

**ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ОСОБЕННОСТИ
МЕТАЛЛО – ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ В ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
УСТАНОВКАХ**

Рузибоева Угилжон Муминбой кизи

Магистр Ташкентского государственного транспортного университета

**ИНФОРМАЦИЯ О
СТАТЬЕ**

АННОТАЦИЯ:

ИСТОРИЯ СТАТЬИ:

Received: 19.02.2026

Revised: 20.02.2026

Accepted: 21.02.2026

**КЛЮЧЕВЫЕ
СЛОВА:**

система накопления энергии, металл-ионные аккумуляторы, фотоэлектрические установки, энергоэффективность, деградация, глубина разряда.

В статье представлена комплексная оценка энергоэффективности и эксплуатационных характеристик металл-ионных аккумуляторов, применяемых в составе фотоэлектрических установок. Рассмотрены литий-ионные, натрий-ионные и цинк-ионные системы накопления энергии с точки зрения их удельной энергоёмкости, циклической стабильности, температурной устойчивости и экономической целесообразности. Проведён сравнительный анализ влияния глубины разряда, режима циклирования и климатических факторов на деградационные процессы в аккумуляторных ячейках.

Установлено, что эксплуатационная эффективность металл-ионных систем определяется не только их номинальными характеристиками, но и условиями интеграции в фотоэлектрические системы, включая работу MPPT-контроллеров и инверторов. Показано, что при стационарном применении в солнечных электростанциях натрий-ионные аккумуляторы демонстрируют перспективность с точки зрения термической стабильности и стоимости, тогда как литий-железо-фосфатные системы сохраняют лидерство по циклическому ресурсу.

Введение

Развитие возобновляемых источников энергии в последние десятилетия обусловлено глобальными климатическими изменениями, ростом энергопотребления

и необходимостью декарбонизации энергетического сектора. Среди всех видов ВИЭ наибольшее распространение получили фотоэлектрические установки, обеспечивающие преобразование солнечного излучения в электрическую энергию [1].

Однако ключевой проблемой фотоэлектрических систем остаётся прерывистость генерации, связанная с суточной и сезонной изменчивостью солнечной радиации. Для обеспечения стабильности энергоснабжения требуется интеграция эффективных систем накопления энергии.

Металло-ионные аккумуляторы в настоящее время являются наиболее перспективным направлением в области стационарного хранения энергии. Их применение в фотоэлектрических установках позволяет повысить коэффициент использования установленной мощности, снизить нагрузку на сеть и обеспечить автономность потребителей [2].

Несмотря на активное внедрение данных систем, вопросы энергоэффективности, деградации и термической устойчивости аккумуляторов при работе в составе солнечных установок остаются актуальными. Эксплуатационные режимы фотоэлектрических систем существенно отличаются от условий использования аккумуляторов в электротранспорте или портативной электронике. Для них характерны частичные циклы заряда-разряда, длительное пребывание в состоянии неполной зарядки и значительные температурные колебания.

В этой связи целью настоящего исследования является комплексная оценка энергоэффективности и эксплуатационных особенностей металло-ионных аккумуляторов различных типов при их использовании в фотоэлектрических установках малой и средней мощности [3].

Материалы и методы.

Объектом исследования являются металло-ионные аккумуляторы, применяемые в системах накопления энергии фотоэлектрических установок мощностью до 10 кВт. В работе рассмотрены литий-железо-фосфатные (LiFePO₄), литий-никель-марганец-кобальтовые (NMC), натрий-ионные (Na-ion) и цинк-ионные (Zn-ion) аккумуляторные технологии. Выбор данных систем обусловлен их актуальностью для стационарных решений и различиями в электрохимических механизмах переноса заряда [4].

Оценка энергоэффективности осуществлялась на основе определения энергетической и кулоновской эффективности, глубины разряда и параметров деградации. Энергетическая эффективность цикла рассчитывалась по выражению:

$$\eta_e = \frac{E_{\text{разр}}}{E_{\text{зар}}} \cdot 100\%$$

где $E_{\text{зар}}$ - энергия, подведённая к аккумулятору при зарядке; $E_{\text{разр}}$ - энергия, отданная нагрузке при разряде; η_e - энергетическая эффективность цикла, %

Кулоновская эффективность определялась по формуле:

$$\eta_c = \frac{Q_{\text{разр}}}{Q_{\text{зар}}} \cdot 100\%$$

где: $Q_{\text{зар}}$ - электрический заряд, полученный аккумулятором при зарядке, А·ч; $Q_{\text{разр}}$ - заряд, отданный при разрядке, А·ч; η_c - Кулоновская эффективность, %.

Глубина разряда рассчитывалась как:

$$DoD = \frac{Q_{\text{исп}}}{Q_{\text{ном}}} \cdot 100\%$$

где: $Q_{\text{исп}}$ - использованная ёмкость за цикл, А·ч; $Q_{\text{ном}}$ - номинальная ёмкость аккумулятора, А·ч;

Снижение остаточной ёмкости в процессе циклирования описывалось зависимостью [5]:

$$C_t = C_o \cdot (1 - k \cdot N)$$

где: C_t - ёмкость после циклов; C_o - начальная ёмкость; k - коэффициент деградации; N - число циклов.

Моделирование работы аккумуляторов проводилось в среде MATLAB/Simulink для фотоэлектрической установки мощностью 5 кВт с учётом суточной генерации, сезонных колебаний инсоляции, режима нагрузки и ограничений по глубине разряда. Испытания проводились в температурном диапазоне от $-10\text{ }^\circ\text{C}$ до $+45\text{ }^\circ\text{C}$.

Профиль нагрузки принимался типовым для частного домохозяйства с вечерним максимумом потребления (18:00–23:00) и среднесуточным энергопотреблением 18–22 кВт·ч. Расчёт выполнялся для климатических условий резко континентального региона с сезонными колебаниями инсоляции.

Экономическая эффективность оценивалась через показатель приведённой стоимости хранения энергии [6]:

$$LCOE_{\text{storage}} = \frac{C_{\text{сист}}}{E_{\text{год}} \cdot T}$$

где: $C_{\text{сист}}$ – совокупная стоимость системы накопления; $E_{\text{год}}$ – годовой объём отпущенной энергии; T – срок эксплуатации, лет.

Результаты и обсуждение

Проведённое моделирование энергобаланса фотоэлектрической установки мощностью 5 кВт показало, что применение металло-ионных аккумуляторов существенно повышает коэффициент использования солнечной генерации. При отсутствии накопителей потери избыточной дневной генерации составляли до 28%, тогда как при интеграции аккумуляторной системы данный показатель снижался до 8–12%. При этом среднее увеличение коэффициента использования установленной мощности фотоэлектрической системы составило 15–20% в зависимости от типа применяемого аккумулятора.

Литий-железо-фосфатные аккумуляторы продемонстрировали наивысшую стабильность параметров при глубине разряда до 80%. Потеря ёмкости после 1000 циклов составила менее 12%, что подтверждает их высокую циклическую устойчивость. Энергетическая эффективность цикла сохранялась на уровне 92–95% при глубине разряда до 80%, что обеспечивает стабильную работу системы в условиях частичного циклирования.

NMC-аккумуляторы показали более высокую удельную энергоёмкость (до 180–200 Вт·ч/кг), однако при температуре выше +40 °C наблюдалось ускоренное увеличение внутреннего сопротивления, что снижало энергетическую эффективность до 85%.

Натрий-ионные аккумуляторы продемонстрировали стабильную работу в расширенном температурном диапазоне и меньшую чувствительность к глубоким разрядам. Их энергетическая эффективность находилась в пределах 85–92 %, а снижение ёмкости после 1000 циклов не превышало 15 %. Расчёт приведённой стоимости хранения энергии показал, что при сроке эксплуатации 10 лет показатель LCOE_storage для натрий-ионных систем на 18–25 % ниже по сравнению с NMC-аккумуляторами [5, 7].

Цинк-ионные аккумуляторы обладают высокой безопасностью и экологичностью, однако их удельная энергоёмкость остаётся ниже (80–120 Вт·ч/кг), что ограничивает применение в установках средней мощности [8].

Сводные сравнительные характеристики исследованных металло-ионных аккумуляторов представлены в таблице 1.

Таблица 1. Сравнительный анализ характеристик

Параметр	LiFePO ₄	NMC	Na-ion	Zn-ion
Энергетическая эффективность	90–95 %	85–92 %	85–92 %	80–88 %
Удельная энергоёмкость	120–160 Вт·ч/кг	180–200 Вт·ч/кг	100–150 Вт·ч/кг	80–120 Вт·ч/кг
Ресурс циклов	3000–5000	1500–2500	2000–3500	1000–2000
Температурная устойчивость	высокая	средняя	высокая	высокая
Относительная стоимость	базовая	+20–30 %	–15–25 %	–20–30 %

Заключение

В результате проведённого исследования установлено, что энергоэффективность металло-ионных аккумуляторов в фотоэлектрических установках определяется совокупностью эксплуатационных факторов, включая глубину разряда, температурный режим и частоту циклирования.

Литий-железо-фосфатные аккумуляторы демонстрируют наилучшее сочетание циклической устойчивости и энергетической эффективности, что делает их оптимальным выбором для систем малой и средней мощности. Натрий-ионные системы обладают высоким потенциалом для стационарных решений благодаря устойчивости к температурным колебаниям и более низкой стоимости активных материалов.

Таким образом, выбор типа металло-ионного аккумулятора должен осуществляться с учётом климатических условий региона, требуемого ресурса циклирования и экономических ограничений проекта. Дальнейшие исследования целесообразно направить на оптимизацию режимов работы и совершенствование систем управления зарядом с целью повышения срока службы и снижения стоимости хранения энергии.

Практическая значимость результатов заключается в возможности обоснованного выбора типа аккумуляторной технологии для фотоэлектрических установок малой и средней мощности с учётом климатических условий и экономических ограничений. Полученные данные могут быть использованы при проектировании автономных и гибридных солнечных электростанций.

Список литературы

1. Dunn B., Kamath H., Tarascon J.-M. Electrical energy storage for the grid: a battery of choices // *Science*. 2011. Vol. 334. No. 6058. P. 928–935.
2. Goodenough J.B., Park K.-S. The Li-ion rechargeable battery: a perspective// *Journal of the American Chemical Society*. 2013. Vol. 135. No. 4. P. 1167–1176.
3. Manthiram A. An outlook on lithium ion battery technology// *Nature Communications*. 2020. Vol. 11. 1550.
4. Nitta N., Wu F., Lee J.T., Yushin G. Li-ion battery materials: present and future// *Materials Today*. 2015. Vol. 18. No. 5. P. 252–264.
5. Жураева К.К., Рузибоева У.М. Построение умного дома на основе альтернативных источников энергии. «O‘ZBEKISTONDA ENERGETIKA TIZIMINING DOLZARB MUAMMOLARI, YECHIMLARI VA RIVOJLANTIRISH ISTIQBOLLARI» mavzusida Respublika ilmiy-texnik anjuman materiallar to‘plami. Andijan 2025yil 22-dekabr. С. 450-452.
6. Hwang J.-Y., Myung S.-T., Sun Y.-K. Sodium-ion batteries: present and future// *Chemical Society Reviews*. 2017. Vol. 46. P. 3529–3614.
7. Zhang N., Cheng F., Liu Y. et al. Rechargeable aqueous zinc-ion batteries: mechanism and applications// *Advanced Materials*. 2017. Vol. 29.
8. Schmalstieg J., Käbitz S., Ecker M., Sauer D.U. A holistic aging model for Li-ion batteries// *Journal of Power Sources*. 2014. Vol. 257. P. 325–334.
9. Schmidt O., Melchior S., Hawkes A., Staffell I. Projecting the future levelized cost of electricity storage// *Joule*. 2019. Vol. 3. No. 1. P. 81–100.