

УДК 681.11.031.1
Шифр специальности ВАК 2.4.3.

СИСТЕМЫ ОПЕРАТИВНОГО ПОСТОЯННОГО ТОКА ПОДСТАНЦИЙ С ЛИТИЙ–ИОННЫМИ АККУМУЛЯТОРНЫМИ БАТАРЕЯМИ

В статье рассматриваются возможности и перспективы применения литий-ионных аккумуляторных батарей (ЛИАБ) в составе систем оперативного постоянного тока (СОПТ) на подстанциях. Применение ЛИАБ в составе СОПТ имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными свинцово-кислотными аккумуляторными. В отечественной практике ЛИАБ в составе СОПТ находятся в эксплуатации с 2013 года. Несмотря на то, что литий-ионные аккумуляторные батареи являются современной и эффективной технологией накопления энергии с высокой степенью технологической зрелости, в электрических сетях ПАО «Россети» применение таких систем до сих пор не получило широкого распространения.

При устранении существующих барьеров системы оперативного постоянного тока с ЛИАБ имеют высокий потенциал для практического внедрения на подстанциях электросетевого комплекса. Основные результаты статьи были представлены на 97-м заседании научного семинара имени Ю.Н. Руденко «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики».

Цель статьи – анализ перспектив применения СНЭЭ на основе литий-ионных аккумуляторных батарей в составе СОПТ подстанций, а также разработка рекомендаций, направленных на снятие барьеров применения ЛИАБ в электрических сетях ПАО «Россети».

АВТОРЫ:
Д.В. Сорокин, к. т. н.,
ORCID 0000-0002-7676-853X
Sorokin_dv@ntc-power.ru,
АО «Россети Научно-технический центр», Москва, Россия
К.А. Зимин,
ORCID 0009-0004-1694-0352,
АО «Россети Научно-технический центр», Москва, Россия
А.А. Королев,
заместитель главного инженера
ПАО «Россети», Москва, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:
#система оперативного
постоянного тока; #система
накопления электрической
энергии; #литий-ионная
аккумуляторная батарея;
#свинцово-кислотная
аккумуляторная батарея; #опытно-
промышленная эксплуатация

↓ для цитирования:

Сорокин Д.В., Зимин К.А.,
Королев А.А. Системы
оперативного постоянного тока
подстанций с литий-ионными
аккумуляторными батареями //
Энергия единой сети. 2026. № 1 (80).
С. 12–18.



ВВЕДЕНИЕ

Технологии накопления электрической энергии — одно из приоритетных направлений развития электросетевого комплекса России, что отражено во многих нормативных правовых актах и документах, в том числе в Стратегии научно-технологического развития РФ [1], Дорожной карте развития высокотехнологичной области до 2030 г. [2], Единой технической политике ПАО «Россети» [3] и др. Наибольшее распространение как в мировой, так и в отечественной практике получили системы накопления электрической энергии (СНЭЭ) на основе применения литий-ионных аккумуляторных батарей (ЛИАБ). В распределительных сетях системы накопления электрической энергии применяются для:

- обеспечения надежности электроснабжения потребителей (в качестве резервного или аварийного источника электропитания);
- обеспечения требуемого качества электрической энергии (в большинстве случаев в СНЭЭ реализуется функция регулирования напряжения);
- подключения «быстрых» и «ультрабыстрых» зарядных станций (мощностью 150–250 кВт и более) к электрическим сетям и др.

В СНЭЭ могут быть также реализованы следующие функции: участие в регулировании частоты, снижение колебаний потоков мощности («поддержка» возобновляемых источников энергии), сглаживание пиков потребления, функция «ценового арбитража», обеспечивающая возможность снижения расходов на оплату электрической энергии, и др. [4].

Одним из перспективных вариантов применения систем накопления электрической энергии является использование их на базе литий-ионных аккумуляторных батарей в составе систем оперативного постоянного тока подстанций (СОПТ). По сравнению с использованием традиционно применяемых свинцово-кислотных аккумуляторных батарей (СКАБ) это имеет ряд существенных преимуществ, в том числе: большая плотность энергии, компактность ЛИАБ, большой циклический ресурс, меньшее время заряда, лучшие разрядные характеристики и т. д. В то же время применение литий-ионных батарей в составе СОПТ сопряжено с рядом барьеров (в первую очередь связанных с отсутствием разрешительной нормативно-технической документации), что существенно ограничивает возможности использования таких систем.

▼ **Цель статьи** — анализ перспектив применения СНЭЭ на основе литий-ионных аккумуляторных батарей в составе СОПТ подстанций, а также разработка рекомендаций, направленных на снятие барьеров применения ЛИАБ в электрических сетях ПАО «Россети».

СИСТЕМЫ ОПЕРАТИВНОГО ПОСТОЯННОГО ТОКА

СОПТ обеспечивают питание постоянным оперативным током устройств вторичной коммутации как в нормальном режиме, так и в течение заданного времени при исчезновении напряжения на шинах собственных нужд [5]. Потребителями СОПТ являются устройства

релейной защиты, телемеханики и связи, автоматики установок противопожарной защиты, приводы высоковольтных выключателей и др. Надежное электроснабжение этих потребителей должно быть обеспечено, в том числе при возникновении технологических нарушений, приводящих к отключению основного питания собственных нужд. СОПТ должна обеспечить питание этих потребителей в течение не менее двух часов при отключении собственных нужд подстанции. Таким образом, системы оперативного постоянного тока относятся к наиболее ответственным элементам подстанции, от надежного функционирования которых зависит работа всего энергообъекта как в нормальных, так и в аварийных режимах.

Упрощенно типовую структуру СОПТ на подстанции можно представить в виде схемы на рис.1. В состав системы оперативного постоянного тока входят: АКБ — аккумуляторная батарея, ЗВУ — зарядно-выпрямительное устройство, ЩПТ — щит постоянного тока, ШРОТ — шкаф распределения оперативного постоянного тока, питающий нагрузки потребителей. В целом замена СКАБ на ЛИАБ не изменяет структуру СОПТ, однако может потребовать пересмотра требований к отдельным элементам системы (например, к ЗВУ, системе защиты от сверхтоков и т. д.).

Важным с точки зрения выбора параметров АКБ является наличие на подстанции так называемой толковой (импульсной) нагрузки. К такой нагрузке относятся, например, электромагнитные приводы высоковольтных масляных выключателей, потребляющие значительный ток при коммутациях. Величина тока электромагнитного привода может достигать десятков и даже сотен ампер [6].

НЕДОСТАТКИ СВИНЦОВО-КИСЛОТНЫХ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ

В настоящее время на подстанциях ПАО «Россети» основным резервным источником постоянного тока являются свинцово-кислотные аккумуляторные батареи. Данное требование закреплено в различных нормативно-правовых документах (стандартах организации), основными

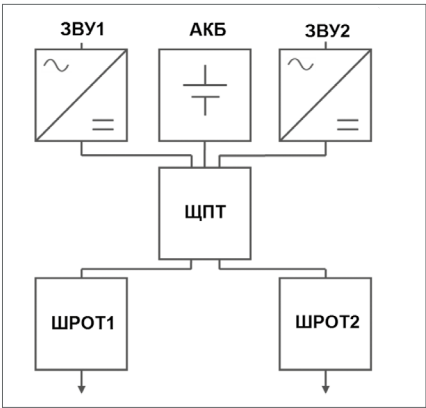


Рис. 1. Упрощенная типовая структура СОПТ на подстанции, где: АКБ — аккумуляторная батарея, ЗВУ — зарядно-выпрямительное устройство, ЩПТ — щит постоянного тока, ШРОТ — шкаф распределения оперативного постоянного тока, питающий нагрузки потребителей

из которых являются: «Нормы технологического проектирования подстанций переменного тока с высшим напряжением 35–750 кВ (НТП ПС)» [7] и «Руководство по проектированию систем оперативного постоянного тока ...» [6].

Свинцово-кислотные батареи имеют более чем 100-летнюю историю эксплуатации и за это время заслужили репутацию достаточно надежного устройства. Существенным преимуществом является обширная нормативная база, подробно регламентирующая практически все аспекты применения СКАБ на всем жизненном цикле, включая батареи различных типов и областей применения. Например, в базе данных Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт) содержится перечень не менее чем из 20 действующих государственных стандартов по СКАБ (не считая стандартов ПАО «Россети») [8]. Существует достаточно большое количество отечественных заводов-изготовителей свинцово-кислотных батарей (ООО «Курский аккумуляторный завод», ООО «Рязанский аккумуляторный завод “Тангстоун”», ООО «Великолукский аккумуляторный завод “Импульс”» и др.), которые предлагают большой ассортимент СКАБ с различными техническими характеристиками по конкурентным ценам.

Вместе с тем применение СКАБ сопряжено с рядом существенных недостатков:

1. При эксплуатации СКАБ может выделяться водород, образующий вместе с воздухом взрывоопасную смесь. В связи с этим СКАБ размещают в отдельном помещении (аккумуляторной), отвечающем специальным требованиям, таким как: наличие вентиляции, взрывобезопасных светильников, огнестойких дверей и др.
2. Электролитом в СКАБ является водный раствор серной кислоты, поэтому пол в помещении аккумуляторной должен быть с кислотостойким покрытием. Также особые требования предъявляются к безопасности персонала, который обслуживает такие батареи.



Рис. 2. Отдельное помещение аккумуляторной со свинцово-кислотными батареями ПС 220 кВ Сварочная

3. Необходимо регулярно обслуживать и контролировать состояние батареи (проверка параметров и уровня электролита).
4. Заряд батареи после аварийного режима (время восстановления системы оперативного тока) занимает не менее 8 часов.
5. Для размещения всех компонентов СОПТ со СКАБ требуется значительное пространство. В частности, это связано с тем, что для обеспечения возможности и удобства обслуживания СКАБ должны размещаться в один ярус (в крайних случаях – в стесненных условиях – в два яруса). Внешний вид отдельного помещения аккумуляторной ПС 220 кВ Сварочная (филиала ПАО «Россети» – МЭС Урала) изображен на рис. 2.

ЛИТИЙ-ИОННЫЕ БАТАРЕИ – ПЕРСПЕКТИВНАЯ ЗАМЕНА СКАБ

Литий-ионные аккумуляторные батареи – относительно новый тип химического источника тока, переносчиком заряда в которых являются положительно заряженные ионы лития Li⁺. Развитие технологии началось в 1990-е годы и в настоящее время достигло технической зрелости. Основным драйвером роста спроса на ЛИАБ стало развитие электротранспорта. В настоящее время литий-ионные аккумуляторные батареи применяются также в системах накопления электрической энергии, различных электронных устройствах, мобильных телефонах и т. д. По оценкам Bloomberg, мировой спрос на ЛИАБ продолжит расти. При этом за счет строительства новых заводов по их изготовлению («гигафабрик») средняя удельная стоимость таких батарей из года в год снижается и на декабрь 2024 г. составила рекордно низкую величину – 115 долл./кВт·ч [9].

ЛИАБ обладает рядом существенных преимуществ по сравнению со СКАБ. Сравнение основных технических характеристик ЛИАБ и СКАБ приведено в таблице 1. Там же представлены усредненные значения параметров. Числовые данные для ЛИАБ приведены для батарей типа LFP (литий-железо-фосфатных). Как видно из таблицы 1, литий-ионные батареи обладают значительно лучшими техническими характеристиками.

Согласно действующей нормативно-технической документации, для размещения СКАБ требуется отдельное помещение с классом взрывоопасности В-1а, оснащенное специализированными инженерными системами (вентиляции, пожаротушения и т. д.) и соответствующее дополнительным требованиям: наличие кислотостойких покрытий, расположение батарей, обеспечивающее удобство обслуживания и безопасную доливку электролита, и др. В отличие от свинцово-кислотных аккумуляторных батарей ЛИАБ не требуют специального обслуживания и, ввиду большей плотности энергии, являются значительно более компактными и могут быть размещены в стандартном электротехническом шкафу (шкафах).

Следует отметить, что стоимость отдельной ЛИАБ обычно выше стоимости СКАБ той же емкости. Однако суммарная стоимость владения ЛИАБ в составе СОПТ в течение

Таблица 1. Сравнение свинцово-кислотных и литий-ионных аккумуляторных батарей

Параметр	СКАБ	ЛИАБ	Ссылка на источник
Циклический ресурс	300÷500	2000÷3000	[10], [11]
Удельная энергия, Вт·ч/кг	30÷50	120÷180	[10]
Время заряда, ч	8÷10	1÷2	[11]
Саморазряд в месяц, %	4÷6	1÷3	[12]
Выделение вредных веществ при эксплуатации	Да	Нет	[15], [16]
Компактность размещения	Требуется отдельное помещение	Значительно компактнее. Могут быть размещены в стандартном электротехническом шкафу (шкафах)	[15], [16]
Система контроля и управления	Отсутствует	Есть (BMS)	[15], [16]

срока жизни батареи (не менее 20 лет) может быть ниже, чем при применении СКАБ [13]. Более того, при наличии значительных толчковых токов даже стоимость отдельной ЛИАБ требуемой емкости оказывается ниже стоимости СКАБ специального назначения (типа GroE и др.).

ПРИМЕРЫ ПРАКТИЧЕСКОГО ОПЫТА ПРИМЕНЕНИЯ СОПТ НА ЛИАБ

В России первый проект, в котором применялись ЛИАБ в составе СОПТ, был реализован в 2013 г. при реконструкции главной понизительной подстанции (ГПП) 220 кВ АО «УЭХК» (АО «Уральский электрохимический комбинат», входит в состав Топливной компании Росатома «ТВЭЛ»). На сегодняшний день СОПТ с ЛИАБ установлены также на ГПП-3 и ГПП-4 АО «УЭХК» [14]. В 2014 г. аналогичный проект реализован на одной из компрессорных станций Комсомольского ЛПУ ООО «Газпром Трансгаз Югорск» [15]. Пилотные проекты с применением СОПТ с ЛИАБ: для распределительной сети – реконструкция в 2020 г. ПС 110 кВ КАЗ (ПАО «Россети Урал»), для магистральной сети – реконструкция в 2021 г. ПС 220 кВ Сварочная (ПАО «Россети» – МЭС Урала) [15, 16]. В 2022 г. введена в эксплуатацию СОПТ с ЛИАБ на ПС 110 кВ Кош-Агачская (ПАО «Россети Сибирь» – «Алтайэнерго»), в 2024 г. – на ПС 110 кВ Звенигород (ПАО «Россети Московский регион»). В ходе реализации всех проектов был получен положительный опыт использования литий-ионных аккумуляторов в системе оперативного постоянного тока.

Разработкой СОПТ с ЛИАБ для ПС 220 кВ Сварочная занимались специалисты АО «Россети Научно-технический центр» в рамках научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы (НИОКР) по разработке и апробации инновационных технологий по снижению расхода на собственные нужды подстанций в рамках реализации мероприятий дорожной карты национального проекта «Энергоэффективная подстанция» [15, 16].

В соответствии с утвержденными требованиями был изготовлен опытный образец системы оперативного постоянного тока, который состоит из следующих основных элементов:

- литий-ионная аккумуляторная батарея LT-LFP номинальной емкостью 170 А·ч в шкафном исполнении с системой контроля и управления;
 - два зарядно-выпрямительных устройства НРТМ 60.220+40.48;
 - шкаф коммутации, обеспечивающий подключение разработанной СОПТ в существующую систему оперативного постоянного тока (на базе СКАБ) и включающий в себя защитно-коммутационные аппараты, предназначенные для работы в сети постоянного тока, а также блок заряда, систему контроля и управления ЛИАБ, систему мониторинга.
- Опытный образец успешно прошел испытания на заводе-изготовителе, комплексные испытания и опытно-промышленную эксплуатацию (ОПЭ) на ПС 220 кВ Сварочная. По результатам ОПЭ было установлено, что потери электрической энергии в ЛИАБ в цикле заряд-разряд в три раза меньше потерь в СКАБ.
- Внешний вид СОПТ на ПС 220 кВ Сварочная, размещенной в релейном зале общеподстанционного пункта управления (ОПУ), изображен на рисунке 3. Видно, что требуемая для такой системы площадь размещения значи-



Рис. 3. Внешний вид СОПТ на ПС 220 кВ Сварочная

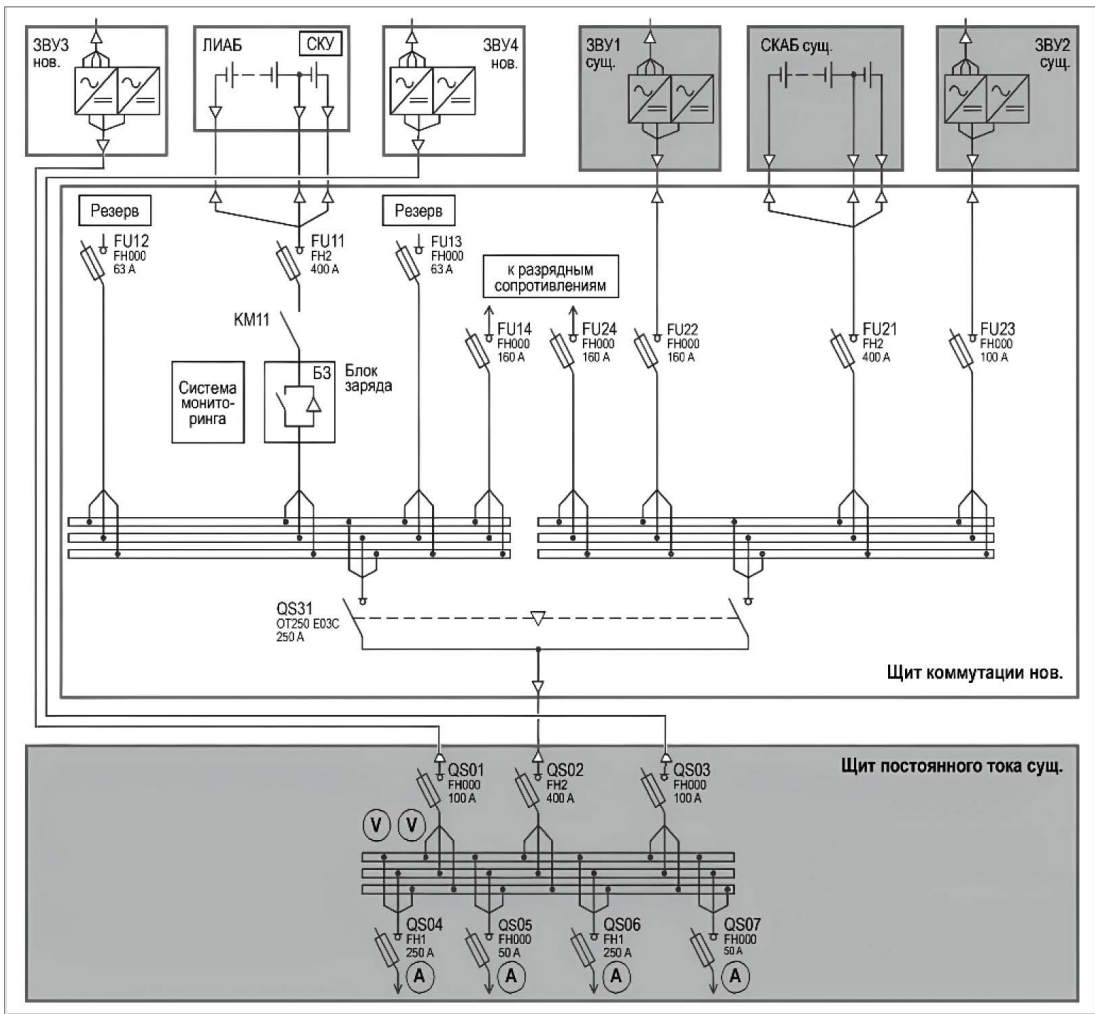


Рис. 4. Схема подключения СОПТ с ЛИАБ на ПС 220 кВ Сварочная

тельно меньше, чем в случае СОПТ с применением СКАБ (рис. 2). Схема подключения СОПТ показана на рис. 4.

В настоящее время система оперативного тока с ЛИАБ работает стабильно и надежно, обеспечивая оперативное управление и контроль оборудования подстанции, что подтверждается эксплуатационным персоналом. Неоднократные коммутации масляных баковых выключателей подтверждают работоспособность внедренной системы. Обеспеченная надежность работы ЛИАБ позволила отключить установленные на подстанции СКАБ. Данный факт подтверждается не только расчетами, проведенными на этапе проектирования СОПТ, но и результатами комплексных испытаний, ОПЭ и успешной эксплуатацией СОПТ вплоть до настоящего времени [15, 16]. Другие характеристики аккумуляторных батарей представлены в таблице 2.

По итогам трехлетнего эксплуатационного периода было отмечено отсутствие отказов при работе системы оперативного постоянного тока на ЛИАБ, а также обеспечена стабильная и надежная работа системы, подтверждены преимущества применения в СОПТ литий-ионных батарей вместо свинцово-кислотных.

СУЩЕСТВУЮЩИЕ БАРЬЕРЫ ВНЕДРЕНИЯ СОПТ С ЛИАБ

Несмотря на техническую зрелость технологии ЛИАБ и ее широкое применение в электротранспорте (в частности, в автомобилях, электробусах, речном транспорте), системах накопления электрической энергии, различных электронных устройствах, мобильных телефонах и др., ЛИАБ в составе СОПТ и систем гарантированного питания на подстанциях ПАО «Россети» в настоящее время практически не применяется. Существует ряд барьеров, которые препятствуют дальнейшему развитию технологии и ее полноценному использованию при сооружении и реконструкции подстанций. Можно выделить основные:

1. **Отсутствие достоверной информации о сроке службы ЛИАБ**

Согласно [5], аккумуляторные батареи в СОПТ должны обеспечивать срок службы не менее 20 лет. Однако существующий в отечественной практике срок эксплуатации не превышает 12 лет, что не позволяет однозначно гарантировать требуемые сроки службы. Срок службы батареи определяется, в первую очередь, условиями эксплуатации

Таблица 2. Сравнение характеристик свинцово-кислотных и литий-ионных аккумуляторных батарей в составе СОПТ на ПС 220 кВ Сварочная [15]

Параметр	Vb 2311+ (СКАБ)	LT-LFP 170 (ЛИАБ)
Номинальная емкость, А·ч	550	170
Количество ячеек в батарее, шт.	123	82
Номинальное напряжение, В	2,0	3,2
Масса одной ячейки, кг	52,9	6,7
Масса батарей (без стеллажа), кг	6 507	550
Требуемая площадь, м²	Около 30	0,6

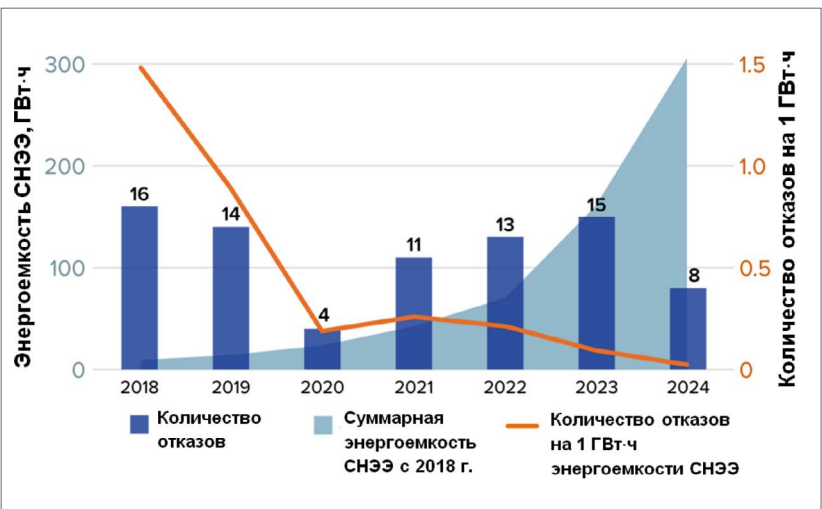


Рис. 5. Статистика отказов СНЭЭ в мире

(температурой батареи, глубиной разряда, степенью заряда, высокими токами заряда и разряда, напряжением ячеек и др.). Для аккумуляторных батарей в составе СОПТ режимы работы не предполагают частых и глубоких разрядов, способствующих ускоренной деградации батареи. В связи с этим срок службы ЛИАБ продолжительностью 20 и более лет может быть на практике достигим, однако требуются дополнительные исследования.

2. Вопросы пожаробезопасности ЛИАБ

Применение ЛИАБ, как и СКАБ, не исключает возможности возникновения пожара. Основная причина возможного возгорания литий-ионных батарей — тепловой разгон, представляющий собой каскадный процесс неконтролируемого увеличения температуры батареи вследствие протекания химических реакций. В свою очередь, можно выделить несколько основных причин теплового разгона, а именно: механические (повреждение батареи, прокол ячейки и т. д.), электрические (внутреннее короткое замыкание, перезаряд, разряд при отрицательных температурах и др.), термические (внутренний или внешний перегрев ячеек и батареи) [17]. Таким образом, обеспечение нормальных условий эксплуатации ЛИАБ (надежная работа BMS¹, систем охлаждения батарей и т. д.), а также исключение нарушений технологии производства оборудования (в том числе за счет проведения заводских и приемочных комплексных испытаний, аттестации оборудования) создают условия для безопасного использования ЛИАБ.

На рис.5 приведена статистика отказов СНЭЭ в мире в период с 2018 по 2024 г. по данным отчета исследовательского института EPRI² [18]. В отчете указано, что для получения статистики использованы данные из открытых источников. При этом в большинстве случаев учтены

отказы, приводящие к тепловому разгону батареи и/или возникновению пожара. Как отмечается в этом и другом [19] отчете, тепловой разгон не во всех случаях приводит к пожару. Из приведенного рисунка видно: несмотря на существенный рост суммарной установленной энергоемкости СНЭЭ, удельное количество отказов СНЭЭ (количество отказов на 1 ГВт·ч установленной мощности) в период с 2018 по 2024 г. сократилось на 98 %. Это обусловлено совершенствованием технологий производства, обслуживания и эксплуатации СНЭЭ.

3. Отсутствие разрешительной нормативно-технической документации

Во многих стандартах ПАО «Россети» указывается, что в составе СОПТ могут применяться только свинцово-кислотные аккумуляторные батареи. Это существенно ограничивает возможности применения ЛИАБ в составе СОПТ на подстанциях организации. Очевидно, стандарты [20], [21], [22] и др. требуют корректировки.

Анализ выявленных ограничений показывает, что существующие барьеры применения литий-ионных аккумуляторных батарей в составе СОПТ могут быть устранены. Однако для этого требуется дополнительное обоснование, а также проведение исследований и практических работ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Литий-ионные аккумуляторные батареи являются современной и эффективной технологией накопления энергии с высокой степенью технологической зрелости. В составе систем оперативного постоянного тока подстанции ЛИАБ демонстрируют значительные преимуще-

¹ BMS (англ. Battery Management System) — система управления аккумуляторной батареей.

² EPRI (англ. Electric Power Research Institute) — научно-исследовательский институт электроэнергетики США.

ства по сравнению со свинцово-кислотными батареями (высокую удельную плотность энергии, сокращение времени заряда батареи, отсутствие необходимости в отдельном помещении со специальной инфраструктурой и др.). Пилотные проекты внедрения СОПТ на ЛИАБ в электрических сетях и на промышленных предприятиях (ПАО «Россети», АО «УЭХК», ООО «Газпром Трансгаз Югорск») подтверждают надежность и эффективность технологии.

Несмотря на преимущества, широкомасштабному применению ЛИАБ в СОПТ препятствуют:

- нормативные ограничения (действующие стандарты ПАО «Россети» регламентируют использование только СКАБ);
- вопросы обеспечения требуемых сроков службы ЛИАБ (отсутствие достоверных данных о 20-летнем сроке службы);
- вопросы пожарной безопасности (наличие риска теплового разгона).

Для масштабирования технологии в качестве первоочередных мер необходимо:

1. Скорректировать и утвердить нормативно-техническую базу (стандарты ПАО «Россети»), регламентирующую применение ЛИАБ в составе СОПТ.
2. Провести дополнительные исследования, направленные на подтверждение (уточнение) срока службы ЛИАБ в условиях, максимально приближенных к условиям эксплуатации литий-ионных аккумуляторных батарей в составе СОПТ.
3. Разработать рекомендации по обеспечению надежности функционирования и пожаробезопасности литий-ионных аккумуляторных батарей, включающие в том числе методику проведения испытаний на пожаробезопасность, рекомендации по системам пожаротушения, методику проведения функциональных испытаний СОПТ с ЛИАБ, а также рекомендации по применению различных технических решений, снижающих риски возникновения и распространения пожара (например, применение жидкостных систем охлаждения батарей, взрывозащищенных шкафов, термостойких корпусов, материалов, перегородок и др.).
4. Провести технико-экономическое обоснование применения ЛИАБ для подстанций различного класса напряжения и с различным составом «толковой» (импульсной) нагрузки.
5. Обеспечить содействие в развитии компетенций по проектированию и применению систем накопления электрической энергии, в том числе на базе вузов, научно-технических центров, центров компетенций, проектных организаций и т. д.

Устранение нормативных и технических барьеров обеспечит возможность применения литий-ионных аккумуляторных батарей в составе СОПТ в электрических сетях ПАО «Россети», что, в свою очередь, станет отдельным драйвером развития технологии литий-ионных аккумуляторных батарей в России в соответствии с целями Стратегии научно-технологического развития РФ [1].

↓ СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Стратегия научно-технологического развития РФ (утв. распоряжением Правительства РФ от 9 июня 2020 года №1523-р).
2. Дорожная карта развития высокотехнологической области «Технологии создания систем накопления электроэнергии, включая портативные» до 2030 года (утв. распоряжением Правительства РФ от 28 февраля 2022 г. № 356-р).
3. Положение ПАО «Россети» «О единой технической политике» (утв. Советом директоров ПАО «Россети», протокол от 28.12.2024 № 673).
4. Сорокин Д.В. Выбор мест установки и параметров систем накопления электрической энергии в распределительных сетях. // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики, 2024, № 75.
5. СТО 56947007–29.120.40.262–2018. Руководство по проектированию систем оперативного постоянного тока (СОПТ) ПС ЕНЭС. Типовые проектные решения. Дата введения: 18.12.2018.
6. Гуриков О.В., Шавловский С.В. и др. Применение накопителей энергии с использованием литий-ионных аккумуляторных батарей в системах оперативного постоянного тока // Известия НТЦ Единой энергетической системы. 2015. №2 (73).
7. СТО 56947007–29.240.10.248–2017. Нормы технологического проектирования подстанций переменного тока с высшим напряжением 35–750 кВ (НТП ПС). Дата введения: 25.08.2017.
8. Официальный сайт Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт): <https://protect.gost.ru/document.aspx?control=13&catalogid=1261&search=&page=0> (Дата обращения: 01.06.2025).
9. Официальный сайт Bloomberg: «Lithium-Ion Battery Pack Prices»: <https://about.bnef.com/insights/commodities/lithium-ion-battery-pack-prices-see-largest-drop-since-2017-falling-to-115-per-kilo-watt-hour-bloombergnef/> (Дата обращения: 01.06.2025).
10. Xiang L., at al. Modeling the correlation relationship of aqueous battery parameters based on regression analysis // 4th International conference on energy and power engineering (EPE 2021). 2021. No 898.
11. Sardar I.H., at al. A short review of lithium-ion battery technology // International journal of scientific research in science. 2020. Vol. 7.
12. Dhanaselvam J., at al. A critical review on key issues of performance degradation factors for lithium-ion batteries // International conference on smart and sustainable energy systems. 2021. No 1375.
13. Ворошилов А.Н. и др. Экономические аспекты использования литий-ионных аккумуляторных батарей в составе СОПТ // Энергоэксперт. 2023. № 1.
14. Официальный сайт АО «УЭХК»: <http://www.ueip.ru/press-center/news/Pages/20230503.aspx> (Дата обращения: 01.06.2025).
15. Лебедев Д.Е., Потапенко А.М., Иваницкий С.С. Система обеспечения резервного питания подстанции с помощью литий-ионных батарей // Энергия единой сети. 2021, №5–6. С. 60–61.
16. Лебедев Д.Е., Потапенко А.М., Иваницкий С.С., Семягин А.С. Система обеспечения резервного питания подстанции с помощью литий-ионных батарей. Комплексные испытания и опытно-промышленная эксплуатация опытного образца // Энергия единой сети. 2022. №5–6. С. 66–67.
17. Dai Y., Panahi A. Thermal runaway process in lithium-ion batteries: A review // Next Energy. 2025. Vol. 6.
18. Официальный сайт EPRI, отчет «Insights from EPRI's Battery Energy Storage Systems (BESS) Failure Incident Database»: Analysis of Failure Root Cause: <https://www.epri.com/research/products/000000003002030360> (Дата обращения: 01.06.2025).
19. Официальный сайт EPRI, отчет «The difference between thermal runaway and ignition of a lithium ion battery»: <https://restservice.epri.com/publicdownload/000000003002025283/0/Product>.
20. СТО 56947007–29.120.40.262–2018. Руководство по проектированию СОПТ ПС ЕНЭС. Типовые проектные решения. Дата введения: 18.12.2018.
21. СТО 56947007–29.120.40.216–2016. Методические указания по выбору оборудования СОПТ. Дата введения: 18.03.2016.
22. СТО 56947007–29.120.40.041–2010. СОПТ. Технические требования. Дата введения: 29.03.2010.