

Вопросы применения и развития систем накопления электроэнергии

Д. А. Россихин
Филиал ПАО «ФСК ЕЭС» – МЭС Центра
rossikhindima@mail.ru

Д. И. Менделеев
АО «Татэнерго» филиал «Казанская ТЭЦ-2»
Dylankn@ya.ru

Л. А. Галимзянов
АО «Татэнерго» филиал «Казанская ТЭЦ-2»
lenarlg85@gmail.com

Аннотация. Мировая энергетика сегодня находится на новом этапе – этапе масштабного перехода, характеризующегося широким применением возобновляемых источников энергии и сокращением использования топлива, основанного на углеводородах. Уже отчетливо виден новый тренд развития энергетики – генерация энергии должна быть непрерывно связана с её параллельным накоплением. В данной статье рассматриваются существующие технологии систем накопления энергии, опыт успешной отечественной и зарубежной эксплуатации систем, перспективы и потенциал их развития в Российской Федерации, а также сопутствующие риски.

Ключевые слова: системы накопления электроэнергии; источник бесперебойного питания; батарея; энергосистема; аккумулятор; электроснабжение; генерация; электроэнергия

I. ВВЕДЕНИЕ

В современном мире энергетика находится на пороге важных перемен. Одним из ключевых этапов этих изменений является распространение систем хранения энергии и снижение стоимости ее хранения. С помощью внедрения этих технологий электростанции смогут оптимизировать работу электрооборудования и сетей, а также потребителей для выравнивания нагрузки и накопления энергии для дальнейшего использования.

Прорыв в области систем накопления электроэнергии сможет стать стимулом к расширению использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Этот вопрос особенно актуален для регионов России, технологически не связанных с единой энергосистемой страны, например, на Крайнем Севере и в Арктике [1–3].

СНЭЭ достаточно широко применяются во многих сферах человеческой жизни. Без эффективных энергоёмких аккумуляторов было бы невозможно покорять водные глубины, исследовать космос или внедрять электромобили в повседневную жизнь.

По данным Глобального института «McKinsey» технологии хранения энергии входят в число двенадцати наиболее важных для развития мировой экономики. «Bloomberg New Energy Finance» ожидает, что установленная мощность накопителей энергии по всему миру к 2040 году достигнет 1095 ГВт*ч, а емкость составит порядка 2 850 ГВт*ч. Согласно прогнозам, лидерами мирового рынка в этой сфере станут США,

Китай, Германия и Индия. Объём инвестиций к 2040 году достигнет отметки в 662 млрд долларов США.

В России же новый инвестиционный цикл в энергетике ожидается после 2022 года. Сумма вложений может составить 500–700 млрд долларов США к 2035 году. При этом выиграть от применения накопителей смогут практически все участники рынка.

Развитие технологий накопления энергии в ближайшем будущем повысит надежность работы энергосистем, сделает их более гибкими, сгладит пики потребления, расширит зоны распределенной генерации, введет в производство больший объем возобновляемых источников энергии, создаст возможность локального перехода на системы постоянного тока и исключит необходимость строгой одновременности производства и потребления электроэнергии [4–7].

Однако, крайне важно оценить все возможности применения СНЭЭ, пути их развития и нюансы успешной эксплуатации.

II. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ

Существует ряд приоритетных сфер применения СНЭЭ, формирующих наибольшие сектора внутреннего рынка и обеспечивающих достижение наибольшего эффекта для экономики. В их число входят:

- Системы распределенной энергетики, микрогриды, смартгриды: применение СНЭЭ в электроснабжении изолированных и удаленных районов, в системах энергоснабжения жилых районов, использование СНЭЭ в системе энергоснабжения промышленных и коммерческих потребителей, применение СНЭЭ в электрическом транспорте и в зарядной инфраструктуре, специальные сервисные применения СНЭЭ (передвижные аварийные источники питания, коллективные источники бесперебойного питания (ИБП), сервисы повышенного качества электроэнергии).
- Новая генеральная схема устройства энергетических систем: управление суточным графиком потребления и генерации, а также качеством электроэнергии, вращающийся резерв энергосистемы и другие системные услуги.
- Водородная энергетика.

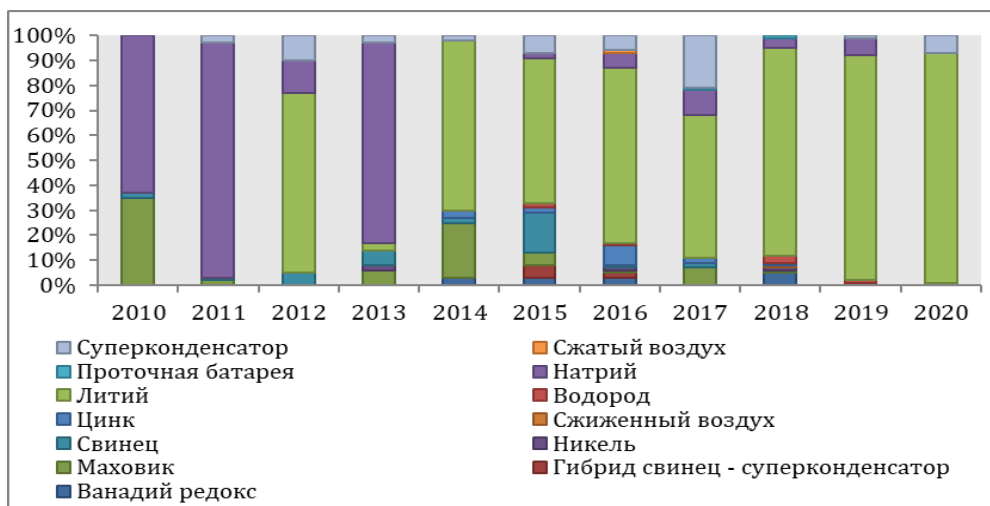


Рис. 1. Структура введенных проектов по технологиям

В процессе анализа рассмотрено более 1000 как реализованных проектов, так и те проекты, которые находятся в процессе реализации, по результатам был выявлен спектр наиболее используемых технологий (рис. 1).

Основные типы СНЭ представлены в табл. 1. Сферы применения СНЭ классифицируются по функциям и типам потребителей (табл. 2) [8–11].

По оценкам «Navigant Research» рынок систем накопления электроэнергии, используемых в сетевых и системных услугах, превысит 18 млрд долларов США, а установленная мощность превысит 20000 МВт к 2025 году (рис. 2).

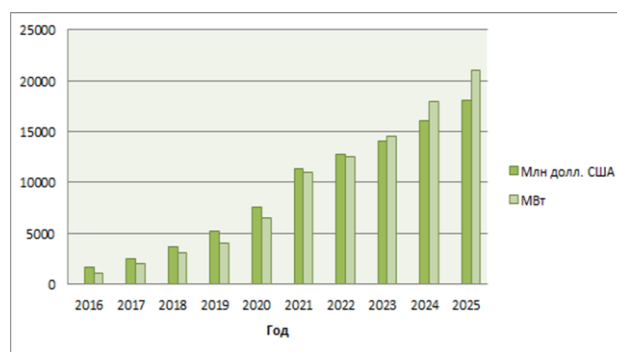


Рис. 2. Прогноз роста мирового рынка систем накопления электроэнергии и прогноз установленной мощности систем накопления электроэнергии в мире.

ТАБЛИЦА 1 КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ ХРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Системы хранения электроэнергии				
Механические / пневматические	Тепловые	Химические	Электрохимические	Электрические
Гидроаккумулирующие системы (ГАЭС)	Термохимические аккумуляторы	Аккумулятор энергии с водородным циклом	Li-ion	Суперконденсаторы
Подземные накопители сжатого воздуха	Хранение энергии за счет нагревания вещества	Преобразование водорода в метан	Ni-Cd	Сверхпроводящие системы
Система хранения жидкого воздуха	Хранение энергии с использованием материалов с обратимыми фазами	-	NaS	-
Инерционные накопители	-	-	LeadAcid и т.д.	-

Основными факторами, которые позволят укрепить рынок и развить применение СНЭ, станут:

- снижение стоимости и массовое расширение зон генерации на основе возобновляемых источников энергии;
- распространение и масштабное использование электрического транспорта;
- освоение аккумуляторов на основе литий-ионных технологий и снижение их стоимости, а также рост потребности в генерирующих и сетевых мощностях [12–16].

Приоритетные технологии СНЭ на горизонте 2021–2035 годов, на которые необходимо делать ставку России, принадлежат к следующим пяти группам:

- «Пост-литиевые» электрохимические технологии, к числу которых относятся технологии натрий-ионных, калий-ионных, магний-ионных и других типов электрохимических аккумуляторов.
- Проточные батареи, в которых разделяются источник мощности и электролит. К этой группе относятся редокс-ванадиевые, цинк-бромидные, цинк-железные и ряд других, отличающихся типом токообразующей реакции.
- Металло-воздушные батареи, такие как воздушно-цинковые и алюминево-воздушные батареи, отличающиеся низкими затратами на их производство и высокой плотностью запасаемой энергии.

Функции	Типы потребителей систем хранения электроэнергии			
	Национальные и региональные энергосистемы, от 500 кВт*ч	Коммерческие и промышленные предприятия, от 150 до 500 кВт*ч	Частный и общественный электрический транспорт, от 50 до 150 кВт*ч	Домохозяйства и промышленное оборудование, от 10 до 50 кВт*ч
Основной источник энергии	-	Собственный источник энергии для предприятий	Источник энергии на личном электрическом и гибридном транспорте Источник энергии на общественном электрическом и гибридном транспорте	Собственные источники энергии для домохозяйств и промышленного оборудования
Аварийный источник энергии	Вращающийся резерв мощности на загрузку и разгрузку	Источник бесперебойного питания предприятий	-	Источники бесперебойного питания домохозяйства
		Источники аварийного питания предприятий		Источники аварийного питания социальных объектов и оборудования
Управление графиком потребления	Сглаживание суточного графика нагрузки в энергосистемах	Ценовой арбитраж	-	Ценовой арбитраж
	Сглаживание годовой неравномерности потребления электроэнергии	Сглаживание графика потребления		Сглаживание графика потребления
	Разгрузка центров питания и сечений	Повышение эффективности собственной генерации, в том числе ВИЭ		Повышение эффективности собственной генерации
Регулирование системных параметров	Первичное и вторичное регулирование частоты в энергосистеме	Регулирование системных параметров	Рекуперация энергии на неподключенном общественном транспорте	Рекуперация энергии на оборудовании
		Пусковые системы		Электротрансмиссия
				Пусковые системы

- Водородные технологии, основанные на сочетании технологий получения энергии из газа и топливных элементов, которые обеспечивают хранение энергии в синтетическом химическом топливе.
- Гравитационные накопители – твердотельные аккумулирующие электростанции, работа которых базируется на принципе лифта твердых грузов. Данный тип накопителей благодаря высокому коэффициенту полезного действия рассматривается как потенциальный технологический лидер отечественного рынка СНЭЭ.

III. ОПЫТ ПРОИЗВОДСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИЯ

В России на сегодняшний день существуют более 15 предприятий, выпускающих электрохимические накопители и суперконденсаторы. Заказчиками в основном являются предприятия оборонно-промышленного комплекса, в связи с чем в большинстве случаев выпускаются не СНЭЭ в готовом виде, а комплектующие для них. Единственным заводом, выпускающим литий-ионные аккумуляторы в России, является «Литотех». Объемы производства «Литотеха» превышают 1 ГВт*ч и являются даже избыточными в условиях невысокого спроса на отечественном рынке. Кроме того, за последние два года в России запущены

новые производственные мощности по различным направлениям СНЭЭ: в сфере литий-ионных АКБ – ООО «ЭнерЗет» (технология NMC), в сфере водородной энергетики и топливных элементов – ООО «ИнЭнерджи». Знаковым событием является старт производства современных суперконденсаторов компанией ООО «ТЭЭМП». Крупнейшими объектами в России, где эксплуатируются СНЭЭ, являются ГАЭС: Загорская ГАЭС-1 (мощность 1,2 ГВт), Кубанская ГАЭС (мощность 15,9 ГВт) и Зеленчукская ГЭС-ГАЭС (мощность 320 ГВт). Также существуют проекты на стадиях реализации. На Кош-Агачской СЭС планируется установка «сетевой» системы мощностью 584 кВтч. На СЭС Верхняя и Нижняя Бурзянская монтажные и пусконаладочные работы ведутся на двух гидроаккумулирующих установках общей мощностью 8 000 кВт*ч. Компания-производитель ООО «Системы накопления энергии» успешно завершила испытания накопительных систем мощностью 400 кВт*ч, что позволяет регулировать график нагрузки и предотвращать отключение газопоршневых агрегатов в случае резкого изменения профиля нагрузки [17–19].

Также эксплуатируются системы накопления электроэнергии, основанные на других технологиях, некоторые из которых приведены в табл. 3.

Местоположение	Тип аккумулятора	Суммарная номинальная мощность/ энергоёмкость	Назначение СНЭЭ	Ввод в эксплуатацию
ПС «Сколково», Московская область	Литий-ионные (литий-никель-марганец-кобальтатные)	1200 кВА/1000 кВт*ч	ИБП	2012
ПС «Псоу», г. Сочи	Литий-ионные (литий-никель-марганец-кобальтатные)	1500 кВА/2500 кВт*ч	ИБП, регулирование частоты, компенсация пиковой мощности	2013
ПС «Волхов-Северная», г. Санкт-Петербург	Литий-ионные (литий-никель-марганец-кобальтатные)	1500 кВА/2500 кВт*ч	Параллельная работа с газотурбинной установкой для компенсации пиковой мощности, выравнивание графика нагрузки, регулирование частоты	2014
Зарядная станция для электромобилей, г. Рязань, ЕЭС России	Литий-ионные (литий-железо-фосфатные)	22 кВА/100 кВт*ч	СНЭЭ для зарядной станции электромобилей	2016
Республика Тыва, п. Мугур-Аксы	Литий-ионные (литий-железо-фосфатные)	400 кВА/460 кВт*ч	Оптимизация работы солнечной электростанции и ДЭС	2019

Американская компания «Tesla» подключила одну из самых больших литий-ионных батарей мощностью 150 МВт и емкостью 193,5 МВт*ч к ветряной электростанции «Hornsedale» в штате Южная Австралия. Данное направление крайне перспективно и актуально. Это объясняется тем, что генерация в Австралии всё больше основывается на ВИЭ – энергии ветра и солнца. Аналогичные технологии компания «Tesla» также внедряет в штате Калифорния, в Новой Зеландии, Великобритании, на Гавайях и в ряде тихоокеанских островов.

Японская компания «NGK Insulators» одной из первых вышла на мировой рынок с технологией сульфидных натриевых батарей с жидким электролитом. Сегодня общая емкость аккумуляторов «NGK Insulators», установленных по всему миру, составляет около 3 ГВт*ч, а в Японии создана крупнейшая в мире сеть аккумуляторных батарей. Также эта технология была внедрена в столице ОАЭ г. Абу-Даби: пятнадцать аккумуляторных систем были установлены в десяти различных географических точках города – суммарной мощностью 108 МВт, каждая из которых способна обеспечивать заявленную мощность в течение пяти-шести часов.

Лидирующая корейская компания «LS Power» ввела в округе Сан-Диего в Калифорнии в эксплуатацию крупнейшую в мире СНЭ – объект «Gateway Energy Storage» мощностью 250 МВт, основанный на литий-ионных аккумуляторах.

Китайская компания «CATL» разработала аккумуляторную систему хранения 100 МВт*ч для демонстрационного проекта «Luneng Naixi», которая представляет собой комбинацию различных типов электростанций, работающих на возобновляемых источниках энергии. Эта система является первым в мире электрохимическим накопителем энергии с виртуальным синхронным генератором [20–22].

IV. РИСКИ РАЗВИТИЯ

1. Основными и наиболее потенциальными к реализации политическими рисками развития рынка электротехнической промышленности как в России, так и в остальном мире, являются санкции: ограничения и

запреты, направленные на подрыв экономической стабильности в странах, искусственное замедление темпов производства, ограничение или полное прекращение поставок необходимых материальных ресурсов и значительное снижение конкурентоспособности на рынке.

Вследствие потенциальных угроз введения санкций по отношению к нашей стране зависимость от импорта технологий и некоторых видов стратегического и дефицитного сырья создает риски необеспечения различных отраслей отечественной экономики необходимым минеральным сырьем и ставит под угрозу динамичное и успешное развитие отрасли СНЭЭ.

2. С точки зрения социокультурных рисков одним из барьеров развития сектора СНЭЭ являются сомнения общества ввиду отсутствия референтной и достаточно известной успешной практики применения в России. По причине новизны данных технологий у потребителей зачастую отсутствует достаточная осведомленность об уровне технических характеристик и соответствии им заявленной финансовой стоимости продукта. На ситуацию негативно влияет сложность демонстрации эффективности применения СНЭ в малых по объёму охвата отечественных проектах на уровне отдельных домохозяйств или компаний и наличие экономического эффекта только в результате реализации масштабных комплексных проектов на уровне микрорайона или крупного промышленного объекта.

Еще одной социальной проблемой, о которой все чаще и чаще пишут ведущие мировые СМИ, является кустарная добыча сырья в некоторых странах мира для производства аккумуляторов, например, кобальта и лития. В процессе добычи указанных металлов зачастую используется детский труд, не обеспечивается должная защита трудящихся, не говоря уже о защите окружающей среды.

Одной из тенденций развития рынка накопителей электроэнергии является широкое распространение в повседневной жизни электротранспорта. Согласно исследованию, примерно половина сомнений в приобретении электрокара основана на пока еще невысоких эксплуатационных характеристиках аккумуляторов и отсутствии развитой зарядной

инфраструктуры для них. Очевидно, что для уверенного роста рынка необходимо повышение уровня технической грамотности потребителя в области электромобилей. Решением может выступить реализация комплекса ознакомительных мероприятий.

3. Экономические риски, связанные с развитием систем хранения энергии, можно разделить на две ветви: внутренние, связанные с их производством, и внешние, связанные с изменением экономической ситуации и рыночных условий.

Внутренний риск – это возможная нехватка сырья и борьба за сырьевой рынок. По оценкам «Deutsche Bank», мировых запасов лития хватит примерно на 185 лет. Несколько иная ситуация складывается вокруг также пользующегося спросом кобальта, более половины мирового производства которого сосредоточено в Демократической Республике Конго, а почти все производство сферического графита сосредоточено в Китае.

Внешнеэкономические риски также можно разделить на две области: риски экономической эффективности и риски стагнации. Предполагается, что хранилища заменят большую часть резерва мощности, но только если это окажется более рентабельным, чем поддержание резервов генерации. В России максимальная зафиксированная фактическая нагрузка составляет чуть более 158 ГВт, а суммарная номинальная мощность всех электростанций превышает 240 ГВт – станции используются далеко не на полную мощность.

На сегодняшний день хранение энергии в СНЭЭ (стоимость составляет 0,4 доллара США за 1 кВт*ч) дороже ее производства (стоимость – 0,05 доллара США за 1 кВт*ч). Стагнационные риски связаны в целом с замедлением роста экономики государств. Падение курса стоимости национальных валют по отношению мировым неизбежно влечет за собой резкое падение спроса на новые технологии.

4. Существенным правовым барьером развития СНЭЭ, присутствующим в российском законодательстве, является отсутствие понятия «система накопления электроэнергии» в отраслевых нормативно-правовых актах, регламентирующих правила и особенности работы оптового и розничного рынков электроэнергии и мощности. Отсутствие данного определения делает невозможным фиксацию в законодательстве особенностей регулирования деятельности СНЭЭ на вышеуказанных рынках.

Классификация СНЭЭ одновременно и как объект генерации и как объект потребления создает предпосылки к предъявлению к ним излишних требований и к невозможности применения для них специальных мер регулирования, которые бы учитывали особенности их функционирования и позволяли эксплуатировать с наибольшей эффективностью. Существующие законы об электроэнергетике запрещают совмещение деятельности по передаче электроэнергии и их купли-продажи (за исключением покупок для компенсации потерь или для удовлетворения собственных производственных нужд). Это лишает операторов электросетей возможности включать соответствующие затраты в расчет валового дохода, необходимого для покупки электроэнергии, хранящейся в накопителях. Это закрывает целый набор возможностей эффективного применения СНЭЭ в

электросетевом комплексе, которая могла бы сократить расходы потребителей на энергоснабжение и повысить качество поставляемой им электроэнергии.

5. Эксплуатация любого технологического оборудования, используемого для производства, преобразования и передачи электроэнергии, безусловно сопровождается серьезными технологическими рисками на каждом этапе жизненного цикла изделия.

Так как СНЭЭ не являются отдельными обособленными изделиями, а являются технологически зависимыми от источников генерации и нагрузки потребителей, им присущи все риски нарушения в работе, характерные для энергосистем в целом.

Перечень основных технологических рисков представлен в табл. 4.

ТАБЛИЦА IV ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РИСКИ

Недостатки проекта	Негативное влияние на технологический процесс на любом дальнейшем этапе жизненного цикла
Низкое качество изготовления изделия	Некачественные материалы при изготовлении, некачественная сборка, отсутствие приемо-сдаточных испытаний могут привести к отказу в работе
Нарушение технологий монтажа	Влияет на дальнейшую эксплуатацию и определяет вероятность повреждения всей установки
Несвоевременное техническое обслуживание и ремонт	Ухудшение технических параметров изделия; быстрая исчерпаемость ресурсов; преждевременное старение и деградация
Отсутствие методов диагностики	Повышает риск выхода оборудования из строя
Нарушение правил эксплуатации	Развитие дефектов; невозможность нормального функционирования оборудования
Недостаточная квалификация обслуживающего персонала	Обслуживающий персонал должен иметь достаточные навыки и требуемую квалификацию, без чего правильная и качественная эксплуатация изделия не представляется возможным
Ограниченность времени выдачи мощности	Снабжение от накопителей требует точных расчетов системы на предмет балансов генерируемой, накапливаемой и отпускаемой энергии. В случае их отсутствия работа системы будет неэффективна или даже бесполезна

6. К экологическим рискам можно отнести риски, возникающие при изготовлении, эксплуатации и утилизации аккумуляторных батарей.

Процесс утилизации отработавших нормативный срок службы накопителей сопровождается большим объемом выделяемых отходов. Переработка происходит посредством плавления аккумуляторов до состояния шлака и последующего химического разделения, с помощью которого удастся извлечь некоторое количество металла, например, кобальта. Утилизация требует большого количества затрачиваемой энергии и сопровождается выделением токсичных газов, а извлекаемые материалы имеют низкое качество и не пригодны для дальнейшего использования.

На сегодняшний день единственным переработчиком АКБ, не подвергающим батареи разборке, а сразу помещающим их в специальную печь-реактор, является компания «Umicore».

В результате утилизации данным способом извлечение никеля, меди и кобальта достигает 70 % от их

изначального содержания, а литий уходит в шлак. Описанная технология на сегодня является единственной, позволяющей замедлить рост отходов при утилизации аккумуляторов.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На пороге 2022 года отчетливо виден новый мировой тренд развития энергетики: любая генерация – ветровая, солнечная или гидрогенерация – должна быть непрерывно связана с параллельным накоплением вырабатываемой энергии. В России данное направление находится в начальной стадии развития, в то время как в зарубежных странах уже активно внедряются и эксплуатируются системы накопления энергии. Для успешного развития рынка накопителей в нашей стране необходимо выполнить корректировку и внести дополнения в существующую нормативно-правовую базу, регламентирующую производство, хранение, передачу и распределение электроэнергии, закрепить понятие СНЭЭ и утвердить нормы и особенности их использования. Реализация указанных мероприятий будет являться стимулом для широкого применения СНЭЭ в промышленном и бытовом секторах, при этом ожидается кардинальное изменение модели рынка электроэнергии и мощности, повышение качества и доступности услуг по электроснабжению потребителей, развитие производства комплектующих и сырья, а также укрепление позиций России на мировом рынке накопителей энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Калимуллин Л.В., Левченко Д.К., Смирнова Ю.Б., Тузикова Е.С. Приоритетные направления, ключевые технологии и сценарии развития систем накопления энергии // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2019. № 1. С. 42-54. DOI 10.17588/2072-2672.2019.1.042-054.
- [2] Россихин Д.А., Выприцкая Т.В., Сидорова А.В. Системы накопления электроэнергии: перспективы и потенциал развития // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт 2021. №9.
- [3] S. Kuravi, J. Trahan, D. Y. Goswami, M. M. Rahman, and E. K. Stefanakos, "Thermal energy storage technologies and systems for concentrating solar power plants," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 39, no. 4, pp. 285–319, Aug. 2013, doi: 10.1016/j.pecs.2013.02.001.
- [4] R. Hemmati and H. Saboori, "Emergence of hybrid energy storage systems in renewable energy and transport applications – A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 65, Elsevier Ltd, pp. 11–23, Nov. 01, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.06.029.
- [5] Системы накопления энергии: российский и зарубежный опыт / В.М. Зырянов, Н.Г. Кирьянова, И.Ю. Коротков [и др.] // Энергетическая политика. 2020. № 6(148). С. 76-87. DOI 10.46920/2409-5516_2020_6148_76.
- [6] Перспективы развития мировой энергетики с учетом влияния технологического процесса / под ред. Кулагина // М.:ИНЭИ РАН, 2020. 320 с;
- [7] Прогноз развития энергетики мира и России 2019 / под ред. А.А. Макарова, Т.А. Митровой, В.А. Кулагина; ИНЭИ РАН – Московская школа управления СКОЛКОВО. Москва, 2019. 210 с. – ISBN 978-5-91438-028-8
- [8] Noel, L., Zarazua de Rubens, G., Sovacool, B.K., Kester, J. 2019. Fear and loathing of electric vehicles: The reactionary rhetoric of range anxiety. *Energy Research & Social Science*, 48, Pp. 96–107.
- [9] T. Chen et al., "Applications of Lithium-Ion Batteries in Grid-Scale Energy Storage Systems," *Transactions of Tianjin University*, vol. 26, no. 3. Tianjin University, pp. 208–217, Jun. 01, 2020, doi: 10.1007/s12209-020-00236-w.
- [10] Рынок систем накопления электроэнергии в России: потенциал развития / под ред. Ю. Удальцова, Д. Холкина; Центр стратегических разработок. Москва, 2018.
- [11] Применение систем накопления энергии в России: возможности и барьеры / под ред. Д.В. Холкина, Д.А. Корева; Инфраструктурный центр EnergyNet. Москва, 2019.
- [12] Менделеев, Д. И. Исследование влияния абсорбционной холодильной машины на режимы работы парогазовой установки / Д.И. Менделеев, Ю.Я. Галицкий // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2019. Т. 11. № 4(44). С. 37-46.
- [13] Y. Yang, S. Bremner, C. Menictas, and M. Kay, "Battery energy storage system size determination in renewable energy systems: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 91, Elsevier Ltd, pp. 109–125, Aug. 01, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.03.047.
- [14] J. Y. Lee and J. I. Lee, "A study on steam cycle optimization for integrating energy storage system to nuclear power plant," *Ann. Nucl. Energy*, vol. 160, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.anucene.2021.108349.
- [15] Особенности работы блока ПГУ-220 Казанской ТЭЦ-2 по заданному графику / Д.И. Менделеев, Ю.Я. Галицкий, Г.Е. Марьин, А.Ю. Федотов // Электроэнергетика глазами молодежи - 2018: Материалы IX Международной молодежной научно-технической конференции. В 3-х томах, Казань, 01–05 октября 2018 года / Ответственный редактор Э.В. Шамсутдинов. Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2018. С. 307-310.
- [16] Study of the work and efficiency improvement of combined-cycle gas turbine plants / D.I. Mendeleev, Y.Y. Galitskii, G.E. Marin, A.R. Akhmetshin // E3S Web of Conferences : 2019 International Scientific and Technical Conference Smart Energy Systems, SES 2019, Kazan, 18–20 сентября 2019 года. Kazan: EDP Sciences, 2019. P. 05061. DOI 10.1051/e3sconf/201912405061.
- [17] D. Kucevic et al., "Standard battery energy storage system profiles: Analysis of various applications for stationary energy storage systems using a holistic simulation framework," *J. Energy Storage*, vol. 28, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.est.2019.101077.
- [18] A. G. Olabi, "Renewable energy and energy storage systems," *Energy*, vol. 136, Elsevier Ltd, pp. 1–6, 2017, doi: 10.1016/j.energy.2017.07.054.
- [19] C. Li et al., "Method for the Energy Storage Configuration of Wind Power Plants with Energy Storage Systems used for Black-Start," *Energies*, vol. 11, no. 12, Dec. 2018, doi: 10.3390/en11123394.
- [20] A. Tomczewski, L. Kasprzyk, and Z. Nadolny, "Reduction of power production costs in a wind power plant–flywheel energy storage system arrangement," *Energies*, vol. 12, no. 10, 2019, doi: 10.3390/en12101942.
- [21] T. Sikorski et al., "A case study on distributed energy resources and energy-storage systems in a virtual power plant concept: Economic aspects," *Energies*, vol. 12, no. 23, 2019, doi: 10.3390/en12234447.
- [22] F. Mohamad and J. Teh, "Impacts of energy storage system on power system reliability: A systematic review," *Energies*, vol. 11, no. 7. MDPI AG, 2018, doi: 10.3390/en11071749.