

УДК 621.313

doi:10.20998/2413-4295.2025.02.03

ПЕРСПЕКТИВНІ СИСТЕМИ АКУМУЛЮВАННЯ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ

Д. С. КРИЛОВ*, О. І. ХОЛОД

Кафедра промислової і біомедичної електроніки, НТУ «ХПІ», Харків, УКРАЇНА

*e-mail: denis.krylov@khpі.edu.ua

АНОТАЦІЯ В умовах глобального енергетичного переходу та посилення кліматичних викликів, пов'язаних із викидами парникових газів, особливої актуальності набуває розвиток високоефективних і екологічно безпечних технологій зберігання енергії. Цей напрям є одним із ключових у контексті інтеграції відновлюваних джерел енергії до енергетичних систем, а також забезпечення сталої роботи електротранспорту, зокрема електромобілів. Сучасний транспортний сектор зазнає суттєвої трансформації під впливом інновацій, спрямованих на електрифікацію та зменшення залежності від викопного палива. Водночас ефективність функціонування електромобілів значною мірою визначається рівнем розвитку систем акумулювання енергії, які мають забезпечити високу питому енергоємність, тривалий термін служби, швидке заряджання, стабільність роботи в широкому діапазоні температур, а також безпеку та мінімальний вплив на довкілля. Наразі літій-іонні акумулятори домінують у сфері електромобілів, так як мають оптимальне поєднання високої енергетичної щільності, ефективності заряду/розряду, терміну служби та як результат баланс ціни та якості. Однак вони не позбавлені технічних, економічних та екологічних обмежень, що стимулює активні наукові пошуки альтернативних технологій: твердотілих акумуляторів, натрій-іонних систем, літій-повітряних та літій-сірчанних акумуляторів, суперконденсаторів, гібридних рішень на основі комбінації акумуляторів з регенеративними паливними елементами та акумуляторів з суперконденсаторами тощо. У зв'язку з цим ця оглядова робота спрямована на систематизацію сучасних і перспективних технологій акумулювання енергії, аналіз їх потенціалу для використання в електричному транспорті, а також ідентифікацію основних проблем та напрямів подальших наукових досліджень і розробок у даній галузі. Перспективні технології накопичення енергії відкривають нові можливості, але потребують подолання низки науково-технічних і економічних бар'єрів. Поєднання акумуляторів із суперконденсаторами або паливними елементами дозволяє досягти оптимального балансу між потужністю, енергоємністю та ресурсом.

Ключові слова: акумулятор; накопичувач енергії; електромобіль; суперконденсатор; питома енергоємність; питома потужність; коефіцієнт корисної дії; заряд/розряд.

PROSPECTIVE ENERGY STORAGE SYSTEMS FOR ELECTRIC VEHICLES

D. KRYLOV, O. KHOLOD

Department of industrial and biomedical electronics, NTU "KhPI", Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT In the context of the global energy transition and growing climate challenges associated with greenhouse gas emissions, the development of highly efficient and environmentally friendly energy storage technologies is becoming increasingly important. This area is crucial both for the integration of renewable energy sources into modern power systems and for ensuring the sustainable operation of electric transportation, particularly electric vehicles (EVs). The transportation sector is undergoing a significant transformation driven by innovations aimed at electrification and reducing dependence on fossil fuels. At the same time, the performance and competitiveness of electric vehicles largely depend on the advancement of energy storage systems, which must offer high specific energy density, long service life, fast charging capabilities, stable performance under a wide range of temperatures, as well as safety and minimal environmental impact. Currently, lithium-ion batteries dominate the electric vehicle (EV) sector due to their optimal combination of high energy density, charge/discharge efficiency, lifespan, and, as a result, a favorable cost-to-performance ratio. However, they are not without technical, economic, and environmental limitations, which drives active scientific efforts to explore alternative technologies such as solid-state batteries, sodium-ion systems, lithium-air and lithium-sulfur batteries, supercapacitors, and hybrid solutions combining batteries with regenerative fuel cells or supercapacitors. In this context, this review focuses on systematizing modern and emerging energy storage technologies, analyzing their potential for application in electric transport, and identifying the main challenges and directions for further scientific research and development in this field. Promising energy storage technologies open up new opportunities but require overcoming a number of scientific, technical, and economic barriers. The combination of batteries with supercapacitors or fuel cells allows for achieving an optimal balance between power, energy density, and lifespan.

Key words: battery; energy storage system; electric vehicle; supercapacitor; specific energy; specific power; efficiency; charge/discharge.

Вступ

У світлі глобальних кліматичних викликів, зростання енергоспоживання та поступового вичерпання викопних ресурсів, питання енергетичної безпеки набуває особливої актуальності [1,2]. У цьому контексті провідні країни світу впроваджують

стратегії декарбонізації, розвиток відновлюваних джерел енергії та оптимізацію енергоспоживання [3,4]. Одним із ключових компонентів сталого енергетичного майбутнього є ефективні та надійні системи акумулювання енергії [5], здатні забезпечити стабільність енергопостачання, гнучкість енергетичних систем і ефективну інтеграцію

відновлюваних джерел [6,7]. Особливої ваги ця проблема набуває у транспортному секторі, де розвиток електричного транспорту, зокрема електромобілів, розглядається як один із найперспективніших напрямів зниження викидів парникових газів і зменшення залежності від викопного палива [8].

Швидке зростання попиту на електромобілі, а також посилення екологічних вимог на державному рівні, стимулюють активний розвиток та вдосконалення систем зберігання енергії [9,10]. У центрі цього технологічного прориву перебувають електрохімічні джерела живлення, які повинні відповідати цілій низці критичних параметрів: високій питомій енергоємності та питомій потужності, тривалому терміну служби, стабільній роботі в широкому діапазоні температур, швидкому заряджанню, високому коефіцієнту корисної дії, екологічній безпечності та можливості вторинної переробки [11,12]. Надійність, масштабованість та економічна доцільність систем накопичення енергії відіграють вирішальну роль у формуванні конкурентного ринку електротранспорту.

На сьогоднішній день літій-іонні акумулятори є домінуючою технологією у сфері електромобілів завдяки збалансованому поєднанню високої щільності енергії, тривалого ресурсу, ефективності циклів заряджання/розряджання, відносної компактності та прийнятної вартості [1,9]. Проте, попри численні переваги, ці батареї мають низку недоліків — зокрема, обмеженість доступу до стратегічних матеріалів (літій, кобальт, нікель), схильність до перегріву, ризик займання та проблеми з утилізацією [5,13]. Це створює технологічні та екологічні виклики, що зумовлюють потребу у диверсифікації елементної бази систем накопичення енергії.

У зв'язку з цим зростає інтерес до альтернативних технологій, таких як твердотільні акумулятори, які забезпечують вищу безпеку та потенційно більшу енергоємність; натрій-іонні батареї — як більш дешевий та ресурсно доступний аналог літійових; літій-сірчані та літій-повітряні системи — що мають надзвичайно високу теоретичну щільність енергії; суперконденсатори — як джерела миттєвої потужності з надвисокою циклічною стабільністю; а також гібридні системи, що поєднують акумулятори із суперконденсаторами або паливними елементами для досягнення оптимального балансу між енергоємністю, потужністю та довговічністю [3,6,14].

Таким чином, дослідження, класифікація та порівняльний аналіз сучасних і перспективних технологій накопичення енергії є важливою складовою формування інноваційних транспортних систем. Це дає змогу не лише оцінити їхній науково-технічний потенціал, а й визначити ключові напрями для подальших розробок, враховуючи як інженерні, так і екологічні аспекти.

Мета роботи

Метою цієї оглядової статті є здійснення комплексного аналізу сучасного стану, ключових тенденцій та перспектив розвитку технологій акумулювання енергії з особливим акцентом на їх застосування в сфері електричного транспорту, передусім у сегменті електромобілів. У роботі розглядаються як комерційно зрілі рішення (зокрема, літій-іонні акумулятори різних конфігурацій), так і новітні розробки, що перебувають на стадії лабораторних чи пілотних випробувань (твердотільні батареї, натрій-іонні, літій-сірчані та літій-повітряні системи, суперконденсатори, гібридні рішення тощо).

Стаття має на меті ідентифікувати технології, які демонструють найбільший науково-технічний та комерційний потенціал для масштабованого застосування в електромобілях, з урахуванням ключових параметрів: питомої енергоємності, питомої потужності, тривалості циклічного ресурсу, безпеки, вартості виробництва, екологічної відповідності та можливостей вторинної переробки. Крім того, особливу увагу приділено аналізу факторів, які обмежують впровадження тих чи інших рішень на масовому ринку — зокрема, доступність сировини, технологічні бар'єри, стандартизація, інфраструктурна готовність та регуляторне середовище.

Виклад основного матеріалу

Сучасна електромобільна індустрія наразі значною мірою спирається на **літій-іонні акумулятори**, які демонструють оптимальний баланс між питомою енергоємністю, ефективністю, терміном служби та вартістю. Ці батареї зазвичай складаються з графітового анода, катода на основі оксидів металів (наприклад, NMC — нікель-марганець-кобальт або LFP — літій-залізо-фосфат), сепаратора і рідкого електроліту.

Попри значні переваги — високу енергетичну щільність (250–300 Вт·год/кг), ефективність понад 90%, добру циклічну стабільність та налагоджене виробництво — літій-іонні батареї мають і обмеження. До недоліків належать використання рідкісних і токсичних матеріалів (зокрема кобальту), обмежена термостійкість і потенційна небезпека займання. Перспективні напрями розвитку включають перехід до безкобальтових катодів, застосування нових матеріалів анодів (кремній, літій-титанат), що дозволяє суттєво підвищити енергоємність, безпеку та надійність систем. Світові дослідницькі центри, зокрема Fraunhofer Institute (Німеччина) та Argonne National Laboratory (США), ведуть відповідні розробки [8].

Паралельно, в науково-інженерному середовищі активно досліджуються альтернативні накопичувачі, які потенційно можуть доповнити або навіть витіснити літій-іонні системи. Одним із

найперспективніших є **твердотілі акумулятори**, які замінюють рідкий електроліт на твердий (керамічний, полімерний або сульфідний), що дозволяє використовувати металічний літій як анод, як результат значно підвищена безпека і збільшена енергетична щільність (до 450 Вт·год/кг). Основними перевагами цієї технології є високий ККД (до 98%), тривалий термін служби й мінімальні ризики займання. Наприклад, компанія QuantumScare вже продемонструвала стабільну роботу твердотілих акумуляторів на понад 1000 циклів заряду/розряду без значної деградації [13]. Водночас ключовими проблемами залишаються крихкість твердого електроліту, складність забезпечення високої іонної провідності та проблеми масштабування виробництва.

Ще одним напрямом є **літій-сірчані батареї**, де використовується сірка в якості катоду та металевий літій як анод, електроліт при цьому може бути або твердим, або рідким. Це теоретично забезпечує енергоємність до 600 Вт·год/кг. Ці батареї вигідні через низьку вартість сірки та екологічність. Утім, проблеми з розчиненням політіонатів, низькою кількістю циклів заряду/розряду та швидкою деградацією поки стримують їх широке впровадження. Перспективи пов'язані з розвитком катодних матриць та стабілізацією електроліту, що, наприклад, демонструється у проєктах ЕС Battery2030+ [14].

Особливу увагу дослідників привертають і **літій-повітряні батареї**, які мають одну з найвищих теоретичних енергетичних щільностей — до 1000 Вт·год/кг та дуже легку структуру. Катод в них взаємодіє з киснем з повітря, утворюючи оксиди літію, а в якості аноду використовується літій. Однак технологія ще далека від комерціалізації через складнощі з керуванням хімічними реакціями та забезпеченням багаторазовості циклів. Дослідження сконцентровані на розробці каталітичних матеріалів та замкнених систем подачі кисню.

Альтернативним підходом є **натрій-іонні батареї**, що вирізняються доступністю ресурсної бази та нижчою вартістю. Технологія аналогічна літій-іонним, але замість літію використовується натрій. В якості катодів шаруваті оксиди або пруські блакитні сполуки, аноди — це твердий вуглець або оксид титану. Хоча вони мають нижчу енергоємність (100–160 Вт·год/кг) порівняно з літєвими, їх переваги — екологічність, стабільність при низьких температурах і добра безпечність — роблять їх цікавими для умов помірного клімату та менш енергоємних транспортних засобів. Перші комерційні зразки з'явилися вже у 2023 році завдяки компанії CATL.

Значне місце у дослідженнях займають і **суперконденсатори**, де накопичення енергії відбувається за рахунок електростатичної взаємодії іонів з поверхнею електродів. В якості матеріалів використовується активоване вугілля, графен. Ці накопичувачі забезпечують надзвичайно високу питому потужність (до 10 000 Вт/кг), миттєве заряджання та наддовгий ресурс (понад 100 000

циклів). Проте їхня головна слабкість — дуже низька енергетична щільність, через що вони частіше застосовуються у гібридних системах.

У цьому контексті актуальним є розвиток **гібридних рішень** — комбінацій батарей з суперконденсаторами або з регенеративними паливними елементами [15]. Наприклад, у громадському транспорті Китаю вже масово застосовуються гібридні автобуси з суперконденсаторними модулями [11]. Поєднання акумуляторної батареї та суперконденсатора дозволяє використовувати сильні сторони кожного — перший забезпечує дальність ходу, другий — швидкий обмін енергією, що особливо корисно при рекуперації гальмівної енергії. Окрім цього досягається зниження пікових навантажень на акумулятор та подовження терміну його служби. Енергія в таких системах розподіляється між компонентами за допомогою керуючої електроніки. Переважно використовується комбінація паралельного підключення з активним керуванням потоками енергії. Саме складна електроніка керування та додатковий об'єм і вага виступають в якості недоліків такої системи та напрямками подальшого удосконалення.

Інший тип — це гібрид акумулятора з паливним елементом (зазвичай на водні). Це комбінована система, в якій літій-іонний акумулятор забезпечує короткочасну потужність, а паливний елемент — тривалу енергетичну підтримку. Регенеративна система дозволяє електролізувати воду з допомогою надлишкової енергії та знову використовувати отриманий водень. Така система має зменшену масу акумуляторного блока й забезпечує швидке «заправлення» енергією. Але висока вартість паливних елементів та водневої інфраструктури, складність системи з точки зору будови (паливний елемент, бак, акумулятор) обмежує її широке використання. Відомі розробки, такі як Toyota Mirai або експериментальні системи від Hyundai, показують практичну життєздатність технології [7,8]. Наразі дослідження щодо інтеграції регенеративного циклу тривають.

Обговорення результатів

Для глибшого аналізу ефективності різних типів накопичувачів енергії доцільно здійснити порівняння за ключовими технічними параметрами. У наведеній табл. 1 охоплено вісім перспективних технологій акумулявання, що потенційно можуть бути використані в електромобілях. Основними критеріями оцінювання є енергетична щільність, питома потужність, коефіцієнт корисної дії, тривалість експлуатації, швидкість заряджання, орієнтовна вартість, рівень безпеки та поточна стадія розвитку. Це дозволяє виявити сильні та слабкі сторони кожної технології в контексті її придатності до масового впровадження. Представлені дані базуються на сучасних науково-технічних дослідженнях і демонструють динаміку розвитку галузі.

Таблиця 1 – Порівняльна характеристика перспективних систем акумулювання енергії для електромобілів

№	Тип накопичувача	Енергетична щільність (Вт·год/кг)	Питома потужність (Вт/кг)	ККД (%)	Термін служби (цикли)	Час заряджання	Вартість (\$/кВт·год)	Безпечність	Стадія розвитку
1	Літій-іонний (Li-ion)	150–250	200–2000	90–95	1000–3000	0.5–3 год	120–200	Висока (з системами BMS)	Масове комерційне використання
2	Твердотілий (Solid-state)	250–450 (очікувана)	300–1500	90–98	>5000 (очікується)	~1 год	>300 (зараз)	Дуже висока	Прототипи, пілотні випробування
3	Літій-сірчаний (Li-S)	400–600 (теоретично)	300–500	80–90	300–1000	~1 год	~150–250 (очікувана)	Середня (деградація)	Активні дослідження, перші зразки
4	Літій-повітряний (Li-air)	до 1000 (теоретично)	200–500	70–80	<500	>1 год	Невизначена	Низька (реактивність)	Ранній етап лабораторних досліджень
5	Натрій-іонний (Na-ion)	100–160	100–500	85–90	1000–3000	1–2 год	50–100 (очікується)	Висока	Пілотні лінії, комерц. старт з 2023
6	Суперконденсатор	5–15	5000–10000	95–98	>100 000	секунд–хвилини	Висока (за \$/кг)	Дуже висока	Комерційне, як допоміжна система
7	Гібрид: АКБ + суперконденсатор	Залежить від конфігурації	Висока	>90	Підвищений	Швидкий + буфер	Висока	Висока	Реалізація в спецтранспорті
8	Гібрид: АКБ + паливний елемент	200–400 (загальна система)	1000+ (в піках)	50–60 (вся система)	3000–5000	Заправка 3–5 хв (водень)	Дуже висока (дорого)	Висока (за норм експлуатації)	Обмежене впровадження (Toyota, Hyundai)

На основі наведених у табл. 1 даних можна наочно проаналізувати ключові технічні параметри кожної з розглянутих систем акумулювання. Візуалізація у вигляді діаграм дозволяє краще зрозуміти співвідношення між показниками та виявити технології з найвищим потенціалом. Зокрема, графіки енергетичної щільності, питомої потужності, ефективності, часу заряджання, тривалості служби та вартості дають змогу швидко і зручно зіставити переваги й недоліки кожної технології. Такий підхід сприяє формуванню обґрунтованих висновків щодо доцільності подальших досліджень і впровадження конкретних рішень. Нижче подано відповідні діаграми, що відображають ключові параметри перспективних накопичувачів енергії.

З аналізу діаграм, що відображають ключові параметри сучасних систем акумулювання енергії, можна зробити кілька важливих висновків. Найвищу

питому енергомісткість демонструють натрій-сірчані батареї, що робить їх привабливими для застосування в умовах, де важлива велика ємність при обмеженій вазі. Водночас суперконденсатори мають найвищу питому потужність, що дозволяє їм забезпечувати швидке вивільнення енергії, хоча їхня енергомісткість значно нижча. Високий коефіцієнт корисної дії спостерігається у натрій-іонних і літій-залізо-фосфатних батареях, що свідчить про ефективне використання енергії під час заряджання та розряджання. За терміном служби переважають суперконденсатори та літій-титанатні батареї, які здатні витримувати десятки тисяч циклів, що ідеально підходить для інтенсивного використання. Найменший час заряджання характерний для суперконденсаторів, що робить їх корисними для застосувань, де потрібна миттєва зарядка. Вартість акумуляторних систем варіюється: найвигіднішими є

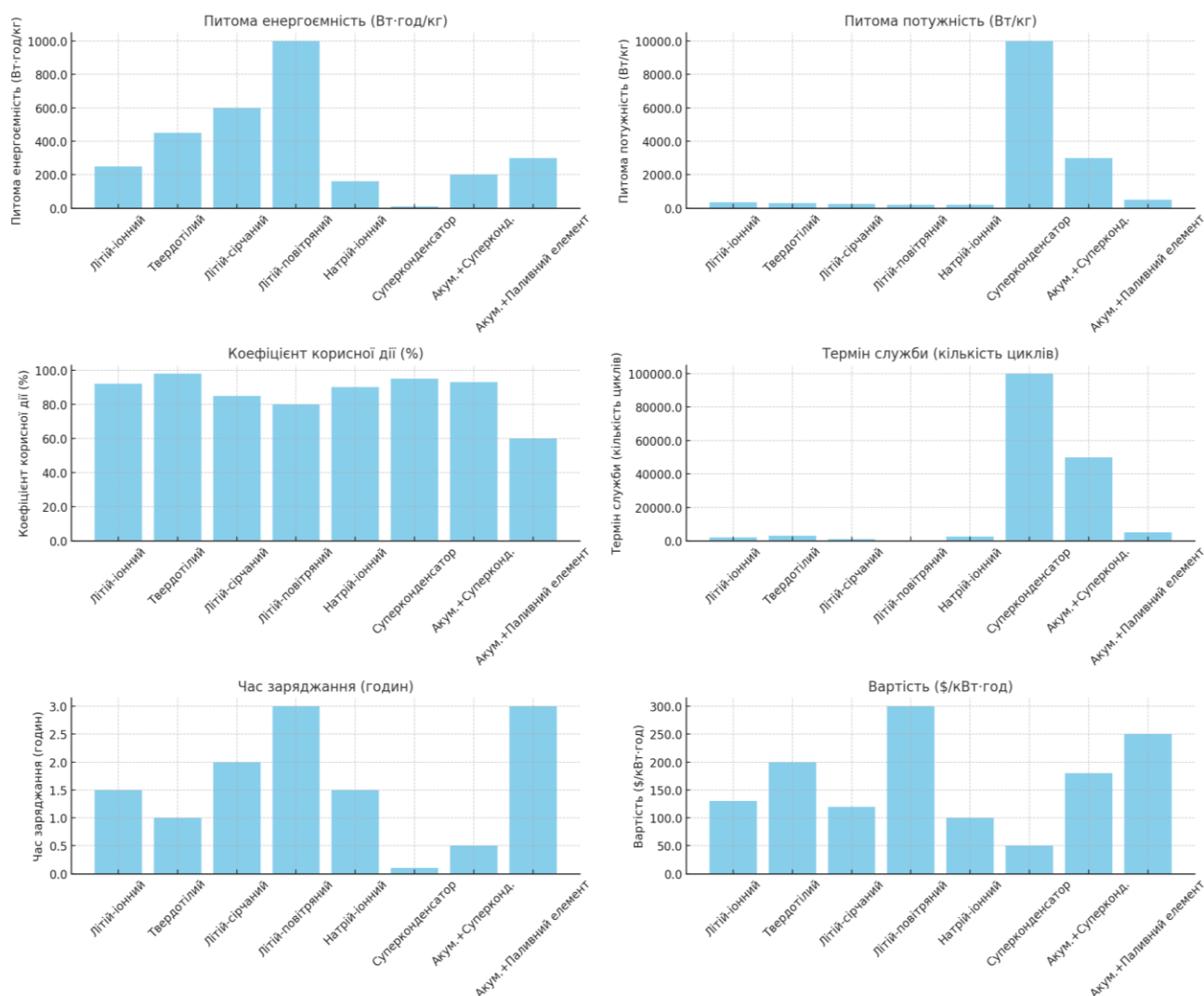


Рис. 1 – Діаграми співвідношення основних параметрів перспективних накопичувачів енергії

натрій-сірчанні й літій-залізо-фосфатні варіанти з помірними витратами на 1 кВт·год. Літій-іонні батареї загального типу демонструють збалансованість характеристик, поєднуючи відносно високу енергоємність, ККД і середній час заряджання. Акумулятори на основі твердого електроліту поки що поступаються в багатьох характеристиках, але мають потенціал для подальшого розвитку. Акумулятори на основі анодно-літійових елементів ще перебувають у стадії становлення, маючи середні показники, але перспективні щодо вартості та стабільності. Таким чином, вибір конкретної технології акумулювання енергії має здійснюватися з урахуванням балансу між технічними параметрами, експлуатаційною надійністю та економічною доцільністю залежно від специфіки використання в електротранспорті.

Висновки

У процесі декарбонізації транспорту та переходу до сталої енергетики системи акумулювання енергії набувають все більшого значення. Вони виступають не лише ключовою технологією для забезпечення мобільності майбутнього, але й важливим елементом енергетичної безпеки країн.

Акумулювання енергії відіграє ключову роль у трансформації сучасної енергетики та транспорту в напрямку сталого розвитку. Ефективні системи зберігання енергії забезпечують не лише стабільність енергопостачання, а й оптимальну інтеграцію відновлюваних джерел у транспортні системи.

Літій-іонні акумулятори залишаються найпоширенішим варіантом для електромобілів завдяки високій енергоємності та добрій надійності. Утім, їхня залежність від дефіцитних матеріалів та ризик займання обмежують подальше вдосконалення.

Перспективні технології накопичення енергії відкривають нові можливості, але потребують подолання низки науково-технічних і економічних бар'єрів.

Твердотільні акумулятори демонструють суттєве підвищення безпеки та потенціал до зростання енергоємності. Основними викликами залишаються крихкість матеріалів і складність масштабованого виробництва.

Літій-сірчані та літій-повітряні системи мають рекордну теоретичну щільність енергії, що робить їх дуже перспективними. Однак швидка деградація та складність стабілізації процесів стримують їх практичне застосування.

Натрій-іонні системи привабливі з огляду на дешевизну й екологічність, зокрема у регіонах із низькими вимогами до енергоємності. Їх вже впроваджують на рівні комерційних зразків, хоча енергоємність поступається літєвим аналогам.

Поєднання акумуляторів із суперконденсаторами або паливними елементами дозволяє досягти оптимального балансу між потужністю, енергоємністю та ресурсом. Такі системи особливо ефективні для громадського транспорту й інтенсивного режиму використання.

Список літератури

1. Islam M. T., Rahman M. M., Choudhury T. A., Mahmud M. A. P., Oo A. M. T. Energy storage technology and its impact in electric vehicle: Current progress and future outlook. *Next Energy*. 2025. Vol. 2, no. 1. P. 100202. doi:10.1016/j.nxener.2024.100202.
2. Мирутенко П. П., Лістовщик Л. К. Накопичувачі енергії. Основні типи та перспективи використання. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2022. № 4. С. 107–116. doi: 10.20535/1813-5420.4.2022.273433.
3. Saxena S., Pal A., Chowdhury B., et al. A comprehensive review of energy storage technology development and application for pure electric vehicles. *Journal of Energy Storage*. 2024. Vol. 75. P. 111159. doi:10.1016/j.est.2024.111159.
4. Омеляненко Г. В. Накопичувачі енергії – ефективний засіб перспективних енергозберігаючих технологій. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я*, 2021, ч. 2, с. 87.
5. Kumar A., Kumar R., Ali H. M., et al. Review of battery-supercapacitor hybrid energy storage systems for electric vehicles. *Results in Engineering*. 2024. Vol. 23. P. 103598. doi:10.1016/j.rineng.2024.103598.
6. Noshin M., Uddin M. A., Sultana R. Battery-Supercapacitor Energy Storage Systems for Electrical Vehicles: A Review. *Energies*. 2022. Vol. 15, no. 15. P. 5683. doi:10.3390/en15155683.
7. Гнатов А. В., Аргун І. В., Сохін П. А., Ульянець О. А. Дослідження автономного джерела живлення для електромобілів та їхньої зарядної інфраструктури. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*. 2024, вип. 104. С. 130–139.
8. Kumar P., Raj A., Singh R. K., et al. Solar cell-integrated energy storage devices for electric vehicles: a breakthrough in the green renewable energy. *Ionics*. 2022. Vol. 28. P. 1095–1112. doi:10.1007/s11581-022-04700-6.

9. Verma S., Mishra S. A comprehensive review on energy storage in hybrid electric vehicle. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. 2021. Vol. 8, Issue 5. P. 621–637. doi:10.1016/j.jtte.2021.09.001.
10. Шпак О., Баб'юк Д. В. Дослідження технології використання сонячних панелей для зарядки електромобілів. *Computer Science and Network*. 2023. вип. 5, № 1. С. 160–171. doi: 10.23939/csn2023.01.160.
11. Xu H., Shen M. The control of lithium-ion batteries and supercapacitors in hybrid energy storage systems for electric vehicles: A review. *International Journal of Energy Research*. 2021. Vol. 45, Issue 15. P. 20524–20544. doi:10.1002/er.7150.
12. Йовченко А. В. Дослідження можливості енергосистеми України в забезпеченні обслуговування парку електромобілів. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2024. № 2. С. 18–24. doi: 10.35546/kntu2078-4481.2024.2.3.
13. Movin Raja J., Gowthamraj R., Shyam Kumar K., Sebastian Vindro Jude P. Ultracapacitor based Hybrid Energy Storage System for Hybrid and Electric Vehicles. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*. 2019. Vol. 8, Issue 3. Article ID: IJERTV8IS030252. doi:10.17577/IJERTV8IS030252.
14. Gómez-Romero P., et al. Hybrid energy storage: the merging of battery and supercapacitor chemistries. *Chemical Society Reviews*. 2015. Vol. 44, Issue 7. P. 2523–2534. doi:10.1039/C4CS00266K.
15. Kumar A., Kumar R., Ali H. M., et al. Review of battery-supercapacitor hybrid energy storage systems for electric vehicles. *Results in Engineering*. 2024. Vol. 23. Article ID: 103598. doi:10.1016/j.rineng.2024.103598.

References (transliterated)

1. Islam M. T., Rahman M. M., Choudhury T. A., Mahmud M. A. P., Oo A. M. T. Energy storage technology and its impact in electric vehicle: Current progress and future outlook. *Next Energy*, 2025, Vol. 2, no. 1, pp. 100202, doi:10.1016/j.nxener.2024.100202.
2. Myrutenko P. P., Listovshchik L. K. Energy storage devices: main types and prospects of use. *Power Engineering: Economics, Technology, Ecology*, 2022, No. 4, pp. 107–116, doi: 10.20535/1813-5420.4.2022.273433.
3. Saxena S., Pal A., Chowdhury B., et al. A comprehensive review of energy storage technology development and application for pure electric vehicles. *Journal of Energy Storage*, 2024, Vol. 75, pp. 111159, doi:10.1016/j.est.2024.111159.
4. Omelianenko H. V. Energy storage devices as an effective means of promising energy-saving technologies. *Information Technologies: Science, Engineering, Technology, Education, Health*, 2021, Part 2, p. 87.
5. Kumar A., Kumar R., Ali H. M., et al. Review of battery-supercapacitor hybrid energy storage systems for electric vehicles. *Results in Engineering*, 2024, Vol. 23, pp. 103598, doi:10.1016/j.rineng.2024.103598.
6. Noshin M., Uddin M. A., Sultana R. Battery-Supercapacitor Energy Storage Systems for Electrical Vehicles: A Review. *Energies*, 2022, Vol. 15, no. 15, pp. 5683, doi:10.3390/en15155683.
7. Hnatov A. V., Arhun Shch. V., Sokhin P. A., Ulyanets O. A. Study of autonomous power supply for electric vehicles and their charging infrastructure. *Bulletin of Kharkiv National Automobile and Highway University*, 2024, Issue 104, pp. 130–139.

8. Kumar P., Raj A., Singh R. K., et al. Solar cell-integrated energy storage devices for electric vehicles: a breakthrough in the green renewable energy. *Ionics*, 2022, Vol. 28, pp. 1095–1112, doi:10.1007/s11581-022-04700-6.
9. Verma S., Mishra S. A comprehensive review on energy storage in hybrid electric vehicle. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 2021, Vol. 8, Issue 5, pp. 621–637, doi:10.1016/j.jtte.2021.09.001.
10. Shpak O., Babyuk D. V. Study of the technology of using solar panels for charging electric vehicles. *Computer Science and Network*, 2023, Issue 5, No. 1, pp. 160–171, doi: 10.23939/csn2023.01.160.
11. Xu H., Shen M. The control of lithium-ion batteries and supercapacitors in hybrid energy storage systems for electric vehicles: A review. *International Journal of Energy Research*, 2021, Vol. 45, Issue 15, pp. 20524–20544, doi:10.1002/er.7150.
12. Yovchenko A. V. Study of the potential of Ukraine's power system to support the operation of the electric vehicle fleet. *Bulletin of Kherson National Technical University*, 2024, No. 2, pp. 18–24, doi: 10.35546/kntu2078-4481.2024.2.3.
13. Movin Raja J., Gowthamraj R., Shyam Kumar K., Sebastian Vindro Jude P. Ultracapacitor based Hybrid Energy Storage System for Hybrid and Electric Vehicles. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 2019, Vol. 8, Issue 3, Article ID: IJERTV8IS030252, doi:10.17577/IJERTV8IS030252.
14. Gómez-Romero P., et al. Hybrid energy storage: the merging of battery and supercapacitor chemistries. *Chemical Society Reviews*, 2015, Vol. 44, Issue 7, pp. 2523–2534, doi:10.1039/C4CS00266K.
15. Kumar A., Kumar R., Ali H. M., et al. Review of battery-supercapacitor hybrid energy storage systems for electric vehicles. *Results in Engineering*, 2024, Vol. 23, Article ID: 103598, doi:10.1016/j.rineng.2024.103598.

Відомості про авторів (About authors)

Крилов Денис Сергійович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри промислової і біомедичної електроніки; м Харків, Україна; <https://orcid.org/0000-0002-1025-3939>; e-mail: denis.krylov@khpi.edu.ua.

Denis Krylov – Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor, Department of industrial and biomedical electronics, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; <https://orcid.org/0000-0002-1025-3939>; e-mail: denis.krylov@khpi.edu.ua.

Холод Ольга Ігорівна – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри промислової і біомедичної електроніки; м Харків, Україна; <https://orcid.org/0000-0002-0036-0239>; e-mail: Olha.Kholod@khpi.edu.ua.

Olga Kholod – Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor, Department of industrial and biomedical electronics, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; <https://orcid.org/0000-0002-0036-0239>; Olha.Kholod@khpi.edu.ua.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Крилов Д. С., Холод О. І. Перспективні системи акумулювання енергії для електромобілів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2025. № 2 (24). С. 22-28. doi:10.20998/2413-4295.2025.02.03.

Please cite this article as:

Krylov D., Kholod O. Prospective energy storage systems for electric vehicles. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2025, no. 2(24), pp. 22-28, doi:10.20998/2413-4295.2025.02.03.

*Надійшла (received) 18.04.2025
Прийнята (accepted) 07.06.2025*