

ОКСЕНИЧ РУСЛАН ВАЛЕРІЙОВИЧ ✉ – аспірант кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту, Державний біотехнологічний університет; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6510-5108>; e-mail: okrus785@proton.me.

МІРОШНИК ОЛЕКСАНДР ОЛЕКСАНДРОВИЧ – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту, Державний біотехнологічний університет; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6144-7573>; e-mail: omiroshnyk@btu.kharkiv.ua.

МОРОЗ ОЛЕКСАНДР МИКОЛАЙОВИЧ – доктор технічних наук, професор, професор кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту, Державний біотехнологічний університет; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8520-9211>; e-mail: moroz.an@btu.kharkiv.ua.

ПАЗІЙ ВОЛОДИМИР ГРИГОРОВИЧ – старший викладач кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту, Державний біотехнологічний університет; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7336-0854>; e-mail: pazziy@btu.kharkiv.ua.

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ РІЗНИХ ТИПІВ – ЛІТІЙ-ЗАЛІЗО-ФОСФАТНИХ (LiFePO₄) ТА НАТРІЙ-ІОННИХ (Na-ION)

Зберігання енергії – це процес накопичення, вивільнення та управління енергією, який відбувається за допомогою накопичувачів. На сьогодні цей принцип зберігання енергії наразі відіграє важливу роль в енергопостачанні. Оскільки відновлювані джерела стають все більш відповідальними за виробництво енергії. Більше того, оскільки неможливо регулювати кількість енергії з відновлюваних джерел, необхідно зберігати енергію в періоди меншого попиту або більшого виробництва, з таких джерел, як сонячна та вітрова енергія. Протягом останнього століття було розроблено широкий спектр технологій зберігання енергії – від масштабних гідроелектростанцій до передових електрохімічних накопичувачів. Гідроелектростанції залишаються основним способом довготривалого зберігання енергії завдяки їх високій ємності та довговічності. Водночас батареї накопичувачі на основі літій-залізо-фосфату та натрій-іонну відкривають нові можливості для зберігання енергії на локальному рівні, що робить їх перспективними для інтеграції у сучасні енергосистеми. Крім того, ефективне використання накопичувачів енергії дозволяє мінімізувати ризики нестачі електроенергії у критичні періоди та забезпечити стабільність енергосистеми. Це досягається завдяки здатності накопичувачів ефективно вирівнювати навантаження, компенсувати коливання генерації відновлюваних джерел та забезпечувати надійне резервне живлення. Зокрема, технології LiFePO₄ та Na-Ion демонструють високу енергоефективність, що дозволяє інтегрувати їх у різні сегменти енергосистеми – від побутових пристроїв до масштабних промислових установок. Їх використання також сприяє зниженню вуглецевого сліду енергетичного сектору, що є важливим для досягнення цілей сталого розвитку. У даній роботі виконано порівняння двох видів електрохімічних накопичувачів – LiFePO₄ та Na-Ion. Особливу увагу приділимо їх довговічності, енергоефективності, матеріалам, з яких вони виготовлені, а також технічним характеристикам. Також, буде оцінено їх економічну доцільність та перспективи впровадження у комерційних і побутових застосуваннях.

Ключові слова: натрій-іонні (Na-Ion) акумулятори; літій-залізо-фосфатні (LiFePO₄) акумулятори; зберігання енергії; моніторинг заряду; відновлювані джерела енергії.

Вступ. Забезпечення доступу до надійної доступної енергосистеми є проблемою для сучасного суспільства, яке стикається зі зростанням населення та виснаженням викопного палива. Що стосується накопичення енергії то на сьогоднішній час найбільш поширені та розвинуті накопичувачі на базі літію, мають високу щільність, тривалий строк служби та відносно невелику вагу. Такі накопичувачі багато використовуються в портативній електроніці, комп'ютерах, в електромобілях, мобільних пристроях та стаціонарних системах зберігання енергії. Незважаючи на швидке зростання використання такого типу напучувачів, використання літію має обмеження в запасах земної кори [1, 2]. Тож виходячи з цього, якщо потреби в літію не зможуть задовільнити попит в виробництві, то ця роль може перейти до натрій-іонних (Na-Ion) накопичувачів, оскільки натрій набагато розповсюдженіший за літій в земній корі. Навіть незважаючи на нижчу продуктивність вони привертають багато уваги, оскільки технологія знаходиться в стадії розробки, тому цілком ймовірно, що щільність та довговічність такого типу

накопичувачів перевищить літій-залізо-фосфатні (LiFePO₄) в найближчі роки [3, 4].

Мета статті зумовлена тим, що при пошуках більш безпечних та економічних рішень зберігання енергії LiFePO₄ та Na-Ion типи акумуляторів стали двома технологіями, що викликають до себе значну увагу. Але все таки поклади літію в рази менше за поклади натрію, який більш рівномірно розподілений по всьому світу та більш дешевший за літій [5].

Дані технології працюють за схожим принципом руху іонів, але різним хімічним складом й мають значні відмінності в продуктивності та застосуванні. У статті розглянуто ключові параметри цих накопичувачів, наведено порівняння їхніх переваг й недоліків, а також визначено який тип накопичувача краще підходить для конкретних прикладів використання.

З розвитком технологій обидва типи накопичувачів швидко еволюціонують, постійно пропонуючи більше можливостей для зберігання енергії в майбутньому [6].

Матеріали досліджень. В даному дослідженні виконано порівняльний аналіз різних типів акумуляторів, зокрема LiFePO₄ та Na-Ion

© Р. В. Оксеніч, О. О. Мірошник, О. М. Мороз, В. Г. Пазій, 2024



Ця робота ліцензується відповідно до **Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)**
Конфлікт інтересів: Автори заявили про відсутність конфлікту

накопичувачів енергії. Для цього використано дані, що зібрані з наукових публікацій, технічної документації провідних виробників акумуляторів, результати експериментальних досліджень, лабораторні тестування, а також узагальнені статистичні дані, що відображають досвід використання цих технологій у різних галузях, як-от відновлювальна енергетика, електричний транспорт і стаціонарні енергосистеми.

Зібрана інформація дозволяє оцінити основні переваги та обмеження кожного типу акумуляторів, а також з'ясувати, в яких умовах і для яких застосувань кожен з них є найбільш ефективним.

Будова акумуляторів. Розглянемо будову LiFePO_4 та Na-Ion накопичувачів [1, 6, 7]. LiFePO_4 накопичувачі мають наступний склад (рис. 1):

- катод із літій-залізо-фосфату (LiFePO_4);
- анод, виготовленого з графіту або іншого вуглецевого матеріалу;
- електроліт – зазвичай рідкий, гелеподібний чи твердий електроліт на основі солей літію у розчиннику;
- сепаратор, який виготовляють з мікропористого полімерного матеріалу, як поліетилен або поліпропілен;
- корпусу з металу чи полімеру.

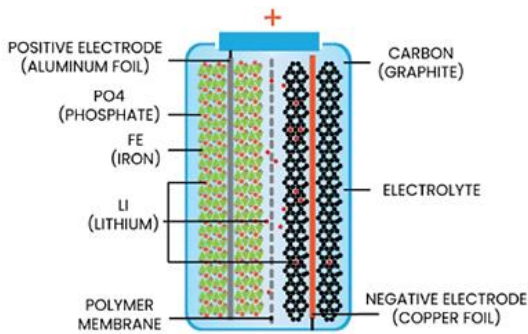


Рисунок 1 – Будова LiFePO_4 акумулятора

На відміну від інших катодних матеріалів LiFePO_4 є поліаніонною сполукою, яка складається з більш ніж одного негативно зарядженого елемента.

LiFePO_4 акумулятор працює за тим самим принципом, що й інші літій-іонні (Li-Ion) батареї: іони літію переміщуються між позитивними та негативними електродами під час заряджання та розряджання. Проте фосфат є нетоксичним матеріалом на відміну від оксиду кобальту чи оксиду марганцю, що робить його більш безпечним для використання [6].

Тепер розглянемо будову Na-Ion накопичувачів (рис. 2) [2]. Цей накопичувач має схожу з Li-Ion накопичувачем будову, але з використанням натрію замість літію та складається з [7]:

- катоду з натрієвої сполуки;
- аноду – зазвичай використовують вуглецеві матеріали як-от твердий вуглець, графіт чи інші вуглецеві структури [4];
- електроліт – використовують рідкий, що містить солі натрію як-от NaPF_6 або NaClO_4 в органічному розчиннику;

- сепаратору – як і в LiFePO_4 використовують мікропористий полімер (поліетилен або поліпропілен);
- корпусу – зазвичай виготовляють металевий або полімерний.

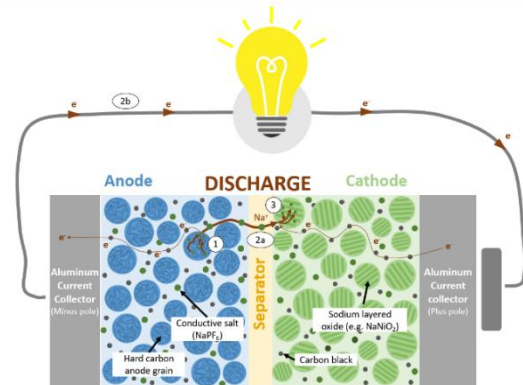


Рисунок 2 – Будова Na-Ion акумулятора

Порівняльна характеристика накопичувачів LiFePO_4 та Na-Ion. Виконаємо порівняння характеристик LiFePO_4 та Na-Ion накопичувачів (табл. 1).

З даної таблиці видно, що LiFePO_4 батареї зазвичай мають вищу енергетичну щільність, що робить їх кращими для застосувань, де важливі компактність та велика ємність [8, 9]. Na-Ion батареї поки поступаються в цьому показнику, але активно вдосконалюються [10, 11]. Очікується, що протягом двох років їх енергетична щільність досягне 160-180 Вт·год/кг, а за 5 років – 200 Вт·год/кг, що зробить їх конкурентоспроможними. Також обидва типи батарей підтримують глибокий розряд без значного впливу на термін служби, але LiFePO_4 мають незначну перевагу завдяки більшій стабільності.

По ефективності LiFePO_4 батареї відзначаються високою ефективністю, з мінімальними втратами енергії при перетворенні [12]. Натрієві батареї поки дещо поступаються, але також демонструють прогрес.

Також LiFePO_4 батареї мають довший життєвий цикл із більшою кількістю циклів до суттєвого зниження продуктивності. Натрієві батареї поки не досягають таких показників, але з кожним роком технологію допрацьовують й кількість циклів заряду-розряду збільшується [13, 14]. Але при низьких температурах Na-Ion батареї значно кращі, що робить їх ідеальними для холодного клімату. LiFePO_4 же можуть втрачати продуктивність в таких умовах, що є їхнім недоліком [15].

Однією з ключових переваг натрієвих акумуляторів є суттєво нижча вартість натрію порівняно з літєм. Наприклад, дані Шанхайського металургійного ринку свідчать про разючу 20-кратну різницю у ціні чистого натрію та літєвих сполук [8]:

- Натрій карбонат коштує приблизно \$290 за метричну тунну.
- Літій карбонат (99.5 % батареиноного класу) має значно вищу ціну — близько \$35 000 за метричну тунну (навіть після суттєвого зниження з середини 2022 року).

Таблиця 1 – Порівняння характеристик LiFePO₄ та Na-Ion накопичувачів

Характеристика накопичувачів	Тип накопичувача	
	Na-Ion	LiFePO ₄
Номинальна напруга, В	3,1	3,2
Робоча напруга, В	2,8–3,5	2,5–3,65
Питома енергетична щільність, Вт·год/кг	120–200	150–220
Об'ємна енергетична щільність, Вт·год/л	180–280	200–350
Типовий життєвий цикл (при 80 % розряду), цикли	1000–3000	3000–6000
Календарний термін служби (при 80 % розряду), роки	15–20	8–10
Збереження ємності при 20 °С	>90 %	60–70 %
Діапазон робочих температур, °С	–40...60	–20...50
Стійкість до перезаряду, В	0	2
Глибина розряду	100%	100%
Швидкість зарядки до понад 80 % при кімнатній температурі, хв	15	45
Вартість	Низька	Висока
Тепловий розгін	350 °С (662°F)	270 °С (518°F)
Максимальний безпечний заряд	50–100 %	100 %
Безпека	Відсутній ризик теплового розгону, нетоксичний	Може перегріватися і загорятися
Екологічний вплив і переробка	Простий процес утилізації	Складне розділення металів
Ефект пам'яті	Відсутній	Відсутній

На даний момент попит на натрій у виробництві батарей залишається незначним, особливо у порівнянні зі стрімко зростаючим попитом на літій, який використовується в Li-Ion акумуляторах [5]. У 2022 р. ціни на акумуляторні блоки на основі літію вперше за 12 років показали зростання, досягнувши \$151 за кВт·год. Це стало результатом високого попиту на акумулятори, спричиненого електрифікацією пасажирського транспорту, виробництвом електричного промислового обладнання та створенням систем накопичення енергії [3].

Ці фактори свідчать про економічну привабливість натрієвих акумуляторів для

енергетичних систем, особливо у випадках, коли вартість є ключовим критерієм.

Дослідні показники LiFePO₄ та Na-Ion накопичувачів. Розглянемо ємність двох типів накопичувачів у формфакторі 18650. Як прототипи використаємо накопичувач HAKADI Sodium Ion 18650 3.1 V 1500 mAh (рис. 3) та LiFePO₄ BATTERY CELL 18650 3.2 V 1600 mAh (рис. 4), зовнішній вигляд яких представлений на рис. 3 і 4. З характеристик видно, що LiFePO₄ має перевагу над Na-Ion по ємності.



Рисунок 3 – Накопичувач HAKADI Sodium Ion

Рисунок 4 – Накопичувач LiFePO₄

З наведених на рис. 5–7 графіків видно, що накопичувачі на основі натрію здатні розряджатися до меншої напруги ніж фосфатні, а в нашому випадку до 1,55 В з високою віддачею ємності. Натомість LiFePO₄ накопичувач віддає заряд до 1,95 В. Також важливим аспектом є ефективність використання ємності на різних етапах розряду. На графіках видно, що Na-Ion акумулятори, як правило, мають більш рівномірний розподіл ємності при розряді, а LiFePO₄ акумулятори демонструють більш виражений спад на кінцевих етапах. Це означає, що хоча LiFePO₄ акумулятори можуть мати вищу початкову ємність, їх ефективність на низьких рівнях напруги може бути меншою порівняно з Na-Ion накопичувачами.

Порівняння з Li-Ion. Дивлячись на те, що для досліду ми використовували накопичувачі формфактору 18650, то виконаємо порівняння в цьому типорозмірі з Li-Ion накопичувачами. Їх конструктивні особливості схожі з Na-Ion накопичувачами. Обидва типи батарей мають схожу конструкцію: анод, катод, електроліт і сепаратор. Проте струмозбірники у Na-Ion виконуються з алюмінію, тоді як у Li-Ion – з дорожчої міді. За хімічним складом Li-Ion від Na-Ion накопичувачів відрізняються використанням літію як ключового компоненту, що забезпечує високу щільність. На противагу Li-Ion накопичувачам у батареї Na-Ion використовуються іони натрію, що полегшує швидку зарядку, але знижує щільність енергії через більший розмір іонів. [11, 12].

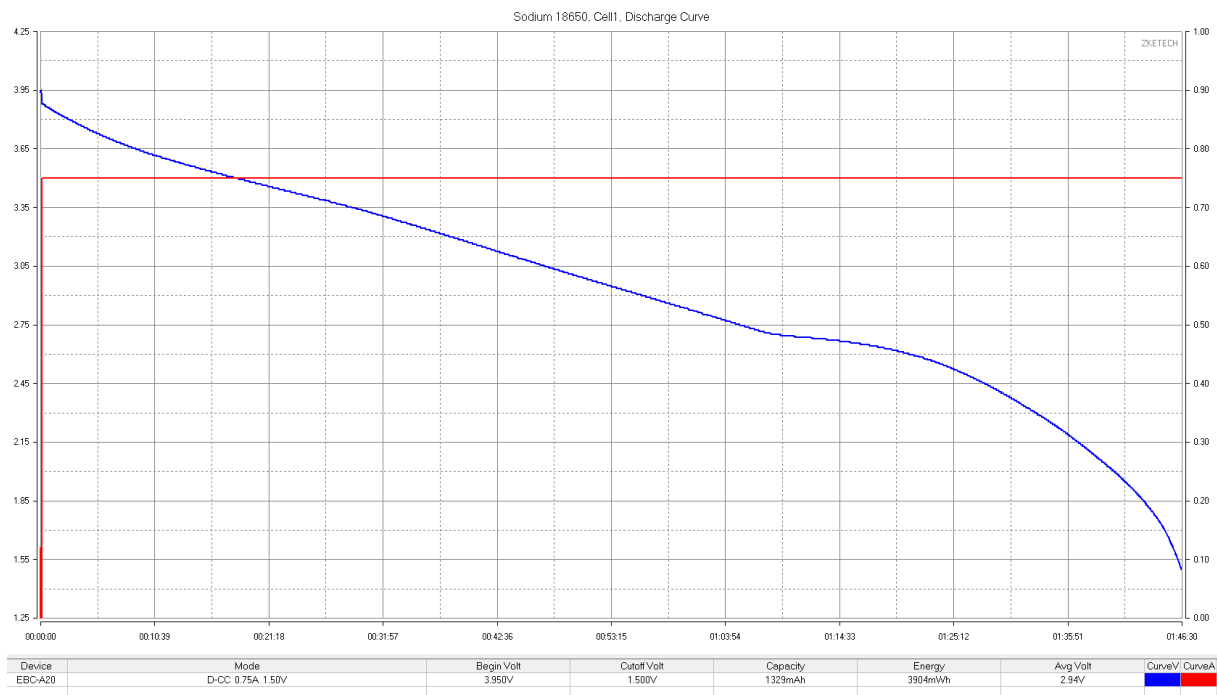


Рисунок 5 – Графік розряду Na-Ion акумулятора

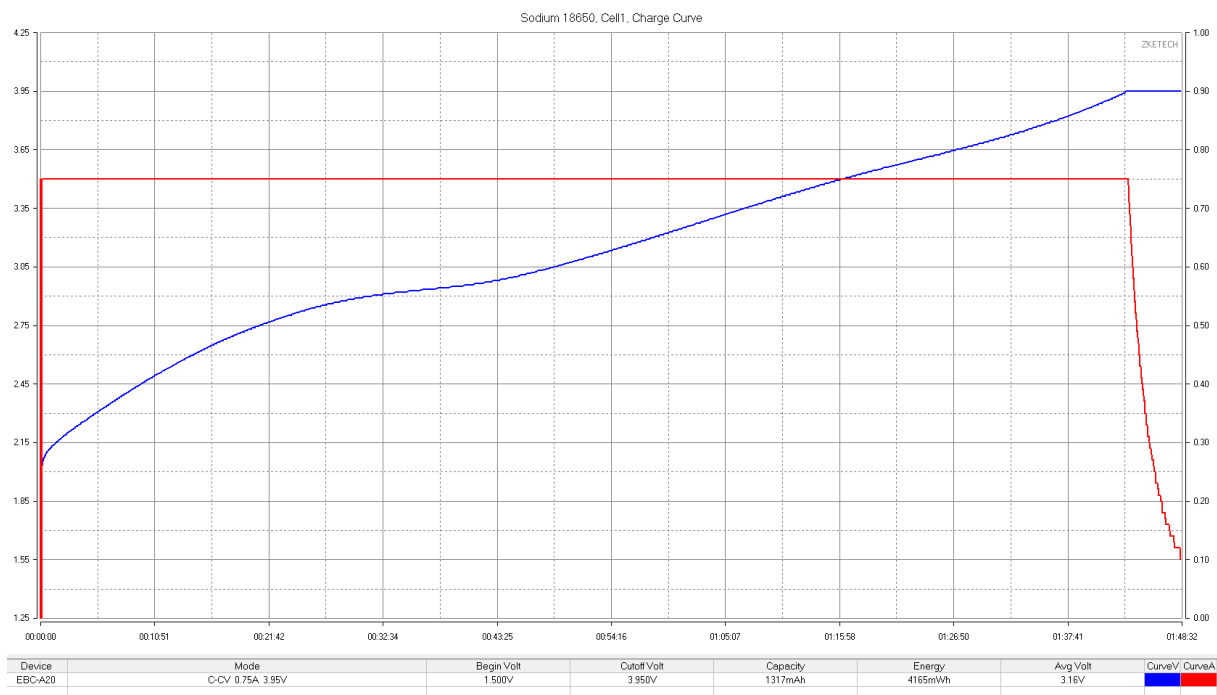


Рисунок 6 – Графік заряду Na-Ion акумулятора

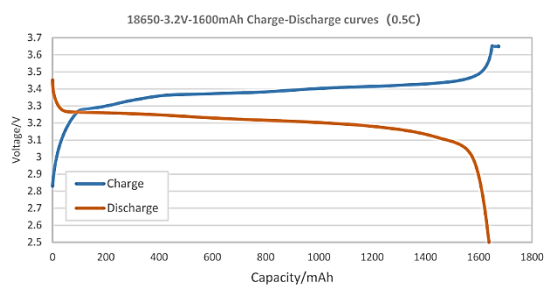


Рисунок 7 – Графіки заряду та розряду LiFePO₄ акумулятора

Також Na-Ion батареї, в порівнянні з Li-Ion, екологічніші завдяки широкій доступності натрію, а також їх меншому впливу на довкілля при виробництві [16, 17]. Вони є безпечнішими, оскільки не вибухають у разі перегріву. Li-Ion батареї потребують більш уважного контролю температури через ризик теплового розгону. Розглянемо показники роботи Li-Ion, на прикладі батареї Samsung INR18650-25R 3.7V 2500 mAh [13, 14] (рис. 8).

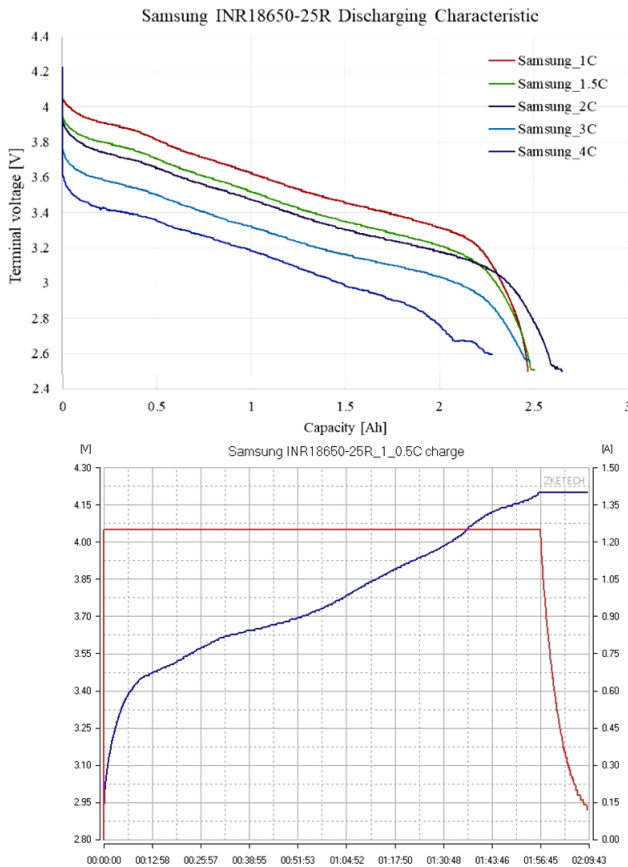


Рисунок 8 – Графіки заряду та розряду Li-Ion акумулятора

З наведеного графіку видно, що мінімальна напруга розряду Li-Ion акумулятора становить 2,5 В і вони також мають рівномірний розподіл ємності (як і в натрієвих), але відмінний від LiFePO₄. Також Li-Ion акумулятори відрізняються по напрузі заряду – на графіку видно, що заряд досягає 4,2 В на відміну від натрієвого 3,95 В та фосфатного 3,65 В.

Це відображає загальну тенденцію, де Li-Ion акумулятори забезпечують високу енергетичну щільність, але потребують суворішого контролю процесів заряджання для запобігання деградації матеріалів. Натрієві та фосфатні батареї, своєю чергою, мають дещо нижчі характеристики щільності енергії, однак виграють у довговічності та безпечності, що робить їх більш придатними для стаціонарних систем зберігання енергії.

Висновок. Натрієві та LiFePO₄ акумулятори мають свої унікальні переваги та недоліки, що робить їх придатними для різних сфер застосування. Натрієві акумулятори є більш економічно вигідним рішенням і демонструють кращу продуктивність при низьких температурах, тоді як LiFePO₄ акумулятори вирізняються вищою енергетичною щільністю, тривалішим терміном служби та підвищеним рівнем безпеки. Вибір між цими технологіями залежить від конкретних вимог до застосування, таких як вартість, продуктивність і екологічність. В перспективі можна очікувати покращення обох типів акумуляторів, що сприятиме створенню більш універсальних та стійких рішень для накопичення енергії.

Список літератури

1. Patel T. A Comparative Study of Lithium-ion and Sodium-ion Batteries: Characteristics, Performance, and Challenges. 2023. 6 p. (Preprint. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU)). URL: <https://open.fau.de/handle/openfau/21891>.
2. Rudola A. The Future of Clean Transportation: Sodium-ion Batteries. *Bridge India*. 2019. URL: <https://www.bridgeindia.org.uk/the-future-of-clean-transportation-sodium-ion-batteries/>.
3. Sodium-Ion Battery Market. 2024. URL: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/sodium-ion-battery-market-207269067.html>.
4. Hybrid anode materials for rechargeable batteries – A review of Sn/TiO₂ based nanocomposites / M. Jamil et al. *Energy Reports*. 2021. Vol. 7. P. 2836–2848. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.05.004>.
5. Impact assessment of battery energy storage systems towards achieving sustainable development goals / M. A. Hannan et al. *Journal of Energy Storage*. 2021. Vol. 42. P. 103040. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103040>.
6. About the LFP Battery. *First Phosphate*. URL: <https://firstphosphate.com/phosphate-industry/about-the-lfp-battery/>.
7. Perspective: Design of cathode materials for sustainable sodium-ion batteries / B. Sayahpour et al. *MRS Energy & Sustainability*. 2022. Vol. 9, no. 2. P. 183–197. DOI: <https://doi.org/10.1557/s43581-022-00029-9>.
8. Commercialisation of high energy density sodium-ion batteries: Faradion's journey and outlook / A. Rudola et al. *Journal of Materials Chemistry A*. 2021. Vol. 9, no. 13. P. 8279–8302. DOI: <https://doi.org/10.1039/d1ta00376c>.
9. Na-ion battery - Sodium ion Battery. *中科海纳科技有限责任公司 HiNa Battery Technology*. URL: <https://www.hinabattery.com/en/index.php?catid=12>.
10. Sodium Ion Batteries: Performance Advantages and Broad Application Prospects in Extreme Temperatures | LiFePO₄ Battery. *LiFePO₄ Batteries and LiFePO₄ Cells Supplier - LiFePO₄ Battery*. URL: <https://www.lifepo4-battery.com/News/sodium-ion-batteries-performance-advanta.html>.
11. Kumar R., Goel V. A study on thermal management system of lithium-ion batteries for electrical vehicles: A critical review. *Journal of Energy Storage*. 2023. Vol. 71. 108025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108025>.
12. A review of the energy storage aspects of chemical elements for lithium-ion based batteries / T. Bashir et al. *Energy Materials*. 2021. Vol. 1, no. 2. 100019. DOI: <https://doi.org/10.20517/energymater.2021.20>.
13. Samsung SDI. Introduction of INR18650-25R. 2013. URL: <https://www.powerstream.com/p/INR18650-25R-datasheet.pdf>.
14. Adaikkappan M., Sathiyamoorthy N. Modeling, state of charge estimation, and charging of lithium-ion battery in electric vehicle: A review. *International Journal of Energy Research*. 2021. Vol. 46, no. 3. P. 2141–2165. DOI: <https://doi.org/10.1002/er.7339>.
15. Battery Data. *CALCE Center for Advanced Life Cycle Engineering | University of Maryland*. URL: <https://calce.umd.edu/battery-data#Storage>.
16. State-of-charge estimation for the lithium-ion battery based on adaptive extended Kalman filter using improved parameter identification / N. Shi et al. *Journal of Energy Storage*. 2022. Vol. 45. 103518. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103518>.
17. Fabrication of Na-Ion Full-Cells using Carbon-Coated Na₃V₂(PO₄)₂O₂F Cathode with Conversion Type CuO Nanoparticles from Spent Li-Ion Batteries / K. Subramanyan et al. *Small Methods*. 2022. Vol. 6, no. 6. 2200257. DOI: <https://doi.org/10.1002/smt.202200257>.

References

1. T. Patel, A Comparative Study of Lithium-ion and Sodium-ion Batteries: Characteristics, Performance, and Challenges. To be published. [Online]. Available: <https://open.fau.de/handle/openfau/21891>
2. A. Rudola, "The Future of Clean Transportation: Sodium-ion Batteries", *Bridge India*, Nov. 2019. [Online]. Available: <https://www.bridgeindia.org.uk/the-future-of-clean-transportation-sodium-ion-batteries/>

3. "Sodium-Ion Battery Market", CH 8993, Apr. 2024. [Online]. Available: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/sodium-ion-battery-market-207269067.html>
4. M. Jamil, S. Wei, M. P. Taylor, J. J. J. Chen, and J. V. Kennedy, "Hybrid anode materials for rechargeable batteries — A review of Sn/TiO₂ based nanocomposites", *Energy Reports*, vol. 7, pp. 2836–2848, Nov. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.05.004>
5. M. A. Hannan *et al.*, "Impact assessment of battery energy storage systems towards achieving sustainable development goals", *Journal of Energy Storage*, vol. 42, p. 103040, Oct. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103040>
6. "About the LFP Battery." First Phosphate. [Online]. Available: <https://firstphosphate.com/phosphate-industry/about-the-lfp-battery/>
7. B. Sayahpour, H. Hirsh, S. Parab, L. H. B. Nguyen, M. Zhang, and Y. S. Meng, "Perspective: Design of cathode materials for sustainable sodium-ion batteries", *MRS Energy & Sustainability*, vol. 9, no. 2, pp. 183–197, May 2022, doi: <https://doi.org/10.1557/s43581-022-00029-9>
8. A. Rudola *et al.*, "Commercialisation of high energy density sodium-ion batteries: Faradion's journey and outlook", *Journal of Materials Chemistry A*, vol. 9, no. 13, pp. 8279–8302, 2021, doi: <https://doi.org/10.1039/d1ta00376c>
9. "Na-ion battery - Sodium Ion Battery." 中科海钠科技有限责任公司 HiNa Battery Technology. [Online]. Available: <https://www.hinabattery.com/en/index.php?catid=12>
10. "Sodium Ion Batteries: Performance Advantages and Broad Application Prospects in Extreme Temperatures | LiFePO₄ Battery." LiFePO₄ Batteries and LiFePO₄ Cells Supplier - LiFePO₄ Battery. [Online]. Available: <https://www.lifepo4-battery.com/News/sodium-ion-batteries-performance-advanta.html>
11. R. Kumar and V. Goel, "A study on thermal management system of lithium-ion batteries for electrical vehicles: A critical review", *Journal of Energy Storage*, vol. 71, Nov. 2023, Art. no. 108025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108025>
12. T. Bashir *et al.*, "A review of the energy storage aspects of chemical elements for lithium-ion based batteries", *Energy Materials*, vol. 1, no. 2, 2021, Art. no. 100019, doi: <https://doi.org/10.20517/energymater.2021.20>
13. Samsung SDI, "Introduction of INR18650-25R", Oct. 2013. [Online]. Available: <https://www.powerstream.com/p/INR18650-25R-datasheet.pdf>
14. M. Adaikkappan and N. Sathiyamoorthy, "Modeling, state of charge estimation, and charging of lithium-ion battery in electric vehicle: A review", *International Journal of Energy Research*, vol. 46, no. 3, pp. 2141–2165, Oct. 2021, doi: <https://doi.org/10.1002/er.7339>
15. "Battery Data." CALCE Center for Advanced Life Cycle Engineering | University of Maryland. [Online]. Available: <https://calce.umd.edu/battery-data#Storage>
16. N. Shi, Z. Chen, M. Niu, Z. He, Y. Wang, and J. Cui, "State-of-charge estimation for the lithium-ion battery based on adaptive extended Kalman filter using improved parameter identification", *Journal of Energy Storage*, vol. 45, Jan. 2022, Art. no. 103518, doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103518>
17. K. Subramanian, M. Akshay, Y. Lee, and V. Aravindan, "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*, vol. 6, no. 6, Apr. 2022, Art. no. 2200257, doi: <https://doi.org/10.1002/smt.202200257>

Надійшла (received) 02.12.2024

UDC 621.355.9

RUSLAN OKSENYCH ✉ – PhD Student of Department of Electricity Supply and Energy Management, State Biotechnological University; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6510-5108>; e-mail: okrus785@proton.me.

OLEKSANDR MIROSHNYK – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of Department of Electricity Supply and Energy Management, State Biotechnological University; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6144-7573>; e-mail: omiroshnyk@btu.kharkiv.ua.

OLEKSANDR MOROZ – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Professor of the Department of Electricity Supply and Energy Management, State Biotechnological University; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8520-9211>; e-mail: moroz.an@btu.kharkiv.ua.

VOLODYMYR PAZIY – Senior Lecturer of the Department of Electricity Supply and Energy Management, State Biotechnological University; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7336-0854>; e-mail: pazziy@btu.kharkiv.ua.

COMPARATIVE ANALYSIS OF LITHIUM IRON PHOSPHATE (LiFePO₄) AND SODIUM ION (Na-ION) ENERGY STORAGE CELLS

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, LiFePO₄ 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 – LiFePO₄ and Na-Ion. Particular attention will be paid to their durability, energy efficiency, materials from which they are made, and technical characteristics. We will also evaluate their economic feasibility and prospects for implementation in commercial and domestic applications.

Keywords: sodium-ion (Na-Ion) batteries; lithium-iron-phosphate (LiFePO₄) batteries; energy storage; charge monitoring; renewable energy sources.