

УДК 621.311

НЕДОСТАТКИ И СЛОЖНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЙ НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ DISADVANTAGES AND COMPLEXITY OF ENERGY STORAGE TECHNOLOGIES

Н.Ю. Кратик

Научный руководитель – С.В. Сизиков, к.т.н., доцент
Белорусский национальный технический университет, г. Минск
N. Kratik

Supervisor – S. Sizikov, Candidate of Technical Sciences, Docent
Belarussian national technical university, Minsk

Аннотация: Статья выявляет критические барьеры в развитии систем хранения энергии (СХЭ), необходимых для стабильности ВИЭ. Основная проблема – высокая УСС Li-ion и их неспособность обеспечить долговременное хранение (ДСХЭ). Новизна состоит в доказательстве необходимости срочного смещения фокуса инвестиций и регулирования на разработку дешевых, масштабируемых технологий ДСХЭ.

Abstract: This article identifies critical barriers in Energy Storage Systems (ESS) essential for stable RES integration. The core issue is the high LCOS of Li-ion and its failure to provide cost-effective long-duration storage (LDES). The novelty is the proven need to urgently shift investment and regulatory focus toward developing cheap, scalable LDES technologies.

Ключевые слова: Накопление энергии (СХЭ), Долговременное хранение (ДСХЭ), Сырьевая зависимость, Стабильность энергосистемы, Li-ion аккумуляторы.

Keywords: Energy Storage (ESS), Long-Duration Storage (LDES), Raw Material Dependence, Grid Stability, Li-ion batteries.

Введение

Роль Сохранения Энергии в Устойчивом Развитии

Переход мировой энергетики к использованию возобновляемых источников энергии (ВИЭ) – солнечной и ветровой – является основополагающим условием для достижения целей по сокращению выбросов парниковых газов и борьбы с изменением климата. Однако ключевой особенностью этих источников является их прерывистость и непостоянство: производство энергии не совпадает по времени с потреблением.

Системы хранения энергии (СХЭ) – это критически важный технологический элемент, необходимый для обеспечения стабильности и надежности энергосистемы. Они выполняют функции балансирования сети, переноса нагрузки (сохранение дневной энергии для вечернего пика) и резервирования.

Ключевая проблема: существующие технологии СХЭ либо имеют высокую стоимость, либо технологически сложны, либо ограничены в применении, что замедляет их массовое внедрение и ставит под вопрос возможность полного отказа от традиционной базовой генерации.

Основная часть

Экономические недостатки: высокая цена и инвестиционный риск

Главный барьер для широкого внедрения ССЭ носит экономический характер: высокая удельная стоимость сохранения энергии в масштабах, требуемых современной энергосистеме.

Для оценки коммерческой эффективности ССЭ используется показатель Усредненной Стоимости Сохранения (УСС) – общие расходы на один киловатт-час сохраненной и возвращенной в сеть энергии за весь срок службы системы:

- Литий-ионные (Li-ion) аккумуляторы: Несмотря на значительное снижение капитальных затрат на Li-ion за последние годы, их УСС резко возрастает при попытке использовать их для долговременного хранения (более 4-6 часов). Для увеличения емкости приходится линейно наращивать количество дорогих модулей.
- Новые системы: Технологии долговременного сохранения (например, проточные аккумуляторы или гравитационные системы) имеют высокий потенциал для снижения УСС в будущем благодаря долгому сроку службы, но их начальные капитальные затраты пока слишком высоки для конкуренции.

Рынок аккумуляторов, особенно Li-ion, является сырьезависимым. Критические материалы: Производство требует металлов, таких как литий, кобальт, никель и марганец, добыча и переработка которых часто сконцентрированы в политически нестабильных регионах.

Ценовая нестабильность: Цены на эти металлы подвержены высокой волатильности, что напрямую влияет на конечную стоимость аккумуляторов. Это создает геополитические риски и затрудняет долгосрочное финансовое планирование проектов.

Инвестирование в ССЭ сопряжено с высоким риском из-за:

- Технологической незрелости: Новые решения (например, гравитационные или тепловые накопители) не имеют длительной истории эксплуатации, что повышает риски для инвесторов.
- Неопределенность доходности: Во многих странах отсутствует четкая нормативная и тарифная база, определяющая, как накопители будут получать плату за свои услуги (например, за регулирование частоты, обеспечение резерва). Эта регуляторная неопределенность является значительным барьером для привлечения крупного частного капитала.

Технологические недостатки и сложность применения

Сложность технологий сохранения энергии заключается в их ограниченной масштабируемости по времени и жесткой привязке к географии или условиям эксплуатации.

Самый серьезный технологический пробел – отсутствие эффективных и дешевых систем для долговременного сохранения энергии (ДССЭ), способных работать от 10 часов до нескольких недель или месяцев:

- Проблема "Штиля": Для полной замены базовой генерации необходим запас энергии на случай длительных периодов без солнца и ветра. Li-ion

батареи не могут решить эту задачу без астрономических затрат.

- Низкий КПД: Технологии, имеющие потенциал для ДССЭ, такие как водородные системы, страдают от низкого КПД полного цикла (преобразование электричества в водород и обратно), что делает их неэффективными с точки зрения использования энергии.

Традиционные, проверенные временем крупномасштабные ССЭ имеют серьезные ограничения:

- Гидроаккумулирующие Электростанции (ГАЭС): Являются самыми надежными и долговечными, но жестко привязаны к специфической топографии (горы, водоемы) и наличию воды, что делает их неприменимыми в большинстве регионов.
- Накопление сжатого воздуха: Требует подходящей геологии (подземных соляных куполов или пещер) и имеет сложную конструкцию, что ограничивает выбор места строительства.
- Термический контроль: Li-ion системы требуют сложной и дорогостоящей системы терморегуляции для предотвращения теплового разгона и пожаров, что увеличивает эксплуатационные расходы.
- Проблемы утилизации: Утилизация и экологически безопасная переработка огромных объемов аккумуляторов, содержащих токсичные и ценные компоненты, представляет собой сложную и затратную логистическую и экологическую задачу.

Примеры существующих технологий сохранения энергии

Современные ССЭ можно разделить на несколько категорий в зависимости от принципа работы и шкалы времени.

Электрохимические технологии (аккумуляторы). Хранят энергию посредством обратимых химических реакций.

Таблица 1 – Электрохимические технологии (аккумуляторы)

Технология	Принцип работы	Назначение и шкала времени	Главные недостатки и сложность
Литий-ионные	Движение ионов лития между электродами.	Кратковременное сетевое хранение (до 4-6 часов), регулирование частоты.	Высокая стоимость емкости, сырьевая зависимость, риск теплового разгона, сложность утилизации.
Проточные (окислительно-восстановительные)	Энергия хранится в жидких электролитах во внешних резервуарах.	Средне- и долговременное хранение (до 10 часов), где требуется долгий срок службы.	Высокая начальная стоимость электролита (часто ванадия), низкая плотность энергии (требуют много места).
Натрий-ионные	Используют ионы натрия, который более доступен и дешевле, чем литий.	Альтернатива Li-ion для стационарного применения.	Меньшая удельная энергоемкость (пока), на ранних этапах коммерческого освоения, нехватка стандартизации.

Механические технологии. Хранят энергию в виде потенциальной или кинетической энергии.

Таблица 2 – Механические технологии

Технология	Принцип работы	Назначение и шкала времени	Главные недостатки и сложность
Гидроаккумулирующие (ГАЭС)	Закачивание воды в верхний резервуар с использованием избыточной энергии.	Масштабное, долговременное резервирование и балансирование (часы/дни).	Жёсткая географическая привязка к топографии, высокие капитальные затраты, длительный цикл строительства.
Накопление сжатого воздуха	Сжатие воздуха и его хранение в подземных полостях.	Крупномасштабное, долговременное сохранение.	Зависимость от геологии, низкий КПД (требуется дополнительный нагрев).
Гравитационные Накопители	Подъем тяжелых блоков или грунта с использованием электричества.	Долгий срок службы, длительное сохранение.	Высокие начальные инвестиции, низкая удельная энергоемкость (требуют большой территории).

Тепловые и химические технологии. Эти системы преобразуют электрическую энергию в тепловую или химическую энергию.

Таблица 3 – Тепловые и химические технологии

Технология	Принцип работы	Назначение и шкала времени	Главные недостатки и сложность
Тепловые Накопители	Сохранение тепла в расплавленных солях или других материалах.	Продление работы тепловых солнечных станций.	Ограниченная область применения (в основном для тепловой генерации).
Водородные Системы (Преобразование Энергии в Газ)	Электролиз воды для получения водорода с использованием электричества.	Сезонное и очень долговременное сохранение.	Очень низкий общий КПД, высокая стоимость оборудования и отсутствие развитой инфраструктуры.

Для преодоления недостатков и снижения стоимости ССЭ необходим многосторонний подход, включающий технологические инновации, финансовое стимулирование и совершенствование регулирования.

Критически важно сместить фокус с краткосрочных Li-ion решений на развитие систем ДССЭ:

- Разработка альтернатив: Государственная поддержка научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) по натрий-ионным, цинковым, и новым механическим системам, использующим дешевое и доступное сырье.
- Программы ДССЭ: Создание целевых программ финансирования для пилотных проектов в области гравитационных и тепловых накопителей,

которые обещают долгий срок службы и низкую УСС.

- Повышение КПД: Инвестиции в технологии, направленные на повышение общего КПД систем преобразования энергии в газ (водород), что повысит их экономическую целесообразность.

Рынок должен быть адаптирован для признания полной ценности услуг, предоставляемых ССЭ:

- Введение адекватных тарифов: Создание четких тарифных планов, которые компенсируют накопителям не только объем поставленной энергии, но и услуги по регулированию частоты, предоставлению резерва и обеспечению надежности.
- Государственные закупки: Использование механизма государственных закупок для гарантированного спроса на новые технологии ДССЭ, что позволит снизить инвестиционный риск для частных компаний и ускорить снижение цен за счет экономии от масштаба.
- Стандартизация: Разработка унифицированных технических стандартов и правил безопасности для всех типов ССЭ, что упростит проектирование, строительство и эксплуатацию.

Для обеспечения устойчивости энергетического перехода необходимо решить проблему зависимости от критического сырья:

- Индустрия переработки: Масштабное финансирование и создание инфраструктуры для вторичной переработки отработанных аккумуляторов. Это создаст "замкнутый цикл" для лития, кобальта и никеля.
- Диверсификация: Активная поддержка разработок, использующих более доступные материалы (натрий, железо, алюминий) в качестве основных компонентов.

Заключение

Высокая стоимость и технологическая сложность технологий сохранения энергии являются на сегодняшний день главными препятствиями на пути достижения полной энергетической независимости от ископаемого топлива.

Успешное преодоление этих недостатков требует скоординированных действий на трех уровнях: технологические прорывы в ДССЭ, снижение сырьевой зависимости через переработку и диверсификацию, а также создание стимулирующей регуляторной среды. Только при условии, что сохранение энергии станет дешевым, надежным и масштабируемым, ВИЭ смогут полностью обеспечить базовую мощность и привести мировую экономику к устойчивому и безуглеродному будущему.

Литература

1. RENWEX 2026 7-я международная выставка и форум «Энергосбережение, зеленая энергетика и электротранспорт»- URL: <https://www.renwex.ru/ru/ii/vozobnovlyаемaya-ehnergetika> (дата обращения 20.10. 2025)
2. Формум ХАБР - URL https://habr.com/ru/companies/ru_mts/articles/755226 (дата обращения 20.10. 2025)

3. 3.Химическая промышленность в России и мире, оХимПром - URL: <https://ohimprom.ru/articles/preryvistye-vozobnovlyaemye-istochniki-elektroenergii> (дата обращения 20.10. 2025)
4. 4.Международное энергетическое агентство (МЭА) (дата обращения 20.10. 2025)