

Анализ применения систем накопления электроэнергии на тепловых электрических станциях

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

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

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

А. Ю. Федотов
АО «Татэнерго» филиал «Казанская ТЭЦ-2»
fedotovay@ktec2.tatenergo.ru

Аннотация. Стремление усовершенствовать производство электроэнергии по различным критериям, будь то технологические факторы или экологические приводит к развитию технологий и последующим их применению в промышленности. Сегодня новый тренд – системы накопления электроэнергии. В частности, такие технологии могут стать неотъемлемой частью производства – как вариант их использования на тепловых электрических станциях. В России системы накопления энергии находится в начальной стадии развития, в то время, как в зарубежных странах уже активно внедряются и эксплуатируются системы накопления энергии, причем их применение актуально как в промышленности, так и в бытовом секторе потребления. В данной статье рассматривается вопрос использования подобных технологий на тепловых электрических станциях с целью повышения энергоэффективности производства и сокращения затрат на собственные нужды.

Ключевые слова: системы накопления электроэнергии; тепловые электрические станции; накопитель; источник бесперебойного питания; парогазовые установки; энергосистема; электроснабжение; генерация; потребление; электроэнергия, собственные нужды

I. ВВЕДЕНИЕ

Россия с существенным отставанием приступает к формированию национальной промышленности систем накопления электроэнергии (СНЭ) и развитию рынка их применения в различных секторах экономики. В Америке планируется ввести 1 325 МВт накопительной мощности к 2020-2021 гг. Компания National Grid (Великобритания) закупила 201 МВт систем накопления энергии для регулирования частоты, а сами системы уже несколько лет представлены на рынке мощности страны. Китай относит накопление энергии к одной из восьми ключевых сфер развития энергетики, до 2021-2022 года планируется ввести 46 ГВт мощности. В США и в Китае интенсивно развивается масштабное производство накопителей, ориентированное на насыщение внутреннего рынка и также на массовые экспортные поставки. [1–3]

По оценке, на основе данных агентства Navigant Research, глобальный рынок систем накопления энергии к 2025 году составит 80 млрд долл. Основная причина роста – масштабное развитие возобновляемых источников энергии (стационарное применение для сглаживания неравномерности выработки) и электротранспорта (батареи для электромобилей),

напрямую или косвенно использующих накопители. Драйвером становится технологический прогресс по ряду решений в области накопления энергии, способный в кратко- и среднесрочной перспективе обеспечить снижение стоимости систем до уровня, приемлемого для рынка. [4–6]

Развитие технологий систем накопления электроэнергии позволит повысить надежность работы энергосистемы, сделает ее более гибкой, сгладит пики потребления, расширит зоны распределенной генерации, внедрит в генерацию больший объем ВИЭ, создаст возможность локального перехода на системы постоянного тока и снизит необходимость строгой одновременности процессов генерации и потребления электроэнергии. [7–9]

Но, кроме широкого применения, можно использовать данные технологии для определенных целей и задач для повышения энергоэффективности работы оборудования или предприятия.

II. РАЗВИТИЕ СИСТЕМ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ

Основными драйверами развития рынка и практики применения СНЭ в мире были – в порядке значимости – пять основных факторов:

1. Удешевление и массовое распространение генерации на основе ВИЭ, эффективное масштабное применение которой невозможно без СНЭ.
2. Развитие и начало массового распространения частного электрического транспорта.
3. Массовое промышленное освоение литий-ионных АКБ, выступающих своего рода строительными блоками наиболее распространенных сегодня СНЭ, и резкое снижение их стоимости.
4. Развитие и снижение стоимости силовой электроники, способной эффективно преобразовывать ток из постоянного в переменный и наоборот, а также развитие систем коммуникаций, позволяющих координировать и управлять значительным количеством объектов в энергосистеме.
5. Рост потребности в пиковых генерирующих и сетевых мощностях (в т.ч. вследствие увеличения доли более неравномерного бытового потребления в совокупном балансе электропотребления), приводящий к

росту стоимости мощности для потребителей и к снижению эффективности работы энергосистем.

Прогноз мирового рынка систем накопления электроэнергии и структура их целевого использования представлены на рис. 1 и 2.



Рис. 1. Прогноз роста мирового рынка систем накопления электроэнергии (ГВт)

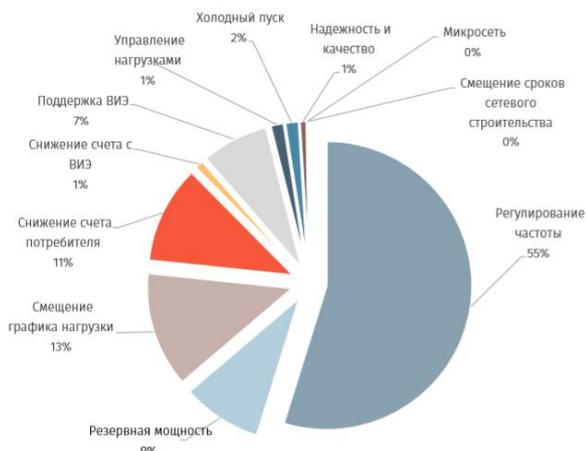


Рис. 2. Структура целевого использования систем накопления электроэнергии

Основные функции накопителей электроэнергии:

- выравнять графики нагрузок в сети и демпфировать колебания мощности, повышая устойчивость системы;
- стабилизировать работу децентрализованных источников электрической энергии, включая ВИЭ;
- расширять доступную мощность (для покрытия пиковых нагрузок, бесперебойного энергоснабжения на переходных режимах энергосистемы), как в базовом режиме энергоснабжения, так и при работе от резервных источников энергоснабжения;
- обеспечивать резервное энергоснабжение основных потребителей в случае ограничения подводимой мощности, отключений, аварий;
- обеспечивать компенсацию реактивных мощностей, регулирование частоты в энергосистеме и активную фильтрацию высших гармоник, в рамках концепции использования внешних фильтрокомпенсационных устройств.

Основные виды систем хранения электроэнергии представлены в табл. 1. ГАЭС составляют 98,5% от общего объема мощности накопителей в мире, на втором и третьем месте находятся электрохимические

накопители и накопители на сжатом воздухе соответственно.

ТАБЛИЦА 1 КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ ХРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Системы хранения электроэнергии				
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.	-

В России на сегодняшний день существует более пятнадцати предприятий, выпускающих электрохимические накопители и суперконденсаторы. В основном все они выполняют заказы оборонно-промышленного комплекса, поэтому чаще всего выпускаются не СНЭ в готовом виде, а комплекующие для них. Единственным заводом, выпускающим литий-ионные аккумуляторы в России, является «Лиотех». Его объемы производства превышают 1 ГВт*ч, что даже больше имеющегося в стране спроса. Кроме того, за последние два года в России начато создание новых производственных мощностей по разным направлениям СНЭ: ООО «ЭнерЗет» – в сфере литий-ионных АКБ (технология NMC), ООО «ИнЭнерджи» – в сфере водородной энергетики и топливных элементов.

В России эксплуатация СНЭ в большей степени осуществляется на трех крупных ГАЭС: Загорская ГАЭС-1 (1,2 ГВт), Кубанская ГАЭС (15,9 ГВт) и Зеленчукская ГЭС-ГАЭС (320 ГВт). Также существуют проекты на стадии реализации. [10–11]

III. СОБСТВЕННЫЕ НУЖДЫ В ГЕНЕРАЦИИ

В условиях работы на рынке электроэнергии производители в лице тепловых электростанций попадают под тот факт, что вся производимая ими энергия выставляется на рынок. Но, в то же время у любой генерации есть показатель затрат энергии на собственные нужды, величину которой производители обязаны покупать у рынка по рыночной цене, даже если себестоимость произведенной энергии будет меньше.

Исходя из этого был поставлен вопрос о возможности использования накопителя энергии для аккумуляции и последующем использовании как для собственных нужд, так и для перепродажи на рынок электроэнергии.

Для анализа был выбран парогазовый энергоблок мощностью 220 МВт, который состоит из двух газотурбинных установок типа PG6111FA (ГТУ) производства фирмы «GE Energy» номинальной мощностью 78 МВт сконструирована на базе серийной газовой турбины MS6001FA, двух паровых котлоутилизаторов производства ОАО «ЭМАльянс», двух паротурбинных установок КТ-33/36-7,5/0,12 производства ОАО «Калужский турбинный завод» с одним регулируемым отбором.

Оборудование собственных нужд включает в себя:

- дожимные компрессорные станции;
- питательные электрические насосы;
- насосы конденсатного тракта, охлаждающего контура ГТУ, технической воды, рециркуляции конденсата, конденсата подогревателя сетевой воды;
- насосы сетевой воды;
- дренажных насосов
- насосов циркуляционной воды;
- дренажных насосов;
- питание различных установок и др.

В зависимости от режима работы станции величина мощности собственных нужд меняется – на данное значение влияет как график нагрузки электроэнергии, окружающих внешних условий, нахождения оборудования в ремонте или плановом обслуживании и других факторов. Обычно величина собственных нужд составляет 5–10 процентов от мощности генерируемого оборудования. На рисунке 3 представлены изменение мощности собственных нужд ПГУ 220 МВт в течение года. Данные получены на основании расчетной модели эксплуатации оборудования и годовых отчетов [12–17].

Минимальное значение мощности собственных нужд приходится на летний период, это связано с пионовыми ремонтными и техническими работами.

Для подбора правильного оборудования необходимо будет также рассчитать минимальное, максимальное и среднее значение мощности собственных нужд. Это позволит исключить простои накопителя и обеспечит правильную работу системы.



Рис. 3. Расход мощности на собственные нужды парогазового блока 220 Мвт в течение года

IV. АНАЛИЗ ПРИМИНЕНИЯ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ

Основными составляющими, определяющими стоимость системы накопления энергии, являются:

- инвертор (силовой модуль), который может включать резервный модуль для «горячей замены» в случае отказа одного из модулей;
- аккумуляторные батареи, которые включают: о аккумуляторные модули, состоящие из отдельных ячеек, количество которых определяется напряжением отдельных ячеек (зависящим от технологии изготовления ячейки) в зависимости от требуемого напряжения шины постоянного тока; о систему управления;
- стойки, стеллажи или шкафы для аккумуляторных модулей;

- силовые кабели и прочее вспомогательное оборудование;
- модульное здание или контейнер;
- система управления, в т.ч. удаленного доступа;
- система охлаждения;
- помещение или земельный участок;
- фундамент, ограждение;
- стоимость строительно-монтажных работ и пуско-наладочных работ;
- стоимости подключения к сети (схема выдачи мощности).

Наиболее затратными составляющими стоимости являются аккумуляторная батарея и инвертор. Стоимость батареи обычно включает и стоимость системы управления батареями (BMS). [18–20]

Удешевление накопителей произошло прежде всего за счет удешевления технологий производства батарей. Последние 5 лет темпы падения цен батарей составляли 20% в год и были в значительной степени вызваны ростом спроса в автомобильном транспорте, а также в энергетике. По различным прогнозам, стоимость должна упасть до 130–150 \$/кВт·ч. Исходя из данного значения можно оценить стоимость установки системы – для минимальной мощности (6 МВт) она составит около 840 000\$ или 60 млн. рублей. Мощность одной установки может варьироваться в очень большом диапазоне от 1 кВт до 3000 кВт и выше – в данном случае возникает вопрос оптимального выбора, учитывая такие параметры как надёжность, эксплуатация, необходимость обслуживания и персонала и др., так как системы накопления энергии часто используются как модульные установки.

Несмотря также на разницу в ценах для разных технологий, темпы падения цен на различные типы аккумуляторов примерно одинаковые. Так, прогнозируется падение стоимости литий-титанатных аккумуляторов с текущих 1000-1200 долларов США за кВт·ч до 500–600 долларов США за кВт·ч к 2022 году. Опережающими темпами могут снижаться стоимости вновь разрабатываемых технологий, например, проточных ячеек на основе более дешевых (чем ванадий) металлов. [21–23]

Расход электроэнергии на работу накопителя формируется из следующих факторов:

- потерь холостого хода работы накопителя в режиме ожидания;
- потерь при осуществлении цикла заряд-разряд, определяемых КПД накопителя;
- дополнительных потерь, возникающих при схеме подключения накопителя;
- затрат на охлаждение и вентиляцию;
- затрат на климатическую технику.

В табл. 2 и 3 представлен расчет использования накопителей для двух вариантов – при цене по программе договоров поставки мощности (на вновь вводимых установках) и при цене конкурентного отбора мощности.

Обозначение	Размерность	По цене договоров поставки мощности (10 лет)										Сумма За 10 лет
		1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	
ЦДПМ (Расчетная цена мощности по ДПМ без учёта индекса цен)	тыс.руб/МВт	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	
Мощность собственных нужд Nсн (в год)	МВт	169	169	169	169	169	169	169	169	169	169	
Средняя мощность собственных нужд Nсн в месяц	МВт/в месяц	14.1	14.1	14.1	14.1	14.1	14.1	14.1	14.1	14.1	14.1	
Стоимость мощности собственных нужд в год	тыс.руб.	169000	169000	169000	169000	169000	169000	169000	169000	169000	169000	
Число часов работы накопителей за сутки	часов	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	
Отпуск ЭЭнакоп в сутки	МВт*ч	70.4	70.4	70.4	70.4	70.4	70.4	70.4	70.4	70.4	70.4	
Отпуск ЭЭнакоп. в год	МВт*ч	25 702	25 702	25 702	25 702	25 702	25 702	25 702	25 702	25 702	25 702	
Разница в цене покупки ЭЭ на собственное потребление	тыс.руб./ МВт*ч	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	
Экономия от покупки ЭЭ на собственные нужды при работе накопителей в год	тыс.руб.	7711	7711	7711	7711	7711	7711	7711	7711	7711	7711	92 532
Суммарная выручка при применении накопителей ЭЭ в год	тыс.руб.	176711	170261	2 120 532								

ТАБЛИЦА II

РАСЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ ЦЕНЕ ДЛЯ КОНКУРЕНТНОГО ОТБОРА
МОЩНОСТИ

Обозначение	Размерность	По цене конкурентного отбора мощности (10 лет)										Сумма (за 10 лет)
		134.394	167.751	171.123	182.048	193.158	194.900	194.900	194.900	194.900	194.900	
Цкомпу (Принята средняя цена по региону в год без учёта индекса цен)	тыс.руб/ МВт	134.394	167.751	171.123	182.048	193.158	194.900	194.900	194.900	194.900	194.900	
Мощность собственных нужд Nсн (в год)	МВт	169	169	169	169	169	169	169	169	169	169	
Средняя мощность собственных нужд Nсн в месяц	МВт/ в месяц	14.1	14.1	14.1	14.1	14.1	14.1	14.1	14.1	14.1	14.1	
Стоимость мощности собственных нужд в год	тыс.руб.	22 713	28 350	28 920	30 766	32 644	32 938	32 938	32 938	32 938	32 938	
Число часов работы накопителей за сутки	часов	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	
Отпуск ЭЭнакоп в сутки	МВт*ч	70.4	70.4	70.4	70.4	70.4	70.4	70.4	70.4	70.4	70.4	
Отпуск ЭЭнакоп. в год	МВт*ч	25 702	25 702	25 702	25 702	25 702	25 702	25 702	25 702	25 702	25 702	
Разница в цене покупки ЭЭ на собственное потребление	тыс.руб./ МВт*ч	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	
Экономия от покупки ЭЭ на собственные нужды при работе накопителей в год	тыс.руб.	7711	7711	7711	7711	7711	7711	7711	7711	7711	7711	92 532
Суммарная дополнительная выручка от применении накопителей ЭЭ в год	тыс.руб.	30424	36 061	36 631	38 477	40 355	40 649	466 491				

Для систем накопления энергии возможны три основных потенциальных механизма работы – регулирование частоты и конкурентного отбора мощности; – смещения сроков инвестиций в сетевое строительство; и обеспечения надежности и качества энергоснабжения, и повышения резерва мощности, снижения затрат на покупку мощности.

В данном случае рассматривается третий вариант, но также, при необходимости, можно использовать и другие.

Использование накопителя для снижения собственного пика потребления будет относительно часто входить в противоречие с другими задачами, при этом необходимо учитывать следующие факторы: – в меньшей степени это будет касаться рынка регулирования частоты, ввиду краткосрочного характера загрузки/разгрузки накопителя в этом рынке; – для выполнения других задач владелец или оператор накопителя должен будет разрабатывать собственные алгоритмы, используя накопитель для снижения собственного пика по остаточному принципу в случае, если задачей является исключительно экономический эффект за счет участия в оказании услуг по обеспечению системной надежности; – если задачей владельца СНЭ является недопущение перегрузки в рамках собственной энергосистемы, то он должен будет снизить объем мощности накопителя, доступный под другие услуги.

Выше мы уже оценили стоимость установки для минимальной мощности, а так как в расчетах использована среднее годовое значение потребления на собственные нужды цена на установку системы будет выше в 2,5 раза – 150 млн рублей. Но в данном случае необходим полноценный технико-экономический расчет, учитывая все тонкости на тепловой электрической станции, включая оборудование вне парогазовой части.

Однако, обращая внимание на первоначальные расчеты можно отметить следующее – при работе СНЭ 5 часов в сутки и компенсируя разницу в стоимости электроэнергии в разное время доход от перепродажи может составить 30–40 млн рублей. что дает при полноценной работе системы срок окупаемости около 5 лет. Учитывая относительную новизну технологии и знание эксплуатации нужно заложить потери и увеличить срок окупаемости до 6-7 лет, что тоже является хорошим значением для подобных и новых технологий.

Дальнейшее же техническое совершенство технологий и производства позволит дополнительно снизить стоимость СНЭ и ее эксплуатации, позволяя внедрять накопители в разные сферы производства.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Новые технологии и их применение часто представляют собой вызов и столкновение с неизвестным. Но, учитывая большой зарубежный опыт и постепенное внедрение систем накопления энергии в России, можно сказать, что в ближайшее время данные установки будут устанавливаться как в дополнение к старому оборудованию, так и как часть новых вводимых мощностей.

Причем использоваться СНЭ могут в различных вариантах, что позволит расширить сферу их использования, либо использовать в одном месте в нескольких функциях.

Касательно применения СНЭ на тепловых электрических станциях в качестве компенсации затрат на собственные нужды – актуальная задача по повышению общей энергоэффективности и снижению затрат. Важен только правильный подбор оборудования, так как оптимальный выбор всегда процесс непростой, но решаемый.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Л.В. Калимуллин, Д.К. Левченко, Ю.Б. Смирнова, Е.С. Тузикова. 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 №9 2021. 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.peccs.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.: ИЭИ РАН, 2020. 320 с;
- [7] Прогноз развития энергетики мира и России 2019 / под ред. А.А. Макарова, Т.А. Митровой, В.А. Кулагина; ИЭИ 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] Центр раскрытия корпоративной информации [сайт]. URL : <https://e-disclosure.ru/portal/company.aspx?id=772> / (дата обращения: 20.11.2021).
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.

- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.