

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

№ 4 (2025)

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/GMYR4462>

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.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Никифоров А. С.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Новожилов А. Н.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Никитин К. И.,	<i>д.т.н., профессор (Российская Федерация)</i>
Алиферов А. И.,	<i>д.т.н., профессор (Российская Федерация)</i>
Кошеков К. Т.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Приходько Е. В.,	<i>к.т.н., профессор</i>
Кислов А. П.,	<i>к.т.н., доцент</i>
Нефтисов А. В.,	<i>доктор PhD</i>
Шокубаева З. Ж.	<i>технический редактор</i>

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

<https://doi.org/10.48081/LKRT3596>***Д. Д. Айкимбаева¹, Г. Г. Таткеева²**

¹ГКП на ПХВ «Высший колледж транспорта и коммуникаций»,
Республика Казахстан, г. Астана;

²Казахский агротехнический исследовательский
университет имени С. Сейфуллина, Республика Казахстан, г. Астана.

¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6182-9220>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9518-4567>

*e-mail: darkhan_s05@mail.ru

ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ ДЛЯ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ НА ОСНОВЕ НАТРИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ

Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения стабильности и эффективности функционирования солнечных электростанций в условиях неравномерной генерации электроэнергии. В современных энергетических системах, ориентированных на декарбонизацию и расширение доли возобновляемых источников энергии, возрастает значение интеграции накопителей, способных сглаживать суточные и сезонные колебания выработки. В этом контексте натрий-ионные аккумуляторы рассматриваются как экономически и технологически перспективная альтернатива традиционным литий-ионным системам, особенно с точки зрения снижения зависимости от дефицитных ресурсов.

Целью статьи является разработка научно обоснованных подходов к оптимизации архитектуры и режимов функционирования систем накопления энергии с использованием натрий-ионных аккумуляторов, с акцентом на повышение их надёжности и адаптивности к параметрам фотоэлектрической генерации.

В рамках методологии проведён теоретический анализ научных источников, технико-эксплуатационных характеристик аккумуляторных блоков, моделей прогнозирования и управления зарядно-разрядными циклами, а также параметров энергообмена в гибридных установках. Используются сравнительно-аналитические

методы, методы системного подхода, а также обобщение передовых инженерных решений.

Научная новизна заключается в систематизации критериев выбора и конфигурации натрий-ионных накопителей для солнечных электростанций, а также в разработке рекомендаций по их адаптации к динамическим условиям генерации и потребления.

В результате исследования выявлены ключевые технологические, экономические и инфраструктурные барьеры внедрения данных систем; установлено, что наиболее эффективными являются модульные конфигурации с интеллектуальными системами управления и прогнозирования. Доказано, что применение адаптивных моделей управления на основе машинного обучения повышает энергетическую автономность и рентабельность солнечных установок.

К перспективным направлениям отнесено развитие гибридных архитектур накопителей, создание цифровых двойников для оптимизации эксплуатационных режимов, а также стандартизация решений на уровне промышленных и децентрализованных энергосистем.

Ключевые слова: энергетическая устойчивость, прогнозное управление, модульные аккумуляторы, адаптивные режимы, фотоэлектрическая генерация

Введение

Современное развитие возобновляемой энергетики обусловлено необходимостью декарбонизации экономики и повышения энергетической независимости, что особенно актуально на фоне роста мирового энергопотребления и нестабильности топливных рынков. Солнечные электростанции, как один из ключевых источников чистой энергии, стремительно интегрируются в национальные энергетические балансы, однако их широкомасштабное применение сопровождается проблемой нестабильности выработки и несоответствия между генерацией и потреблением электроэнергии. Эффективное функционирование таких систем невозможно без надежных накопителей энергии, способных сглаживать колебания выработки и обеспечивать стабильность энергоснабжения. В этом контексте особое внимание уделяется разработке и оптимизации систем хранения энергии, в частности на основе натрий-ионных аккумуляторов, как более устойчивой и потенциально дешёвой альтернативы литий-ионным аналогам.

Несмотря на значительный прогресс в области хранения энергии, существующие решения часто не учитывают специфику работы в условиях переменной генерации и требуют адаптации к техническим и экономическим

особенностям солнечных электростанций различного масштаба. Проблема заключается не только в выборе подходящего типа аккумуляторов, но и в необходимости системного подхода к оптимизации их параметров, конфигураций и режимов эксплуатации. Это делает актуальным проведение научных исследований, направленных на создание интеллектуальных моделей управления и прогнозирования работы натрий-ионных систем в составе солнечных энергетических установок, с учетом факторов производительности, стоимости, надежности и экологической устойчивости.

Несмотря на растущий интерес к натрий-ионным аккумуляторам, их эксплуатационные характеристики в составе солнечных электростанций до сих пор изучены недостаточно. Остаются открытыми вопросы работы в условиях переменной генерации, включая допустимую глубину разряда, устойчивость к температурным колебаниям и эффективность в различных режимах нагрузки. Недостаточно разработаны модели адаптивного управления, способные учитывать особенности натрий-ионной химии и динамику солнечной инсоляции.

Кроме того, отсутствуют универсальные критерии конфигурации аккумуляторных блоков с учетом параметров генерации и потребления, что затрудняет масштабирование систем. Не решены проблемы совместимости с существующими BMS и инверторами, а также нормативные и логистические ограничения. Предлагаемое исследование направлено на восполнение этих пробелов за счет систематизации эксплуатационных параметров, разработки структурированных подходов к выбору конфигурации и внедрения прогнозных моделей управления с учетом технических и климатических условий.

Анализ научных исследований по теме оптимизации систем накопления энергии для солнечных электростанций на основе натрий-ионных аккумуляторов позволяет выделить четыре ключевых направления, формирующих современную научную парадигму в данной области.

Первое направление связано с сравнительным анализом натрий-ионных и литий-ионных технологий с точки зрения их применимости в системах с возобновляемыми источниками энергии. H. Bai и Z. Song провели комплексное исследование трёх типов аккумуляторов – литий-ионных, натрий-ионных и редокс-флоу – в контексте их эффективности в возобновляемой энергетике [1]. J. Hounjet оценила применимость натрий-ионных батарей в системах накопления энергии, обращая внимание на технические параметры, безопасность и стоимость [2]. A. J. Casey и M. D'Arpino рассмотрели сравнительную производительность литий- и натрий-ионных аккумуляторов в прикладных энергетических системах, включая фотоэлектрические установки [3]. Эти исследования подчеркивают перспективность натриевых технологий для солнечной энергетики, однако указывают на необходимость повышения их

энергетической плотности и устойчивости к циклированию. Целесообразно дополнить это направление исследованиями полного жизненного цикла и углеродного следа натрий-ионных аккумуляторов по сравнению с альтернативными накопителями.

Второе направление касается инженерных и материаловедческих стратегий оптимизации натрий-ионных аккумуляторов с учетом нестабильной генерации солнечных электростанций. J. Chen и соавт. представили комплексный обзор ключевых факторов, влияющих на функциональность батарей, включая выбор катодов, анодов, электролитов и конструкцию ячеек [4]. H. S. Hirsh и коллеги исследовали потенциал натрий-ионных аккумуляторов для длительного хранения энергии в масштабах электросетей [5]. W. Yang и соавт. сосредоточились на усовершенствовании полианионных катодных материалов с высокой стабильностью и емкостью [6]. H. Xu с коллегами систематизировали подходы к оптимизации катодов с точки зрения плотности энергии, циклической стабильности и масштабируемости [7]. Y. Yang и соавт. предложили стратегии повышения начального кулоновского выхода анодов из твердого углерода – ключевого компонента для коммерциализации технологии [8].

В рамках данного направления необходимо углубить экспериментальные исследования поведения материалов при колебательном режиме генерации и интенсивной циклизации.

Третье направление охватывает оптимизацию конфигурации аккумуляторных систем и их экономической эффективности при интеграции с солнечными установками. M. T. Castro и соавт. разработали комбинированную модель, учитывающую физические и стоимостные параметры для оптимизации характеристик натрий-ионных батарейных блоков [9]. D. Dewar и A. Glushenkov исследовали возможность преднасыщения натрием (pre-sodiation) как способ повышения энергоемкости и снижения потерь при первом цикле заряда [10]. R. Wahyu с соавторами провели инженерный анализ применимости натрий-ионных аккумуляторов в качестве альтернативы литиевым, особенно в условиях повышенной температуры и влажности [11]. A. Alzahrani и коллеги предложили стратегию многокритериальной оптимизации в интеллектуальных энергосетях, учитывающую взаимодействие между генерацией, нагрузкой и параметрами накопителей [12]. Перспективным направлением станет интеграция подобных моделей с прогнозными алгоритмами управления солнечной генерацией в реальном времени.

Четвертое направление фокусируется на вопросах безопасности, надежности и нормативной совместимости натрий-ионных систем при их масштабном внедрении. A. Iwan и соавт. изучили инженерные аспекты

безопасности таких аккумуляторов в военных системах хранения, акцентируя внимание на устойчивости к ударам, термостабильности и отказоустойчивости [13]. X. Chang и соавт. предложили использование негорючих органических жидких электролитов как основу для построения безопасных крупномасштабных систем [14]. С. Delmas обобщил 50-летнюю историю исследований в области натриевых батарей, указав на ключевые вызовы, связанные с стандартизацией и интеграцией технологий в энергетическую инфраструктуру [15]. Целесообразно сосредоточить усилия на разработке международных технических стандартов и регламентов безопасности для применения натрий-ионных систем на объектах критической энергетики.

Выделенные направления демонстрируют, что натрий-ионные аккумуляторы обладают высоким потенциалом для эффективного применения в солнечной энергетике. Однако их широкомасштабное внедрение требует междисциплинарного подхода к технической, экономической и регуляторной оптимизации.

Цель статьи – разработать научно обоснованные подходы к оптимизации систем накопления энергии на основе натрий-ионных аккумуляторов для повышения эффективности и устойчивости работы солнечных электростанций в условиях переменной генерации.

Задачи статьи:

1 Охарактеризовать технические и эксплуатационные особенности натрий-ионных аккумуляторов и обосновать критерии их конфигурации с учётом параметров генерации, хранения и потребления электроэнергии в солнечных энергетических установках.

2 Проанализировать существующие модели управления и прогнозирования работы систем накопления энергии при интеграции с фотоэлектрическими установками, а также выявить ключевые ограничения, препятствующие эффективному внедрению натрий-ионных аккумуляторов.

3 Сформулировать научно обоснованные рекомендации по оптимизации архитектуры накопительных систем и режимов их работы на основе натрий-ионных аккумуляторов с целью повышения надёжности и энергоэффективности солнечных электростанций.

Материалы и методы

В ходе исследования использован теоретический анализ научных и технических источников, посвящённых накопителям энергии, фотоэлектрическим системам и натрий-ионным аккумуляторам. Анализу подвергнуты технические и эксплуатационные характеристики аккумуляторных блоков, включая их химический состав, энергетическую плотность, температурные режимы и число циклов заряд–разряд.

Рассмотрены возможности применения натрий-ионных систем в различных климатических и эксплуатационных условиях.

Для оценки эффективности интеграции аккумуляторов в солнечные электростанции использованы сравнительно-аналитические методы. Проведено сопоставление существующих моделей управления и прогнозирования (в том числе на базе временных рядов и машинного обучения), а также рассмотрены примеры их внедрения в реальных проектах в разных странах. Обобщён практический опыт использования аккумуляторов в автономных и гибридных энергетических системах. Отдельное внимание уделено анализу архитектурных решений, позволяющих обеспечить модульность, масштабируемость и надёжность работы накопителей в условиях переменной генерации.

Результаты и обсуждение

Натрий-ионные аккумуляторы представляют собой перспективное направление развития накопителей энергии благодаря своей ресурсоемкости, относительной дешевизне и экологической безопасности. В отличие от литий-ионных аналогов, они используют более доступные и равномерно распределённые в земной коре материалы, такие как натрий и алюминий, что снижает себестоимость и уменьшает геополитическую зависимость. Эти аккумуляторы характеризуются высокой термической стабильностью, способностью работать в широком температурном диапазоне и безопасностью при механических повреждениях, что особенно важно для удалённых и климатически нестабильных регионов. Однако существуют и определённые ограничения, включая более низкую удельную энергию по сравнению с литиевыми системами, что требует грамотного подхода к проектированию и компоновке накопительных блоков. При этом именно в солнечной энергетике, где стоимость играет ключевую роль, натрий-ионные технологии могут обеспечить выгодное соотношение цена–эффективность, особенно при масштабировании (табл.1).

Таблица 1 – Сравнительная характеристика натрий-ионных аккумуляторов в контексте применения в солнечных энергетических системах

Характеристика	Содержание	Практическое значение для солнечной энергетики
Химический состав	NaFePO_4 , $\text{Na}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$, $\text{NaTi}_2(\text{PO}_4)_3$, твердый электролит, карбоновые аноды	Упрощает производство, снижает себестоимость
Энергетическая плотность	90–150 Вт·ч/кг	Меньше, чем у литиевых систем, требует увеличения объема накопителей

Рабочий температурный диапазон	от –20 до +60 °C	Повышает устойчивость в уличных и экстремальных условиях эксплуатации
Количество циклов заряд–разряд	2000–4000	Соизмеримо с литиевыми системами, подходит для длительного использования
Экологичность и уровень безопасности	Высокая, не склонны к возгоранию, нетоксичны	Повышает надёжность и снижает затраты на защитные системы
Зависимость от критических металлов	Отсутствует потребность в литии, кобальте, никеле	Повышает устойчивость поставок и снижает цену
Совместимость с солнечными инверторами	В о з м о ж н а п р и соответствующей настройке контроллеров и BMS	Не требует полной замены инфраструктуры
Стоимость по сравнению с литиевыми системами	Ниже на 20–30 % при массовом производстве	Повышает инвестиционную привлекательность в сфере ВИЭ

Источник: составлено автором по материалам [1; 2; 4; 5; 6; 13; 14]

На практике применение натрий-ионных аккумуляторов в солнечной энергетике становится особенно актуальным в условиях децентрализованных систем энергоснабжения, таких как автономные станции, сельские микросети и резервные комплексы в удалённых районах. Их способность выдерживать перепады температур и сниженная чувствительность к перегрузкам делают их устойчивыми к нестабильной генерации, типичной для солнечных установок. Кроме того, невысокая себестоимость и доступность сырья позволяют рассматривать натрий-ионные накопители как экономически целесообразную альтернативу в проектах, где литиевые решения оказываются слишком дорогими или нестабильными с точки зрения поставок. Современные прототипы и первые коммерческие реализации таких систем показывают, что при правильной конфигурации и управлении натрий-ионные батареи обеспечивают приемлемую плотность хранения, высокую циклическую стабильность и минимальные затраты на обслуживание, что делает их жизнеспособным элементом будущих энергетических архитектур на основе возобновляемых источников энергии.

Интеграция систем накопления энергии с фотоэлектрическими установками требует использования эффективных моделей управления и прогнозирования, которые позволяют компенсировать нестабильность солнечной генерации и обеспечить баланс между выработкой, хранением и потреблением электроэнергии. В отличие от традиционных энергосистем, где управление строится на стабильных и прогнозируемых источниках, фотоэлектрические станции зависят от метеоусловий, что делает необходимым внедрение интеллектуальных стратегий на основе анализа больших данных,

моделей машинного обучения и прогностических алгоритмов. Управление накопителями энергии в таких системах должно учитывать не только текущее состояние батарей и потребления, но и краткосрочные и среднесрочные прогнозы солнечной инсоляции, а также состояние сети. Используемые модели могут быть централизованными или децентрализованными, работать в реальном времени и опираться на принципы оптимизации с множеством переменных, включая стоимость энергии, срок службы аккумуляторов и потребительский профиль нагрузки (табл.2).

Таблица 2 – Основные модели управления и прогнозирования работы накопителей энергии при интеграции с солнечными установками

Модель или подход	Краткая характеристика	Роль в управлении накопителями
Модель прогнозирования на основе временных рядов (ARIMA, SARIMA)	Использует исторические данные генерации и нагрузки для построения предсказаний	Позволяет определять пиковые часы и заранее планировать заряд/разряд
Машинное обучение (градиентный бустинг, нейросети, SVM)	Обрабатывает многопараметрические данные: метеоусловия, поведение потребителей	Обеспечивает адаптивное управление и более точное прогнозирование генерации и спроса
MPC (Model Predictive Control)	Прогнозирует будущее состояние системы и оптимизирует действия на заданном горизонте	Используется для динамической корректировки зарядных циклов с учетом ограничений BMS
Алгоритмы максимизации собственного потребления (Self-Consumption Maximization)	Приоритизируют использование собственной генерации вместо сетевой энергии	Снижают нагрузку на сеть и повышают рентабельность автономной работы
Гибридные модели с учетом стоимости электроэнергии (Time-of-Use + AI)	Сочетают прогноз спроса и ценовые сигналы для оптимального планирования	Позволяют экономически выгодно заряжать/разряжать аккумуляторы в зависимости от тарифа

Источник: составлено автором по материалам [9; 10; 12]

В практических условиях внедрение моделей управления и прогнозирования в системах с фотоэлектрическими установками и накопителями энергии демонстрирует высокую эффективность при условии адаптации к конкретным эксплуатационным параметрам. Так, модели на основе ARIMA применяются для краткосрочного планирования в домашних энергетических системах, позволяя предсказать профили генерации в течение суток и тем самым минимизировать избыточный заряд или разряд аккумулятора [10]. Примеры их использования зафиксированы в проектах распределённых энергосетей в Германии и Японии. В свою очередь,

нейросетевые модели, включая LSTM и глубокие сверточные архитектуры, успешно используются в китайских промышленных микросетях для динамического прогнозирования пиков потребления и управления батареями фермами [11]. Модель предиктивного управления (MPC) внедрена в пилотных проектах в Нидерландах и США для координации действия батарей, солнечных панелей и интеллектуальных инверторов в режиме реального времени, с учетом технических ограничений и экономических предпочтений [4]. Алгоритмы максимизации собственного потребления получили широкое распространение в странах ЕС, особенно в аграрных домохозяйствах, где важно использовать всю выработанную энергию без отдачи в сеть. Гибридные модели, учитывающие динамику рыночных цен (Time-of-Use) и прогностические данные, доказали свою рентабельность в Израиле и Канаде, где используется адаптивное зарядное планирование в зависимости от колебаний тарифа [4]. Таким образом, применение таких моделей позволяет существенно увеличить автономность систем, снизить операционные издержки и продлить срок службы аккумуляторов.

Рациональный выбор и конфигурация натрий-ионных аккумуляторных блоков для фотоэлектрических установок требует учета комплекса технических, экономических и эксплуатационных параметров. В отличие от универсальных решений, накопители, интегрированные в солнечные энергосистемы, должны быть адаптированы к характеру генерации, суточной и сезонной неравномерности, а также к профилю потребления. Важным является достижение баланса между объемом хранимой энергии, допустимой глубиной разряда, числом циклов и эффективностью зарядно-разрядных процессов. При этом натрий-ионные технологии, обладая ограниченной удельной энергоемкостью, требуют более точного расчета конфигурации аккумуляторных блоков для обеспечения требуемой мощности и длительности автономной работы без существенного увеличения габаритов системы. Кроме того, при проектировании необходимо учитывать такие факторы, как плотность потерь при преобразовании энергии, совместимость с инвертором, температурный режим и целевая нагрузка (табл. 3).

Таблица 3 – Критерии выбора и конфигурации натрий-ионных аккумуляторных блоков в солнечных энергетических установках

Критерий	Содержание	Практическое значение для конфигурации системы
Суточный объем генерации	Средний и пиковый выход солнечной энергии, Вт·ч в сутки	Определяет необходимую емкость аккумуляторного блока

Профиль потребления	Характер нагрузки: постоянная/переменная, вечерние пики, ночное потребление	Влияет на режим разряда и время хранения энергии
Глубина разряда (DoD)	Допустимая глубина использования емкости без ускоренного износа, обычно до 80 %	Обеспечивает долговечность при циклическом использовании
Номинальное напряжение и ток	Зависит от конфигурации панели и инвертора	Требует согласования с BMS и силовой частью системы
Температурные условия эксплуатации	Минимальные и максимальные температуры на месте установки	Определяет необходимость дополнительного охлаждения/изоляции
КПД при зарядке и разряде	Обычно 85–90 % у натрий-ионных систем	Влияет на общий энергетический баланс и экономическую эффективность
Количество циклов и срок службы	2000–4000 циклов, до 10 лет	Определяет расчёт окупаемости и частоту замены
Модульность и масштабируемость	Возможность конфигурации по типу 48 В/96 В с последовательным и параллельным соединением	Облегчает подбор под требуемую мощность и резервирование

Источник: составлено автором по материалам [4; 5; 6; 7; 8; 11]

На практике конфигурация натрий-ионных аккумуляторных блоков осуществляется с учетом анализа метеоданных, мощности фотоэлектрической установки и нагрузки, которую необходимо покрыть в автономном или гибридном режиме. Например, в проектах автономных станций для сельских районов Индии и Южной Африки используются блоки емкостью от 10 до 40 кВт·ч, рассчитанные на покрытие вечернего и ночного потребления при генерации в пиковые дневные часы [4]. Системы конфигурируются так, чтобы использовать до 70–80 % емкости (DoD), обеспечивая тем самым до восьми часов автономной работы без превышения критического износа [8]. В более холодных регионах (например, север Европы) применяются термоизолированные корпуса с адаптацией под минусовые температуры, а в коммерческих установках - масштабируемые блоки, позволяющие объединять от 5 до 20 модулей по 5 кВт·ч [5]. Таким образом, учет критериев выбора и конфигурации позволяет обеспечить оптимальное соотношение между производительностью, долговечностью и стоимостью систем хранения на основе натрий-ионных аккумуляторов.

Несмотря на значительный научный и промышленный интерес к натрий-ионным аккумуляторам как перспективной альтернативе

литий-ионным системам, их широкомасштабное внедрение в контексте солнечных электростанций сдерживается рядом системных проблем. На технологическом уровне основным барьером остается ограниченная удельная энергоемкость, которая существенно уступает литий-ионным аналогам и требует увеличения физического объема батарей для достижения эквивалентной емкости [1]; [5]. Это ограничивает возможности применения натрий-ионных накопителей в условиях ограниченного пространства, например в городских установках или мобильных энергетических модулях. Кроме того, разработка стабильных и долговечных катодных и анодных материалов, совместимых с натриевой химией, по-прежнему остается предметом интенсивных исследований, поскольку многие соединения демонстрируют деградацию при многократных циклах [4].

Экономические барьеры обусловлены отсутствием масштабного производства и серийных поставок, что делает натрий-ионные системы дороже в расчете на киловатт-час при низких объемах заказа [11]. Стоимость может быть снижена только при достижении эффекта масштаба, однако для этого необходимо стабильное рыночное доверие и инфраструктурная поддержка [1]. Кроме того, отсутствует устоявшийся рынок вторичного сырья и сервисного обслуживания, что делает жизненный цикл таких систем менее предсказуемым с точки зрения утилизации и технического сопровождения [13].

Инфраструктурные ограничения также включают недостаточную совместимость с существующими стандартами BMS, инверторов и энергетических контроллеров, что требует адаптации программного обеспечения и технической базы под специфические параметры натрий-ионной технологии [2]; [4]. В некоторых странах препятствием также является нормативная неопределенность, поскольку сертификация таких решений в ряде юрисдикций до сих пор не стандартизирована [15].

Анализ существующих научных исследований подтверждает наличие указанных проблем и позволяет очертить их влияние на реализацию натрий-ионных решений в солнечной энергетике. В первую очередь, ограниченная удельная энергоемкость требует увеличения габаритов батарей, что делает их менее пригодными для компактных фотоэлектрических установок и транспортируемых систем [1];[5];[11]. Ряд авторов подчеркивает, что при текущем уровне технологии эффективность таких решений уступает литиевым, особенно в проектах, где критично использование пространства [3].

Наряду с этим, устойчивость катодных и анодных материалов к повторным циклам заряда и разряда остаётся ограниченной. Исследования демонстрируют, что даже многообещающие структуры на основе твёрдого углерода и фосфатных соединений нуждаются в доработке для повышения начального кулоновского выхода и предотвращения быстрой деградации [4];[6];[7;8].

Экономическая эффективность натрий-ионных батарей также подвергается сомнению на начальном этапе коммерциализации. Отсутствие серийного производства, развитой логистики и инфраструктуры утилизации повышает стоимость одного кВт·ч накопленной энергии [9], [12]. Даже несмотря на дешевизну натрия как сырья, в условиях ограниченного выпуска себестоимость остаётся высокой [1];[10];[15].

Проблемы инфраструктурной совместимости с оборудованием, ориентированным на литий-ионные стандарты, зафиксированы в исследованиях, посвящённых взаимодействию натрий-ионных аккумуляторов с BMS, инверторами и силовыми преобразователями [2];[13]. В частности, адаптация программного обеспечения и согласование рабочих параметров требуют дополнительных усилий. Отдельно акцентируется нормативная неустойчивость в ряде стран, где сертификационные процедуры для подобных решений до сих пор отсутствуют [14].

Тем не менее, перспективные исследования предлагают решения, включающие гибкую модульную архитектуру накопительных систем, прогнозно-адаптивные алгоритмы управления зарядом, использование BMS с динамической регулировкой DoD и интеграцию с метеоаналитикой. Это позволяет снизить пиковые нагрузки, увеличить срок службы аккумуляторов и повысить уровень автономного энергопотребления [4];[7];[10].

Для повышения надежности и энергоэффективности солнечных электростанций на базе натрий-ионных аккумуляторов целесообразно использовать гибкую архитектуру накопительных систем с возможностью модульного масштабирования, что позволяет адаптировать объем хранения к сезонным и суточным колебаниям генерации. Оптимизация должна основываться на предварительном энергетическом аудите станции с учетом профиля потребления и инсоляционных характеристик региона. Рекомендуется внедрение интеллектуальных систем управления (BMS), поддерживающих адаптивные режимы заряд-разряд с динамическим ограничением глубины разряда (DoD), что обеспечивает продление срока службы батарей и предотвращает перегрузку при пиковых нагрузках. Эффективным является применение прогностических алгоритмов, основанных на машинном обучении, для управления зарядом в зависимости от метеопрогнозов и тарифных сигналов, что повышает уровень собственного потребления и снижает зависимость от внешней сети. При проектировании систем хранения необходимо предусматривать резервные модули, обеспечивающие отказоустойчивость и упрощающее сервисное обслуживание. Также рекомендуется использовать энергоэффективные преобразователи с высоким коэффициентом полезного действия и

согласованные интерфейсы, что минимизирует потери при передаче энергии между фотоэлектрическими модулями, аккумуляторами и нагрузкой.

Выводы

Проведённое исследование позволило обосновать целесообразность использования натрий-ионных аккумуляторов в системах накопления энергии для солнечных электростанций, учитывая их технологические преимущества, доступность сырьевой базы и адаптивность к условиям переменной генерации. Установлено, что несмотря на сравнительно низкую удельную энергию, данные системы обладают высокой термической стабильностью, экологической безопасностью и экономической привлекательностью при масштабном производстве. Научный анализ подтвердил, что эффективная интеграция таких накопителей в фотоэлектрические установки требует применения интеллектуальных моделей управления и прогнозирования, которые способны учитывать не только метеоусловия, но и динамику потребления и тарифные сигналы.

Выявлены ключевые проблемы, препятствующие широкомасштабному внедрению натрий-ионных решений, включая ограниченность доступных промышленных конфигураций, отсутствие единых стандартов и необходимость адаптации инфраструктуры управления. Наиболее значимыми остаются барьеры, связанные с технологической зрелостью материалов и отсутствием развитого рынка сервисного обслуживания.

На основании комплексного анализа предложены научно обоснованные рекомендации по архитектурной и функциональной оптимизации таких накопительных систем, включая модульное масштабирование, использование прогностических алгоритмов, температурную адаптацию и повышение КПД преобразователей. Перспективы дальнейших исследований связаны с разработкой гибридных систем на основе натрий-ионных и других аккумуляторных технологий, адаптацией к сетям переменной частоты и внедрением цифровых двойников для мониторинга и предиктивной диагностики накопителей в составе солнечных электростанций.

REFERENCES

1 **Bai, H., Song, Z.** Lithium-ion battery, sodium-ion battery, or redox-flow battery : A comprehensive comparison in renewable energy systems // Journal of Power Sources. 2023. Vol. 580. – P. 233–426. – <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.233426>

2 **Hounjet, L. J.** Comparing lithium- and sodium-ion batteries for their applicability within energy storage systems // *Energy Storage*. – 2022. – Vol. 4. – № 3. – P. e309. – <https://doi.org/10.1002/est2.309>

3 **Casey, A. J., D'Arpino, M.** Performance of Sodium-Ion and Lithium-Ion Batteries for Energy Storage System Applications // *Proc. of the 2025 IEEE Electrical Energy Storage Applications and Technologies Conference (EESAT)*. Charlotte, NC, USA. IEEE. – 2025. – P. 1–5. – <https://doi.org/10.1109/EESAT62935.2025.10891240>

4 **Chen, J., Adit, G., Li, L., Zhang, Y., Chua, D. H., Lee, P. S.** Optimization strategies toward functional sodium-ion batteries // *Energy & Environmental Materials*. 2023. – Vol. 6. – № 4. – P. e12633. – <https://doi.org/10.1002/ceem2.12633>

5 **Hirsh, H. S., Li, Y., Tan, D. H., Zhang, M., Zhao, E., Meng, Y. S.** Sodium-ion batteries paving the way for grid energy storage // *Advanced Energy Materials*. 2020. – Vol. 10. – № 32. – P. 2001274. – <https://doi.org/10.1002/aenm.202001274>

6 **Yang, W., Liu, Q., Zhao, Y., Mu, D., Tan, G., Gao, H., Li, L., Chen, R., Wu, F.** Progress on Fe-based polyanionic oxide cathodes materials toward grid-scale energy storage for sodium-ion batteries // *Small Methods*. – 2022. – Vol. 6. – № 9. – P. 2200555. – <https://doi.org/10.1002/smt.202200555>

7 **Xu, H., Yan, Q., Yao, W., Lee, C.-S., Tang, Y.** Mainstream optimization strategies for cathode materials of sodium-ion batteries // *Small Structures*. – 2022. – Vol. 3. – № 4. – P. 2100217. – <https://doi.org/10.1002/ssr.202100217>

8 **Yang, Y., Wu, C., He, X.-X., Zhao, J., Yang, Z., Li, L., Wu, X., Li, L., Chou, S. L.** Boosting the development of hard carbon for sodium-ion batteries: strategies to optimize the initial coulombic efficiency // *Advanced Functional Materials*. – 2024. – Vol. 34. – № 5. – P. 2302277. – <https://doi.org/10.1002/adfm.202302277>

9 **Castro, M. T., Domalanta, M. R. B., Paraggua, J. A. D., Ocon, J. D.** Energy, power, and cost optimization of a sodium-ion battery pack via a combined physics-based and cost modeling approach // *Journal of Energy Storage*. – 2024. – Vol. 94. – P. 112414. – <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.112414>

10 **Dewar, D., Glushenkov, A. M.** Optimisation of sodium-based energy storage cells using pre-sodiation: a perspective on the emerging field // *Energy & Environmental Science*. – 2021. – Vol. 14. – № 3. – P. 1380–1401. – <https://doi.org/10.1039/D0EE02782K>

11 **Wahyu, R., Syahputra, H., Kammuang-lue, N., Sakulchangsattajai, P., Chaichana, C., Shankar, V. U., Suttakul, P., Yuttana, M.** Engineering aspects of sodium-ion battery: an alternative energy device for Lithium-ion batteries // *Journal of Energy Storage*. – 2024. – Vol. 100. – P. 113497. – <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.113497>

12 Alzahrani, A., Ur Rahman, M., Hafeez, G., Rukh, G., Ali, S., Murawwat, S. A. A strategy for multi-objective energy optimization in smart grid considering renewable energy and batteries energy storage system // IEEE Access. 2023. Vol. 11. – P. 33872–33886. – <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3263264>

13 Iwan, A., Bogdanowicz, K. A., Pich, R., Gonciarz, A., Miedziak, J., Plebankiewicz, I., Przybyl, W. The safety engineering of sodium-ion batteries used as an energy storage system for the military // Energies. – 2025. Vol. 18. – № 4. P. 978. – <https://doi.org/10.3390/en18040978>

14 Chang, X., Yang, Z., Liu, Y., Chen, J., Wu, M., Li, L., Chou, S., Qia, Y. The guarantee of large-scale energy storage: non-flammable organic liquid electrolytes for high-safety sodium ion batteries // Energy Storage Materials. – 2024. Article 103407. – <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2024.103407>

15 Delmas, C. Sodium and sodium-ion batteries: 50 years of research // Advanced Energy Materials. – 2018. Vol. 8. – № 17. – P. 1703137. – <https://doi.org/10.1002/aenm.201703137>

Поступило в редакцию 16.05.25.

Поступило с исправлениями 21.10.25.

Принято в печать 05.12.25.

*Д. Д. Айкимбаева¹, Г. Г. Таткеева²

¹ШЖК «Жоғары көлік және коммуникация колледжі» МКК,
Қазақстан Республикасы, Астана қ.;

²С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті,
Қазақстан Республикасы, Астана қ.

16.05.25 ж. баспаға түсті.

21.10.25 ж. түзетулерімен түсті.

05.12.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

КҮН ЭЛЕКТР СТАНЦИЯЛАРЫ ҮШІН НАТРИЙ-ИОНДЫ АККУМУЛЯТОРЛАР НЕГІЗІНДЕ ЭНЕРГИЯ ЖИНАҚТАУ ЖҮЙЕЛЕРІН ОҢТАЙЛАНДЫРУ

Зерттеудің өзектілігі күн электр станцияларының ауыспалы генерация жағдайында тұрақтылығы мен тиімділігін арттыру қажеттілігімен анықталады. Декарбонизацияға және жаңартылатын энергия көздерінің үлесін кеңейтуге бағытталған қазіргі заманғы энергетикалық жүйелерде тәуліктік және маусымдық өндіріс ауытқуларын теңестіруге қабілетті энергия жинақтаушыларды біріктірудің маңыздылығы артып келеді. Осы

тұрғыдан алғанда, натрий-ионды аккумуляторлар сирек кездесетін ресурстарға тәуелділікті азайту контекстінде дәстүрлі литий-ионды жүйелерге балама ретінде экономикалық және технологиялық тұрғыдан перспективалы шешім болып табылады.

Мақалада натрий-ионды аккумуляторларды қолдана отырып, энергия жинақтау жүйелерінің архитектурасы мен жұмыс режимдерін оңтайландырудың ғылыми негізделген тәсілдерін қалыптастыру, олардың сенімділігі мен фотоэлектрлік генерация параметрлеріне бейімделу деңгейін арттыру мақсаты қойылды.

Зерттеу әдіснамасы аясында ғылыми әдебиеттерге, аккумуляторлық блоктардың техникалық және пайдалану сипаттамаларына, заряд-разряд циклдерін басқару және болжау модельдеріне, сондай-ақ гибридік қондырғылардағы энергия алмасу параметрлеріне теориялық талдау жүргізілді. Салыстырмалы-аналитикалық әдістер, жүйелік тәсілдер және озық инженерлік шешімдерді жинақтау қолданылды.

Ғылыми жаңалығы – күн электр станциялары үшін натрий-ионды жинақтау жүйелерін таңдаудың және конфигурациялаудың критерийлерін жүйелеу, сондай-ақ оларды өндіріс пен тұтынудың өзгермелі жағдайларына бейімдеу бойынша ұсыныстар әзірлеу.

Зерттеу нәтижесінде аталған жүйелерді енгізуге кедергі келтіретін негізгі технологиялық, экономикалық және инфрақұрылымдық мәселелер анықталды; ең тиімді шешім – интеллектуалды басқару және болжау жүйелерімен жабдықталған модульдік конфигурациялар екені дәлелденді. Машиналық оқытуға негізделген бейімделгіш басқару модельдерін қолдану энергия тәуелсіздігін және күн станцияларының рентабельдігін арттыратыны дәлелденді.

Болашақ зерттеу перспективаларына жинақтау жүйелерінің гибридік архитектурасын дамыту, жұмыс режимдерін оңтайландыру үшін цифрлық егіздерді енгізу, сондай-ақ өнеркәсіптік және децентрализовандық энергетикалық жүйелер деңгейінде стандарттау жатады.

Кілтті сөздер: энергетикалық тұрақтылық, болжау жүйесі, модульдік жинақтағыштар, бейімделгіш басқару, фотоэлектрлік өндіріс.

*D. D. Aikimbayeva¹, G. G. Tatkeyeva²

¹REM «Higher College of Transport and Communications»,
Republic of Kazakhstan, Astana.;

²S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University
Republic of Kazakhstan, Astana.

Received 16.05.25.

Received in revised form 21.10.25.

Accepted for publication 05.12.25.

OPTIMIZATION OF ENERGY STORAGE SYSTEMS FOR SOLAR POWER PLANTS BASED ON SODIUM-ION BATTERIES

The relevance of this study is determined by the growing need to improve the stability and efficiency of solar power plants under variable generation conditions. In modern energy systems focused on decarbonization and expanding the use of renewable energy sources, the role of energy storage becomes critical for smoothing daily and seasonal fluctuations in electricity output. In this context, sodium-ion batteries are considered a technologically and economically viable alternative to traditional lithium-ion systems, especially in terms of reducing dependence on scarce raw materials.

The aim of the article is to develop scientifically grounded approaches to optimizing the architecture and operational modes of energy storage systems based on sodium-ion batteries, with a focus on increasing their reliability and adaptability to the parameters of photovoltaic generation.

The methodological framework of the study includes a theoretical analysis of scientific literature, technical and operational characteristics of battery systems, forecasting and control models for charge-discharge cycles, and parameters of energy exchange in hybrid installations. Comparative-analytical methods, a systems approach, and synthesis of advanced engineering practices were applied.

The scientific novelty lies in the systematization of criteria for selecting and configuring sodium-ion batteries for solar energy applications, as well as in the development of practical recommendations for their adaptation to fluctuating generation and consumption conditions.

As a result of the study, key technological, economic, and infrastructural challenges of deploying sodium-ion energy storage systems were identified. It was found that modular configurations with intelligent forecasting and management systems are the most effective. It was also demonstrated that

the use of machine learning-based adaptive control models enhances energy autonomy and economic viability of solar installations.

Future research directions include the development of hybrid storage architectures, implementation of digital twins for optimizing operating regimes, and standardization of solutions for both industrial and decentralized energy systems.

Keywords: energy resilience, predictive control, modular storage units, adaptive operation, photovoltaic output.

Теруге 17.12.2025 ж. жіберілді. Басуға 30.12.2025 ж. қол қойылды.

Электронды баспа

29.9 Mb RAM

Шартты баспа табағы 22,2. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: А. К. Мыржикова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Тапсырыс № 4494

Сдано в набор 17.12.2025 г. Подписано в печать 30.12.2025 г.

Электронное издание

29.9 Mb RAM

Усл. печ. л. 22,2. Тираж 300 экз. Цена договорная.

Компьютерная верстка: А. К. Мыржикова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Заказ № 4494

«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