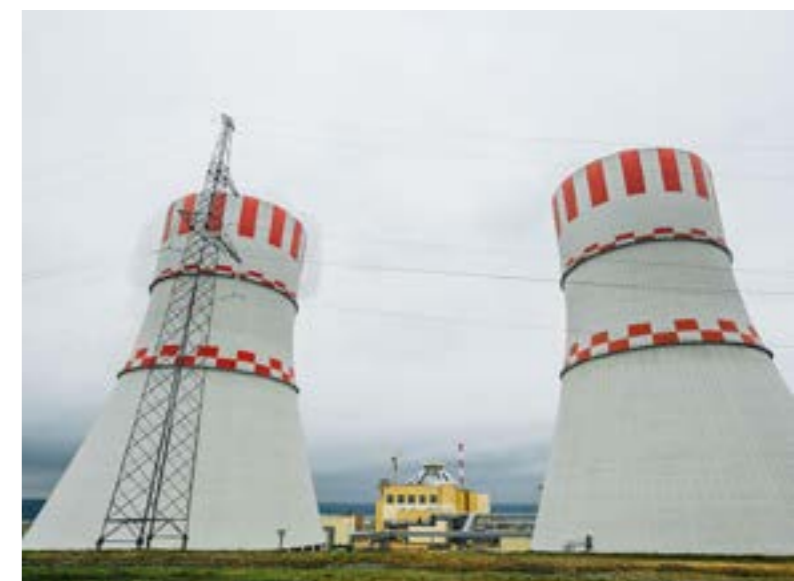
Abstract. The article provides information on the range of existing and promising energy storage technologies, a brief description of the evolution of lithium-ion technology: availability, popularity, safety aspects. The prospects of using lithium-ion energy storage devices in the nuclear industry are considered.

Keywords: battery, electric energy storage system, frequency regulation, regulatory and technical documentation.



Применение систем накопления электроэнергии открывает возможности улучшения экономических показателей функционирования атомных станций

В последние десятилетия в составе и структуре электроэнергетических систем (энергосистем) происходят существенные качественные изменения. Прежде всего это связано со значительной и неуклонно возрастающей долей генерации с использованием возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и развитием распределённой генерации. Учитывая стохастический характер ВИЭ-генерации, её полную зависимость от погодных условий, а также в связи с нестабильным характером потребления электроэнергии в разрезе суток для гарантированного обеспечения баланса мощности необходим соответствующий объём резервной мощности, который в настоящее время реализуется в основном за счёт традиционной генерации. Отечественная практика прежних многолетних



Нововоронежская АЭС
Источник: rekonenergo.ru

периодов генерации энергии на атомных электростанциях (АЭС) в традиционном базовом режиме в современных условиях постепенно пересматривается, а проекты новейших российских АЭС предусматривают нестационарные режимы электрогенерации как в периоды суточных колебаний мощности, так и при регулировании частоты энергосистемы. Отсутствие требований к АЭС о необходимости работы в режимах с изменением генерируемой мощности в современной практике присуще только энергоблокам АЭС, сооружённым по устаревшим проектам (РБМК, БН-600).

Радикально проблема может быть решена при помощи широкого внедрения буферных систем накопления электрической энергии (СНЭЭ), интенсивно развивающихся в последнее время. Как отмечено

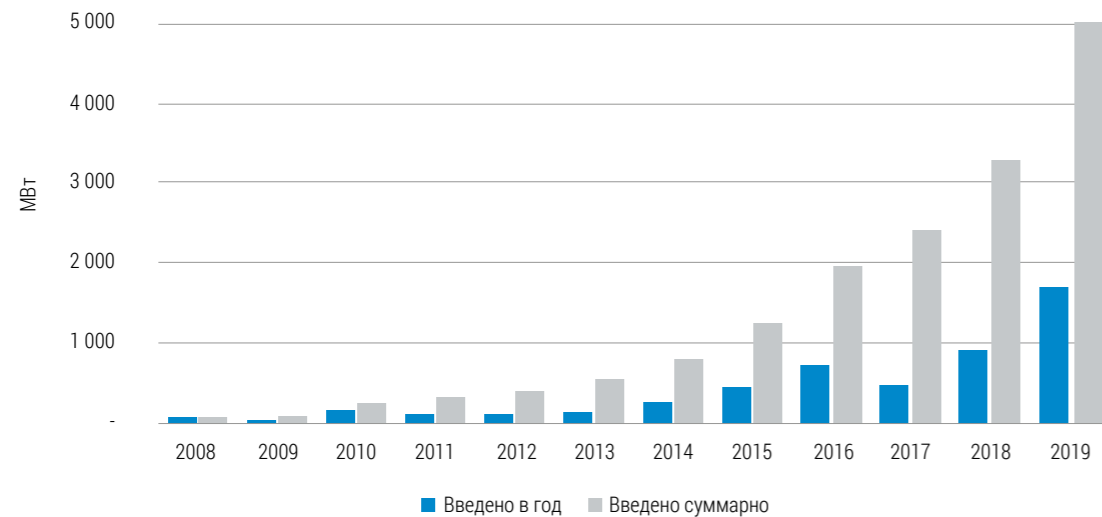


Рис. 1. Динамика ввода СНЭЭ в мире в период с 2008 по 2019 гг.

Источник: [2]

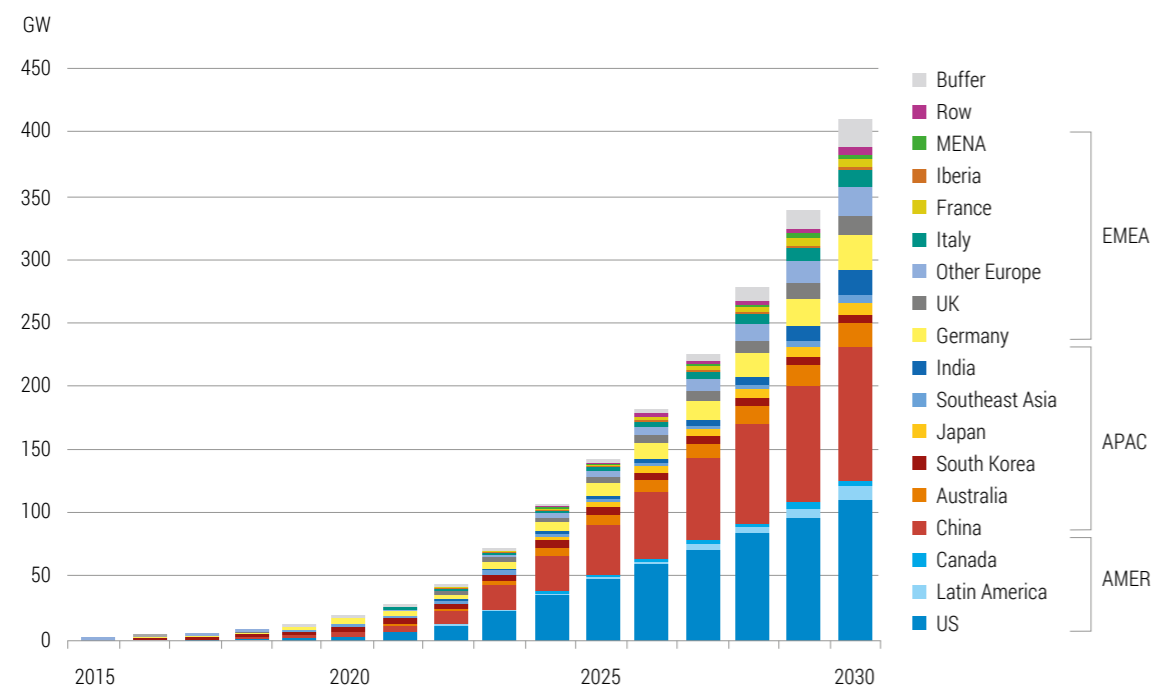
в [1, 9], функциональность СНЭЭ является предпосылкой изменений, повышающих надёжность и эффективность энергосистем. Применение СНЭЭ также открывает возможности улучшения экономических показателей их функционирования.

Система накопления электрической энергии (СНЭЭ) представляет собой комплекс оборудования, способный извлекать электрическую энергию из энергосистемы, хранить ее и отдавать обратно. В зависи-

мости от формы хранения энергии, СНЭЭ разделяют на виды [9]:

- электрохимические (аккумуляторные батареи различных типов, проточные батареи);
- электрические (суперконденсаторы, сверхпроводящие индуктивные накопители);
- механические (маховики, гравитационные накопители, накопители энергии, использующие сжатые

Рис. 2. Изменение суммарной установленной мощности СНЭЭ в мире



Реакторный цех АЭС

Источник: novyefoto.ru

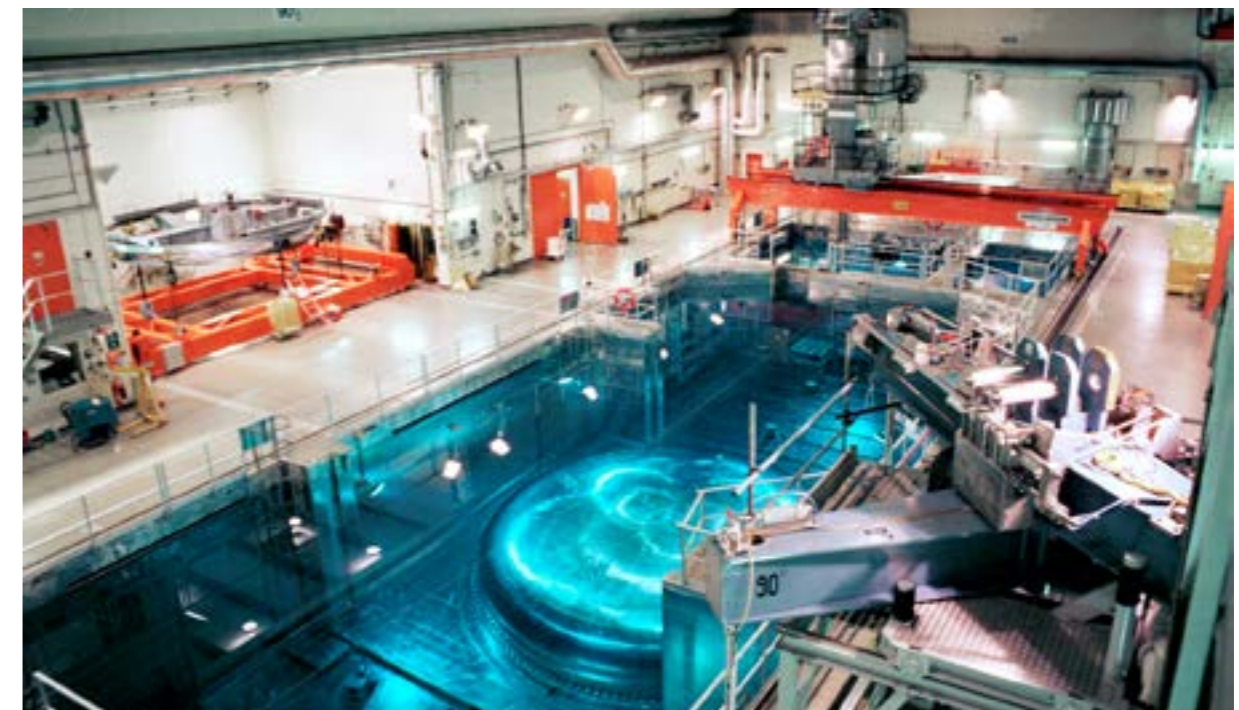
ки: за период с 2008 по 2019 гг. введенная мощность выросла в 48 раз, среднегодовые темпы роста составили 47% (см. рис. 1) [2].

По оценке [3] к 2030 г. мировая суммарная мощность и энергоёмкость СНЭЭ составит 411 ГВт и 1194 ГВт·ч соответственно, что в 45 раз по мощности и в 70 раз по энергоёмкости больше, чем на начало 2019 г. – 9 ГВт и 17 ГВт·ч (рис. 2).

Рост интереса к тематике СНЭЭ в отечественной научно-технической среде начался в конце 1960-х гг., что соответствовало аналогичным процессам в мировом сообществе. Однако экономическая ситуация в стране в конце XX века не способствовала развитию этого направления

энергетики. Из крупных проектов необходимо отметить строительство на территории РФ Кубанской и Загорской ГАЭС.

За последние десятилетия ряд технологий накопления электрической энергии достиг уровня практического применения. Одновременно с этим значительно снизилась стоимость основных компонентов (аккумуляторов, силовых преобразователей), что, в свою очередь, повысило рентабельность проектов с применением СНЭЭ. Потенциально высокие экономические показатели, а также стремительно расту-



щая популярность электромобилей резко увеличили интерес к тематике СНЭЭ, в том числе в России.

Увеличение спроса на СНЭЭ привело к появлению новых компаний, выводящих продукцию на рынок, что стимулирует конкуренции в форме совершенствования технологий, оптимизации производства, улучшению технических показателей.

В настоящее время в России идет процесс формирования нормативно-технической и нормативно-правовой базы, регламентирующей процессы разработки, производства и применения СНЭЭ.

В энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 г. [4] оборудо-

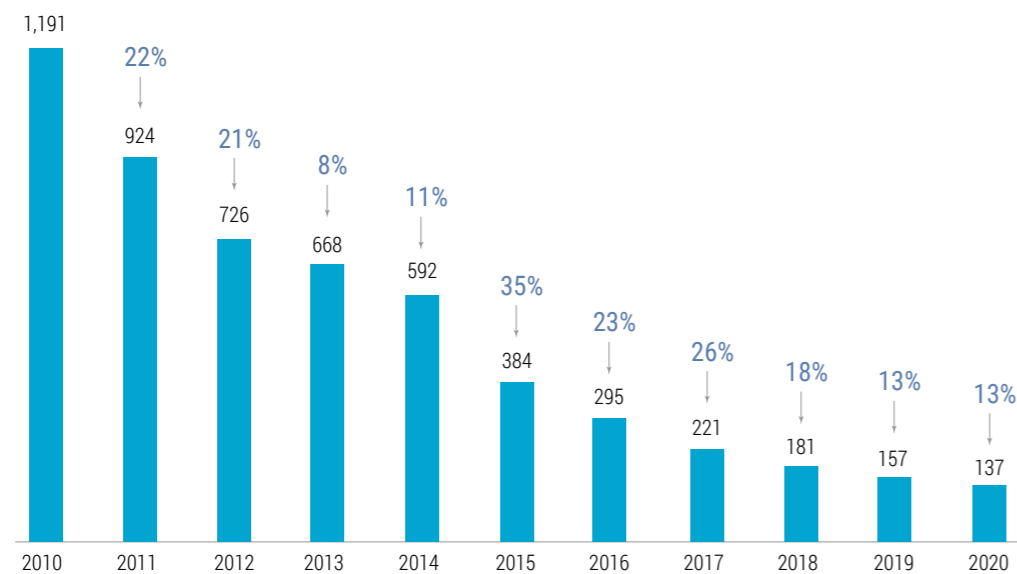
Проекты новейших российских АЭС предусматривают нестационарные режимы электрогенерации как в периоды суточных колебаний мощности, так и при регулировании частоты энергосистемы

вание и технологии для СНЭЭ, в том числе аккумуляторные батареи, топливные элементы, входит в перечень технологического оборудования, востребованного организациями топливно-энергетического комплекса Российской Федерации, создания или локализация производства которого необходимы на территории РФ до 2035 г.

Согласно исследованию [5], мировая средняя стоимость литий-ионного аккумулятора за период с 2010 по 2020 гг. снизилась на порядок (см. рис. 3).

Энергоемкие доступные аккумуляторные батареи имеют важное значение для постепенного отказа мировой экономики от ископаемого топлива. До недавнего времени этот процесс не мог осуществляться без существенных государственных субсидий и специальных «зелёных» тарифов.

Рис. 3. Динамика снижения средних цен на литиевые аккумуляторы



По оценкам мировых аналитических исследований, к 2024 г. цены на аккумуляторные батареи снизятся до 100 долл. за кВт·ч [6].

Аналогичны прогнозы динамики изменения стоимостей комплексов СНЭЭ. Увеличивающаяся популярность, единичные мощности, расширение номенклатуры и появление конкурирующих производителей неизбежно должны привести к снижению удельной стоимости производства таких систем. Это относится как к накопительной части системы, так и к преобразующей (инверторной).

Энергия аккумулируется в СНЭЭ разного типа с разной эффективностью. Рациональность применения каждого типа СНЭЭ определяется спецификой задач. На рис. 4 представлено распределение различных технологий накопления электрической энергии по мощности и энергоёмкости.

Атомная энергетика – это отрасль, которая балансирует на грани использования консервативных, проверенных временем технических решений, с одной стороны, и концептуально новых и прогрессивных достижений науки и техники, с другой.

Для отечественной атомной отрасли практически неизменными являются подходы к проектированию и сооружению систем аварийного электроснабжения (САЭ). Как правило, это свинцово-кислотные аккумуляторные батареи (СКАБ) в качестве источника постоянного тока, и дизель-

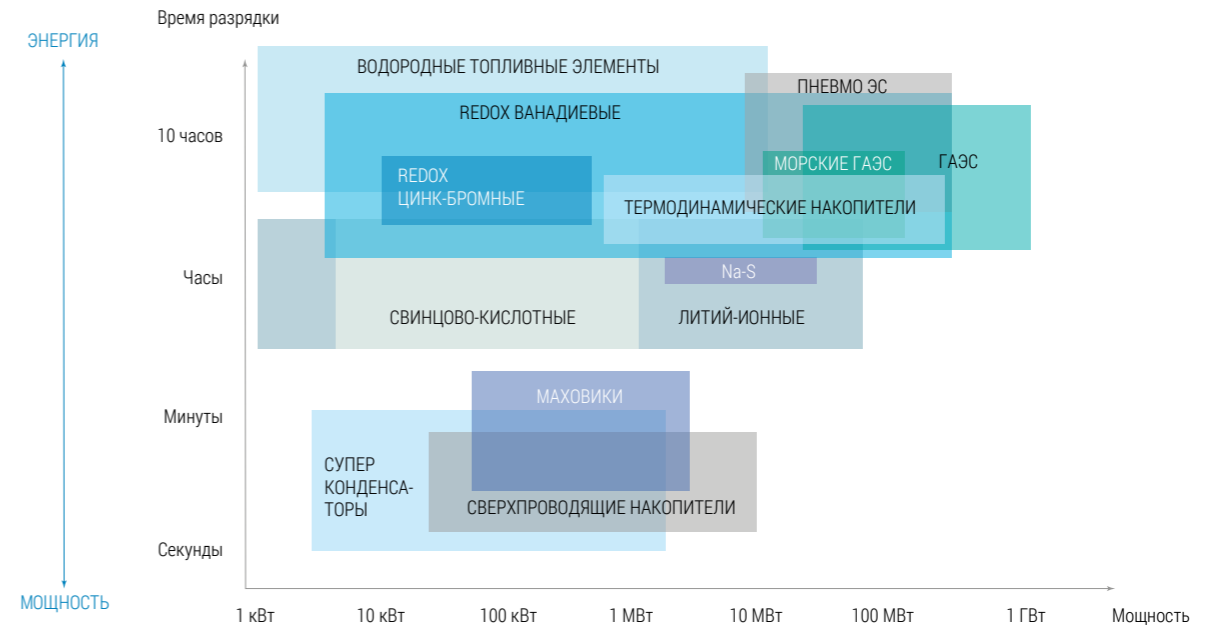


Рис. 4. Распределение различных технологий накопления электрической энергии по основным характеристикам

генераторные установки (ДГУ) в качестве источника переменного тока.

В настоящий момент, в качестве альтернативы используемым в составе систем надёжного (аварийного) электроснабжения АЭС – ДГУ, можно рассмотреть технологию накопления энергии в литий-ионных аккумуляторах (ЛИА), укомплектованных автоматизированными системами заряда и поддержания состояния АБ, контроля и управления.

К достоинствам таких накопителей энергии можно отнести хорошую масштабируемость энергоёмкости, высокие показатели надёжности (референтность в общей мировой промышленности), высокую скорость реакции на возникшую потребность в запасённой энергии, хорошие удельные характеристики, приемлемый ресурс и постоянно снижающаяся цена. Кроме того, систему с необходимой энергоёмкостью можно скомплектовать из модулей-контейнеров заводского (транспортного) исполнения и, тем самым, отказаться от капитального возведения зданий ДГУ.

К недостаткам ЛИА-накопителей энергии можно отнести малые ёмкости единичного аккумулятора, что приводит к необходимости собирать батареи из большого количества элементов, и, следовательно, к увеличению общей площади застройки.

При этом возрастает доля неосновных подсистем, как в стоимости, так и массогабаритных показателях всего изделия. С другой стороны, большое количество параллельных модулей СНЭЭ повышает надёжность системы в целом. На рис. 5 приведено масштабное сравнение занимаемой площади здания ДГУ (без учета ёмкости запаса топлива) и поля из модулей СНЭЭ, реализованного в форм-факторе 40-футовых морских контейнеров (см. рис. 6) в одноярусном исполнении для источника переменного тока электрической мощностью 1 МВт и ёмкостью 72 МВт·ч.

С учетом вышеизложенного необходимо констатировать текущую нецелесо-

Наибольшее распространение получили СНЭЭ на основе литиевых аккумуляторных батарей и суперконденсаторов, редокс-накопителей, ГАЭС, маховиков и накопителей энергии, использующих сжатые газы

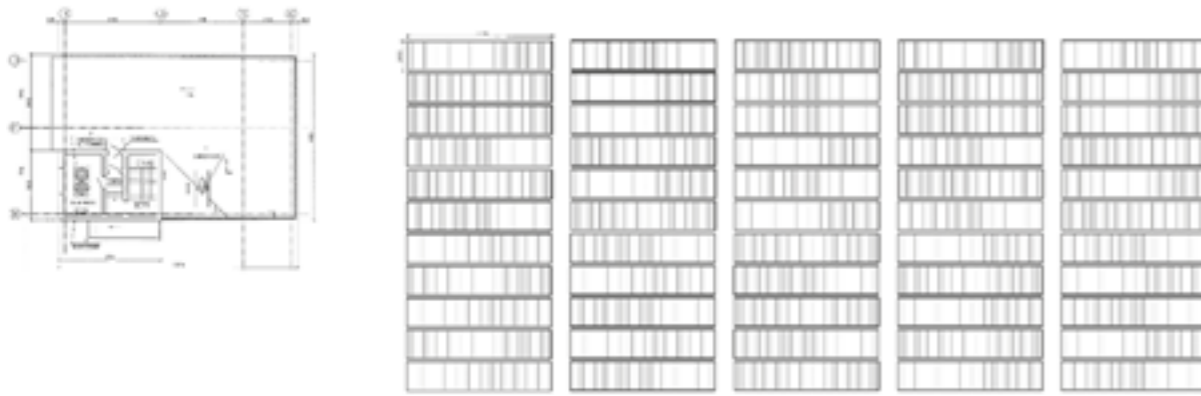


Рис. 5. Сравнение площади занимаемой традиционной ДГУ АЭС (слева) и альтернативная СНЭЭ в контейнерном исполнении (справа)

образность замены ДГУ на ЛИАБ из-за существенного роста размеров зданий и сооружений АЭС, а также занимаемой площади. Предварительные проработки в части оценки стоимости альтернативы ДГУ в виде СНЭЭ аналогичных параметров, обеспечивающей надежным электроснабжением энергоблок в течение не менее 72 часов, показывают десятикратное увеличение капитальных затрат. Это также отрицательно сказывается на принятии решения о применении новой технологии в САЭ АЭС.

В отношении замены СКАБ на СНЭЭ на базе ЛИАБ, наоборот, аналитические исследования [6] показывают абсолютное преимущество над традиционными

решениями как со стороны экономической целесообразности (капитальные и эксплуатационные затраты), так и с точки зрения сокращения размеров помещений аккумуляторного хозяйства. Кроме того, при отказе от традиционных решений на основе СКАБ исключается проблема обеспечения водородной взрывопожаробезопасности.

В качестве еще одного направления применения СНЭЭ может рассматриваться расширение функциональных возможностей проектов АЭС в части оказания услуг по обеспечению системной надежности энергосистем.

Системная надежность – способность электроэнергетической системы (ЭЭС) вы-

Рис. 6. Внешний вид модуля СНЭЭ в контейнерном исполнении

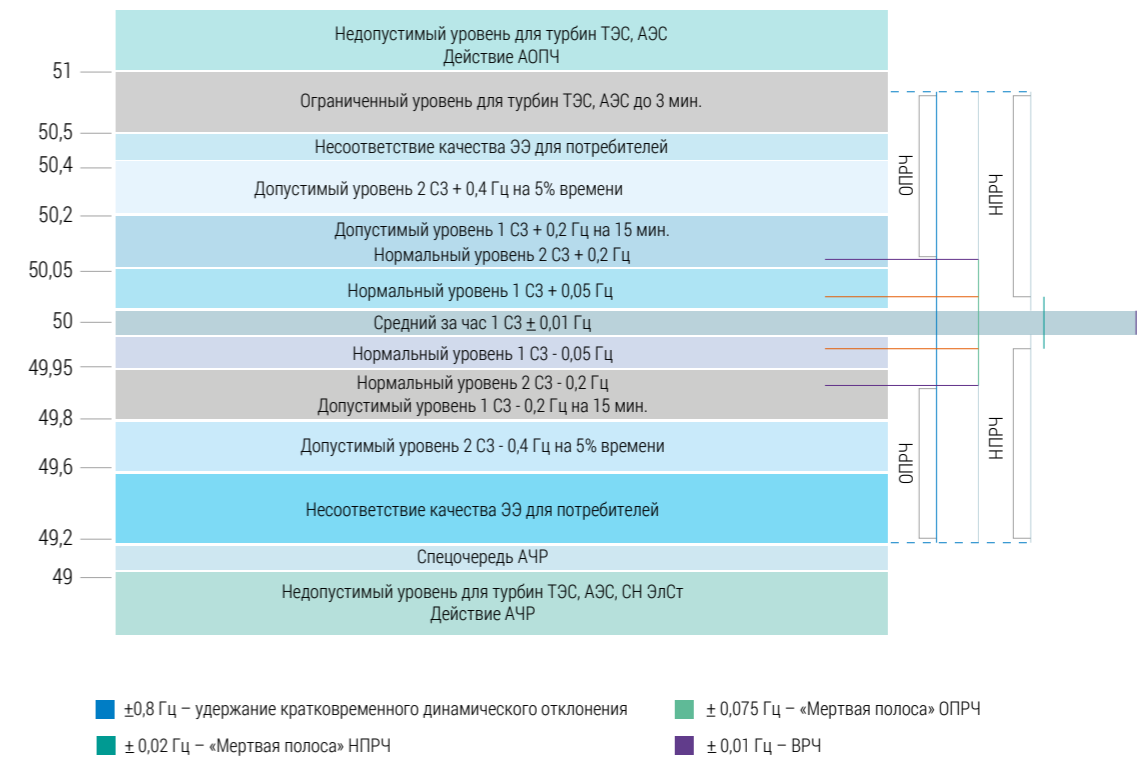


Рис. 7. Допустимые отклонения частоты и настроек «мертвых зон» регуляторов

полнять функции по производству, передаче, распределению электроэнергии и электроснабжению потребителей в требуемом количестве и нормируемого качества путем технологического взаимодействия системного оператора Единой энергетической системы (СО ЕЭС), генерирующих установок, магистральных электрических сетей, центров питания электрических сетей региональных электросетевых компаний и крупных потребителей [11].

В частности, под системной надежностью понимается способность удовлетворять в любой момент времени общий спрос на электроэнергию в соответствии с техническими условиями поставки в отношении качественных и количественных показателей надежности и качества поставляемой электроэнергии (мощности).

Одним из основных общесистемных и критически важных параметров является частота электрического тока. Частота оказывает влияние на режимы работы энергетического оборудования электростанций (вибрации, износ турбин и т. д.); нагрузку (на изменение производительности); возможность возникновения развивающихся аварийных процессов, таких,

как «лавины частоты»; параметры схемы, например, изменение величин индуктивных и емкостных сопротивлений.

Частота в энергосистеме регулируется путем воздействия на генерируемые активные мощности электростанций и/или потребляемые активные мощности (в нормальных режимах это ценозависимое потребление или регулирование спроса, в аварийных режимах – отключение части нагрузки).

Регулирование частоты и перетоков мощности осуществляется непрерывно с использованием первичного общего и первичного нормированного, вторичного и третичного регулирования.

Требования к допустимым отклонениям частоты для первой и второй синхронных зон, настройки «мертвых зон» регуляторов, области недопустимых отклонений частот и действия противоаварийной автоматики представлены на рис. 7.

Из рисунка можно видеть, что требования к допустимым отклонениям частот и требования к настройкам систем, регулирующих частоту в энергосистеме (пороги начала работы – «мертвые зоны»), разные, но согласованы между собой общей иерархической концепцией регулирования.

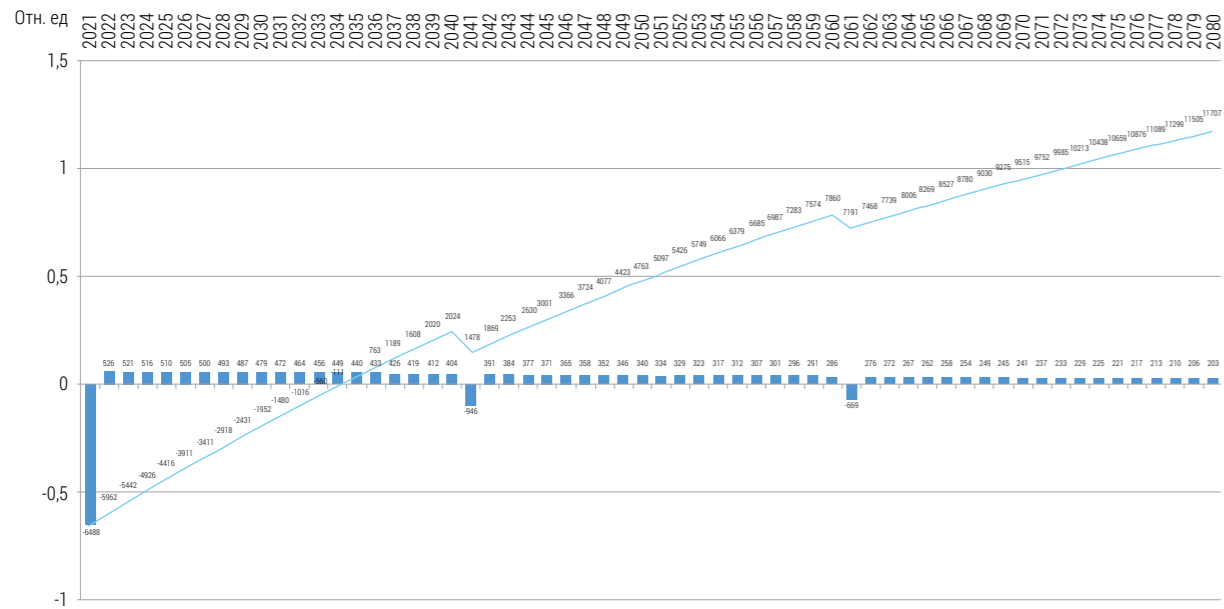


Рис. 8. Чистый дисконтированный доход от внедрения СНЭЭ в СВМ энергоблока с РБН (при ставке дисконтирования 5%)

В современной практике энергоблоки АЭС, сооруженные по проектам поколения «3+» [7] и участвующие в регулировании частоты сети, обязаны постоянно нести нагрузку на сниженном уровне мощности (2–5%) из-за требования постоянного наличия «горячего резерва» для мгновенного подъема или сброса в установленном диапазоне в случае отклонения частоты за пределы «зоны нечувствительности». В данном случае возникает несколько негативных факторов как с экономической точки зрения: энергоблок постоянно работает недогруженным, т. е. с пониженным КИУМ, так и с технологической точки зрения: для крупногабаритного энергетического оборудования нежелательна про-

должительная работа на отличающихся от номинального уровнях мощности. Также повышенные значения циклических нагрузок резко отрицательно сказываются на ресурсе и надежности работы такого оборудования.

В качестве решения описанной задачи была рассмотрена схема работы энергоблока в комплексе с СНЭЭ определенных параметров, обеспечивающих первичное регулирование частоты (ПРЧ). Иными словами, рассмотрен принцип, аналогичный принципу параллельного гибрида из автомобильной промышленности. Основными преимуществами выбранной схемы являются:

- постоянная стационарная работа энергоблока на номинальном уровне мощности (максимальный КИУМ);
- стационарная работа крупного энергетического оборудования без скачков технологических параметров (максимальный коэффициент готовности);
- участие энергоблока в ПРЧ (выполнение нормативных требований и оплата за участие в ПРЧ);
- повышение стабильности и надежности ЕЭС за счёт быстрой реакции и точности СНЭЭ при запросе от системного оператора.

За последние десятилетия ряд технологий СНЭЭ достиг уровня практического применения. Одновременно значительно снизилась стоимость основных компонентов, что повысило рентабельность проектов

При экономической оценке целесообразности реализации подобной схемы в разрезе проектного срока службы современных АЭС, а также ресурса и потребности периодического обновления ЛИАБ, показана экономическая целесообразность такого решения. В относительных величинах чистый дисконтированный доход при ставке дисконтирования от 0 до 8% может достигать от 36 до 1,6% соответственно от стоимости капитальных затрат на сооружение 1 энергоблока с реактором на быстрых нейтронах (РБН). Пример графика доходности представлен на рис. 8.

Таким образом, рассмотрение на базе актуальных стоимостных и технологических характеристик показало, что:

- себестоимость СНЭЭ на базе ЛИАБ имеет тенденцию к постоянному снижению, что делает доступными решения крупномасштабных энергетических задач;
- параметры литий-ионных аккумуляторных батарей постоянно совершенствуются, плотность хранения энергии повышается, что позволяет реализовывать компактные, гибкие и мощные энергетические решения;

Энергоблоки АЭС поколения «3+», участвующие в регулировании частоты сети, обязаны нести нагрузку на сниженном уровне мощности (2-5 %) из-за требования постоянного наличия «горячего резерва»

- доступность литий-ионных технологий позволяет реализовывать самые амбициозные проекты благодаря развитию и увеличению конкуренции среди поставщиков систем, в т. ч. отечественных.

Необходимо отметить, что, как и любая новая технология, применяемая на АЭС, СНЭЭ на базе ЛИАБ столкнутся с рядом трудностей разрешительного характера. Прямого запрета в нормах и правилах федерального уровня на использование ЛИАБ в структуре САЭ АЭС не существует. В России идет процесс формирования нормативно-технической и нормативно-

Накопители с аккумуляторными батареями производства завода Лиотех

Источник: estorsys.ru



правовой базы, регламентирующей процессы разработки, производства и внедрения СНЭЭ на объектах энергетики. В настоящее время техническое регулирование СНЭЭ в РФ осуществляется национальными стандартами. Кроме того, в законодательстве РФ были внесены изменения, согласно которым СНЭЭ могут участвовать в услугах по нормированному первичному регулированию частоты, услугах по автоматическому вторичному регулированию частоты и перетоков активной мощности, а также услугах по управлению спросом на электрическую энергию. Работа СНЭЭ как элемента энергосистемы может регламентироваться в двух аспектах – организационно-правовом и техническом. К регламентирующим документам относятся нормативные правовые акты (НПА) и документы по стандартизации. К первым относятся федеральные законы, постановления Правительства Российской Федерации и приказы федеральных органов исполнительной власти с утвержденными актами правилами, указаниями и др. Ко вторым относятся межгосударственные и национальные стандарты (ГОСТ, ГОСТ Р), предварительные национальные стандарты

Поскольку любая новая технология, внедряемая на АЭС, должна быть апробирована, то, кроме анализа экономической эффективности, необходимы исследования безопасности применения СНЭЭ на АЭС

(ПНСТ), стандарты организаций и другие документы, предусмотренные [12].

Следует отметить, что развитие отрасли СНЭЭ является предметом внимания со стороны государства, что нашло свое отражение в соответствующих документах стратегического планирования. Так, оборудование и технологии для СНЭЭ включены в перечень технологического оборудования, востребованного организациями топливно-энергетического комплекса Российской Федерации, создание или локализация производства которого необходимы на территории Российской

Федерации до 2035 г. [13], в План мероприятий по импортозамещению в отрасли энергетического машиностроения, электротехнической и кабельной промышленности Российской Федерации [14]. Кроме того, на уровне Правительства РФ и федеральных органов исполнительной власти были утверждены План мероприятий развития отрасли систем накопления энергии в Российской Федерации на период до 2030 г. [15], а также Перспективная программа стандартизации по приоритетному направлению «Системы накопления энергии» на период 2022–2026 гг. [16].

Поскольку любая новая технология, внедряемая на АЭС, должна быть апробирована [17], то, кроме анализа экономической эффективности, безусловно необходимы дальнейшие исследования безопасности применения СНЭЭ на базе ЛИАБ в системах АЭС, в том числе в свете примеров возникновения пожаров на транспорте с использованием ЛИАБ [10].

Выводы

Технологии СНЭЭ развиваются и имеют перспективы для применения, в том числе в атомной отрасли, использующей, как правило, проверенные, референтные решения. Замещение свинцово-кислотных АБ в системах САЭ АЭС при настоящем уровне развития мировой отрасли ЛИАБ выгодно с точки зрения, как экономики, так и компоновки. Применение СНЭЭ положительно влияет на стабильность и надежность энергосистем и экономически эффективно применительно к АЭС.

Отечественные решения ЛИАБ общепромышленного назначения уже применяются в системах оперативного постоянного тока на электрических подстанциях. В то же время, отсутствуют отечественные опыт и методики проектирования СНЭЭ больших энергоемкости и мощности (более ~100 МВт·ч и ~10 МВт соответственно), а также существует ряд нормативных пробелов для использования ЛИАБ на АЭС.

Использованные источники

1. Бердников Р. Н., Фортвов В. Е., Сон Э. Е., Деньщиков К. К., Жук А. З., Новиков Н. Л., Шакарян Ю. Г. Гибридный накопитель электроэнергии для ЕНЭС на базе аккумуляторов и суперконденсаторов // Энергия Единой сети. № 2, 2013. С. 40–51.
2. Холкин Д. В., Корев Д. А., Аамов А. Ю. и др. Применение систем накопления энергии в России: возможности и барьеры // Экспертно-аналитический отчет. ИЦ Энерджинет, Москва 2019.
3. Global Energy Storage Market to Grow 15-Fold by 2030 [Электронный ресурс]. Bloomberg NEF. – URL: <https://about.bnef.com/blog/global-energy-storage-market-to-grow-15-fold-by-2030/>
4. Об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 г. Распоряжение Правительства РФ от 09.06.2020 г. № 1523-р.
5. This Is the Dawning of the Age of the Battery [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2020-12-17/this-is-the-dawning-of-the-age-of-the-battery>
6. Battery Pack Prices Cited Below \$100/kWh for the First Time in 2020, While Market Average Sits at \$137/kWh [Электронный ресурс]. – URL: <https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-cited-below-100-kwh-for-the-first-time-in-2020-while-market-average-sits-at-137-kwh>
7. Реакторы поколения 3+ / «Атомная энергия 2.0» [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.atomic-energy.ru/III-plus-Generation-Reactors>
8. ГОСТ Р 58092.2.1-2020. Системы накопления электрической энергии (СНЭЭ). Параметры установок и методы испытаний.
9. Нестеренко Г. Б., Зырянов В. М., Кирьянова Н. Г., Коротков И. Ю., Рудюк И. Ф. Системы накопления электрической энергии. Возможное применение и проблемы развития // XI Международная научно-техническая конференция «Электроэнергетика глазами молодежи – 2020». Ставрополь, 2020.
10. Сгоревшее судно Fremantle Highway с 3,8 тысячами авто отбуксировано в порт // Российская газета // <https://rg.ru/2023/08/04/sgorevshee-sudno-fremantle-highway-s-38-tysiachami-avto-otbuksirovano-v-port.html>
11. Глоссарий СО ЕЭС. – URL: <https://www.so-ups.ru/functioning/glossary/>
12. Федеральный закон от 29.06.2015 г. № 162-ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации».
13. Распоряжение Правительства РФ от 09.06.2020 г. № 1523-р «Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 г.».
14. Приказ Минпромторга России от 02.07.2021 г. № 24222.
15. План мероприятий развития отрасли систем накопления энергии в Российской Федерации на период до 2030 г. от 30.11.2021 г. № 12844п-П51.
16. Минпромторг утвердил программу стандартизации систем накопления энергии // Российская газета. – URL: https://rg.ru/2022/04/17/minpromtorg-utverdil-programmu-standartizacii-sistem-nakopleniia-energii.html?utm_source=yxnews&utm_medium=desktop&utm_referrer=https%3A%2F%2Fyandex.ru%2Fnews%2Fsearch%3Ftext%3D
17. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций НП-001-15. Утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 17 декабря 2015 г. № 522.

Производство аккумуляторов

Источник: gk-kaz.ru

