

Направление развития ВИЭ и накопителей энергии в энергетике Казахстана

Трофимов Г.Г., д.т.н., профессор, заслуженный энергетик Казахстана и СНГ;
 Яшков В.А., профессор, заслуженный энергетик Казахстана (Атырау);
 Турымбекова Г.Д., доцент, заведующий кафедрой (Шымкент);
 Клецель М. Я., д.т.н., профессор (Павлодар);
 Турганов Д.Н., к.т.н., заслуженный энергетик Казахстана, депутат Мажилиса РК

Казахстан обладает уникальными условиями для использования огромного природного потенциала солнечной и ветровой энергии в интересах энергетики страны. Это делают его одним из наиболее перспективных регионов мира для развития ВИЭ.

Кроме того еще в 20 веке до появления ВИЭ в Казахстане назрел целый ряд проблем решение которых возможно за счет ВИЭ.

Остановимся на них.

Истощение ископаемых ресурсов. Уже в середине 20 века стало очевидно, что запасов нефти и газа при существующих темпах добычи и потребления хватит порядка 45–65 лет.

Экологические и климатические вызовы. В Казахстане добыча электроэнергии из ископаемого топлива, которое является основным источником парниковые газы, особенно CO², составляет около 83 %. Международное энергетическое агентство (IEA) отмечает, что энергетический сектор – крупнейший источник глобальных выбросов CO².

Энергетическая безопасность. Зависимость электроэнергетики страны от угольной и газовой генерации при отсутствии достаточного количества мощных трансграничных ЛЭП влияет на энергетическую безопасность и стоимость электроэнергии.

Неравномерность доступа к энергии. Неравномерное распределение традиционных источников по стране и наличие отгонных пастбищ приводит к дефициту электроэнергии в отдельных регионах.

Отдаленность источника от потребителя. Доля Экибастузских ГРЭС, работающих на пределе своих возможностей, составляет более 25

% от общего объема электроэнергии на огромных просторах Казахстана. Отдаленность от потребителя как этого, так и других источников электроэнергии оказывает отрицательное влияние на экономику и экологию.

Ограниченная масштабируемость инноваций и медленная модернизация инфраструктуры. Крупные энергетические проекты в стране требуют значительных капиталовложений и длительного времени строительства, что тормозит быстрое внедрение новых технологий и реагирование на технологические/социальные изменения.

Огромная централизация принятия решений и невозможность участия и влияния потребителей. В этом случае все решения, связанные с развитием и изменением электрической сети, используют систему централизованного управления, что снижает гибкость сети, удлиняет сроки реализации, не учитывает интересы потребителей энергии, не позволяет им управлять сетью и замедляет для них внедрение передовых технологий.

Поэтому появление и развитие ВИЭ в Казахстане – это не случайность, а историческая необходимость. Это естественный ответ на проблемы, с которыми столкнулась страна в начале этого века.

В Казахстане в начале 21 века вместе с другими странами начался процесс расширенной интеграции ВИЭ в Казахстанскую энергетику.

Бурному развитию ВИЭ в 21 веке способствовали:

Децентрализация энергетики.

Децентрализованная энергетика обеспечивает большую гибкость, меньше подвержена рискам и воздействиям климата. Распределенные

системы за счет ВИЭ позволяют развивать автономные электростанции в отдаленных регионах, что повышает устойчивость энергосистемы и снижает потери при передаче энергии.

Технологический прогресс.

Ранее ВИЭ в Казахстане были ограничены гидроэнергетикой. С момента начала использования ВИЭ в энергетике за счет совершенствования технологий, конкурентных цепочек поставок и экономии за счёт масштаба стоимость их значительно снизилась.

Энергетическая безопасность.

ВИЭ позволяют снизить зависимость от импорта и от отдельных стран, добавить новые типы генерации, повысить диверсификацию энергетического баланса.

Экологическая устойчивость.

ВИЭ, такие как СЭС и ВЭС, практически не производят CO² что снижает выбросы парниковых газов и помогает бороться с изменением климата. Это делает энергосистему экологически совместимой с целями устойчивого развития и Парижским соглашением.

Сохранение природных ресурсов.

ВИЭ позволяют сохранить и эффективно использовать свои природные ресурсы, что укрепляет энергетический суверенитет и повышает энергетическую независимость.

Государственная поддержка и международные соглашения.

В начале развертывания процесса интеграции ВИЭ обычно применяется Государственная поддержка в виде финансовых стимулов: субсидий и грантов, «зелёных» тарифов, налоговых льгот и различных регуляторных механизмов.

Инвестиционная
привлекательность.

ВИЭ стали привлекательны для инвесторов. Гарантии правительства, тарифные/аукционные рамки и налоговые стимулы, уменьшают политический и регуляторный риск и повышают доходность.

Финансовые выгоды энергосистемы
от использования ВИЭ.

Появившиеся в конце прошлого века ВИЭ позволили уже сегодня обеспечить значительную выгоду для энергосистем. Они экономят затраты электрических станций на ископаемое топливо. Только общее сокращение затрат на ископаемое топливо в 2024 г. в мире составило 467 миллиардов долларов США [1].

Так анализ проведенный для США [2], (на основе данных о ценах предоставленных Управлением энергетической информации и рассчитанных с использованием средних цена на ископаемое топливо) показал, что при выработке 1057 ТВт·ч электроэнергии из ВИЭ в 2024 году только за счет замещения ископаемого топлива (30 % угля; 70 % газа) предполагаемые выгоды могут составить:

- 4,1 млрд долларов США только за счет экономии затрат на ископаемое топливо
- 21,5 млрд долларов США – предотвращенный ущерб от загрязнения воздуха.

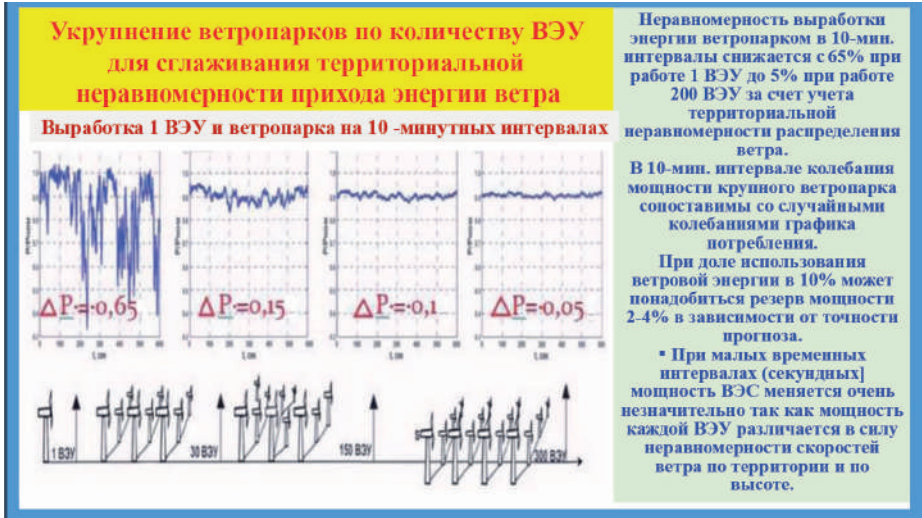
Следующая таблица ▼ [3] дополняет этот анализ, представляя сравнительные оценки предотвращенных затрат на ископаемое топливо и ущерба от загрязнения воздуха в нескольких крупнейших странах.

	Китай	Германия	Бразилия	Австралия
Сокращение затрат на ископаемое топливо (млрд долларов США)	179,8	16,4	28,3	5,0
Предотвращенный ущерб от загрязнения воздуха (млрд долларов США)	261,1	6,0	3,9	1,9
Всего (млрд долларов США)	440,9	22,4	32,2	6,9

Таблица 1. Предполагаемые ежегодные выгоды от
производства энергии из ВИЭ в отдельных странах, 2024 год.

Равномерное распределение объектов ВИЭ по территории Казахстана может обеспечить Казахстану целый ряд дополнительных преимуществ.

Развитие ВИЭ в разных регионах и централизованных, крупных элек-



тростанций- ВИЭ обеспечат более стабильное и устойчивое энергоснабжение по всей стране, включая отдаленные и малонаселенные районы, которые традиционно страдают от высоких потерь при передаче энергии.

Кроме того отметим, что если 50 ВИЭ по 100 МВт) расположить по всей территории страны, то это снизит неравномерность выработки, что показано выше ▲, и возможные крупные коллапсы – масштабные аварии и блэкауты, затронувшие целые страны и регионы*.

Однако, необходимо отметить, что широкая интеграция ВИЭ создала также некоторые технические и экономические проблемы, связанные с режимом работы и управлением как для энергосистемы так и для рынка электроэнергии.

Проблемы в энергосистемах,
связанные с интеграцией ВИЭ

С появлением ВИЭ энергосисте-

основе инверторов заменяют традиционные вращающиеся синхронные генераторы, которые ранее за счет инерции вращающихся турбин и генераторов обеспечивали основную долю гибкости энергосистемы в прошлые десятилетия. А теперь за счет широкой интеграции переменчивых ВИЭ доля синхронных генераторов в энергосистемах сокращается. ВИЭ отделены от сети, они не создают вращающую массу, как турбины ТЭС и не могут влиять на гибкость поскольку они взаимодействуют с сетью через силовые электронные инверторы. Увеличение доли ВИЭ снижает инерцию системы, создавая проблемы при эксплуатации энергосистем по всему миру. Снижение инерции уменьшает гибкость энергосистемы, понижает надежность сети и может создавать серьезные проблемы не только для устойчивости сети, но и для степени интеграции ВИЭ [4].

Выдаваемая мощность СЭС и ВЭС зависят от погодных условий и времени суток. Даже небольшие изменения режима работы ВИЭ напрямую влияют на стабильность напряжения и частоты в энергосистеме вызывая их колебания. Быстрые изменения мощности от ВИЭ вызывают фликер, скачки напряжения, значительные отклонения частоты. Это нарушает режимные параметры: частоту, напряжение, баланс мощности. Для компенсации этого требуются дополнительные резервные источники активной и реактивной мощности.

* А. Наурызбаев, казахстанский энергетик, экономист, в неопубликованной статье «Надежность пула электростанций на ВИЭ».

Кроме того, интеграция ВИЭ в энергосистему вызывает дополнительные сложности балансировки сети и диспетчеризации. Централизованные системы плохо справляются с распределённой генерацией. Требуется внедрять новые инструменты мониторинга, прогнозирования погоды, создавать новую архитектуру управления большим числом распределённых ресурсов: цифровые платформы, систему прогнозирования, автоматизации и обучение персонала, что требует затрат. Инверторные ресурсы в «слабых» сетях хуже поддерживают напряжение.

А при снижении доли синхронных генераторов это приводит к снижению напряжения, а следовательно и к уменьшению тока короткого замыкания, что осложняет защиту, нарушает селективность, а также работу традиционных устройств регулировки реактивной мощности. Требуются новые решения по управлению реактивной мощностью и сетевым усилениям.

Широкая интеграция ВИЭ приводит к ограничению по пропускной способности сетей. Сети бывают не готовы к приёму большого объёма распределённой генерации. Они не рассчитаны на двусторонние потоки энергии. Возникают перегрузки, особенно в периоды пикового производства (например, солнечный полдень). Требуется модернизация сетей и внедрение умных сетевых решений (Smart Grid).

Интеграция накопителей энергии на силовой электронике – влечёт за собой существенные изменения режимов сети, которые меняют условия работы релейной защиты, повышая требования к алгоритмам, селективности и измерительным принципам.

Наличие в энергосистеме ВИЭ создает и экономические проблемы. Из-за переменной генерации в энергосистеме возникает колебание цен на электроэнергию, что нарушает стабильность рынка. Традиционные рыночные механизмы, ориентированные на объём энергии, плохо компенсируют «услуги мощности» (инерция, быстрая регулировка, синхронный резерв). Для компенсации этого необходима реформа рынка и разработка новых требований к рынкам, тарифам и механизмам компенсации этих проблем.

Таким образом, широкая интеграция переменных ВИЭ достигающая очень высокой доли в производстве электроэнергии во многих регионах, в сочетании со снижением объемов производства электроэнергии традиционными методами, требует чтобы энергосистемы умели справляться с возросшей изменчивостью и неопределенностью, увеличив потребности в гибкости. Необходимо преодолеть технические и экономические проблемы, принципиально отличающиеся от тех, с которыми традиционно сталкивались энергосистемы. Это создает сложности не только для операторов систем, но и регулирующих органов и для политиков.

Процесс интеграции переменных ВИЭ в энергосистемы по рекомендации IEA.

С 2018 по 2023 гг. мощность солнечных и ветровых станций в мировой энергетике более чем удвоилась. Для успешной интеграции необходимы проактивные стратегии: развитие систем накопления энергии (СНН – ESS или просто накопителей), сетей, гибких рынков. Цель – максимизировать выгоды от ВИЭ, снизить зависимость от ископаемого топлива и минимизировать затраты на поддержание стабильности.

IEA рассматривает интеграцию переменных ВИЭ (ветра, солнца, малых ГЭС) как процесс постепенного увеличения гибкости энергосистемы за счет генерации, сетевой инфраструктуры, накопителей и управления спросом. Главная цель – обеспечить устойчивость и надежность сети при росте доли ВИЭ в энергосистеме.

IEA видит интеграцию ВИЭ как эволюционный процесс, где каждая новая ступень роста доли ВИЭ требует большего уровня гибкости энергосистемы. Это не только техническая задача, но и институциональная – нужны новые рынки услуг, межсистемные связи и цифровые технологии.

IEA разбивает процесс интеграции ВИЭ на этапы:

Низкая доля ВИЭ (до 10 %) – система справляется без значительных изменений.

Средняя доля (10–30 %) – нужны накопители и гибкие станции.

Высокая доля (>30 %) – требуется комплексная трансформация: цифровизация, межсистемные связи, новые рынки услуг.

Весь процесс интеграции ВИЭ в энергосистеме IEA разбивает на 6 фаз (см. табл. 2 ►). Общая тенденция этого рисунка в том, что чем выше этап, тем выше влияние переменных ВИЭ на энергосистему.

Доля установленной мощности ВИЭ (ветер и солнце) в энергосистеме Казахстана сегодня составляет около 12,5 %. Это соответствует фазе 2–3 по классификации IEA. Уже возникают заметные колебания нагрузки и потребность в гибкости.

Только из этой оценки ясно, что ВИЭ уже начинают определять режим работы энергосистемы в которой ограниченная маневренность ГЭС и ТЭС и нехватка накопителей. Это значит, что без масштабного внедрения накопителей и гибких мощностей рост ВИЭ будет ограничен. Чтобы двигаться дальше, нужно создать рынок гибкости и инвестировать в BESS, LAES и ГАЭС.

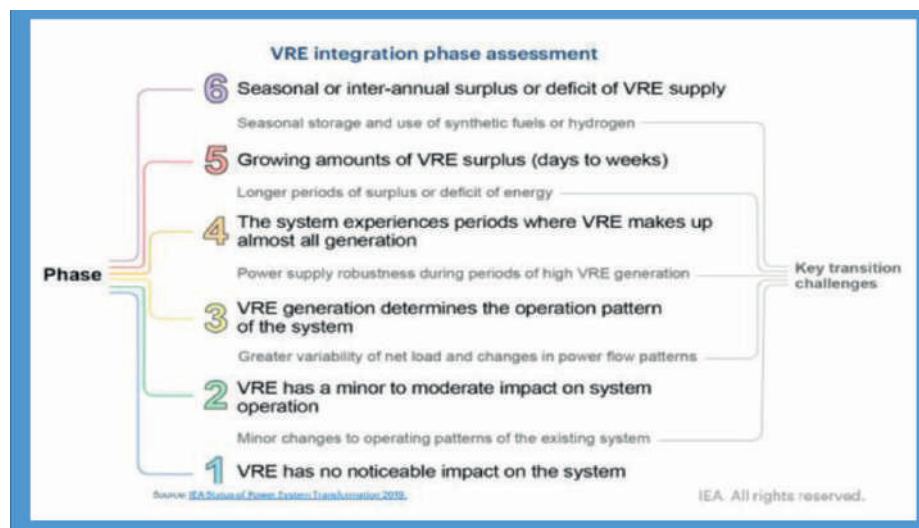
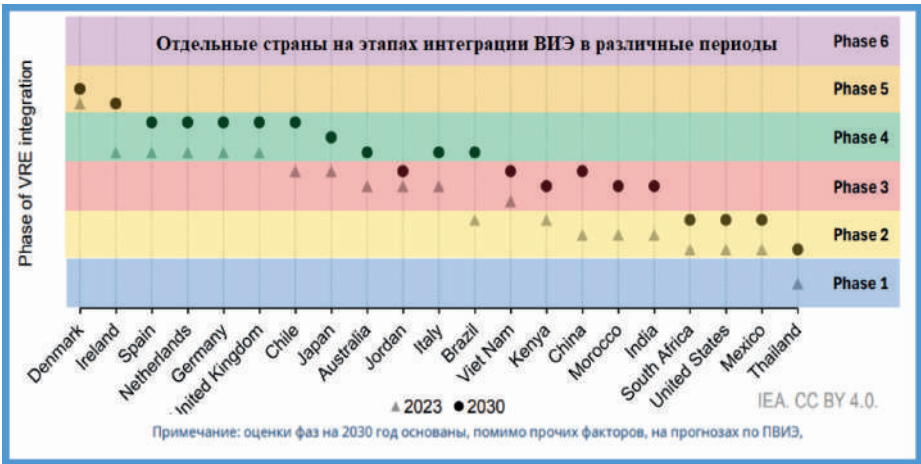
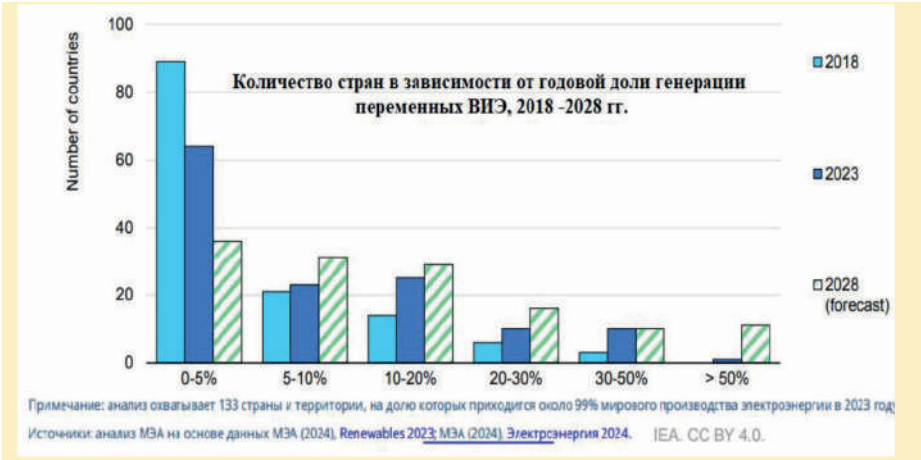


Рис. 2. Поэтапная структура процесса интеграции ВИЭ [5].

Фаза	Доля ВИЭ	Характеристика	Основные меры
1. Начальная	<5 %	ВИЭ не оказывают заметного влияния на энергосистему	Локальные корректировки, прогнозирование
2. Первые вызовы	5–10 %	ВИЭ оказывают незначительное или умеренное влияние и уже появляются заметные колебания нагрузки	Улучшение диспетчеризации, прогнозы ВИЭ
3. Влияние существенно	10–20 %	ВИЭ уже влияют на режим работы системы. Надо начать применять механизмы для их смягчения или устранения	Накопители, гибкие станции, «evduck curve»
4. Почти полное покрытие	20–40 %	Система переживает периоды когда переменные ВИЭ покрывают почти весь спрос в отдельные часы	Новые правила рынка, быстрые резервы
5. Избыток ВИЭ	40–60 %	Частые периоды профицита генерации. Рост излишков от дней до недель	Массовое внедрение ESS и управления спросом
6. Высокая доля ВИЭ	>60 %	Система полностью перестраивается под ВИЭ. Может наблюдаться сезонный или межгодовой избыток ВИЭ	Цифровизация, межсистемные связи, новые стандарты

▲ Таблица 2. ▼ Рисунок 3.



▲ Рисунок 4. ▼ Рисунок 5.

Характеристика маневренных качеств различных типов электростанций				
Тип электростанции	Технический минимум нагрузки, в % (отношение минимальной допустимой мощности к установленной)	Регулируемый диапазон, в %	Время набора полной мощности, мин	
			После остановки	Из горячего состояния
АЭС	85–90	10–15	390–660	60
Мощные ТЭС	70–80	20–30	90–180	20–50
ГТУ	0	100	15–30	0,5
ГЭС	0	100	1–2	0,25–0,5*
ГАЭС	0	200	1–2	0,25–0,5*

* При вращении в режиме холостых оборотов.

На рис. 3 [6] показан процент стран мира с разной долей генерацией ВИЭ в мировом электроэнергетическом балансе. Из него ясно, что на сегодняшний день большинство стран мира еще не достигло этого этапа.

На рис. 4 показаны этапы на которых находятся отдельные страны мира [6].

Из рисунка видно, что в большинстве стран ожидается интеграция ВИЭ [6]. Причем уже в наши дни немало энергосистем в разных странах с высокой долей выработкой электроэнергии переменными ВИЭ, которые находятся на 4 этапе и даже на 5 этапе. Так, Германия, Ирландия, Испания, Китай и Япония достигли 4-й фазы. Эта фаза характеризуется максимальной выработкой электроэнергии в стране в определенные периоды за счет ВИЭ. В эти периоды основной проблемой для них является обеспечение стабильности системы. Ожидается, что многие страны перейдут к четвертой фазе в ближайшие годы.

Существующая ситуация с маневренностью в Казахстане

В Казахстане доминирует устойчивая (базовая) генерация – крупные угольные ТЭС. В настоящее время доля угольных электростанций преобладает и составляет около 70 % всей выработки. Однако угольная генерация, доля которой велика в энергосистеме, в основном работает в базовом режиме, они не являются гибкой и не позволяют осуществлять не-обходимое регулирование, не способны быстро маневрировать (набирать/снижать мощность электроэнергии).

По информации КЕГОС в ЕЭС Казахстана для регулирования графика нагрузок используются крупные гидроэлектростанции (рис. 5) [7]:

- Бухтарминская ГЭС, располагаемая мощность – 675 МВт;
- Усть-Каменогорская ГЭС, располагаемая мощность – 335 МВт;
- Шульбинская ГЭС – 702 МВт;
- Капчагайская ГЭС – 364 МВт.

Отсутствие маневренных мощностей – это давняя «болезнь» казахстанской энергетики. Она затрудняет управление режимом, особенно в часы прохождения максимальных нагрузок, не позволяет проводить оптимальную балансировку своими силами.

В 2020 г. в энергосистеме Казахстана уже существовал дефицит маневренной мощности. Это подвигло АО «KEGOC» совместно с экспертами проекта USAID «Энергия будущего» в 2020 г. провести исследование, связанное с надежностью работы энергосистемы Казахстана, при регулярном воздействии на нее переменных ВИЭ. В нем была определена необходимая для энергосистемы величина нормативного размера маневренной мощности при имеющейся в то время мощности ВИЭ. Эту величину необходимо знать системным операторам, чтобы обеспечить балансировку энергосистемы при непостоянном режиме работы возобновляемой генерации.

Естественно, что величина нормативного размера маневренной мощности зависит от различных факторов, включая соответствующую установленную мощность ВИЭ и текущее состояние энергосистемы и др. На основе экспериментов в 2020 г. в реальной энергосистеме определили, что при мощности ВИЭ 650 МВт необходимо, чтобы 1 МВт регулируемой мощности приходился на 2 МВт установленной мощности ВИЭ [8]. На тот момент когда в казахстанской энергосистеме мощность ВИЭ составляла 3 % в энергобалансе страны. В то время возможности энергосистемы, за счет использования регулирующей возможности ГЭС и запаса инерции вращающихся турбин и генераторов, позволяли иметь требуемые 260 МВт регулирующей мощности. Этого имеющегося размера маневренной мощности тогда хватало для балансировки имеющегося в энергосистеме мощности.

Это была только констатация факта и попытка решения назревшей проблемы только в тот момент. К сожалению, АО «KEGOC» не задумывалось о завтрашнем дне. Для них было важно мгновенно решить проблему когда доля ВИЭ увеличила необходимость в маневренной мощности.

В тот 2020 г. мы понимали что такая оценка необходима только для мгновенного решения назревшей тогда проблемы, связанной только с балансировкой энергосистемы при недостаточном количестве маневренной мощности, при воздействии переменной генерации ВИЭ. Было ясно,

что этот подход, с определением необходимой мощности, примененный ими может быть только сиюминутным.

Понимая, что в энергетике страны назрели проблемы тормозящие ее развитие, в 2020 году мы остановились на некоторых из них и предложили пути их решения [9].

А затем в 2021 г. мы отметили что уже много лет в Казахстане не хватает маневренных мощностей. Регулирующих мощностей ГЭС недостаточно энергосистеме, доля газовой генерации, которая тоже могла бы помочь, мала, а большинство традиционных тепловых электростанций не в состоянии справиться с этой проблемой [10].

Мы предлагали различные методы которые могли бы способствовать увеличению маневренной мощности. И в первую очередь – использование традиционных ГАЭС. Описывали их возможности влиять на режим энергосистемы, примеры использования их в разных странах и целесообразность применения ГАЭС в Казахстане. Рекомендовали относительно простой вариант ГАЭС, который можно легко реализовать в Казахстане по уже известному примеру его использования в мировой энергетике. И даже предлагали возможные места строительства ГАЭС на территории Казахстана. Мы полагали, что предлагаемые решения позволят в короткие сроки за счёт ГАЭС в значительной степени способствовать ликвидации дефицита маневренных мощностей в стране. Кроме того, значительная часть статьи была посвящена ВИЭ и накопителям энергии. Мы привели рекомендации Международного энергетического агентства (IEA) для сотрудников министерств энергетики и регуляторов энергетических рынков направленные на решение проблем интеграции ВИЭ в энергосистемах. И было показано, что уже пришло время когда для обеспечения нормального режима энергосистемы необходимо установить накопители энергии. Однако до сих пор в энергосистеме Казахстана ни ГАЭС, ни накопители энергии не установлены.

Следует отметить, что в [11] уже тогда так же предсказывалось, что если потребность в маневренной

мощности для балансировки сектора зеленой энергетики увеличится в 3 раза в ближайшие годы, то весь резерв маневренной мощности содержащийся в инерционной способности вращающихся турбин и генераторов энергосистемы будет исчерпан и функционирование Национальной электрической сети заметно ухудшится.

В 2022 году наблюдался исторический максимум потребления электроэнергии за все годы и составил 16 459 МВт при выработке 15 203 МВт, в результате чего из Российской Федерации импортируется уже 1 256 МВт, что отмечено резким скачком по сравнению с предыдущими годами (в 2018 году – 268 МВт, в 2019 году – 301 МВт, в 2020 году – 300 МВт, в 2021 году – 388 МВт) [12].

Пиковое потребление в 2024 г по данным KEGOC достигло 17 203 МВт. А объем генерации в совокупные часы пик составил 15 402 МВт. Причем по сравнению с 2023 г разница увеличилась [13]. А общая установленная мощность ВИЭ в 2024 г. достигла порядка 3 ГВт. Их них на долю ВЭС приходилось 1,52 ГВт, СЭС – 1,22 ГВт, малые гидроэлектростанции – 0,26 ГВт. В общем балансе электроэнергии доля ВИЭ в Казахстане в 2024 году достигла 6,43 %, что на год раньше запланированного срока [14].

Из сказанного ясно что значительный разрыв между потреблением и возможностями генерации тяжким бременем ложится на плечи энергосистемы.

Таким образом видно, что в энергосистеме Казахстана уже много лет наблюдается стабильная положительная динамика увеличения доли генерации ВИЭ в общем энергобалансе страны. Кроме того отметим, что за последние 10 лет развитие энергетики в Казахстане происходило за счет ВИЭ. За счет этого если в 2020 доля ВИЭ в энергобалансе страны составляла 3 %, то в 2024 г она увеличилась почти вдвое. Естественно, что из-за роста доли ВИЭ все больше увеличивается нестабильность выработки. Наблюдаются резкие колебания, прогнозные отклонения.

Здесь следует отметить, что в Казахстане с 2018 года начали проводить аукционы на строительство объектов ВИЭ.

АО «Казахстанский оператор рынка электрической энергии и мощности» (АО «КОРЭМ»), которое было назначено официальным оператором и ответственным за проведение аукционов, предоставляло электронную торговую площадку и обеспечивало техническую сторону торгов. АО интересовало только их мощность и стоимость, и не оговаривало использование накопителей энергии при строительстве ВИЭ. Мы много раз на разных уровнях при общении с энергетиками указывали, что такой подход при широкой интеграции ВИЭ в энергосистему не допустим. Требование о реализации проектов ВИЭ совместно с системами накопления энергии впервые появилось только в 2025 году, когда Министерство энергетики включило такие проекты в официальный график аукционов. И впервые в графике аукционов было указано требование строительства ВЭС с системой накопления энергии (например, проект мощностью 1000 МВт для Северной зоны ЕЭС Казахстана), что отражало переход к следующему этапу интеграции ВИЭ, когда накопители

становятся обязательным элементом для обеспечения маневренности и надежности системы [15].

Это привело к тому, что в марте 2025 г. KEGOC заявил о необходимости приостановить запуск новых ВИЭ-проектов на 2–3 года с точки зрения обеспечения стабильности, пока не будет достаточной гибкости [16]. Этого и следовало ожидать еще 4 года назад.

После чего 28.05.2025 г. в Астане прошла Международная конференция «Роль систем накопления энергии BESS в энергетике Казахстана». Была представлена презентация первой в Казахстане Белой книги «Применение систем накопления энергии BESS в ЕЭС РК», подготовленной Ассоциацией ВИЭ «Qazaq Green» совместно с Китайской компанией Huawei, которая должна поставит систему BESS мощностью 4,4 мегаватта и обеспечить ее сопровождение и мониторинг в течение года. [17].

Отметим, что эта мощность накопителей энергии сегодня не позволит энергосистеме даже частично сгладить пики, так как по нашему мнению эта выбранная мощность накопителей

по меньшей мере в 50 раз меньше того, что требуется энергосистеме Казахстана не для обеспечения стабильной работы, а хотя бы только для того чтобы накопители энергии могли бы немного облегчить работу энергосистемы.

Функциональные возможности и услуги накопителей энергии в энергосистемах

Хотелось бы вначале отметить, что в качестве накопителей энергии для Казахстана мы будем иметь в виду не только аккумуляторные системы BESS и другие широко известные типы классических накопителей, но и ГАЭС, которые также способны решить возникшие проблемы в энергетике страны.

Таблица 3 ниже классифицирует услуги, предоставляемые накопителями энергии только в энергосистеме Казахстана (фактически их больше для энергосистем мира) с разделением по типу новации (новые и улучшенные), а также по характеру эффекта (технический и экономический). В таблице ▼ цветная маркировка на зеленом фоне отражает новые функции, а на голубом – улучшенные функции.

Услуга / Функция	Характер эффекта	Содержание услуги	Возможный эффект
Двусторонний поток мощности	Технический	Обмен энергией между сетью и накопителем	Гибкость и активное участие в управлении сетью, обеспечивающее кардинальное повышение маневренности и многофункциональности системы
Декомпозиция по времени производства и потребления	Режимный/Экономический	Разделение генерации и потребления во времени обеспечивающая накопление избыточной энергии и временной сдвиг (Time Shift) при ее отдаче	Балансировка спроса и предложения. Снижение затрат на электроэнергию (временной арбитраж)
«Склад» электроэнергии	Режимный/Экономический	Хранение и использование энергии в оптимальный момент	Снижение затрат и повышение надежности
Стэкинг услуг	Экономический	Предоставление накопителем нескольких услуг одновременно или последовательно (например, регулирование частоты и снижение пиков)	Максимизация доходности энергосистемы и ускорение окупаемости инвестиций в ESS
Виртуальные накопители	Функциональный	Объединение и совместное управление распределенными ресурсами (ESS, управляемая нагрузка) как единым крупным объектом	Снижение капитальных затрат, повышение гибкости за счет использования распределенных ресурсов и интеграции ВИЭ
Гибридные системы накопления	Технический	Комбинация разных технологий ESS (например, батареи для энергии, маховики для мощности) в одной системе	Оптимизация характеристик ESS (сочетание высокой мощности и большой энергоемкости) и повышение надежности
Длительное хранение энергии	Технический/Экономический	Хранение энергии на срок от часов до недель и более	Обеспечение резерва для длительных периодов без ВИЭ генерации. Полная декарбонизация системы
Интеграция с транспортом	Функциональный	Использование аккумуляторов электромобилей для отдачи энергии в сеть, когда электромобили не используются	Создание огромного распределенного резерва мощности, повышение гибкости сети
Интеллектуальное управление	Технический	Оптимизация работы ESS с помощью ИИ	Предиктивное управление и повышение КПД
Повышение инерционности	Режимный	Электронное имитирование инерционного отклика традиционных генераторов	Повышение общей устойчивости системы при высокой доле безынерционных ВИЭ
Регулирование частоты при низкой инерции	Технический	Имитация инерции с помощью ESS. Сверхбыстрое и точное предоставление резерва в сетях с высокой долей ВИЭ	Компенсация потерь механической инерции из-за ВИЭ. Обеспечение устойчивости сети к малым возмущениям
Регулирование частоты	Технический	Быстрое изменение активной мощности для поддержания частоты сети в заданных пределах	Повышение устойчивости энергосистемы и снижение потребности в резерве. Предотвращение системных аварий. Улучшение качества электроэнергии
Снижение требований к прогнозированию	Режимный/Экономический	Компенсация ошибок прогнозов ВИЭ. Использование ESS для коррекции краткосрочных ошибок прогноза генерации ВИЭ или потребления	Снижение дисбалансов и штрафов из-за ошибки прогноза, повышение точности оперативного планирования
Обеспечение бесперебойного питания (UPS)	Экономический	Резервное питание при отключении сети	Повышение надежности электроснабжения критических объектов
Снижение резервной мощности	Экономический	Замена традиционных горячего и холодного (тепловых) вращающихся резервов на быстрые электронные резервы ESS	Снижение эксплуатационных расходов традиционной генерации
Поддержка напряжения на основной частоте	Технический	Регулирование реактивной мощности для поддержания напряжения в узлах сети	Повышение качества электроэнергии, снижение потерь
Поддержка качества электроэнергии	Технический	Фильтрация гармоник, компенсация провалов напряжения, предотвращение фликера	Защита чувствительного оборудования потребителей, соблюдение стандартов. Улучшение качества электроэнергии
Снижение потерь в сетях	Технический/Экономический	Оптимизация потоков мощности и минимизация потерь на участках сети за счет ESS в узлах нагрузки	Экономия энергии, повышение общей эффективности системы. Снижение потоков мощности
Снижение пиков нагрузки	Экономический	Использование ESS для покрытия пикового спроса, вместо включения дорогой пиковой генерации. Сглаживание суточных колебаний	Снижение платежей за пиковые мощности. Экономия затрат на электроэнергию
«Черный старт»	Технический	Использование ESS для автономного запуска генерирующего оборудования после полного обесточивания энергосистемы	Критически важное ускорение восстановления системы после блэкаута. Повышение надежности восстановления системы
Участие в рынках гибкости	Экономический	Предоставление регулирования на коммерческой основе. Предоставление услуг по быстрому изменению потребления/генерации по требованию оператора	Создание новых бизнес-моделей, получения дополнительного дохода, повышение ликвидности рынка
Ценовой арбитраж	Экономический	Заряд в часы низких цен, разряд в часы высоких	Снижение затрат на электроэнергию
Отсрочка модернизации сетевой инфраструктуры	Экономический	Использование ИЭ для снятия перегрузок на линиях и подстанциях, откладывая капитальные вложения	Снижение капитальных затрат на развитие сети и оптимизация инвестиционного цикла
Сетевое строительство	Экономический/Технический	Применение ESS как альтернативы строительству новых ЛЭП или подстанций	Более быстрое и дешевое решение проблем с пропускной способностью сети

Рассмотрим отдельные функциональные особенности использования накопителей в энергосистемах.

Накопители энергии устранили фундаментальное ограничение энергосистем – необходимость синхронного производства и потребления электроэнергии, радикально изменив парадигму одновременности в энергосистеме.

Ранее традиционная энергосистема базировалась на принципе необходимости мгновенного строгого равенства между производимой и потребляемой электроэнергией в каждый момент времени (парадигма одновременности), поскольку электричество было невозможно хранить. Любое значительное отклонение приводило к проблемам со стабильностью (изменение частоты).

Накопители энергии впервые в истории разрушили этот принцип что кардинально меняет архитектуру и экономику энергосистем. Они отделили генерацию от потребления. Сейчас накопители позволяют сохранять избыточную энергию для последующего использования в часы пик или при дефиците. Это не только разъединяет процессы генерации и потребления, но и устраняет необходимость в постоянном балансе генерации и потребления ослабляя жесткую связь одновременности без влияния на режим энергосистемы.

Накопители энергии повлияли на развитие двунаправленного потока мощности

Традиционная энергосистема работала по принципу «сверху-вниз»: электростанции (ТЭС, ГЭС, АЭС) производят энергию, которая передается по ЛЭП через подстанции и потребляется в конце цепи. Поток мощности был строго однонаправленным (от генератора к потребителю).

Накопители энергии изменили этот принцип за счет своей уникальной способности:

Мгновенно поглощать мощность: ESS могут выступать в качестве нагрузки, потребляя избыточную энергию из сети в моменты высокого производства (например, при сильном ветре или ярком солнце).

Мгновенно инжектировать мощность: ESS могут выступать в качестве генератора, отдавая накопленную

Элемент сети	Влияние на элемент сети двунаправленного потока за счет наличия накопителя энергии
Электрические станции (генерация) СЭС и ВЭС ТЭС, ГЭС, АЭС, Газовые электростанции	ESS сглаживают прерывистый характер выработки. Избыточная энергия сохраняется, а затем высвобождается, превращая переменный источник в более предсказуемый и надежный. ESS берут на себя функции первичного и вторичного регулирования частоты и быстрые изменения мощности. Кроме того на этих станциях снижается нагрузка в часы пик и появляется возможность работать в оптимальных режимах. Это позволяет традиционным станциям работать в более стабильных и экономичных режимах (базовая нагрузка) без постоянной необходимости маневрирования. Обычно они используются как резерв или для покрытия пиковой мощности. За счет ESS они стали реже включаться, экономя газ.
Подстанции и сеть	Подстанции, оснащенные ESS становятся интеллектуальными узлами, управляющими потоками в обе стороны. Появляется возможность локального хранения и выдачи энергии, что снижает потери при передаче. ESS, интегрированные на уровне подстанций, превратили пассивные узлы в активные, что позволяет: <i>осуществлять регулирование сети:</i> ESS обеспечивают мгновенную стабилизацию напряжения и частоты в узловых точках, компенсируя локальные колебания и поддерживая качество электроэнергии. <i>управлять перегрузками:</i> в случае перегрузки ЛЭП накопитель может поглощать мощность до критической линии, а затем отдавать ее, когда нагрузка снизится. <i>отсрочить строительства:</i> ESS, расположенные в стратегических местах, могут временно взять на себя увеличение нагрузки, позволяя энергокомпаниям отложить дорогостоящее строительство новых линий электропередачи и подстанций.
Потребители энергии	Двунаправленный поток создал категорию просьюмеров и дал потребителям активную роль в управлении энергосистемой: <i>управление спросом</i> - потребители с собственными ESS могут заряжать их при низких тарифах и использовать накопленную энергию (становиться "поставщиком" для себя) в часы пик, снижая нагрузку на общую сеть. <i>резервирование и устойчивость электроснабжения</i> - ESS обеспечивают автономное питание во время отключений, повышая устойчивость отдельных потребителей и критической инфраструктуры. <i>интеграция распределенной генерации:</i> ESS энергии позволяют частным солнечным панелям на крышах легко отдавать избыточную энергию обратно в сеть, что было бы невозможно без двунаправленного обмена.

Таблица 4.

энергию обратно в сеть, когда это необходимо (например, в часы пик или при падении выработки ВИЭ).

Технически это стало возможным благодаря использованию двунаправленных инверторов, которые позволяют току течь в обе стороны — из сети в накопитель и обратно.

Это позволило ESS превратиться из пассивных потребителей в активных участников энергосистемы, способных как накапливать, так и отдавать энергию.

В итоге, двунаправленный поток мощности, инициированный ESS, привел к переходу к интеллектуальной энергосистеме (Smart Grid), которая является более гибкой, отказоустойчивой и эффективной, способной интегрировать большой объем ВИЭ.

Децентрализация энергосистемы
Децентрализованная энергосистема характеризуется переходом от крупных центральных электростанций к множеству распределенных, локальных источников генерации, часто основанных на ВИЭ.

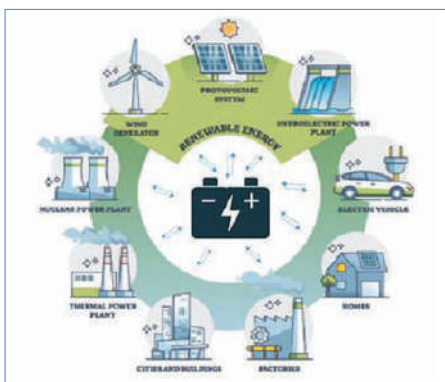
ESS способны в децентрализованных системах обеспечить надежную работу автономных объектов неза-

висимо от централизованной сети, особенно в удалённых районах, сглаживать генерацию ВИЭ, поддерживать устойчивую работу микросетей и энергетическое просьюмерство потребителей при наличии бытовых ESS.

Накопители – это «склад» электроэнергии для энергосистемы
Современный накопитель энергии это не просто склад энергии для энергосистемы, и тем более не в традиционном понимании этого слова как склада для материальных товаров.

Накопитель энергии в энергосистеме, в отличие от обычного склада, не просто хранит, но и **активно** участвует в энергоснабжении, выполняя роль источника энергии. Энергия на этом «складе» не просто «лежит» – она **активно** циркулирует, участвует в регулировании частоты, напряжения, реактивной мощности.

Накопители – это активный элемент энергосистемы, способный генерировать мощность при необходимости
Обычно говорят что накопители энергии не являются источником энергии в классическом смысле (в отличие от электрических станций, ко-



которые преобразует первичное топливо/силу в электричество), а являются, по сути, инструментом хранения.

Сетевой новацией современной энергетики в отличие от традиционной является способность накопителей энергии не просто хранить, но и активно управлять выдачей энергии в сеть. Однако, их роль в современном рынке столь трансформационная, что они создают новаторские возможности, которые ранее были недоступны, и по сути, выступают как виртуальный источник энергии, доступный по требованию.

Сетевой новацией современной энергетики в отличие от традиционной является способность накопителей энергии не просто хранить, но и активно управлять выдачей энергии в сеть. Однако, их роль в современном рынке столь трансформационная, что они создают новаторские возможности, которые ранее были недоступны, и по сути, выступают как виртуальный источник энергии, доступный по требованию.

Накопители энергии снижают требования к прогнозированию

В любой энергосистеме резкие изменения спроса или генерации требовали изменения режима работы традиционных источников энергии и их мгновенной коррекции. Поэтому прогнозирование мощности является неотъемлемой частью диспетчерского управления. Прогнозирование спроса на энергию в Казахстане необходимо для поддержания баланса между генерацией и потреблением, что критически важно для предотвращения отклонений частоты и напряжения в сети и обеспечения стабильности электросети.

Накопители энергии снижают зависимость системы от точного прогноза. Поэтому системы накопления энергии играют ключевую роль в сни-

жении требований к диспетчеризации и прогнозированию нагрузки в энергосистеме страны. Они сглаживают пиковые нагрузки, позволяют компенсировать колебания между генерацией и потреблением улучшая процесс балансировки электроэнергии, обеспечивая дополнительную гибкость как в управлении энергосистемой, так и в случае аварий или сбоев в энергосистеме, позволяют диспетчерам даже без их участия оптимизировать генерацию в реальном времени.

Регулирование частоты

Частота в энергосистеме – это показатель баланса между механической мощностью (вводимой турбинами) и электрической мощностью, потребляемой нагрузкой. Поэтому мы более подробно остановимся на этом вопросе, так как он очень актуален для энергосистемы Казахстана. Частотное регулирование – одна из самых критичных системных услуг для обеспечения стабильности энергосистемы. Регулирование частоты в энергосистеме – это многоуровневый процесс в котором механическая инерция обеспечивает мгновенную устойчивость, первичное регулирование турбин стабилизирует частоту, вторичное возвращает её к номиналу, а система АРВ поддерживает напряжение и синхронность, предотвращая переходные расстройства и потери устойчивости.

Обычные источники (ТЭС, ГЭС) реагируют с инерцией и запаздыванием:

- Механическая инерция турбин → первые секунды;
- Первичное регулирование → 5–10 секунд;
- Вторичное регулирование → десятки секунд и минут.

В результате чего f системы падает до того, как вступят в действие АРВ.

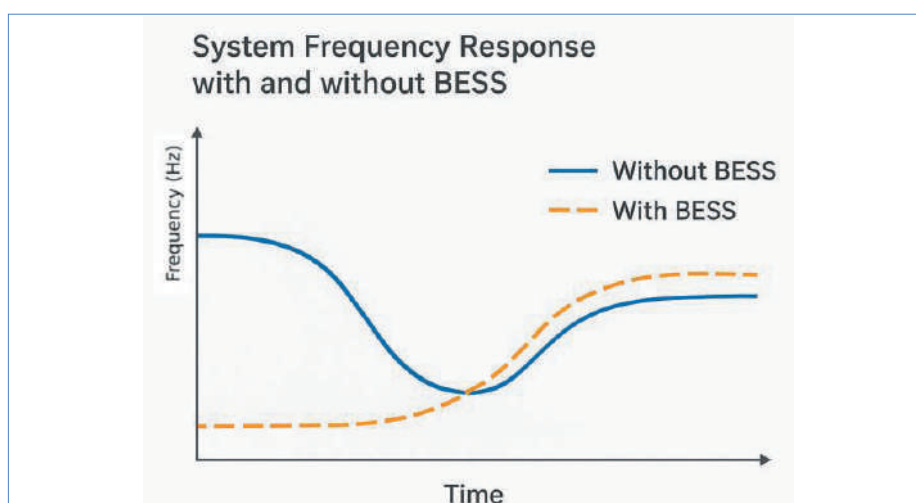
Для энергосистемы чтобы не допустить сильного отклонения частоты, нужно иметь резерв мощности $\Delta P_{рез}$, который быстро реагирует на это за время реакции АРВ.

Обычно на традиционных электростанциях АРВ в зависимости от типа действуют в диапазоне от 0,1 до 10 сек. (электрохимические регуляторы 2–1 сек., они медленные, инерционные; электронные регуляторы – 0,5–2 сек., более быстрые и точные; микропроцессорные регуляторы – 0,1–0,5 сек. до десятка миллисекунд, большинство остальных – десятки-сотни миллисекунд).

Однако ВИЭ с накопителями способны выполнять эту функцию с более высокой скоростью реакции чем традиционные станции. Современные накопители (особенно литий-ионные и суперконденсаторы) способны включаться за миллисекунды, обеспечивая практически мгновенный отклик.

Если в энергосистеме имеется аккумуляторная батарея мощностью P_{BESS} , которая практически сразу выдаёт мощность, то изменение мощности за счет них положительно влияет на динамику. Причем P_{BESS} действует в противофазе падению частоты.

Естественно это приведет к тому, что наличие ESS, способных мгновенно выдавать энергию для корректировки частоты, уменьшит величину падения частоты от номинального значения. Поэтому наличие быстродействующих накопителей становятся идеальным средством для первичного регулирования частоты в энергосистеме, что показано на рисунке 7. ▼



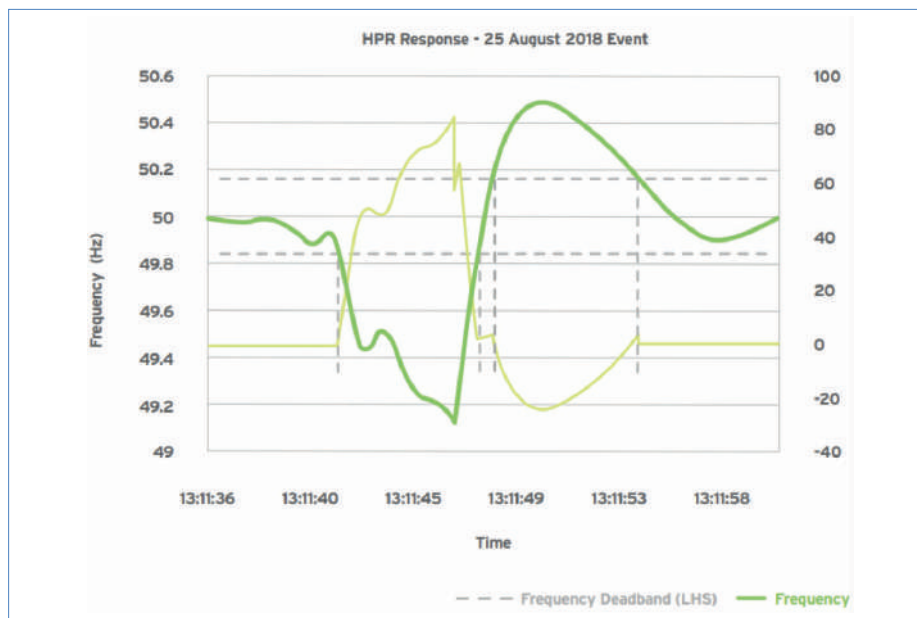


Рисунок 8.

Исследования проведенные в Южной Австралии показали, что использование традиционных электростанций позволяет только на уровне выше 49 Гц активировать функция отключения нагрузки при пониженной частоте [18].

Однако ВИЭ с накопителями способны выполнять эту функцию с более высокой скоростью реакции чем традиционные станции. На рис. 8 ▲ показана быстрая реакция ESS на аварийную ситуацию 25 августа 2018 г. вызвавшую падение частоты в сети энергетической системы Австралии АЕМО.

Аккумуляторная система Tesla, получив сигнал была способна выдать мощность до 100 МВт менее чем за 150 мс, что на 4 секунды быстрее, чем резервный генератор частотного контроля и вспомогательных услуг (FCAS), что обеспечило значительную частотную поддержку всем подключённым регионам [19]. Быстродействующие накопители обеспечивающие маневренную мощность за счет поглощения и выделения энергии становятся идеальными для регулирования частоты.

Моделирования этого события показало, что без участия ESS в рассматриваемом сценарии частота упала бы примерно до 48,7 Гц, что потребовало бы отключение нагрузки. Использование гигантской аккумуляторной системы Tesla 100 МВт/129 МВт·ч. потенциально предотвращает всякие отключения нагрузки в Южной

Австралии. Эксплуатация системы показывает, что благодаря скорости и точности реагирования она обеспечивает очень быструю и точную реакцию на сигналы системы регулирования FCAS. Это отличает реакция ESS от крупных традиционных паровых турбин, которые могут запаздывать по сигналу системы автоматического регулирования частоты вращения (AGC) на несколько минут.

После того как батарея Tesla сыграла решающую роль в стабилизации электросети в Южной Австралии аккумуляторы стали лидером в мире управляемой возобновляемой энергии. Только за два дня гигантская аккумуляторная система Tesla за счет аккумуляции дешёвой энергии и продажи её в несколько раз дороже в пиковые часы заработала миллион долларов за два дня, принесла компании максимальную прибыль [19].

Накопители энергии обеспечивая гибкость и масштабируемость позволяют повысить интеграцию ВИЭ в электрическую сеть, а мгновенная скорость отклика обеспечивает эффективность регулирования частоты сети.

Системы виртуального накопления энергии

Системы виртуального накопления энергии (VESS) – это инновационный подход к управлению энергией, который имитирует работу физической системы накопления энергии, но без необходимости установки физического аккумулятора.

VESS возникли как ответ на вызовы децентрализации и интеграции ВИЭ. Они позволяют объединять за считанные секунды небольшие распределенные энергетических ресурсов, такие как солнечные панели, домашние аккумуляторы, зарядные устройства для электромобилей и системы управления нагрузкой которые представляют единую управляемую систему. VESS способна быстро сбалансировать спрос и предложение энергии в больших масштабах в реальном времени, предотвращая потенциальные перебои с электро-снабжением, регулировать частоту, обеспечить гибкость, надёжность, экономическую эффективность для всей энергосистемы и снизить расходы на электроэнергию для конечного потребителя.

Платформа VESS объединяющую огромное количество ресурсов VPP позволяет за считанные секунды выдать мощности мегаваттного масштаба.

VESS содержащая в своем накопителе энергии увеличивает эффективную инерцию системы:

$$H_{eq} = H_{sys} + \sum H_{BESS}$$

VESS напрямую влияет на динамику переходных процессов (увеличивая скорость изменения частоты RoCoF (Rate of Change of Frequency) –

$$RoCoF = \Delta P / (2(H_{sys} + \sum H_{BESS})),$$

сокращая время восстановления частоты и амплитуду колебаний за счет демпфирования возмущений) улучшая переходный процесс, делая его короче и мягче. В результате чего VESS положительно влияют на устойчивость частоты в энергосистеме определяемой как:

$$J \cdot (d\omega/dt) = P_m - P$$

где:

J – эквивалентная инерция системы,

ω – угловая скорость (пропорциональна частоте),

P_m, P – механическая и электрическая мощности.

VESS позволили при допустимом уровне снижения частоты $\Delta f_{доп}$, использовать меньшую мощность традиционного резерва:

$$\Delta P_{рез}^{новое} = \Delta P_{рез}^{старое} - \sum P_{BESS}^{быстр}$$

А когда в составе VESS увеличивается суммарная мощность накопителей ($\sum \Delta P_{резBESS}$ или гибридных систем), то система получает дополнительный резерв управляемой мощности.

Кроме того следует отметить, что увеличение суммарной мощности накопителей энергии в составе виртуальной электростанции приводит к сокращению времени нормализации частоты в энергосистеме. Таким образом видно, что VESS оказывает значительное влияние на технические показатели работы энергосистемы. Это напрямую влияет на и на показатели надёжности. За счет VESS в энергосистеме увеличивается – дополнительный запас мощности системы и энергии относительно ожидаемого спроса, необходимый для поддержания электроснабжения. А следовательно возрастает и системная инерция определяющая способность энергосистемы сохранять стабильные процессы при внезапных изменениях баланса мощности, что способствует и увеличению RoCoF – скорости изменения частоты.

Повышение качества электрической энергии

Поддержка напряжения основной частоты. Для поддержания уровня напряжения в сети требуется управление реактивной мощностью. Современные инверторы, используемые с ВИЭ, могут управлять не только активной, но и реактивной мощностью. Инверторы ВИЭ вместе с накопителями могут выполнять функции управления напряжением на уровне распределительных сетей, обеспечивая гибкость в распределении активной и реактивной мощности в зависимости от условий работы сети.

В промышленных накопителях (BESS) запасенная энергии зависит от номинального напряжения батареи U (В) ёмкости батареи Q (А·ч) как:

$$E_{\text{кwh}} = (U \cdot Q) / 1000.$$

Если в электрической сети нагрузка внезапно возрастает, то возрастает ток и падает напряжение на величину $\Delta U \approx (Q \cdot X_L) / U$. BESS в момент падения напряжения отдаёт реактивную мощность $Q_{\text{BESS}} > 0$. Инвертор сравнивает измеренное напряжение в сети с эталонным и отдаёт энергию из накопителя в сеть. В результате чего напряжение на шине повышается.

Кроме реактивной мощности накопители BESS могут временно отдать активную мощность, если частота падает. Тогда накопитель BESS отдаёт энергию $P(t) = dE/dt$. Эта энергия преобразуется через ШИМ-инвертор

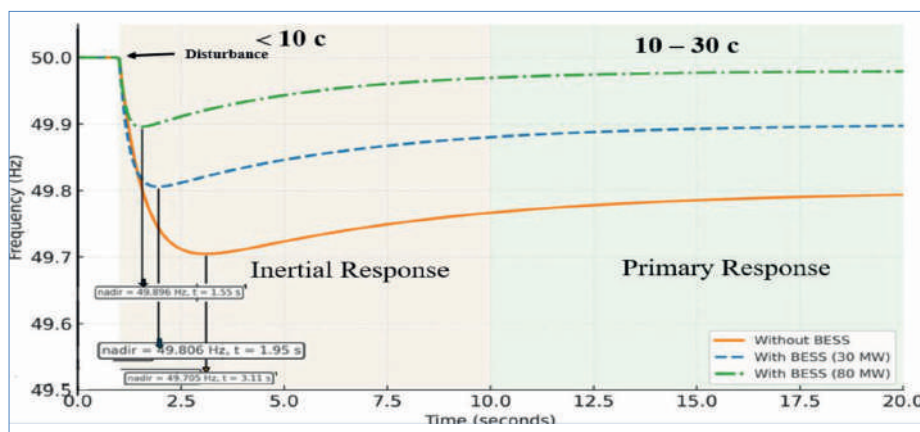


Рисунок 9.

в синусоидальный ток, синфазный с напряжением – подпитывая сеть.

Поддержка других показателей качества электроэнергии. Современные накопители энергии (батареи, суперконденсаторы) подключаются к каждой фазе через преобразователь (инвертор), что позволяет снижать фазовую несинусоидальность напряжения в электрических сетях. Эти инверторы могут работать в четырёх квадрантах, а значит – не только отдавать/поглощать мощность, но и управлять формой тока и напряжения. Инвертор накопителя измеряет гармонический состав сетевого тока и формирует ток компенсации:

$$i_{\text{comp}}(t) = - \sum_{n=2}^N I_n \sin(n\omega t + \varphi_n)$$

А так как этот ток направлен в противофазе к току высших гармоник сети, то суммарный ток в сети становится ближе к синусоидальному, что компенсируют высшие гармоники, стабилизируют форму напряжения и повышают качество электроэнергии.

Накопители энергии сами по себе напрямую не устраняют гармоники. Однако они являются ключевым компонентом в составе активных фильтров и систем управления качеством электроэнергии. Активные фильтры – это силовые электронные устройства, которые подключаются параллельно или последовательно к сети и генерируют ток (или напряжение), полностью компенсирующий гармонические составляющие, создаваемые нелинейной нагрузкой. Активные фильтры напряжения и тока используют накопители энергии (индуктивность или емкость) для компенсации гармоник. Накопитель энергии (как

правило, конденсатор в схеме источника напряжения или индуктивность в схеме источника тока) служит для накопления и стабилизации энергии для работы автономного инвертора, который и формирует компенсационный сигнал.

Так как BESS и суперконденсаторы могут быстро отдавать или поглощать энергию, то это позволяет сглаживать гармоники, компенсируя искажения формы напряжения, снижая коэффициент гармонических искажений (THD) что и позволяет им обеспечить высокую эффективность по сравнению с традиционными активными фильтрами. Кроме того активные фильтры способны компенсировать несколько гармоник одновременно и адаптироваться к изменяющимся параметрам нагрузки, что является их ключевым преимуществом перед пассивными фильтрами.

В распределительных сетях 0,4–10 кВ часто возникает небаланс по фазам. Система BESS-инвертор может перераспределять мощность между фазами, поддерживая:

$$U_A \approx U_B \approx U_C.$$

В этом случае современные накопители энергии с инверторами работают так же как и статические источники реактивной мощности, поддерживая баланс фаз и уменьшая перекосы напряжений по фазам, что позволяет снизить и несимметрию напряжения в сети.

Причем современные BESS ESS благодаря своим преобразователям, являясь многофункциональными обладают большей гибкостью, так часто выполняют несколько функций одновременно. Они могут выполнять комплексную компенсацию (фильтрацию) снижение сразу нескольких

гармоник, включая компенсацию реактивной мощности и несимметрии (в случае фильтрокомпенсирующих устройств и фильтросимметрирующих устройств и поддержка напряжения при провалах (за счет быстрой отдачи активной энергии). Следует добавить и то, что в отличие от пассивных фильтров, активные фильтры с ESS не создают риск возникновения резонансов с сопротивлением сети.

Эффект от внедрения многофункциональных батарейных систем хранения энергии (BESS) в промышленных сетях выражается в комплексном повышении качества электроэнергии и, как следствие, в снижении операционных рисков и затрат.

Таким образом, накопители энергии – это не только средство хранения, но и активный элемент управления современных и высокоэффективных систем повышения качества электроэнергии, позволяющий значительно более эффективно выполнять эти функции по сравнению с ранее существующими устройствами.

Развитие и массовое внедрение СНЭ представляют новый этап в эволюции энергетики. Эти технологии перестали быть лишь дополнением к ВИЭ – они становятся ключевым элементом современной энергосистемы в обеспечении её гибкости, устойчивости и надёжности децентрализованной энергосистемы будущего.

Энергетическая революция уже началась. И в её центре – технологии хранения энергии, открывающие путь к «умной», низкоуглеродной и потребителски-ориентированной энергетике XXI века.

Переход к широкому использованию накопителей энергии представляет собой не просто технологическую эволюцию, а системную революцию в энергетике, способную коренным образом изменить принципы функционирования энергосистем, их структуру и роль конечных потребителей.

В ближайшие десятилетия СНЭ будут играть определяющую роль в достижении глобальных климатических целей, повышении энергетической безопасности и создании более справедливых и устойчивых энергетических рынков.

В этой обстановке нам представляется целесообразным чтобы СНЭ выступающие сегодня в роли пилот-

ных проектов перешли к стадии одного из ключевых элементов в энергетике Казахстана.

Развитие нормативно-правовой базы, введение понятия «накопитель энергии» в Закон «Об электроэнергетике», разработка правил подключения СНЭ к сетям, участия их рынках, введение механизмов оплаты услуг хранения и балансировки, и создание экономических стимулов позволят продвинуть интеграцию накопителей энергии в энергосистему страны.

Таким образом можно считать, что в энергетике наступила эра накопителей энергии или революция в энергетике. А будущее энергетики мира будет опираться на а двух китов – накопителей энергии и ВИЭ.

ГАЭС

Гидроаккумулирующие электростанции (ГАЭС) в 21 веке переживают период расцвета. Они повышают надёжность энергосистем за счет использования уникальных свойств гидроэлектростанций (ГЭС) для регулирования пиков и спа-потреблений. Они работают, перекачивая воду в верхний резервуар в холодное время суток, а затем забирая воду из него вырабатывают электроэнергию во время пиковой нагрузки. Этот принцип позволяет снизить необходимость быстрого изменения мощности базовых электростанций, таких как АЭС и ТЭС, и повысить эффективность энергосистем [20].

Технология PHS, известная как старейшая технология крупномасштабного хранения энергии, может использоваться для балансировки сети, дополнения другой инфраструктуры возобновляемой энергии и содействия эффективному перераспределению поставок.

Технология PHS способна активно поглощать излишки электроэнергии из сети, что делает ее более экономичным и гибким вариантом по сравнению с известными технологиями, которые преобразуют ВИЭ в другие формы энергии или химические продукты, например водород, синтетическое топливо, химикаты или тепло.

Классическая гидроаккумулирующая станция включает:

- два водохранилища (верхнее и нижнее),
- турбины/насосы (обычно реверсивные Francis),

- большие уклоны и перепады высот 300–800 м,

- мощность 300–1800 МВт и накопление 4–12 часов.

Ограничения традиционных ГАЭС:

- необходимость высоких уклонов и крупных водохранилищ,
- зависимость от рельефа и экологии,
- длительные сроки строительства (7–10 лет),
- высокие капитальные затраты.

Для информации отметим, что Россия в 2025 году разработала два проекта строительства ГАЭС совокупной мощностью порядка 1 ГВт на озерах Айдаркуль и Каратерен в Узбекистане [21]. И по сообщению пресс-службы «Узбекгидроэнерго», уже не только подписано соглашение о совместной реализации проекта с китайской компанией «China Southern Power Grid International Co Ltd» (CSGI), но 10 марта 2025 г. заложен первый камень [22].

Процесс широкой интеграции ВИЭ в энергосистемы мира привел к возрождению ГАЭС и разработке новых проектов по всему миру с их участием. Так только в США в настоящее время 67 новых предложенных проектов ГАЭС находятся на различных стадиях планирования в 21 штате, что представляет собой более 50 ГВт новой емкости для хранения. В Австралии запущена ГАЭС мощностью 360 МВт в Форарльберге [23].

Электростанция Nant de Drance, одна из самых мощных ГАЭС в Европе введённая в эксплуатацию в 2022 году, перекачивает и пропускает воду через турбины между двумя водохранилищами обеспечивая устойчивое будущее для швейцарской и европейской энергетической системы [24].

Самая мощная ГАЭС в мире ГЭС установленной мощности 3,6 ГВт была введена в эксплуатацию в Китае в 2022 г. [25].

Учитывая, что Казахстан собирается развивать АЭС, покажем как ГАЭС (далее в тексте PHS – Pumped Hydro Storage) позволяли выполнять баланс спроса и предложения электроэнергии на острове Кюсю в Японии 3 мая 2018 г.

На южном японском острове Кюсю расположены 2 японские АЭС, которыми управляет электроэнергетическая компания Кюсю: Сендай мощно-

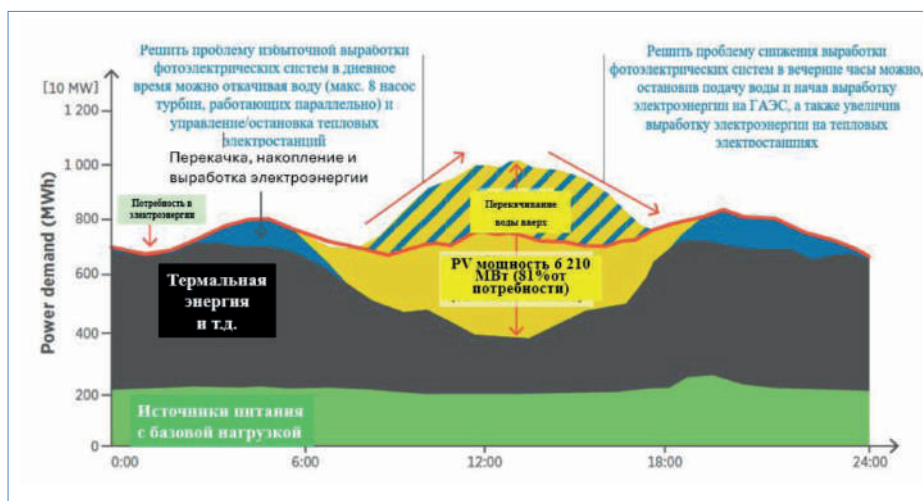


Рисунок 10.

стью 1680 МВт и Генкай мощностью 3478 МВт. Здесь же на острове имеется одна из самых мощных фотоэлектрических станций Японии с установленной мощностью 8,07 ГВт.

Пиковая нагрузка СЭС в указанный день достигла 6,21 ГВт (81 % пиковой нагрузки в этот день).

PNS помогла избежать полной остановки тепловых электростанций. Избыток вырабатываемой солнечной энергии использовался для перекачки воды в верхние резервуары на электростанциях. А производство тепловой энергии было сокращено для удовлетворения большого количества солнечной энергии.

На самом южном острове Японии, Кюсю, расположены три электростанции PNS, которыми управляет электроэнергетическая компания Кюсю. Имея установленную солнечную мощность 8,07 ГВт, Кюсю имеет одну из самых высоких долей ВИЭ в Японии. 3 мая 2018 года около 13:00 мощность фотоэлектрических станций достигла 6,21 ГВт (81 % пиковой нагрузки в этот день). Избыток вырабатываемой солнечной энергии использовался для перекачки воды в верхние резервуары на электростанциях PNS острова, а производство тепловой энергии было сокращено для удовлетворения большого количества солнечной энергии. PNS помогла избежать полной остановки тепловых электростанций за счет поглощения излишков солнечной энергии. Это помогло сохранить их эффективность и время реагирования, поскольку запуск тепловых электростанций может занять от 2 до 8 часов.

Кроме того, вырабатываемая PNS энергия использовалась в периоды снижения выработки фотоэлектрических энергии для удовлетворения пикового спроса.

Однако заметим, что эпоха равнинных гигантских ГЭС и мощных ГАЭС постепенно изживает себя. На смену им приходят гидроэлектростанции нового типа, которые меньше вредят природе и работают в паре с другими ВИЭ (СЭС и ветропарками).

Кроме того современные инновации в технологиях pumped hydro storage (PNS) делают гидроаккумулирующие станции более гибкими, экологичными.

В отличие от традиционных ГАЭС, новые проекты используют закрытые контуры, переменноскоростные турбины и цифровые системы управления, что позволяет быстрее реагировать на колебания ВИЭ и снижать воздействие на окружающую среду.

Насосы-турбины с регулируемой частотой вращения или как их иногда называют (переменноскоростные турбины) позволяют более точно регулировать мощность при выработке и потреблении электроэнергии, обеспечивая большую гибкость реагируя на потребности сети и плавное изменение нагрузки, а так же и балансирование солнечной и ветровой генерации. Технология регулируемой частоты вращения особенно важна для балансировки прерывистых ВИЭ за счет изменения производительности PNS [26].

Цифровые системы управления используют искусственный интеллект и машинное обучение для опти-

мизации работы PSH, позволяя прогнозировать изменения в сети при быстро меняющейся нагрузке или прерывистых ВИЭ.

Быстрое нарастание и ввод в эксплуатацию позволяют обеспечить еще более быстрый запуск, быстрое переключение из режима перекачки в режим генерации, сделает эти новые конфигурации PNS еще более гибкими при участии в регулировании режима сети.

Эти новые технологии PNS позволяют расширить диапазон услуг а также обеспечить регулирование частоты в режимах генерации и насоса.

Закрытые и вне-речные системы в отличие от традиционных ГАЭС, которые используют естественные водоемы, новые проекты строятся на искусственных резервуарах, что снижает экологическое воздействие и упрощает лицензирование.

Новые конструкции позволяют быстрее переключаться между режимами «насос» и «турбина», а также использовать «гидравлический короткий замыкатель» для мгновенного отклика.

Известно несколько видов низконапорных ГАЭС, которые с успехом можно применить в Казахстане.

Низконапорные ГАЭС. Они работают даже при 30–80 м напора. Это главное направление последних лет. Основная новация их в том, что теперь ГАЭС можно строить там, где нет гор.

Они используют насос-турбину типа StrafloMatrix (десятки малых турбин вместо одной большой). Работают при очень малых напорах: 30–80 м (традиционно – 300–600 м), что позволяет использовать старые каналы, озёра, затопленные карьеры.

Это не только дает возможность размещать ГАЭС в равнинных регионах (степях, пустынях, на побережьях), но и удешевление строительства в 2–3 раза и во много раз сроки сооружения.

► Примеры:

- Kanoya Osaki PHS, Япония – 30–40 м напор, использует малые насос-турбины.

- Seawater PHS Okinawa (Япония) – первая в мире морская ГАЭС, низкий напор (136 м).

	Физические возможности	Экономическая эффективность	Экологические особенности
Традиционные ГАЭС	Обычно большие сооружения, имеющие длительное время запуска и ограниченную гибкость	Высокие капитальные затраты, долгий срок окупаемости	Воздействуют на реки и экосистемы
Новые технологии PHS	Обеспечивают быстрый старт, высокую маневренность, возможность работы в частичных режимах. Имеют возможность в 10–20 раз больше мест для подходящего рельефа, позволяют работать при 30–40 м, позволяют использовать шахты, снимают ограничения рек	<ul style="list-style-type: none">• Меньшие экологические издержки, сокращение сроков согласования, снижение эксплуатационных расходов• Уменьшение потерь и расхода воды:<ul style="list-style-type: none">- замкнутые циклы дают сокращение испарения на 90 %,- подземные резервуары – минимальные утечки• Современные инверторы позволяют:<ul style="list-style-type: none">- обеспечить изменения скорости до 50–150 MW/сек,- полную активацию в 10–20 секунд. Повысить эффективность (до 80–82) против 72–78%	Закрытые системы, минимизируют влияние на природные водосемы

Таблица 5. Отличия новых технологий PHS от традиционных ГАЭС.

Подземные ГАЭС. Используют шахты горных выработок и подземные резервуары. У них нижний или верхний резервуар – подземный, созданный в шахтах / соляных кавернах. Они на 80–90 % снижают потребность в новом водохранилище. У них очень низкие утечки. Высокая механическая прочность грунта. Возможность больших напоров (до 600–900 м).

Примеры:

- Mount Hope PHS (США) – использует старые рудные шахты.
- Queensland UG-PHS (Австралия) – проект подземной ГАЭС в соляных кавернах.

PHS с замкнутым контуром. Они независимы от рек. Эти ГАЭС, полностью отдаленны от природных водотоков. Они не влияют на рыбные запасы и миграцию рыб. Для них легче получить экологическое разрешение, за счет возможности размещения в любом удобном месте.

Федеральная комиссия по регулированию энергетики (FERC) США для ускорения процессы лицензирования проектов PSH с замкнутым циклом ввела ускоренные процессы лицензирования для того, чтобы сократить время получения разрешений для реализации этих проектов с нескольких лет до месяцев.

Примеры:

- Goldendale PHS (США) – 1.2 GW, два искусственных водохранилища.
- Gordon Butte PHS (США) – 400 MW, полностью искусственный комплекс.

Модульные ГАЭС. Обеспечивают возможность быстрого строительства. Для этого они используют предварительно изготовленные промышленностью компоненты: модульные

насос-турбины, бетонные резервуары вместо земляных плотин и заводскую сборку каналов. Это позволяет снизить капитальные затраты и инвестиции компании в приобретение (CAPEX) на 20–30 %, обеспечить экономические преимущества, снизить время строительства с 7–10 лет до 3–4 лет, уменьшить экологический след.

Примеры:

- RPU GridScale (Дания) — модульные резервуары диаметром 20–40 м.
- Voith StreamDiver PHS concepts — многокамерные модули низконапорных турбин.

Гибридные PHS+BESS+СЭС/ВЭС. Обеспечивают возможность получения преимуществ совместного управления за счет быстрой реакции аккумуляторных накопителей (BESS), большая ёмкость PHS. Здесь утренний/вечерний пик покрывают ГАЭС, а мгновенное регулирование обеспечивают батареи.

Примеры:

- Snowy 2.0 (Австралия) – интеграция солнечной генерации и накопителей.
- Qinghai Solar-PHS (Китай) – 1,2 GW ГАЭС + 2 GW солнечных.

Модульные и малые PHS. Используются разработанные и изготовленные компактные установки для региональных сетей, что снижает капитальные затраты и открывает новые рынки.

Отличия новых технологий PHS от традиционных ГАЭС представлены в таблице 5.

Заключение

На тему о ВИЭ и накопителях энергии и перспективах развития мировой энергетики при высокой доле ВИЭ в энергосистемах разных страна мирах имеется много статей. Однако несмо-

тря на это, до сих пор некоторые профессионалы энергетики сомневаются в энергетических новациях связанных с ВИЭ. Причем именно профессионалы энергетики, получившие прекрасное образование в 20 веке и проработавшие в энергетике не один десяток лет, знающие основополагающие принципы традиционной энергетики, не могут смириться с необходимостью изменения этих принципов. Это и понятно, потому, что с началом интеграции использования переменные ВИЭ не только нарушали незыблемые основы традиционной электроэнергетики, существующие более ста с лишним лет, но и стали свидетелями многочисленных дополнительных проблем и сложностей, возникших в энергосистемах мира. Это создает неверное представление о роли ВИЭ в энергетике мира и мешает развитию современной энергетики.

В этой статье мы специально дали информацию о революционных технологиях в энергетике 21 века, чтобы читатель понял те огромные возможности которые ВИЭ и накопители энергии могут дать энергетике Казахстана.

Однако, получить их можно не наскоком, а если вдумчиво относится к проблеме. Было показано, как прекрасная идея начавшая свою историю в 2009 г. с Закона РК «О поддержке ВИЭ» затормозилась, так как с одной стороны не была подготовлена нормативная база, имели место технические просчеты, не рассчитана экономическая эффективность.

На все это у нас есть ответы, но они требуют немалого объёма. Поэтому мы не можем их здесь изложить. И если будет интерес со стороны читателей, то продолжение следует.

Список использованных источников и литературы:

- [1]. Renewable power generation costs in 2024 Media Briefing 21 July 2025. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2025/Jul/Costs-2025_Media-Briefing-Presentation.pdf
- [2]. Renewable power generation costs in 2024, <https://www.irena.org/Publications/2025/Jun/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2024>
- [3]. Renewable power generation costs in 2024, https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2025/Jul/IRENA_TEC_RPGC_in_2024_2025.pdf
- [4]. Project Inertia – Phase II Recovering power system resilience in case of system splits for a future-ready decarbonised system, ENTSO-E, https://eepublicdownloads.blob.core.windows.net/public-cdn-container/clean-documents/Publications/Position%20papers%20and%20reports/2025/250123_Project_Inertia_II_Position_paper_Recovering_power_system_resilience_in_case_of_system_splits_for_a_future-ready_decarbonised_system.pdf
- [5]. Интеграция с возобновляемыми источниками энергии, IEA, https://www.iea.org/energy-system/electricity/renewable-integration?utm_source=chatgpt.com
- [6]. Integrating Solar and Wind Global experience and emerging challenges, IEA, 2024, <https://iea.blob.core.windows.net/assets/4e495603-7d8b-4f8b-8b60-896a5936a31d/IntegratingSolarandWind.pdf>
- [7]. Ключевые факторы электроэнергетической отрасли Казахстана, 2025, <https://www.kegoc.kz/en/electric-power/elektroenergetika-kazakhstana/>
- [8]. Анализ отдельных режимов работы ВИЭ при дисбалансе УЭС Казахстана, журнал QAZAQGREEN, 2021.
- [9]. Герман Трофимов, журнал Энергетика, Вестник Союза инженеров-энергетиков Республики Казахстан, Алматы, № (2) 73, 2020.
- [10]. Герман Трофимов, журнал Энергетика, Вестник Союза инженеров-энергетиков Республики Казахстан, Алматы, № (3) 78, 2021, Направления развития электроэнергетики Казахстана.
- [11]. Жомарт Моминбаев, Прогнозирование выработки электроэнергетических объектов ВИЭ: проблемы и пути их решения, 2021, https://qazaqgreen.com/en/journal-qazaqgreen/expert-opinion/260/?utm_source=chatgpt.com
- [12]. Об утверждении Концепции развития электроэнергетики Республики Казахстан на 2023 - 2029 годы, 2023, https://cis-legislation.com/document.fwx?rgn=149571&utm_source=chatgpt.com
- [13]. Национальная энергетическая система, <https://www.kegoc.kz/en/electric-power/natsionalnaya-energosistema/#:~:text=Annual%20Peak%20Load,to%20Central%20Asia:%2095%20MW>
- [14]. Ассель Сатубальдина, Возобновляемые источники энергии выявляют слабые стороны энергетического сектора Казахстана и меняют мышление, 2025, https://astanatimes.com/2025/02/renewables-expose-weaknesses-in-kazakhstans-power-sector-transforms-mindsets/?utm_source=chatgpt.com
- [15]. Аукционы по проектам возобновляемых источников энергии в Казахстане, ИТОГИ 2018–2023 гг., Астана, Казахстан, Январь 2024 г, https://powercentralasia.org/wp-content/uploads/2024/02/KZ-RE-Auctions-Report-2018-2023_RUS-26-Jan-2024.pdf
- [16]. Промышленность возобновляемой устойчивости предложена Казахстаном к приостановке, 31 Марта 2025 г., Kazakhstan's renewable energy industry proposed to be suspended, March 31, 2025? RES, Kazakhstan, https://centralasiacclimateportal.org/kazakhstans-renewable-energy-industry-proposed-to-be-suspended/?utm_source=chatgpt.com
- [17]. Первая система накопления энергии появится в Казахстане, 29 мая 2025, https://tengrinews.kz/kazakhstan_news/pervaya-sistema-nakopleniya-energii-poyavitsya-v-kazahstane-571474/.nih.gov/articles/PMC4678120/?utm_source=chatgpt.com
- [18]. Hornsdale Power Reserve Year 1 Technical and Market Impact Case Study, <https://hornsdalespowerreserve.com.au/wp-content/uploads/2022/12/Aurecon-HornsdalesPower-Reserve-Impact-Study-year-1.pdf>
- [19]. Гигантская аккумуляторная система Tesla заработала миллион долларов за два дня, 2018, <https://habr.com/ru/articles/409761/>
- [20]. Papadakis C. Nikolaos, Fafalakis Marios and Katsaprakakis Dimitris, A Review of Pumped Hydro Storage Systems, 2023, Обзор систем гидроаккумулирования энергии, <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/11/4516>
- [21]. Россия в 2025 году разработает проекты строительства двух ГАЭС в Узбекистане, 2025, <https://www.spot.uz/ru/2024/06/03/hydropower>
- [22]. Iskander Beglov, Узбекистан-Китай: гидроаккумулирующая электростанция, 2025, <http://www.eecca-water.net/content/view/38762/1/lang,ru/>
- [23]. Гидроаккумулирующая электростанция Obervermuntwerk II, Форарльберг, Obervermuntwerk II Pumped Storage Power Plant, Vorarlberg, <https://www.power-technology.com/projects/obervermuntwerk-ii-pumped-storage-power-plant-vorarlberg>
- [24]. Nant de Drance, one of Europe's most powerful pumped storage power plants, <https://www.nant-de-drance.ch/en/>
- [25]. Новый рекордсмен: самая мощная ГАЭС в мире введена в эксплуатацию, 2022, <https://dzen.ru/a/YhRWxFU2WjcKJRS3?ysclid=mhz15zqbt200742331>
- [26]. The Latest Developments, <https://www.nha2024pshreport.com/nha-psh-2024/current-trends>