

Торайғыров университетінің хабаршысы
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайғыров университета

Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы
1997 жылдан бастап шығады



ВЕСТНИК Торайғыров университета

Энергетическая серия
Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

№3 (2026)

ПАВЛОДАР

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайгыров университета

Энергетическая серия
выходит 4 раза в год

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания

№ 14310-Ж

выдано

Министерство информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность

публикация материалов в области электроэнергетики,
электротехнологии, автоматизации, автоматизированных и
информационных систем, электромеханики и теплоэнергетики

Подписной индекс – 76136

<https://doi.org/10.48081/BTOUEn3.2026/2710-3420>

Бас редакторы – главный редактор

Талипов О. М.

доктор PhD, ассоц. профессор (доцент)

Заместитель главного редактора

Калтаев А.Г., *доктор PhD*

Ответственный секретарь

Сағындық Ә.Б., *доктор PhD*

Редакция алқасы – Редакционная коллегия

Клецель М. Я.,

д.т.н., профессор

Никифоров А. С.,

д.т.н., профессор

Новожилов А. Н.,

д.т.н., профессор

Алиферов А. И.,

д.т.н., профессор (Российская Федерация)

Кошеков К. Т.,

д.т.н., профессор

Приходько Е. В.,

к.т.н., профессор

Кислов А. П.,

к.т.н., доцент

Нефтисов А. В.,

доктор PhD

Шеръязов С. К.

т.ғ.д., профессор (Российская Федерация)

Искакова З. С.

технический редактор

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели

Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов

При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

© Торайгыров университет

***К. А. Байжанов¹, С. С. Исенов², Д. Д. Исабеков³**

^{1,2}Казахский агротехнический исследовательский

университет имени С. Сейфуллина,

Республика Казахстан, г. Астана;

³Торайғыров университет,

Республика Казахстан, г. Павлодар.

¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6653-1140>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4576-4621>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6673-5646>

*e-mail: bnovkairat@mail.ru

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ СТАБИЛИЗАЦИИ МОЩНОСТИ ВЕТРОВОЙ ГЕНЕРАЦИИ В ИЗОЛИРОВАННЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМАХ НЕФТЕГАЗОВЫХ ОБЪЕКТОВ

В статье представлен обзорно-аналитический анализ технологий стабилизации мощности ветровой генерации, ориентированный на их применение в изолированных промышленных энергосистемах нефтегазовых объектов. Рассматриваются системные вызовы, связанные с интеграцией стохастических возобновляемых источников энергии в слабые сети с мощной динамической нагрузкой, характерной для нефтегазовой отрасли. Проведена систематизация и классификация существующих подходов к стабилизации, с особым акцентом на системы накопления электрической энергии (СНЭЭ). Выполнен многокритериальный сравнительный анализ ключевых технологий накопления: литий-ионных, натрий-серных и проточных редокс-батарей, суперконденсаторов, маховичных и водородных накопителей. Анализ основан на обобщении данных из открытых научных публикаций и отчетов. Выявлены преимущества, недостатки и области рационального применения каждой технологии для решения задач сглаживания флуктуаций мощности, регулирования частоты и напряжения, а также демпфирования электромеханических колебаний. Обсуждаются ограничения и перспективы применения гибридных систем накопления и водородных технологий в контексте специфических условий эксплуатации в западных регионах Казахстана,

включая климатические факторы и требования к надежности. Результаты исследования формируют основу для разработки обоснованного подхода к выбору оптимальных технологических решений для повышения устойчивости и надежности автономного электроснабжения промышленных объектов.

Ключевые слова: изолированная энергосистема, ветровая генерация, накопитель энергии, BESS, стабилизация мощности, качество электроэнергии, нефтегазовая отрасль, сравнительный анализ.

Введение

Нефтегазовая отрасль Казахстана сосредоточена преимущественно в западных регионах страны. Освоение новых месторождений сопровождается ростом энергопотребления [1]. Значительная часть объектов расположена в удалённых районах и работает в изолированном или полуизолированном режиме относительно Единой электроэнергетической системы.

Энергоснабжение таких объектов ограничено высокой стоимостью и длительными сроками технологического присоединения (18–36 месяцев), износом сетевой инфраструктуры и нестабильным качеством электроэнергии. Крупные аварии в западном энергоузле последних лет показали зависимость производств от внешней сети и уязвимость удалённых площадок.

Развитие автономной генерации, включая ВИЭ, рассматривается как одно из ключевых направлений. Западные регионы обладают высоким ветровым потенциалом, однако переменный характер выработки создаёт проблемы устойчивости изолированных энергосистем. Колебания мощности приводят к отклонениям частоты и напряжения, особенно при работе мощных электроприводов насосов и компрессоров.

Для стабилизации режимов применяются системы накопления электрической энергии (СНЭЭ), способные быстро поглощать избыточную мощность и отдавать её при дефиците. Это обеспечивает сглаживание выработки, регулирование частоты и напряжения и снижение колебаний в сети.

Несмотря на большое количество работ по интеграции систем накопления энергии, большинство исследований посвящено экономическим аспектам или крупным энергосетям. Вопрос сравнительного анализа технологий накопления и их влияния на динамическую устойчивость изолированных промышленных микрогридов остаётся недостаточно проработанным.

Цель исследования: сравнительный анализ технологий стабилизации мощности ветровой генерации и обоснование многокритериального

подхода к выбору накопителей энергии для изолированных энергосистем нефтегазовых объектов Западного Казахстана.

Для достижения поставленной цели определены следующие задачи:

- Обзор и классификация технологий стабилизации ветровой генерации;
- Анализ применения накопителей энергии в изолированных промышленных системах;
- Сравнительный анализ ключевых технологий накопления энергии по техническим и экономическим параметрам;
- Оценка областей их рационального применения.

Научная новизна и вклад автора:

В настоящей работе получены следующие научные результаты, обладающие элементами новизны:

- Предложен многокритериальный подход к выбору технологий накопления энергии с учётом временных, экономических и климатических факторов;
- Показана зависимость эффективности накопителей от временных масштабов возмущений мощности ВЭС;
- Сформирована классификация ролей накопителей в автономных энергосистемах нефтегазовых объектов.

Практическая значимость состоит в применении результатов при проектировании автономных и изолированных систем электроснабжения нефтегазовой отрасли.

Материалы и методы

Интеграция ветровой генерации в энергосистемы, особенно в изолированные, сопряжена с рядом технических вызовов, обусловленных ее переменчивым характером. Основными проблемами являются флуктуации выходной мощности, которые приводят к отклонениям частоты и напряжения в сети, что негативно сказывается на общей стабильности и качестве электроэнергии [2; 3]. Для решения этих проблем активно разрабатываются и применяются различные подходы, которые можно классифицировать по принципу действия и временному горизонту регулирования.

Методы на стороне генерации. Современные ветроэнергетические установки, особенно на базе генераторов с двойным питанием (DFIG) и полным преобразователем мощности (FPC), способны быстро регулировать активную и реактивную мощность [4]. Применение синтетической инерции и продвинутых алгоритмов управления шагом лопастей позволяет сглаживать кратковременные колебания выработки. Однако диапазон такого

регулирования ограничен: при длительных провалах или избытках генерации этих мер, как правило, недостаточно [5].

Методы на стороне потребления. Регулирование нагрузки, прежде всего на промышленных объектах, может использоваться для балансировки системы. Тем не менее для нефтегазовых предприятий с непрерывным технологическим циклом возможности отключения или снижения основной нагрузки (насосов, компрессоров) минимальны и связаны с риском нарушения производственного процесса.

Системы накопления электрической энергии (СНЭЭ): Наиболее универсальным инструментом стабилизации ветровой генерации остаются системы накопления. Они позволяют сбалансировать по времени производство и потребление энергии, аккумулируя излишки и отдавая их в периоды дефицита, тем самым повышая управляемость и гибкость энергосистемы.

1. Электрохимические накопители (аккумуляторные батареи):

- Литий-ионные батареи (Li-ion): На сегодняшний день являются доминирующей технологией для задач стабилизации энергосистем благодаря высокой плотности энергии, длительному сроку службы, высокому КПД (85-95%) и быстро снижающейся стоимости. Они способны к быстрому заряду/разряду, что делает их идеальными для сглаживания краткосрочных и среднесрочных колебаний мощности. Ключевые компоненты системы (BESS – Battery Energy Storage System) включают аккумуляторные модули, систему управления батареями (BMS), систему преобразования мощности (PCS) и систему управления энергией (EMS).

- Натрий-серные батареи (NaS): Высокотемпературные батареи (рабочая температура 300-350°C), характеризующиеся высокой плотностью энергии и длительным сроком службы. Однако необходимость поддержания высокой температуры приводит к дополнительному собственному потреблению энергии и усложняет эксплуатацию.

- Проточные редокс-батареи: В этих системах энергия хранится в жидких электролитах, которые прокачиваются через электрохимическую ячейку. Ключевое преимущество – независимое масштабирование мощности (определяется размером ячейки) и энергоемкости (определяется объемом баков с электролитом). Это делает их перспективными для длительного хранения энергии (многочасового).

2. Электрические накопители (суперконденсаторы):

- Суперконденсаторы (Supercapacitors, SC): Также известные как ультраконденсаторы, они хранят энергию в электрическом поле. Их главное преимущество – огромная плотность мощности и практически

неограниченный циклический ресурс (сотни тысяч и миллионы циклов). Они способны заряжаться и разряжаться за секунды, что делает их идеальными для компенсации очень быстрых, высокочастотных флуктуаций мощности и обеспечения качества электроэнергии. Однако их плотность энергии значительно ниже, чем у аккумуляторов, что ограничивает их применение для длительного хранения.

3. Механические накопители:

- Маховичные накопители энергии (Flywheel Energy Storage Systems, FESS): Хранят энергию в виде кинетической энергии вращающегося с высокой скоростью ротора (маховика). Они эффективно применяются для кратковременного резервирования (UPS) и регулирования частоты. Ограничениями являются относительно высокое саморазряжение (из-за трения) и короткое время разряда (от секунд до нескольких минут).

4. Химические накопители (водородные системы):

- Водородные технологии: Эта технология предполагает производство «зеленого» водорода из избыточной энергии ВИЭ методом электролиза воды. Водород затем хранится (в сжатом или сжиженном виде) и при необходимости преобразуется обратно в электроэнергию с помощью топливных элементов или сжигания в газовых турбинах. Главное преимущество водорода – возможность очень длительного, вплоть до сезонного, хранения больших объемов энергии. Однако такие системы обладают более низкой скоростью реакции и меньшим КПД полного цикла «заряд-разряд» (30-50 %) по сравнению с BESS.

5. Гибридные системы накопления энергии (HESS):

- Для оптимизации работы и продления срока службы накопителей часто применяются гибридные системы, сочетающие технологии с разными характеристиками. Наиболее распространенной является комбинация аккумуляторов и суперконденсаторов. В такой системе суперконденсаторы отрабатывают быстрые, высокочастотные колебания мощности, а аккумуляторы – более медленные, но продолжительные изменения. Это позволяет снизить пиковые нагрузки на аккумуляторы, уменьшить их деградацию и повысить общую эффективность системы.

Таким образом, выбор технологии стабилизации зависит от конкретных задач: сглаживание кратковременных флуктуаций, регулирование частоты, сдвиг нагрузки или обеспечение длительной автономии. Для комплексного решения проблем в изолированных системах с ВЭУ наиболее перспективным представляется применение электрохимических и гибридных СНЭЭ.

Результаты и обсуждение

Применение СНЭЭ в изолированных промышленных энергосистемах (микрогридах) не ограничивается сглаживанием выработки ВИЭ. В таких конфигурациях накопители фактически становятся опорным элементом системы, от которого зависит её устойчивая и предсказуемая работа.

Формирование сети (Grid-Forming). В изолированном режиме, в отсутствие связи с мощной внешней энергосистемой, необходимо устройство, которое будет «задавать» параметры сети – стабильное напряжение и частоту. Традиционно эту роль выполняют синхронные генераторы (например, ДГУ). Однако при высокой доле ВИЭ, подключенных через инверторы, работающие в режиме «следования за сетью» (Grid-Following, GFL), система теряет жесткость и инерцию. Современные инверторы СНЭЭ могут работать в режиме «формирования сети» (Grid-Forming, GFM). GFM-инверторы способны самостоятельно создавать и поддерживать синусоиду напряжения и номинальную частоту, фактически эмулируя поведение синхронного генератора [6].

Регулирование частоты и инерционный отклик. Изолированные системы с преобладанием инверторной генерации обладают низкой инерцией. Это может вызвать срабатывание защит и каскадное отключение генерации и нагрузки. СНЭЭ с быстрым откликом способны обеспечить первичное регулирование частоты, практически мгновенно компенсируя разницу между генерацией и потреблением.

Регулирование напряжения и компенсация реактивной мощности. Нагрузка нефтегазовых объектов. Прямой пуск мощного двигателя в слабой сети вызывает глубокие просадки напряжения, что может привести к сбоям в работе другого оборудования. Инвертор СНЭЭ способен независимо и быстро управлять активной и реактивной мощностью. В момент пуска двигателя СНЭЭ может мгновенно выдать в сеть необходимую реактивную мощность, поддерживая напряжение в допустимых пределах.

Демпфирование электромеханических колебаний. В энергосистемах, содержащих как синхронные машины, так и инверторную генерацию, могут возникать низкочастотные (0.1–2.0 Гц) электромеханические колебания мощности. Исследования показывают, что СНЭЭ, оснащенные специальными контроллерами, могут эффективно подавлять эти колебания [7]. Контроллер анализирует колебания мощности или частоты в сети и модулирует выходную мощность СНЭЭ в противофазе.

Повышение качества электроэнергии. Помимо стабилизации частоты и напряжения, СНЭЭ могут выполнять функции активного фильтра, компенсируя гармонические искажения, вносимые нелинейной нагрузкой,

и устранения фликера (колебания напряжения), что критично для чувствительного электронного оборудования и систем управления.

Таким образом, в изолированной промышленной системе СНЭЭ выступает не просто как буфер для энергии ВИЭ, а как многофункциональное системообразующее устройство, обеспечивающее устойчивость, надежность и качество электроэнергии. Выбор конкретной технологии СНЭЭ должен основываться на анализе того, какие из перечисленных функций являются приоритетными для данного объекта. Технические параметры рассматриваемых технологий накопления обобщены в таблице 1.

Таблица 1 – Технические параметры систем накопления энергии для нефтегазовых микросетей

Вид	Литий-ионные батареи	Натрий-серные	Проточные редокс	Суперконденсаторы	Маховики	Водородные системы
Плотность энергии (Вт·ч/кг)	100-265	150–240	25–75	5–10	~100 (в системе)	>1000 (системная)
Количество циклов	3,000–10,000	~4,500	>10,000	>500,000	>100,000	Зависит от компонента
КПД полного цикла (%)	85–95	75–85	65–85	95–98	85–95	30–50
Диапазон рабочих температур (°C)	-20 до +60 (с BMS)	300–350	-5 до +50	-40 до +65	-20 до +45	-20 до +50
Оценочный LCOS (\$/МВт·ч)	150–250	280–400	200–500	>1000	>800	>500

Литий-ионные аккумуляторы

Преимущества: высокая плотность энергии (100–265 Вт·ч/кг), КПД 85–95 %, быстрый отклик и ресурс 3000–10000 циклов. Применяются для регулирования частоты, напряжения и сдвига нагрузки [8].

Недостатки и ограничения: необходимость сложной системы управления и пожарной защиты, зависимость ресурса от температуры

окружающей среды, дополнительные затраты на термостатирование в суровом климате.

Область применения: стабилизация режимов в диапазоне от секунд до нескольких часов, формирование сети и сглаживание мощности.

Суперконденсаторы

Преимущества: высокая плотность мощности, быстрый отклик, ресурс свыше 500 000 циклов и широкий температурный диапазон. КПД 95-98 %.

Недостатки и ограничения: низкая плотность энергии и высокая стоимость в пересчёте на кВт·ч.

Область применения: кратковременная компенсация флуктуаций мощности, поддержка напряжения при пуске двигателей и работа в составе гибридных систем с аккумуляторами [9].

Маховичные накопители

Преимущества: Аналогичны суперконденсаторам по характеристикам: высокая плотность мощности, быстрый отклик, очень долгий срок службы, не зависящий от глубины разряда. Экологически чистые, так как не используют токсичных материалов.

Недостатки и ограничения: Короткое время хранения (от секунд до 15-20 минут). Наличие вращающихся частей требует обслуживания. Более высокий уровень саморазряда по сравнению с электрохимическими системами. Капитальные затраты на единицу энергии (\$/кВт·ч) высоки, что ограничивает их применение для задач длительного хранения.

Область применения: Регулирование частоты на рынках вспомогательных услуг, обеспечение бесперебойного питания (UPS) для критически важного оборудования до запуска резервных дизель-генераторов, сглаживание кратковременных провалов и всплесков мощности.

Проточные редокс-батареи

Преимущества: Независимое масштабирование мощности и энергоёмкости, ресурс 10 000 – 20 000 циклов, высокая пожаробезопасность.

Недостатки и ограничения: Низкая плотность энергии и КПД 65–85 %, медленный отклик и необходимость обслуживания гидравлической системы; отдельные электролиты могут быть токсичными.

Область применения: Длительный сдвиг нагрузки, накопление энергии ВЭУ и резервное питание на несколько часов.

Натрий-серные батареи

Преимущества: высокая плотность энергии и использование доступных материалов.

Недостатки и ограничения: рабочая температура 300–350 °С, потери на подогрев и риски безопасности.

Область применения: стационарные системы сдвига нагрузки и резерв мощности с разрядом 6–8 часов.

Водородные технологии

Преимущества: Уникальная способность к сверхдлительному (сезонному) хранению практически неограниченных объемов энергии [10]. Водород может использоваться не только для генерации электроэнергии, но и как сырье в химической промышленности или топливо для транспорта, что создает дополнительные экономические возможности.

Недостатки и ограничения: Низкий КПД полного цикла (30-50 %). Высокие капитальные затраты на электролизеры и топливные элементы. Относительно медленная скорость реакции по сравнению с BESS, что не позволяет эффективно участвовать в быстром регулировании частоты. Проблемы хранения и транспортировки водорода. Технология все еще находится на ранней стадии коммерциализации для задач энергосистем.

Область применения: Стратегическое резервирование, обеспечение 100 % автономности на ВИЭ за счет сезонного хранения энергии, декарбонизация промышленных процессов.

Для обоснованного выбора технологий накопления энергии в условиях изолированных энергосистем нефтегазовых объектов в работе использован многокритериальный аналитический подход. Предложенный подход учитывает специфику автономных нагрузок, повышенные требования к надёжности и ограниченные возможности резервирования – аспекты, которые в большинстве существующих обзорных работ [2; 3; 9] остаются нерассмотренными применительно к изолированным промышленным системам нефтегазовой отрасли.

В качестве основных критериев оценки выбраны следующие параметры:

- Время отклика – способность технологии компенсировать кратковременные провалы и скачки мощности ветровой генерации.
- Энергоемкость – возможность покрытия дефицита мощности в течение заданного интервала времени.
- Надежность и отказоустойчивость – работа системы при отказах и перегрузках.
- Климатическая устойчивость – работа при низких и высоких температурах, характерных для Западного Казахстана
- Срок службы и деградация – влияние цикличности работы на ресурс оборудования.
- Капитальные затраты (CAPEX) – инвестиционные затраты на внедрение технологии.

- Эксплуатационные затраты (OPEX) – затраты на обслуживание и ремонт.
- Масштабируемость – возможность поэтапного наращивания мощности системы накопления.

Оценка по каждому критерию выполнена с использованием качественной шкалы (низкий / средний / высокий), что позволяет сохранить аналитический вес исследования без применения сложных математических моделей. Данный подход (WSM — Weighted Sum Model) предпочтён более формальным методам (АНР, TOPSIS) ввиду ограниченной доступности количественных объектных данных по изолированным объектам Западного Казахстана: применение точных нормализованных матриц при отсутствии реальных паспортных данных создаёт риск ложной точности результата. При этом критерии ранжированы по степени приоритетности для данного типа объектов: наивысший приоритет имеют время отклика и надёжность, за ними следуют климатическая устойчивость, КПД цикла и стоимость хранения (LCOS). Результаты многокритериальной оценки представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Качественная многокритериальная оценка технологий накопления энергии для изолированных систем. (Составлено автором на основе анализа источников [9; 10])

Критерий	Li-ion BESS	Суперконденсаторы	Маховики (FESS)	Проточные батареи	Водородные системы
Время отклика	Высокое	Очень высокое	Очень высокое	Среднее	Низкое
Плотность мощности	Высокая	Очень высокая	Очень высокая	Средняя	Средняя
Плотность энергии	Высокая	Очень низкая	Низкая	Средняя	Очень высокая
Циклический ресурс	Средний	Очень высокий	Очень высокий	Высокий	Средний
КПД полного цикла	Высокий	Очень высокий	Высокий	Средний	Низкий
Климатическая устойчивость	Средняя	Высокая	Средняя	Средняя	Средняя
Приведенная стоимость (LCOS)	Низкая	Очень высокая	Высокая	Средняя	Высокая
Надежность и ТО	Средняя	Высокая	Средняя	Средняя	Низкая

Для наглядной демонстрации областей рационального применения различных СНЭЭ в таблице 3 представлена матрица соответствия технологий ключевым функциям, которые они могут выполнять в изолированной энергосистеме. Характерные диапазоны времени отклика различных технологий накопления показаны на рисунке 1.

Таблица 3 – Матрица соответствия технологий функциям энергосистемы

Функция в энергосистеме	Li-ion BESS	Суперконденсаторы	Маховики (FESS)	Проточные батареи	Водородные системы
Формирование сети (Grid-Forming)	+++	+	+	++	+
Регулирование частоты (быстрое)	+++	+++	+++	+	-
Регулирование напряжения (VAR)	+++	+++	++	++	+
Сглаживание мощности (секунды-минуты)	+++	+++	+++	+	-
Демпфирование колебаний	+++	++	++	+	-
Сдвиг нагрузки (часы)	++	-	-	+++	+++
Сезонное хранение (дни-месяцы)	-	-	-	-	+++

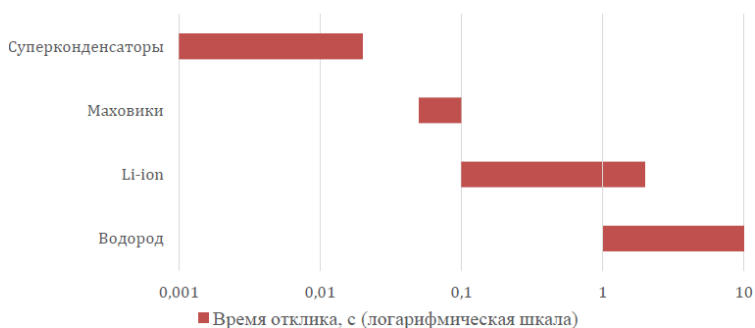


Рисунок 1 – Характерные диапазоны времени отклика различных технологий накопления энергии при резких флуктуациях мощности ветровой генерации

Условия эксплуатации энергосистем нефтегазовых объектов Западного Казахстана характеризуются значительными суточными и сезонными колебаниями ветровой нагрузки, ограниченной ремонтпригодностью оборудования и повышенными требованиями к бесперебойности электроснабжения. В этих условиях универсальные решения, применяемые в централизованных энергосистемах, не всегда обеспечивают требуемый уровень устойчивости.

Результаты проведенного анализа показывают, что наибольший эффект достигается при использовании гибридных систем накопления энергии, сочетающих технологии с различным временем отклика и энергоемкостью. Такой подход позволяет одновременно решать задачи стабилизации частоты, сглаживания кратковременных провалов мощности и обеспечения резервирования нагрузки. Сравнение приведённой стоимости хранения энергии (LCOS) по технологиям показано на рисунке 2.

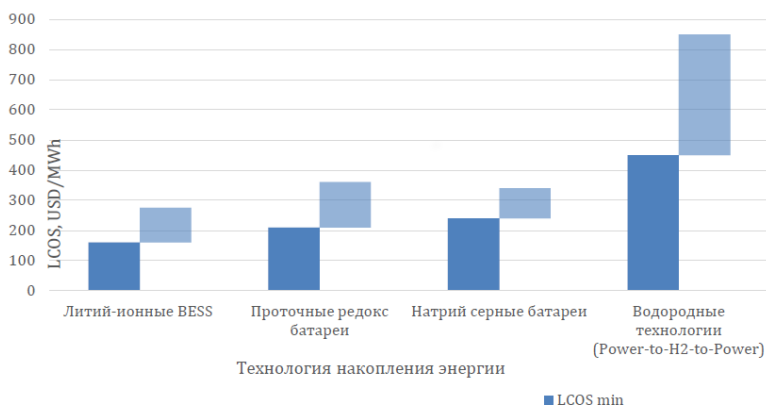


Рисунок 2 – Гистограмма приведённой стоимости хранения энергии (LCOS) для различных технологий накопления на основе обобщения данных открытых источников за 2023–2025 гг.

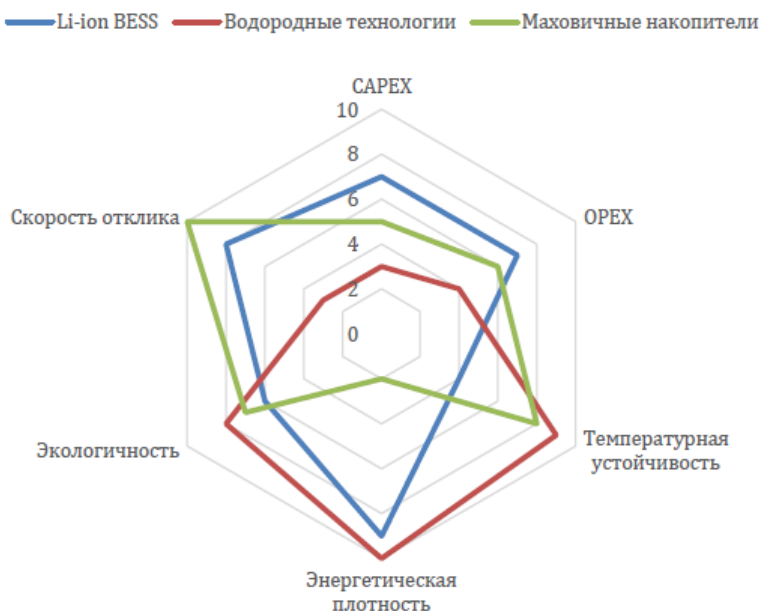


Рисунок 3 – Качественная многокритериальная оценка технологий накопления энергии

Диаграмма отражает экспертно-аналитическое сравнение литий-ионных, водородных и маховичных систем накопления энергии по совокупности экономических, эксплуатационных и климатических критериев

Для изолированной системы нефтегазового объекта, где требуется одновременно сглаживать быстрые флуктуации ВЭУ, компенсировать пусковые токи двигателей и обеспечивать стабильность частоты и напряжения, ключевыми являются высокая плотность мощности и быстрый отклик. С этой точки зрения, литий-ионные BESS на сегодняшний день представляют собой наиболее сбалансированное и технологически зрелое решение. Их способность выполнять множество системных услуг (формирование сети, регулирование частоты/напряжения, демпфирование колебаний) в рамках одного устройства делает их особенно привлекательными [11]. Качественное многокритериальное сравнение ключевых технологий в графическом виде представлено на рисунке 3.

Однако при их применении в условиях Западного Казахстана необходимо уделить особое внимание двум аспектам. Во-первых, это климатические условия. Резко континентальный климат характеризуется среднемесячными

температурами от $-18...-22\text{ }^{\circ}\text{C}$ в январе до $+35...+38\text{ }^{\circ}\text{C}$ в июле; число дней с температурой ниже $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ достигает 15–25 в год. При температурах ниже $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ литий-ионные батареи теряют 30–40 % номинальной ёмкости, что увеличивает собственное потребление системы обогрева на 3–8 %; для NaS-батарей необходимость непрерывного поддержания $300\text{--}350\text{ }^{\circ}\text{C}$ в арктических условиях повышает расчётный LCOS на 15–25 % по сравнению с умеренным климатом. Это потребует установки BESS в термостатированных контейнерах с надёжными системами отопления и кондиционирования. Это увеличивает капитальные и оперативные затраты (за счет собственного потребления) и должно учитываться при экономическом обосновании проекта. Во-вторых, требования к безопасности на объектах нефтегазовой отрасли являются первостепенными. Необходимо применять BESS с наиболее безопасной химией (например, литий-железо-фосфат), а также предусматривать многоуровневые системы мониторинга, газоанализа и автоматического пожаротушения, соответствующие стандартам для взрывоопасных зон.

Перспективы гибридных систем (HESS). Для оптимизации работы и снижения нагрузки на основной аккумуляторный массив перспективным является применение гибридных систем. Комбинация литий-ионных батарей и суперконденсаторов (SC) представляется наиболее рациональной для рассматриваемых условий. В такой конфигурации SC берут на себя компенсацию самых быстрых и мощных возмущений (например, начальный бросок тока при пуске двигателя), в то время как BESS обеспечивает более длительную поддержку мощности и регулирование частоты [12]. Это позволяет уменьшить пиковые токи разряда BESS, что положительно сказывается на их деградации и сроке службы, а также потенциально снизить требуемую пиковую мощность инвертора BESS.

Роль водородных технологий. В долгосрочной перспективе, по мере снижения стоимости электролизеров и топливных элементов, водородные системы могут занять свою нишу. Для удаленных объектов, стремящихся к максимальной энергонезависимости и декарбонизации, водород может стать решением для сезонного хранения энергии, компенсируя длительные периоды безветрия, которые не могут быть покрыты аккумуляторными системами [13]. Казахстан обладает значительным потенциалом для производства «зеленого» водорода. Однако на текущем этапе развития технологии, водородные системы следует рассматривать не как замену, а как дополнение к более быстрым накопителям (BESS), решающее задачи стратегического, а не оперативного резервирования.

Таким образом, для текущего технологического уровня и ближайшей перспективы (5-10 лет) оптимальной стратегией для стабилизации изолированных энергосистем нефтегазовых объектов является использование литий-ионных BESS, возможно, в гибридном исполнении с суперконденсаторами. При этом проектирование системы должно в обязательном порядке учитывать экстремальные климатические условия региона и повышенные требования к промышленной безопасности. В отличие от рассмотренных работ, ориентированных преимущественно на крупные централизованные энергосистемы, настоящее исследование сфокусировано на специфике изолированных микрогридов с мощной двигательной нагрузкой, для которых временные масштабы возмущений и требования к быстродействию принципиально иные. Предложенный подход с климатическими поправками для условий Западного Казахстана не был реализован ни в одной из проанализированных работ применительно к нефтегазовым объектам данного региона.

Информация о финансировании

Данная работа является результатом, полученным в ходе реализации проекта ИРН АР32718997 (2026), финансируемого в рамках грантового финансирования от Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан.

Выводы

В рамках настоящего исследования проведен системный сравнительный анализ технологий стабилизации мощности ветровой генерации с фокусом на их применимость в изолированных энергосистемах удаленных нефтегазовых объектов. Анализ мирового опыта и научных публикаций позволил сформулировать следующие ключевые выводы.

1. Изолированные промышленные энергосистемы с высокой долей ветровой генерации и мощной динамической нагрузкой (насосы, компрессоры) представляют собой «слабые» сети с низкой инерцией. Они подвержены значительным отклонениям частоты и напряжения, а также риску возникновения низкочастотных колебаний мощности, что может привести к потере динамической устойчивости и нарушению технологических процессов. Простого управления мощностью на стороне ВЭУ недостаточно для обеспечения требуемого уровня надежности и качества электроэнергии.

2. Системы накопления электрической энергии являются ключевым технологическим решением, позволяющим не только сглаживать стохастический характер ветровой генерации, но и выполнять ряд критически важных системных функций: формирование параметров сети

в островном режиме (GFM), быстрое регулирование частоты и напряжения, компенсация реактивной мощности и демпфирование электромеханических колебаний. СНЭЭ трансформируют пассивную энергосистему в активно управляемый микрогрид.

3. Проведенный многокритериальный сравнительный анализ показал, что различные технологии накопления обладают уникальным набором характеристик, определяющим их рациональную область применения. Суперконденсаторы и маховики эффективны для компенсации сверхбыстрых флуктуаций мощности и улучшения качества энергии. Проточные и натрий-серные батареи лучше подходят для многочасового сдвига нагрузки. Водородные системы являются перспективным решением для долгосрочного и сезонного хранения больших объемов энергии.

4. Для комплексного решения задач стабилизации в изолированных энергосистемах нефтегазовых объектов, требующих сочетания быстрого отклика и достаточной энергоемкости, на современном этапе технологического развития наиболее сбалансированным и коммерчески зрелым решением являются литий-ионные аккумуляторные системы (Li-ion BESS). Их универсальность позволяет эффективно решать задачи как оперативного регулирования (секунды-минуты), так и краткосрочного сдвига нагрузки (до нескольких часов).

5. Научная новизна исследования заключается в систематизации технологий и формировании многокритериального подхода к их выбору, адаптированного к специфическим условиям изолированных промышленных объектов Западного Казахстана. В отличие от общих исследований, акцент сделан на одновременном учете стохастической генерации, динамической нелинейной нагрузки, экстремальных климатических факторов и повышенных требований к промышленной безопасности.

Практическая значимость работы состоит в предоставлении инженерно-техническим специалистам научно обоснованной базы для принятия решений при проектировании автономных энергокомплексов. Обоснованный выбор технологии стабилизации, в частности, применение Li-ion BESS (потенциально в гибридном исполнении с суперконденсаторами), позволит повысить надежность электроснабжения критически важного оборудования, минимизировать риски производственных потерь и ускорить безопасную интеграцию ветроэнергетики в энергобаланс нефтегазовой отрасли Казахстана. Дальнейшие исследования должны быть направлены на технико-экономическую оптимизацию параметров СНЭЭ для конкретных объектов и разработку адаптивных алгоритмов управления, учитывающих износ оборудования и изменяющиеся условия эксплуатации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Kazakhstan energy profile // IEA. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.iea.org/reports/kazakhstan-energy-profile/energy-security>.
- 2 **Mastoi, M. S., et al.** Critical comparison of storage technologies for wind energy fluctuation mitigation // *Applied Energy*. – 2025. – Vol. 385. – P. 125412.
- 3 **Mahadevan, V., et al.** This review offers a quantitative comparison of major ESS technologies mechanical electrical electrochemical thermal and chemical storage systems // *Journal of Energy Storage*. – 2025. – Vol. 93. – P. 112345.
- 4 **de Siqueira, L. M. S. & Peng, W.** Control strategy to smooth wind power output using battery energy storage system: A review // *Journal of Energy Storage*. – 2021. – Vol. 35. – P. 102252.
- 5 **Eroğlu, H., et al.** Techno-economic analysis of battery energy storage systems integrated into wind power plants // *Scientific Reports*. – 2025. – Vol. 15. – P. 18863.
- 6 **Gajewski, P. & Pieńkowski, K.** Control of the hybrid renewable energy system with wind turbine, photovoltaic panels and battery energy storage // *Energies*. – 2021. – Vol. 14, No. 6. – P. 1595. – <https://doi.org/10.3390/en14061595>
- 7 **Chen, X., et al.** Damping enhancement of power systems via control parameter tuning of grid-forming battery energy storage system // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. – 2025. – Vol. 168. – P. 110943.
- 8 **Hasanvand, S., Sobhani, H., Mardaneh, M., & Khooban, M.** Optimal Design of Battery Energy Storage System Controllers for Damping Low-Frequency Oscillations // *ETRI Journal*. – 2025. – <https://doi.org/10.1155/er/2248945>
- 9 **Kamarposhti, M. A., et al.** Design and Optimization of a Robust Wide-Area Damping Controller for Mitigating Inter-Area Oscillations in Wind-Integrated Power Systems // *Energies*. – 2025. – Vol. 18, No. 1. – P. 234. – <https://doi.org/10.1002/ese3.70161>
- 10 **Kumar, R., et al.** Effect of battery energy storage system on inter-area oscillations under varying load conditions // *Materials Today: Proceedings*. – 2024.
- 11 **Zhu, Y.** Control and Placement of Battery Energy Storage Systems for Power System Oscillation Damping : PhD diss. – University of Tennessee, 2018.
- 12 **Bowen, T., et al.** Grid-Scale Battery Storage: Frequently Asked Questions. – NREL/TP-6A20-76097. – Golden, CO : National Renewable Energy Laboratory, 2021. – 50 p.
- 13 **Jan, K. U., Dubois, A. M., & Diallo, D.** Hybrid Battery-SC and Battery-Battery Multistage Design and Energy Management for Power Sharing // *IECON 2021 – 47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. – 2021. – P. 1–6.

Поступило в редакцию 30.01.26.

Поступило с исправлениями 27.04.26.

Принято в печать 03.09.26.

*Қ. Ә. Байжанов¹, С. С. Исенов², Д. Д. Исабеков³

^{1,2}С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті,
Қазақстан Республикасы, Астана қ.

³Торайғыров университеті,
Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

30.01.26 ж. баспаға түсті.

27.04.26 ж. түзетулерімен түсті.

03.09.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

МҰНАЙ-ГАЗ НЫСАНДАРЫНЫҢ ОҚШАУЛАНҒАН ЭНЕРГИЯ ЖҮЙЕЛЕРІНДЕГІ ЖЕЛ ГЕНЕРАЦИЯСЫ ҚУАТЫН ТҰРАҚТАНДЫРУ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫНА САЛЫСТЫРМАЛЫ ТАЛДАУ

Мұнай-газ секторының оқшауланған өнеркәсіптік энергия жүйелерінде қолдануға бағытталған жел генерациясының қуатын тұрақтандыру технологияларына шолу-аналитикалық талдау ұсынылған. Мұнай-газ саласына тән қуатты динамикалық жүктемесі бар әлсіз желілерге стохастикалық жаңартылатын энергия көздерін біріктірумен байланысты жүйелік қиындықтар қарастырылады. Электр энергиясын жинақтау жүйелеріне (ЭЭЖЖ) ерекше назар аудара отырып, тұрақтандырудың қолданыстағы тәсілдерін жүйелеу және жіктеу жүргізілді. Негізгі жинақтау технологияларына: литий-ионды, натрий-күкіртті және ағынды редокс-батареяларға, суперконденсаторларға, маховикті және сутекті жинақтағыштарға көпкритерийлі салыстырмалы талдау жасалды. Талдау ғылыми жарияланымдар мен есептердегі деректерді жалпылауға негізделген. Қуат ауытқуларын тегістеу, жиілік пен кернеуді реттеу, сондай-ақ электромеханикалық тербелістерді демпферлеу міндеттерін шешу үшін әр технологияның артықшылықтары, кемшіліктері және ұтымды қолдану салалары анықталды. Қазақстанның батыс өңірлеріндегі ерекше пайдалану шарттары, соның ішінде климаттық факторлар мен сенімділікке қойылатын талаптар тұрғысында гибридті жинақтау жүйелері мен сутекті технологияларды қолданудың шектеулері мен

перспективалары талқыланады. Зерттеу нәтижелері өнеркәсіптік нысандардың автономды электрмен жабдықтауының тұрақтылығы мен сенімділігін арттыру үшін оңтайлы технологиялық шешімдерді таңдауға негізделген тәсілді әзірлеуге негіз болады.

Кілтті сөздер: оқшауланған энергия жүйесі, жел генерациясы, энергия жинақтағыш, BESS, қуатты тұрақтандыру, электр энергиясының сапасы, мұнай-газ саласы, салыстырмалы талдау.

*K. A. Baizhanov¹, S. S. Issenov², D. D. Isabekov³

^{1,2} S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University,
Republic of Kazakhstan, Astana;

³Toraighyrov University,
Republic of Kazakhstan, Pavlodar.

Received 30.01.26.

Received in revised form 27.04.26.

Accepted for publication 03.09.26.

COMPARATIVE ANALYSIS OF WIND POWER STABILIZATION TECHNOLOGIES FOR ISOLATED ENERGY SYSTEMS

This work presents a review and analytical analysis of wind power stabilization technologies, focusing on their application in isolated industrial power systems of oil and gas facilities. It examines the systemic challenges associated with integrating stochastic renewable energy sources into weak grids with powerful dynamic loads, which are characteristic of the oil and gas industry. A systematization and classification of existing stabilization approaches are carried out, with a special emphasis on Battery Energy Storage Systems (BESS). A multi-criteria comparative analysis of key storage technologies is performed, including lithium-ion, sodium-sulfur, and redox flow batteries, as well as supercapacitors, flywheel, and hydrogen storage systems. The analysis is based on a generalization of data from open scientific publications and reports. The advantages, disadvantages, and rational application areas of each technology are identified for solving tasks such as smoothing power fluctuations, regulating frequency and voltage, and damping electromechanical oscillations. The limitations and prospects for using hybrid storage and hydrogen technologies are discussed in the context of the specific operating conditions in the western regions of Kazakhstan,

including climatic factors and reliability requirements. The research results form a basis for developing a well-founded approach to selecting optimal technological solutions to enhance the stability and reliability of autonomous power supply for industrial facilities.

Keywords: isolated power system, wind power generation, energy storage system, BESS, power stabilization, power quality, oil and gas industry, comparative analysis.

Теруге 07.09.2026 ж. жіберілді. Басуға 30.09.2026 ж. қол қойылды.

Электронды баспа

19,0 Mb RAM

Шартты баспа табағы 34,4. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: Шукитова А. Б.

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Тапсырыс № 4601

Сдано в набор 07.09.2026 г. Подписано в печать 30.09.2026 г.

Электронное издание

19,0 Mb RAM

Усл. печ. л. 34,4. Тираж 300 экз. Цена договорная.

Компьютерная верстка: Шукитова А. Б.

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Заказ № 4601

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

67-36-69

E-mail: kereku@tou.edu.kz

www.vestnik-energy.tou.edu.kz