

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-2-8>

УДК 621.311:621.311.25

Р. В. Оксенич¹, аспірант

ORCID: 0000-0002-6510-5108

С. В. Галько², канд. техн. наук

ORCID: 0000-0001-7991-0311

А. І. Середа¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-7670-6822

С. А. Попадченко¹, ст. викладач

ORCID: 0000-0003-2537-9769

Д. М. Зеленков², аспірант

ORCID: 0009-0002-9685-9196

¹Державний біотехнологічний університет, м. Харків²Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

e-mail: galkosv@gmail.com

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЛІТІЙ-ЗАЛІЗО-ФОСФАТНИХ ТА НАТРІЙ-ІОННИХ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ

Анотація. Накопичення енергії являє собою процес зберігання, вивільнення та управління енергетичними ресурсами за допомогою спеціалізованих систем акумулювання. У сучасних умовах розвитку енергетики ця технологія набуває дедалі більшого значення, зокрема у зв'язку з активним упровадженням відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Оскільки виробництво енергії з таких джерел, як сонячна та вітрова, є нестабільним і не піддається прямому регулюванню, виникає необхідність у її зберіганні в періоди надлишкового виробництва або зниженого попиту. У цьому контексті перспективними рішеннями є літій-залізо-фосфатні (LiFePO) та натрій-іонні (Na-Ion) акумуляторні системи, які відкривають нові можливості для локального зберігання енергії. Завдяки високій енергоефективності ці технології мають потенціал для широкої інтеграції в енергетичну інфраструктуру – від побутового використання до промислових масштабів. У роботі проведено порівняльний аналіз електрохімічних систем накопичення енергії на основі LiFePO₄- та Na-Ion-акумуляторів. Особливу увагу приділено їхнім технічним характеристикам, енергоефективності, довговічності та матеріалам, що використовуються у виробництві. Розглянуто економічну доцільність упровадження зазначених технологій як у побутовому, так і у комерційному секторах.

Ключові слова: натрій-іонні акумулятори, літій-залізо-фосфатні акумулятори, зберігання енергії, моніторинг заряду.

Постановка проблеми. Забезпечення надійного, сталого та доступного енергопостачання є одним із ключових завдань для сучасного суспільства, що зумовлено як стрімким зростанням чисельності населення, так і поступовим вичерпанням ресурсів викопного палива. У контексті технологій зберігання енергії сьогодні найбільш широко використовуваними та технологічно розвиненими є літій-іонні акумулятори, які характеризуються високою енергетичною щільністю, тривалим терміном експлуатації та відносно низькою масою. Завдяки зазначеним характеристикам літієві накопичувачі знайшли широке застосування у портативній електроніці, комп'ютерній техніці, електричному транспорті, мобільних пристроях, а також у стаціонарних системах накопичення енергії [1; 2]. Утім, стрімке зростання попиту на літій-іонні акумулятори супроводжується проблемою обмежених природних запасів літію у земній корі [3]. У зв'язку із цим актуальним є пошук альтернативних рішень, серед яких особливу увагу привертають натрій-іонні акумулятори. Натрій є значно поширенішим елементом у природі порівняно з літієм, що робить його перспективним ресурсом для масштабного виробництва накопичувачів енергії [4]. Незважаючи на те що натрій-іонні батареї демонструють нижчі показники енергетичної ефективності, вони залишаються об'єктом активних наукових досліджень. Існують підстави вважати, що в найближчому майбутньому за рахунок удосконалення

матеріалів та інженерних рішень їхні показники щільності енергії та довговічності можуть перевищити характеристики літій-залізо-фосфатних систем накопичення [3; 5].

Аналіз останніх досліджень. Пошуки більш безпечних, доступних та екологічно сталих рішень для зберігання енергії технології літій-залізо-фосфатних (LiFePO_4) та натрій-іонних (Na-Ion) акумуляторів привертають дедалі більшу увагу наукової спільноти та промисловості. Попри значний прогрес у розвитку літєвих систем глобальні запаси літію залишаються обмеженими та нерівномірно розподіленими, що підвищує вартість і створює ризики для стабільності постачання. Натомість натрій є значно більш поширеним елементом у земній корі, має рівномірніший географічний розподіл і нижчу вартість, що робить його привабливою альтернативою для масштабного використання [4].

Натрій-іонні акумулятори демонструють низку унікальних характеристик, що сприяють їх перспективності, зокрема для стаціонарних систем накопичення енергії. На відміну від багатьох літєвих аналогів Na-Ion-батареї не потребують використання критично важливих або геополітично чутливих матеріалів, таких як кобальт чи нікель. Це суттєво зменшує ризики, пов'язані з ланцюгами постачання, та підвищує загальну стійкість технології.

Сучасні досягнення у галузі матеріалів для електродів, особливо впровадження шаруватих оксидів, значно покращили як енергетичну щільність, так і здатність зберігати заряд у натрій-іонних системах [6; 7; 38]. Однією з ключових переваг Na-Ion-акумуляторів є їхня підвищена ефективність за низьких температур, що робить їх особливо придатними для використання у кліматично суворих регіонах, де літєві системи демонструють знижену продуктивність. Окрім того, заміна мідного струмознімального шару на алюмінієвий зменшує вартість виробництва та спрощує переробку, що підвищує екологічну привабливість Na-Ion-технології [8].

Утім, широкомасштабна комерціалізація натрій-іонних акумуляторів усе ще залишається викликом. Хоча лабораторні прототипи демонструють обнадійливі результати, реалізація повноцінного виробництва потребує оптимізації електролітних композицій та вдосконалення виробничих процесів для забезпечення довготривалої стабільності циклів заряджання-розряджання. Відносно нижча енергетична щільність порівняно з літій-іонними аналогами обмежує застосування Na-Ion-батареї у високопродуктивних мобільних пристроях та електротранспорті, натомість роблячи їх особливо придатними для стаціонарного зберігання енергії та інтеграції в електромережі.

Попри зазначені обмеження зростання інвестицій і науковий інтерес до натрій-іонних систем свідчать про їхню потенційну ключову роль у процесі глобального енергетичного переходу [9]. Обидві технології – LiFePO_4 та Na-Ion – функціонують за схожим принципом перенесення іонів, однак різняться за хімічним складом, технічними характеристиками та сферами застосування.

У цьому дослідженні буде проведено порівняльний аналіз основних параметрів указаних типів акумуляторів із метою визначення їхніх переваг, недоліків та доцільності використання залежно від специфіки застосування. З урахуванням стрімкого технологічного прогресу обидва напрями продовжують демонструвати значний потенціал у сфері зберігання енергії..

Формулювання мети статті. Виконати порівняльний аналіз літій-залізо-фосфатних (LiFePO_4) та натрій-іонних (Na-Ion) накопичувачів енергії з метою надання рекомендацій для конкретних сфер використання.

Основна частина. У дослідженні здійснено порівняльний аналіз кількох типів акумуляторних систем зберігання енергії, зокрема літій-залізо-фосфатних (LiFePO_4) та натрій-іонних (Na-Ion) акумуляторів. Для реалізації поставлених цілей було використано широкий спектр джерел, включаючи рецензовані наукові публікації, технічну документацію провідних виробників, результати лабораторних експериментів, а також узагальнені статистичні дані, що ілю-

струють практичний досвід упровадження зазначених технологій у таких сферах, як відновлювана енергетика, електричний транспорт і стаціонарні системи зберігання енергії [10–12].

Аналіз отриманих даних дав змогу ідентифікувати ключові технічні переваги й обмеження кожного з розглянутих типів акумуляторів, а також визначити оптимальні умови їх застосування з урахуванням специфіки експлуатаційних навантажень та галузевих вимог [9].

У рамках дослідження було детально розглянуто конструкцію літій-залізо-фосфатних (LiFePO₄) та натрій-іонних (Na-Ion) систем накопичення енергії [13].

Літій-залізо-фосфатні акумулятори зазвичай мають таку будову (рис. 1): катод виготовлений на основі літій-залізо-фосфату (LiFePO₄); анод, як правило, складається з графіту або іншого вуглецевого матеріалу; електроліт може бути рідким, гелеподібним або твердим, зазвичай на основі солей літію в органічному розчиннику; сепаратор – це мікропористий полімерний матеріал, такий як поліетилен (PE) або поліпропілен (PP), який виконує функцію ізоляції між електродами, запобігаючи короткому замиканню; корпус виготовляється з металевих або полімерних матеріалів, що забезпечують герметичність і механічну стабільність елемента.

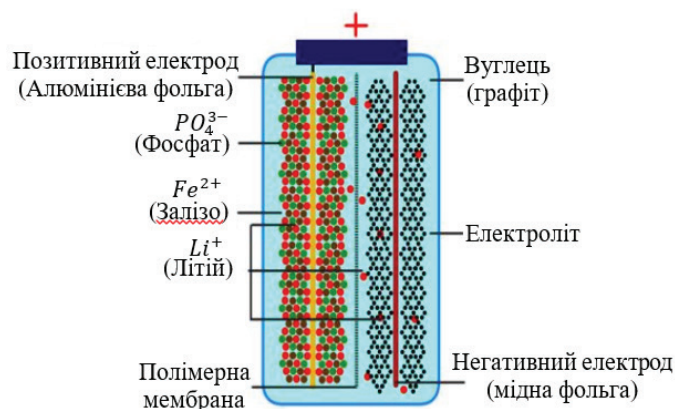


Рис. 1. Будова акумулятора LiFePO₄ [14]

Літій-залізо-фосфатні акумулятори (LiFePO₄) характеризуються використанням літій-залізо-фосфату як катодного матеріалу та графітового вуглецевого електрода з металевою підкладкою як аноду. На відміну від традиційних катодних матеріалів сполука LiFePO₄ належить до класу поліаніонних матеріалів, до складу яких входять декілька аніонів із високою електронегативністю, зокрема фосфатні групи. Основний принцип функціонування цих акумуляторів відповідає загальній схемі роботи літій-іонних джерел струму: у процесах заряджання та розряджання іони літію здійснюють зворотну міграцію між електродами. Однією з визначальних переваг LiFePO₄ є його висока екологічна безпечність. На відміну від оксидів кобальту та марганцю фосфатні сполуки є нетоксичними, що значно знижує екологічні та техногенні ризики під час експлуатації й утилізації елементів живлення.

Конструкція натрій-іонного акумулятора (Na-ion), представлена на рис. 2 [2], демонструє високий ступінь структурної аналогії з літій-іонними системами, однак із заміною літію на натрій як основного іонного носія. У таких системах катод формується з натрієвмісних сполук, тоді як анод зазвичай виготовляється з вуглецевих матеріалів – твердого вуглецю, графіту або вуглецевих наноструктур. Як електроліт використовуються органічні розчинники з розчиненими натрієвими солями, зокрема NaPF₆ або NaClO₄. Аналогічно до LiFePO₄-акумуляторів у ролі сепаратора застосовується мікропориста полімерна мембрана на основі поліетилену або поліпропілену. Зовнішній корпус елемента зазвичай виготовляється з металу або термостійкого полімерного матеріалу, що забезпечує механічну стабільність та безпечність експлуатації.

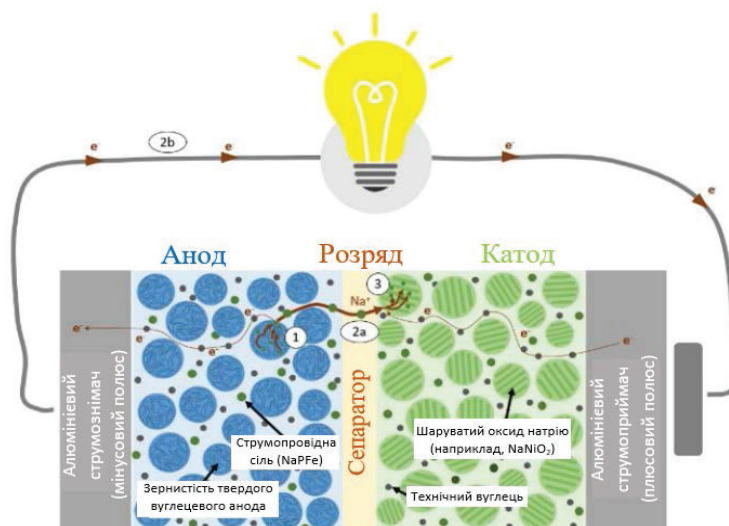


Рис. 2. Будова Na-Ion-акумулятора [6]

Базова архітектура натрій-іонного акумулятора загалом є аналогічною до структури літій-іонного акумулятора. Як ілюстровано на рис. 2, натрій-іонний елемент містить два основних електроди – анод і катод, які виконують функцію накопичення енергії за рахунок зворотної інтеркаляції натрій-іонів. Для запобігання прямому контакту між електродами, що може спричинити коротке замикання, між анодом і катодом розміщений сепаратор [18–20].

2. Порівняння матеріалів і характеристик LiFePO_4 – і Na-Ion-акумуляторів представлено в табл. 1 і 2.

Таблиця 1

Порівняння матеріалів між LiFePO_4 -та Na-Ion-акумулятором

Тип	Натрій-іонний акумулятор Na-Ion	Літій-залізо-фосфатний акумулятор LiFePO_4
Матеріал катода	Шаруваті оксиди, прусська синь, поліаніони та ін.	Потрійні матеріали, літій-залізо-фосфат, літій-марганцевий оксид тощо.
Матеріал анода	Аморфний вуглець	Графіт
Електроліт	Гексафторфосфат натрію	Гексафторфосфат літію
Катодний струмоприймач	Алюмінієва фольга	Алюмінієва фольга
Анодний струмоприймач	Алюмінієва фольга	Мідна фольга
Сепаратор	PP/PE	PP/PE

На основі аналізу наданих таблиць можна зробити висновок, що акумулятори LiFePO_4 зазвичай володіють більшою щільністю енергії, що робить їх оптимальними для застосування, де важливі компактність і висока ємність [7; 37]. Натрієво-іонні акумулятори сьогодні відстають за цим показником, проте активно вдосконалюються [21; 22]. Очікується, що протягом наступних двох років їхня щільність енергії досягне рівня 160–180 Вт·год/кг, а через п'ять років – 200 Вт·год/кг, що дасть змогу зробити ці акумулятори конкурентоспроможними. Обидва типи акумуляторів здатні витримувати глибокий розряд без суттєвого впливу на ресурс, однак LiFePO_4 має деяку перевагу завдяки вищій стабільності.

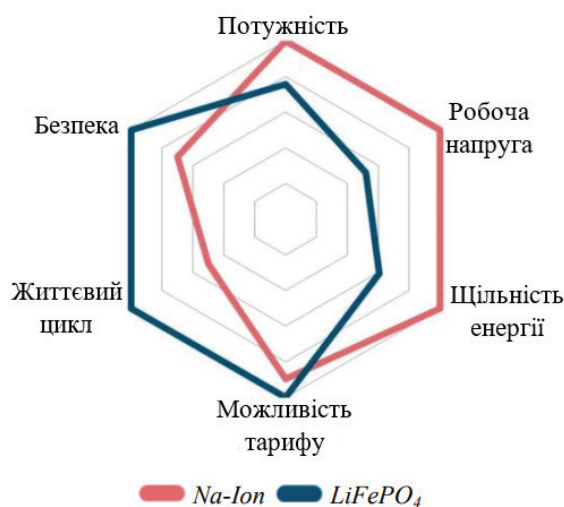
Щодо ефективності, то акумулятори LiFePO_4 характеризуються високим коефіцієнтом корисної дії з мінімальними енергетичними втратами під час перетворення. Натрієво-іонні акумулятори все ще дещо відстають, але також демонструють позитивну динаміку в цьому напрямі.

Таблиця 2

Порівняння характеристик LiFePO_4 – і Na-Ion-аккумуляторів

Специфікація аккумуляторних батарей	Натрій-іонний аккумулятор Na-Ion	Літій-залізо-фосфатний аккумулятор LiFePO_4
Номинальна напруга	3,0 В	3,2 В
Робоча напруга	2,8–3,5 В	2,5–3,65 В
Щільність енергії на вагу	120–200 Вт·год/кг	150–220 Вт·год/кг
Щільність енергії на об'єм	180–280 Вт·год/л	200–350 Вт·год/л
Типовий термін служби циклів (80%)	1000–3000 циклів	3000–6000 циклів
Календарний термін експлуатації (80%)	15–20 років	8–10 років
-20°C коефіцієнт збереження ємності	>90%	60–70%
Температурний діапазон	-40°C to 60°C	-20°C to 50°C
Стійкість до надмірного розряду	0 В	2 В
Глибина розряду (ГР)	100%	100%
Швидкість заряджання	Заряджається до понад 80% за 15 хвилин при кімнатній температурі	Заряджання більш ніж на 80% за 45 хвилин при кімнатній температурі
Вартість	Низький	Високий
Тепловий розбіг	350 °C (662 °F)	270°C (518°F)
Максимальне безпечне заряджання	50–100%	100%
Безпека	Відсутність ризику термічного розбігу, нетоксичний	Може перегрітися і загорітися, нетоксичний
Вплив на навколишнє середовище та можливість переробки	Простий процес відновлення	Може знадобитися складне розділення металів
Ефект пам'яті	NONE	NONE

Аккумулятори на основі літєвого залізо-фосфату (LiFePO_4) характеризуються значно довшим життєвим циклом із більшою кількістю циклів заряджання-розряджання до суттєвого зниження їхньої ефективності. Натомість натрієві аккумулятори на даний момент не досягли таких показників, проте технологія постійно вдосконалюється, і з кожним роком кількість циклів заряджання-розряджання зростає [3; 23]. Водночас натрієві аккумулятори демонструють перевагу за низьких температур, що робить їх оптимальним вибором для застосування у холодних кліматичних умовах. Аккумулятори LiFePO_4 можуть зазнавати зниження продуктивності в таких умовах, що є їхнім суттєвим недоліком [24] (рис. 3).


Рис. 3. Порівняння Na-Ion- та LiFePO_4 -аккумуляторів [25]

Однією з основних переваг натрієвих акумуляторів є значно нижча вартість натрію порівняно з літієм. Зокрема, дані з Шанхайського металургійного ринку демонструють значну різницю у ціні чистих сполук натрію та літію: карбонат натрію коштує близько \$290 за метричну тонну; карбонат літію (99,5% маси акумулятора) має значно вищу ціну – близько \$35 тис за метричну тонну, навіть після значного зниження цін із середини 2022 р.

Попит на натрій у виробництві акумуляторів на даний момент залишається обмеженим, особливо в контексті стрімкого зростання попиту на літій, який активно використовується у виробництві акумуляторів LiFePO_4 . Уже в 2022 р. ціни на літєві акумулятори вперше за 12 років зросли, досягнувши \$151 за кВт·год. Це відбулося через високий попит на акумуляторні батареї, викликаний електрифікацією пасажирського транспорту, виробництвом електричного промислового обладнання та створенням систем накопичення енергії.

Ці чинники свідчать про економічну привабливість натрієвих акумуляторів (Na-Ion) для енергетичних систем, особливо в умовах, коли вартість є визначальним фактором. Прогрес у технології виробництва та хімії клітин дав змогу значно знизити витрати на їх виготовлення. Водночас глобальні зусилля, спрямовані на зменшення споживання викопного палива, сприяли популяризації технології акумуляторів LiFePO_4 , яка стала основою для електрифікації мільярдів легкових та комерційних транспортних засобів.

Порівняння LiFePO_4 та Na-Ion, як показано на рис. 3, підкреслює різні переваги кожного типу катодного матеріалу. Na-Ion має вищу напругу елементів, щільність потужності та питому ємність, що надає йому суттєву перевагу в об'ємній щільності енергії. Це є важливим чинником для досягнення великих запасів ходу, що можуть зрівнятися з пробігом автомобілів, оснащених двигунами внутрішнього згоряння (наприклад, 1000 км на одному баку палива). Водночас LiFePO_4 відзначається довшим терміном служби, швидким заряджанням та підвищеною безпекою. Його нижчий ризик теплового розбігу у разі механічних пошкоджень робить LiFePO_4 особливо придатним для комерційних транспортних засобів із частими циклами заряджання (автобуси, навантажувачі та скутери), а також для стаціонарних систем зберігання енергії, що часто використовуються у поєднанні з відновлюваними джерелами енергії, як-от сонячні та вітрові електростанції.

Розглянемо практичні характеристики двох типів акумуляторів у форм-факторі 18650. Як прототипи використовуються акумулятори HAKADI Sodium Ion 18650 (3,1V, 1500 mAh) та LiFePO_4 BATTERY CELL 18650-3,2V-1600 mAh. Порівняння їхніх характеристик наведено на рис. 3. З аналізу характеристик видно, що LiFePO_4 має деяку перевагу перед Na-Ion за ємністю. Далі варто провести порівняння графіків розряду та заряджання цих пристроїв і здійснити їх тестування для більш детальної оцінки.

Із графіків на рис. 4–8 видно, що натрій-іонні акумулятори здатні розряджатися до нижчих напруг порівняно з акумуляторами на основі фосфату заліза (LiFePO_4) [15], зокрема до 1,55 В, при цьому демонструючи високий коефіцієнт посилення ємності. Водночас акумулятори LiFePO_4 можуть розряджатися лише до 1,95 В. Окрім цього, важливим є аналіз ефективності використання потужностей на різних етапах розряду.

Графіки свідчать про те, що натрій-іонні акумулятори характеризуються більш рівномірним розподілом ємності протягом розряду, тоді як акумулятори LiFePO_4 відзначаються помітним зниженням ємності на завершальних етапах розряду. Це свідчить про те, що, хоча акумулятори LiFePO_4 можуть мати вищу початкову ємність, їхня продуктивність на низьких рівнях заряду може бути нижчою, ніж у натрій-іонних акумуляторів.

Оскільки для нашого дослідження були використані акумулятори форм-фактора 18650, проведемо порівняння їх із літій-іонними акумуляторами того ж форм-фактора. Хімічний склад та конструктивні особливості цих пристроїв схожі, оскільки обидва типи використовують літій як основний компонент, що забезпечує високу енергетичну щільність. Натомість у натрій-іон-

них акумуляторах використовуються іони натрію, що сприяють більш швидкому процесу заряджання, але призводять до зниження енергетичної щільності через більший розмір іонів [1; 30].

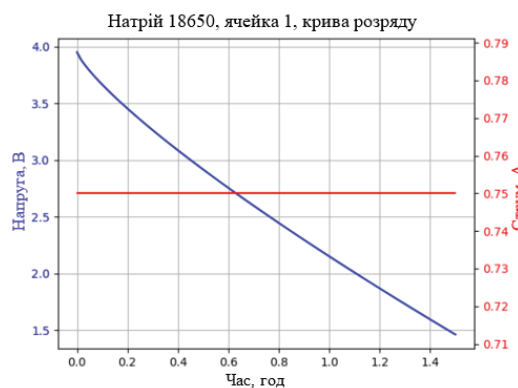


Рис. 4. Графік розряду Na-Ion- акумулятора

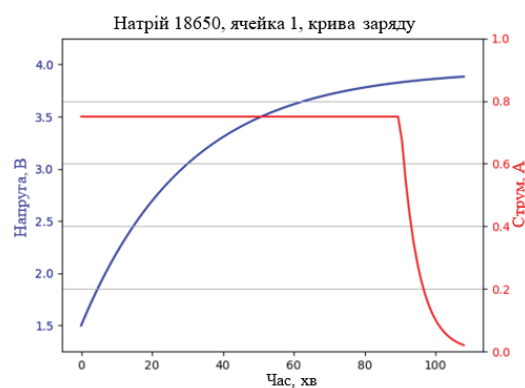


Рис. 5. Графік заряду Na-Ion- акумулятора

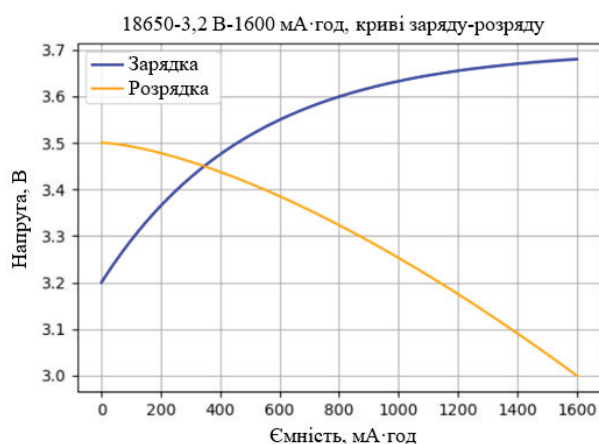


Рис. 6. Графіки заряду та розряду LiFePO_4 -акумулятора

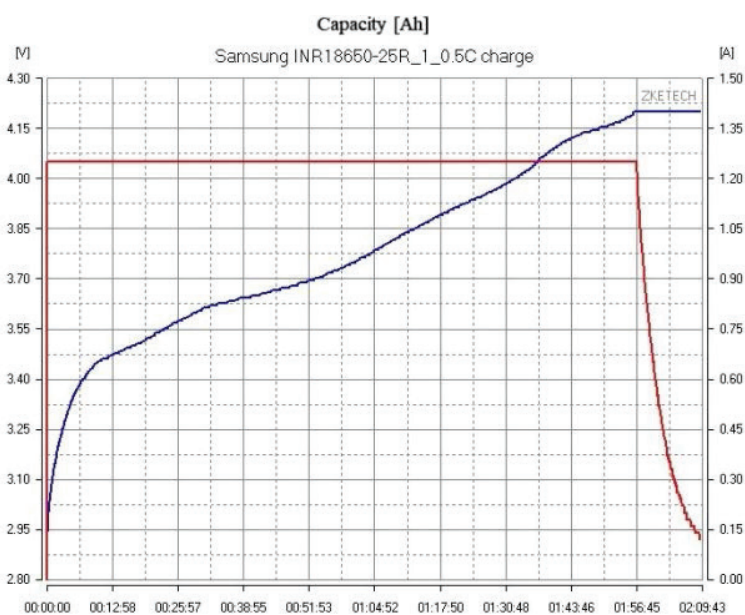


Рис. 7. Графіки зарядки акумулятора LiFePO_4

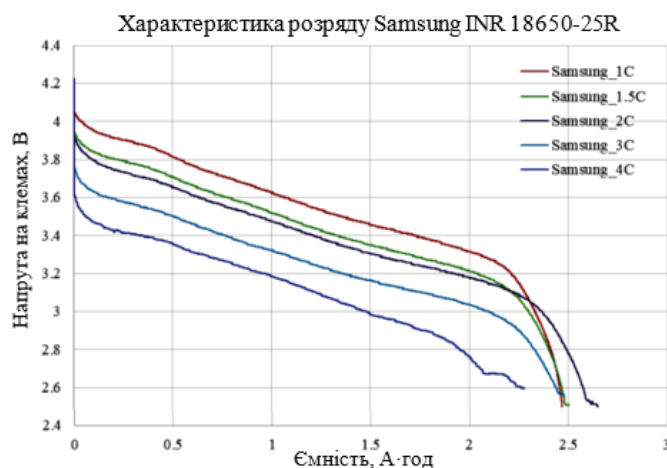


Рис. 8. Графіки розрядки акумулятора LiFePO_4

Конструктивно обидва типи акумуляторів мають анод, катод, електроліт та сепаратор. Водночас струмоприймачі натрій-іонних акумуляторів виготовляються з алюмінію, тоді як у літій-іонних акумуляторах використовують більш кошкову мідь. Із погляду екологічності натрій-іонні акумулятори є більш привабливими, оскільки натрій є доступнішим матеріалом, а також їх виробництво має менший негативний вплив на навколишнє середовище [4; 26]. Окрім того, натрій-іонні акумулятори є більш безпечними, оскільки не схильні до вибухів у разі перегріву, тоді як літій-іонні акумулятори вимагають більш ретельного контролю температури через ризик теплового розгону [31; 32].

Наступним етапом є аналіз практичних характеристик літій-іонних акумуляторів на прикладі моделі Samsung INR18650-25R 3,7 В 2500 мА·год [33–35]. На графіку, що наведений вище, можна спостерігати, що мінімальна напруга розряду для цього акумулятора становить 2,5 В. Він має рівномірний розподіл ємності подібно до натрій-іонних акумуляторів, але відрізняється від акумуляторів на основі літій-залізо-фосфату. Також на графіку зарядження до 4,2 В (рис. 7) відрізняється від заряджання натрій-іонного акумулятора до 3,95 В (рис. 5) і літій-залізо-фосфатного акумулятора до 3,65 В (рис. 6) у нашому випадку.

Ці дані підтверджують загальну тенденцію: літій-іонні акумулятори забезпечують високу енергетичну щільність, але потребують суворого контролю заряджання для запобігання деградації матеріалу. Натрій-іонні та літій-залізо-фосфатні акумулятори, своєю чергою, характеризуються дещо нижчою енергетичною щільністю, але виграють у плані довговічності та безпеки, що робить їх більш придатними для застосування в стаціонарних системах зберігання енергії.

Висновки. Натрій-іонні та LiFePO_4 -акумулятори мають свої унікальні переваги і недоліки, що визначає їх придатність для різних застосувань. Натрій-іонні акумулятори є більш економічно ефективним варіантом і забезпечують кращу продуктивність за низьких температур, тоді як LiFePO_4 -акумулятори мають вищу енергетичну щільність, більший термін служби та покращену безпеку. Вибір між цими технологіями залежить від конкретних вимог до застосування, таких як вартість, ефективність та екологічність. У майбутньому очікується подальше вдосконалення обох типів акумуляторів, що сприятиме розвитку більш універсальних і стійких рішень для зберігання енергії.

Список використаних джерел

1. Lakshmi G.S. Battery Energy Storage Technologies for Sustainable Electric Vehicles and Grid Applications. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. 1495. 012014. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1495/1/012014>

2. Jamil M., Wei Sh., Taylor M.Ph., Chen J.J.J., Kennedy J.V. Hybrid Anode Materials for Rechargeable Batteries – A Review of Sn/TiO₂ Based Nanocomposites. *Energy Rep.* 2021. 7. 2836–2848. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.05.004>
3. Hannan M.A., Al-Shetwi A.Q., Begum R.A. Ker P.J., Rahman S.A., Mansor M., Mia M.S., Muttaqi K.M., Dong Z.Y. Impact assessment of battery energy storage systems towards achieving sustainable development goals. *Energy Storage.* 2021. 42. 103040. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103040>
4. Patel T. A Comparative Study of Lithium-ion and Sodium-ion Batteries: Characteristics, Performance, and Challenges. *Friedrich Alexander Universität Erlangen Nürnberg (FAU).* 2023. 14 March. <https://open.fau.de/handle/openfau/21891>
5. Shi N., Chen Z., Niu M., He Z., Wang Y., Cui J. State of charge estimation for the lithium-ion battery based on adaptive extended Kalman filter using improved parameter identification. *Energy Storage.* 2021. 45. 103518. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103518>
6. Belik M. Optimisation of energy accumulation for renewable energy sources. *Energy Power Qual. J.* 2021. 19. 205–210. <https://doi.org/10.24084/repqj19.258>
7. Martinko D., Medved D., Kolcun M., Mazur D. Planning of the Optimal Performance of Household Photovoltaics and Battery Storage within Consideration of Investment Return. *Przegląd Elektrotechniczny.* 2024. 100(1). 105–111. <https://doi.org/10.15199/48.2024.01.22>
8. Lezhniuk P., Buslavets O. Rubanenko O. Balancing electricity generation and consumption in a system with renewable energy sources. *2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine. 2021. 63–68. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570087>
9. Makovenko E. Single-phase three-level qZ-source inverter connected to the grid with battery storage and active power decoupling function. *59th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*, Riga, Latvia, 12–13 November 2018, 1–6. <https://doi.org/10.1109/RTUCON.2018.8659843>
10. Halko S., Halko K., Suprun O., Qawaqzeh M., Miroshnyk O. Mathematical modelling of cogeneration photoelectric module parameters for hybrid solar charging power stations of electric vehicles. *2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine. 2022. 1–6. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916397>
11. Al-Issa H.A., Qawaqzeh M., Kurashkin S., Halko S., Kvitka S., Vovk O., Miroshnyk O. Monitoring of power transformers using thermal model and permission time of overload. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE).* 2022. 12(3). 2323–2334. <https://doi.org/10.11591/ijece.v12i3.pp2323-2334>
12. Qawaqzeh M., Dudnikov S., Miroshnyk O., Moroz O., Savchenko O., Trunova I., Pazyi V., Danylchenko D., Halko S. Buinyi, R. Development of algorithm for the operation of a combined power supply system with renewable sources. *2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine. 2022. 1–4. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916372>
13. Sodium Ion Batteries: Performance Advantages and Broad Application Prospects in Extreme Temperatures. <https://www.LiFePO4-battery.com/News/sodium-ion-batteries-advantages.html>
14. First Phosphate. How the LFP Battery Works <https://firstphosphate.com/phosphate-industry/about-the-lfpbattery/#:~:text=How%20the%20LFP%20Battery%20Works,than%20one%20negatively%20charged%20element>
15. Subramanyan K., Akshay M., Lee Y.S., Aravindan V. Fabrication of Na-Ion full-cells using carbon-coated Na₃V₂(PO₄)₂O₂F cathode with conversion type CuO nanoparticles from spent Li-Ion batteries. *Small Methods.* 2022. 6. 2200257. <https://doi.org/10.1002/smt.202200257>
16. Identifying the pinch points in the LFP supply chain. <https://firstphosphate.com/lfp-battery-strategy>
17. FutureBatteryLab. The big beginner's guide to Sodium-Ion batteries <https://futurebatterylib.com/the-big-beginners-guide-to-sodium-ion-batteries>.
18. Rudola A., Rennie A.J.R., Heap R., Meysami S.S., Lowbridge A., Mazzali F., Sayers R., Wright C.J., Barker J. Commercialisation of high energy density sodium-ion batteries: Faradion's journey and outlook. *Mater. Chem. A.* 2021. 9. 8279–8302. <https://doi.org/10.1039/D1TA00376C>

19. Bazaluk, O., Struchaiev, N., Halko, S., Miroshnyk, O., Bondarenko, L., Karaiev, O., Nitsenko, V. Ways to improve the efficiency of devices for freezing of small products. *Materials*, 2022, 15(7), 2412. <https://doi.org/10.3390/ma15072412>
20. Bondarenko L., Halko S., Matsulevych O., Tetervak I., Vershkov O., Miroshnyk O., Nitsenko V., Havrysh V. The Experimental Research on Unit Operation for Fruit Crops' Bones Calibration. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2023. 13(1). 21. <https://doi.org/10.3390/app13010021>
21. Kumar R., Goel V. A study on thermal management system of lithium-ion batteries for electrical vehicles: A critical review. *Energy Storage* 2023. 71. 108025. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108025>
22. Schwarz S. Lithium Iron Phosphate – enabling the future of individual electric mobility. 2022. <https://www.emotec.net/lithium-iron-electric-mobility>
23. Sodium-Ion Battery Market <https://www.marketsandmarkets.com/MarketReports/sodium-ion-battery-market-207269067.html>
24. Battery Data online. <https://calce.umd.edu/battery-data#Storage>
25. Sayahpour B., Hirsh H., Parab S., Nguyen L.H.B., Zhang M. Meng Y.S. Perspective: Design of cathode materials for sustainable sodium-ion batteries. *MRS Energy Sustain.* 2022. 9. 183–197. <https://doi.org/10.1557/s43581-022-00029-9>
26. Na-Ion battery online. <https://www.hinabattery.com/en/index.php?catid=12>
27. Tabor S., Lezhenkin A., Halko S., Miroshnik A., Kovalyshyn S., Vershkov A., Hryhorenko O. Mathematical simulation of separating work tool technological process. *E3S Web of Conferences*, 2019, 132, 01025. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913201025>
28. Lezhenkin O.M., Halko S.V., Miroshnyk O.O., Vershkov O.O., Lezhenkin I.O., Suprun O.M., Shchur T.G., Kruszelnick W., Kasner R. Investigation of the separation of combed heap of winter wheat. *Journal of Physics: International Conference on Applied Sciences*. 2021. 1781(1). 012016. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1781/1/012016>
29. Vovk O. Kvitka S., Halko S., Strebkov O. Energy-saving control of asynchronous electric motors of driving working machines. *Modern Development Paths of Agricultural Production: Trends and Innovations*. Cham: Springer International Publishing. 2019. 415–423. https://doi.org/10.1007/978-3-030-14918-5_43
30. Bashir T. A review of the energy storage aspects of chemical elements for lithium-ion based batteries. *Energy Mater.* 2021. 1. 100019.
31. Mahto T., Mukherjee V. Energy storage systems for mitigating the variability of isolated hybrid power system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. 51. 1564–1577. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.012>
32. Dwornicka R., Pietraszek J. The outline of the expert system for the design of experiment. *Production Engineering*. 2018. 20. 43–48. <https://doi.org/10.30657/pea.2018.20.09>
33. Adaikkappan M., Sathiyamoorthy N. Modeling. State of charge estimation, and charging of lithium-ion battery in electric vehicle: A review. *Energy Res.* 2021. 46(5). 2141–2165. <https://doi.org/10.1002/er.7339>
34. Rudola A.: The Future of Clean Transportation: Sodium-ion Batteries. <http://www.bridgeindia.org.uk>.
35. Samsung INR18650-25R datasheet. <https://www.powerstream.com/p/INR18650-25R-datasheet.pdf>
36. Миколук О., Желавська І., Ляховець В. Формування ключових векторів забезпечення енергетичної безпеки крізь призму інноваційного розвитку альтернативних джерел енергії. *Вісник Хмельницького національного університету. Економічні науки*. 2018. № 3(1). С. 199–204. <http://elar.khnu.km.ua/jspui/handle/123456789/6698>
37. Dali M., Belhadj J., Roboam X. Hybrid solar–wind system with battery storage operating in grid-connected and standalone mode: control and energy management – experimental investigation. *Energy*. 2010. 35. 2587–2595. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.03.005>
38. Mahto T., Mukherjee V. Energy storage systems for mitigating the variability of isolated hybrid power system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. 51. 1564–1577. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.012>
39. Luo Y., Shi L., Tu G. Optimal sizing and control strategy of isolated grid with wind power and energy storage system. *Energy Conversion and Management*. 2014. 80. 407–415. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.01.061>

Стаття надійшла до редакції 04.04.2025



R. Oksenyich¹, S. Halko², A. Sereda¹, S. Popadchenko¹, D. Zelenkov²

¹State Biotechnological University

²Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

COMPARATIVE ANALYSIS OF LITHIUM-IRON-PHOSPHATE AND SODIUM-ION ENERGY STORAGE DEVICES

Summary

Energy storage is the process of accumulating, releasing, and managing energy using storage devices. Today, this principle of energy storage is playing an important role in energy supply, as renewable sources become more and more responsible for energy production. Moreover, since it is not possible to regulate the amount of energy from renewable sources, it is necessary to store energy during periods of lower demand or higher production, from sources such as solar and wind energy. Over the past century, a wide range of energy storage technologies have been developed, from large-scale hydroelectric power plants to advanced electrochemical storage. Hydroelectric power plants remain the main method of long-term energy storage due to their high capacity and durability. At the same time, lithium-iron-phosphate and sodium-ion batteries open up new opportunities for energy storage at the local level, making them promising for integration into modern power systems. In addition, the efficient use of energy storage can minimize the risks of electricity shortages during critical periods and ensure the stability of the power system. This is achieved due to the ability of energy storage to effectively level the load, compensate for fluctuations in renewable energy generation, and provide reliable backup power. In particular, LiFePO_4 and Na-Ion technologies demonstrate high energy efficiency, which allows them to be integrated into various segments of the power system – from household devices to large-scale industrial plants. Their use also helps to reduce the carbon footprint of the energy sector, which is important for achieving sustainable development goals. In this paper, we compare two types of electrochemical storage devices – LiFePO_4 and Na-Ion. Particular attention will be paid to their durability, energy efficiency, materials from which they are made, and technical characteristics. Also, their economic feasibility and prospects for implementation in commercial and domestic applications will be assessed.

Keywords: sodium-ion batteries, lithium-iron-phosphate batteries, energy storage, charge monitoring.