

**Червінський Л. С.**

д.т.н., професор

Лисіков О. Ю.

аспірант

**Національний
університет біоресурсів
і природокористування****Chervinskyi Y.**Doctor of Technical Sciences,
Professor**Lysikov O.**

PhD student

**National University of Life
and Environmental
Sciences of Ukraine****УДК 629.341****DOI: 10.37128/2306-8744-2026-1-13****РОЗВИТОК ЛІТІЄВИХ СИСТЕМ
НАКОПИЧЕННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ
ДЛЯ ДВИГУНІВ ТА
ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК**

У статті розглянуто етапи становлення, сучасний стан і напрями розвитку літійових систем накопичення електроенергії як складових двигунів, енергетичних установок, технологічних машин і транспортних засобів. Проаналізовано передумови широкого впровадження літійових акумуляторних батарей у машинобудуванні, що зумовлені підвищенням вимог до енергоефективності, надійності, динамічних характеристик і експлуатаційної гнучкості електроприводів та енергетичних систем. Обґрунтовано основні експлуатаційні параметри літійових акумуляторів, зокрема питому енергоемність, питому потужність, циклічну довговічність, допустимі температурні режими роботи, швидкість заряджання та показники пожежо- і вибухобезпеки, які визначають ефективність їх застосування в двигунах та енергетичних установках різного призначення. Наведено порівняльний аналіз основних типів літійових акумуляторів за ключовими технічними характеристиками та сферами використання в транспортних засобах, технологічному обладнанні й автономних енергетичних установках. Показано вплив параметрів систем накопичення електроенергії на режими роботи електродвигунів, процеси рекуперації енергії, стабілізацію навантажень та підвищення загального коефіцієнта корисної дії машинобудівних систем. Встановлено, що перспективи подальшого розвитку літійових систем накопичення електроенергії пов'язані з підвищенням енергетичних характеристик, рівня безпеки, довговічності та екологічності. Особливу увагу приділено аналізу перспективних технологічних рішень, зокрема твердотільних акумуляторних систем, катодних матеріалів зі знизеним вмістом кобальту, кремнієвих анодів і технологій швидкого заряджання. Підтверджено, що подальше вдосконалення літійових акумуляторів є одним із ключових напрямів розвитку сучасних двигунів та енергетичних установок машинобудівного призначення.

Ключові слова: енергетичні установки; літій-іонні акумулятори; електропривод; історія розвитку; деградація акумуляторів; енергетичні показники; SEI-шар; твердотільні батареї; електротранспорт.

РОЗВИТОК ЛІТІЄВИХ СИСТЕМ
НАКОПИЧЕННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ДЛЯ
ДВИГУНІВ ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ
УСТАНОВОК © 2026 by Червінський Л.С.,
Лисіков О.Ю. is licensed under CC BY 4.0

Постановка проблеми Сучасний розвиток машинобудування, зокрема двигунів та енергетичних установок, технологічних машин і транспортних засобів, супроводжується зростанням вимог до енергоефективності, надійності та стабільності режимів роботи. Широке впровадження електроприводів, гібридних енергетичних установок і електротранспорту

зумовлює необхідність використання ефективних систем накопичення електроенергії, здатних забезпечувати роботу двигунів у змінних і пікових режимах навантаження, а також реалізацію процесів рекуперації енергії. Літій-іонні акумуляторні батареї на сьогодні є найбільш поширеним типом накопичувачів електроенергії в



машинобудівних системах завдяки високим енергетичним показникам і відносно малій масі.

Водночас експлуатація літєвих систем накопичення електроенергії в складі двигунів та енергетичних установок супроводжується низкою проблем, пов'язаних із деградацією електрохімічних процесів, обмеженою циклічною довговічністю, зниженням енергетичних характеристик у процесі тривалої роботи та підвищеними вимогами до безпеки. Формування та розвиток міжфазного шару SEI, температурні перевантаження, високі струмові навантаження і режими швидкого заряджання суттєво впливають на стабільність роботи акумуляторів і, як наслідок, на надійність електроприводів та енергетичних установок машинобудівного призначення.

Крім того, зростання потужності та динамічних навантажень сучасних технологічних машин і транспортних засобів потребує подальшого вдосконалення літєвих систем накопичення електроенергії з точки зору підвищення питомої енергоємності, безпеки та довговічності за збереження прийнятних масо-габаритних показників. У зв'язку з цим актуальною науково-технічною проблемою є аналіз напрямів розвитку літєвих систем накопичення електроенергії та обґрунтування перспективних технічних рішень для їх ефективного використання в двигунах, енергетичних установках і машинобудівному обладнанні.

У зв'язку з глобальною енергетичною кризою та забрудненням навколишнього середовища існує нагальна потреба переходу до безпечніших, чистіших і більш ефективних відновлюваних джерел енергії, що, у свою чергу, вимагає впровадження ефективних рішень для зберігання енергії. Розвиток сучасної енергетики, електротранспорту, мобільної електроніки та систем накопичення електроенергії неможливий без акумуляторних технологій. Серед них провідне місце займають акумулятори на основі літію, які за останні десятиліття стали ключовим елементом енергетичної інфраструктури. Висока питома енергія, тривалий термін служби, можливість швидкої зарядки та широкий температурний діапазон роботи зробили літєві акумулятори стандартом у багатьох галузях

Аналіз останніх досліджень У наукових дослідженнях останніх років літєві системи накопичення електроенергії розглядаються як ключовий елемент сучасних двигунів, енергетичних установок, технологічних машин і транспортних засобів. Основна увага приділяється підвищенню енергетичних показників акумуляторних батарей, їх ресурсу та надійності в умовах змінних і пікових навантажень, характерних для машинобудівних систем. Встановлено, що ефективність використання літій-іонних акумуляторів у складі електроприводів та енергетичних установок значною мірою

визначається стабільністю їх електрохімічних параметрів і здатністю працювати в широкому діапазоні температур і струмових навантажень [1, 2].

Значна кількість робіт присвячена проблемам деградації літєвих акумуляторів у процесі експлуатації. Дослідники відзначають, що циклічне та календарне старіння зумовлене комплексом факторів, серед яких домінуючу роль відіграють формування та еволюція міжфазного шару SEI, побічні реакції електроліту, а також механічні та термічні напруження електродів. Показано, що інтенсивне зростання SEI-шару під дією високих струмів, підвищених температур і режимів швидкого заряджання призводить до зростання внутрішнього опору акумуляторів і зниження їх енергетичних характеристик, що негативно впливає на режими роботи електродвигунів та енергетичних установок [3, 4].

Окремий напрям досліджень пов'язаний із проблемою швидкого заряджання літій-іонних акумуляторів, яка є критично важливою для електротранспорту та мобільних енергетичних установок. Встановлено, що скорочення часу заряджання супроводжується зростанням теплових навантажень і прискоренням деградаційних процесів, що вимагає застосування ефективних систем термокерування та інтелектуальних алгоритмів керування зарядом. У сучасних роботах значна увага приділяється розробці прогнозних і модельно-орієнтованих стратегій керування акумуляторними батареями, які дозволяють підвищити їх ресурс і безпеку при експлуатації в машинобудівних системах [5, 6].

Поряд із удосконаленням режимів експлуатації активно досліджуються нові матеріали електродів. Зокрема, перспективними вважаються катодні матеріали зі зниженим вмістом кобальту, що забезпечують зменшення вартості та підвищення екологічної безпеки, а також кремнієві аноди, які дозволяють істотно підвищити питому енергоємність акумуляторів. Водночас підкреслюється, що використання кремнієвих анодів супроводжується значними об'ємними деформаціями, які спричиняють інтенсивне утворення SEI-шару та зниження довговічності, що обмежує їх широке впровадження в двигунах і транспортних засобах без додаткових конструктивних рішень [7, 8].

Особливе місце в сучасних дослідженнях займають твердотільні літєві акумуляторні системи, які розглядаються як перспективний напрям розвитку накопичувачів електроенергії для машинобудування. За результатами оглядових робіт встановлено, що твердотільні батареї потенційно забезпечують підвищений рівень безпеки та енергоємності, однак їх практичне застосування стримується проблемами міжфазних контактів, високого інтерфейсного опору та обмежень щодо швидкого заряджання.

Це зумовлює необхідність подальших досліджень, спрямованих на адаптацію таких систем до реальних умов експлуатації двигунів, енергетичних установок і технологічного обладнання [9, 10].

Аналіз сучасних наукових публікацій свідчить, що, незважаючи на значний прогрес у розвитку літійових систем накопичення електроенергії, залишається актуальною проблема узгодження матеріалознавчих і конструктивних рішень із реальними режимами роботи машинобудівних систем. Це обумовлює необхідність комплексного підходу до розвитку літійових акумуляторів з урахуванням вимог двигунів, енергетичних установок, технологічних машин і транспортних засобів.

Мета роботи є огляд історії розвитку літійових акумуляторів, аналіз їх сучасного стану та визначення перспектив майбутнього вдосконалення.

Виклад основного матеріалу. Літій як хімічний елемент привернув увагу дослідників завдяки найнижчій атомній масі серед металів та високому електрохімічному потенціалу. Це давало можливість отримати значно більшу енергетичну ємність у порівнянні з традиційними системами, такими як свинцево-кислотні чи нікель-кадмієві акумулятори.

Акумулятор є складним електрохімічним пристроєм, що складається з кількох тісно взаємопов'язаних компонентів для накопичення енергії. Основними його складовими є катод, анод, електроліт, сепаратор, як показано на рисунку 1 [1]. У цій електрохімічній системі електроліт розділяє анод і катод. Ці два електроди накопичують електричну енергію та перетворюють її на хімічну. У перебігу подальших хімічних реакцій задіяні як електронні, так і йонні складові. Поки електронна складова рухається зовнішнім електричним колом, електроліт забезпечує полегшений перенос йонної складової всередині елемента. Важливо, що в перезаряджуваних акумуляторах цей хімічний процес є зворотним, що дає змогу періодично перетворювати хімічну енергію на електричну.

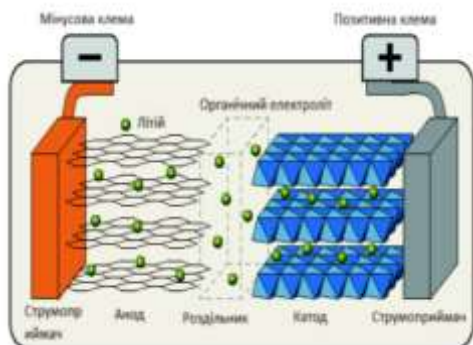


Рис.1. Структурна схема будови і процесів в літійових акумуляторах [1]

Перші дослідження було розпочато ще в 1958–1960-ті — вчені почали працювати з літійом як анодом у первинних (нерозряджуваних) батареях. У 1970-х М. Stanley Whittingham, (Еххон) створює перші літійові акумулятори з можливістю перезаряду, використовуючи в якості аноду металевий літій, катодом служив дисульфід титану (TiS_2). В ході досліджень було встановлено, що на поверхні літійового аноду під час експлуатації (в процесах повторюваних зарядів-розрядів) формувалися дендритні нарости, що в процесі наростання проколювали сепаратор, виникало коротке замикання між електродами і при взаємодії з атмосферним киснем спричиняло загоряння батареї. (Рис.2). Тобто були випадки, коли батареї вибухали, були небезпечні для масового використання.

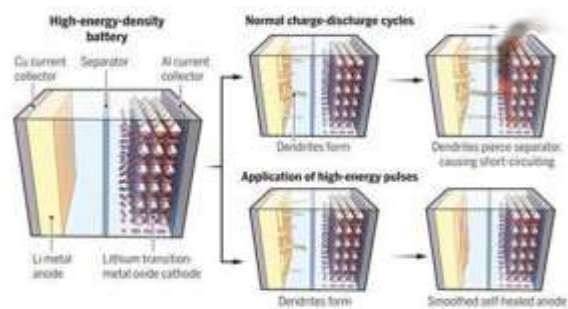


Рис.2. Структурна схема будови літій-іонної батареї та процесу формування пошкоджуючих анодних дендритів в процесі її старіння [3].

Упродовж останніх двох десятиліть графіт залишається найпоширенішим анодним матеріалом у літій-іонних системах накопичення електроенергії, що застосовуються в складі двигунів, енергетичних установок і тягових електроприводів транспортних засобів. Основними перевагами графіту є висока експлуатаційна безпека, хімічна стабільність та екологічна прийнятність, однак його відносно низька питома ємність, що становить близько $372 \text{ mA} \cdot \text{год} \cdot \text{г}^{-1}$, обмежує можливості підвищення енергетичної щільності акумуляторних батарей, що безпосередньо впливає на масо-габаритні показники енергетичних установок і транспортних засобів [1,2].

Ключовим етапом розвитку літійових систем накопичення електроенергії стало впровадження катодного матеріалу на основі оксиду кобальту $LiCoO_2$, що забезпечило підвищення робочої напруги акумуляторного елемента до рівня близько 4 В та стабільність електрохімічних процесів у процесі експлуатації. Це створило передумови для використання літій-іонних акумуляторів у складі двигунів і енергетичних



установок із підвищеними вимогами до надійності та питомої потужності [3].

Подальший розвиток літій-іонної технології питомі характеристики: 250-400 Вт-год/л і 100-пов'язаний із доведенням можливості інтеркаляції 200 Вт-год/кг, внутрішній опір від 150 до 250 мОм іонів літію в графіт, що дозволило відмовитися від і робочу напруга (3.3-3.7) В. Ємність літій-іонних використання металевого літію та суттєво акумуляторів може становити сотні ампер-підвищити безпеку акумуляторів. Інтеркаляційний годин, а діапазон робочих температур від -20 до механізм накопичення енергії забезпечив +60 градусів Цельсія, причому існують моделі, стабільну роботу батарей у режимах здатні працювати навіть при -40 градусах [4,7]. багаторазових циклів заряджання та розряджання, характерних для електроприводів транспортних засобів і енергетичних установок з рекуперацією енергії [2,4].

Починаючи з 1991 року, літій-іонні акумулятори набули широкого промислового впровадження завдяки поєднанню високої енергоємності, відсутності «ефекту пам'яті», зменшених масо-габаритних показників та зміненого рівня безпеки. Разом із тим експлуатація таких систем у складі двигунів і транспортних енергетичних установок виявила критичну залежність надійності від теплових режимів, струмових навантажень і дотримання граничних параметрів заряджання та розряджання [5].

Розвиток електротранспорту зумовив поширення літій-залізо-фосфатних акумуляторів із катодом LiFePO_4 , які характеризуються підвищеною термічною стабільністю, довговічністю та безпечністю в умовах змінних навантажень. Типові експлуатаційні параметри таких батарей — енергетична щільність 90–130 Вт-год/кг, напруга 2,0–3,65 В та ресурс до 2000–3000 циклів — визначили їх широке застосування в електромобілях і мобільних енергетичних установках [4,12].

Сучасні літій-іонні системи накопичення електроенергії забезпечують високі питомі показники (180–300 Вт-год/кг), тривалий термін служби та низький рівень саморозряду, що дозволяє ефективно інтегрувати їх у двигуни та енергетичні установки різного призначення. Робочі діапазони напруги 3,3–3,7 В і температур від -20 до +60 °С забезпечують можливість експлуатації акумуляторів у транспортних засобах та енергетичних системах у широкому спектрі кліматичних і навантажувальних умов [7].

Ефективність комерціалізації літій-іонних акумуляторів відкрила нову еру в енергетичних установках. Вони швидко витіснили інші типи акумуляторних накопичувачів електроенергії завдяки кращим характеристикам:

- висока питома енергія (180–300 Вт-год/кг),
- відносно невелика маса та габарити,
- відсутність пам'яті ефекту,
- тривалий термін служби (1000–3000 циклів),

- низький саморозряд.

Сучасні *Li-ion*-акумулятори мають високі

Першочергово літій-іонні акумулятори знайшли застосування у портативній електроніці: мобільних телефонах, ноутбуках, камерах. Водночас активно вівся пошук оптимальних матеріалів для катодів і анодів.

Найбільш поширеними стали батареї з використанням наступних катодних матеріалів з відповідними особливостями:

LiCoO_2 – мають ефективні енергетичні показники, але високу вартість та значну токсичність,

LiMn_2O_4 – більш безпечні в експлуатації, мають нижчу ціну, але менша довговічність,

LiFePO_4 – логотатньо енергоємні, найбільш стабільні в експлуатації, безпечні та довговічні,

NMC та NCA системи – збалансоване співвідношення енергії, безпеки та ресурсу.

Для запобігання руйнуванню акумуляторів від неправильної експлуатації в більшості батарей є пристрої захисту, що перешкоджають перевищенню заряду вище порогового значення. Саме даний тип акумуляторів використовується в електромобілях *Tesla Model S, Nissan Leaf та Chevy Bolt*. В даних транспортних засобах акумулятори мають також механічний вимикач, що спрацьовує при збільшенні внутрішньо корпусного тиску при швидкому розряді батарей акумулятора.

Подальший розвиток наукових досліджень у перші десятиліття XXI століття зумовив появу літій-полімерних (Li-Po) акумуляторів, ключовою конструктивною особливістю яких стало використання гелеподібного або твердого полімерного електроліту замість традиційного рідкого. Застосування полімерного електроліту дозволило суттєво зменшити масу акумуляторних батарей, розширити можливості їх компоновки та створювати тонкі, гнучкі й нестандартні за формою енергетичні модулі. Такі властивості є особливо важливими для інтеграції систем накопичення електроенергії в обмежені за габаритами простори двигунів, енергетичних установок і транспортних засобів (G11.02, G11.05).

Крім зменшення масо-габаритних показників, використання полімерного електроліту сприяло підвищенню рівня безпеки Li-Po акумуляторів у певних експлуатаційних режимах, зокрема за умов вібраційних і



механічних навантажень, характерних для рухомих машин і транспортних платформ. Зниження ризику витікання електроліту та можливість ефективнішого тепловідведення підвищують стабільність роботи акумуляторних систем у складі електроприводів і автономних енергетичних установок. Унаслідок цього Li-Po акумулятори набули широкого застосування в

безпілотних літальних апаратах, мобільних транспортних засобах, смартфонах і високопродуктивній портативній техніці, де визначальними є компактність, мала маса та надійність функціонування систем накопичення електроенергії.

Порівняльні показники основних характеристики приведено в таблиці 1 нижче.

Таблиця 1.

Основні типи літєвих систем накопичення електроенергії та сфери їх застосування

Тип літєвого акумулятора	Катодний матеріал	Питома енергія, Вт·год/кг	Робоча напруга, В	Ресурс, циклів	Основні переваги	Основні недоліки	Основні сфери застосування
LiCoO ₂ (LCO)	LiCoO ₂	150–200	3,6–4,0	800–1200	Висока енергоємність, стабільна напруга	Висока вартість, токсичність, підвищені вимоги до безпеки	Портативна електроніка, допоміжні енергетичні установки
LiMn ₂ O ₄ (LMO)	LiMn ₂ O ₄	100–150	3,7–4,0	1000–1500	Висока безпека, низька вартість	Менша довговічність	Транспортні системи з помірними навантаженнями
LiFePO ₄ (LFP)	LiFePO ₄	90–130	2,0–3,65	2000–3000	Висока термічна стабільність, довговічність, безпека	Менша енергоємність	Електромобілі, енергетичні установки, тягові приводи
NMC	Li(NiMnCo)O ₂	150–250	3,6–3,8	1500–2500	Збалансовані енергія, ресурс і безпека	Чутливість до терморегимів	Електротранспорт, гібридні енергетичні установки
NCA	Li(NiCoAl)O ₂	200–300	3,6–3,8	1500–2500	Дуже висока енергоємність	Високі вимоги до системи керування	Тягові батареї високої потужності
Li-Po	Різні (полімерний електроліт)	130–250	3,7	800–1500	Мала маса, гнучкість конструкції	Менша механічна міцність	Мобільні енергетичні системи, дрони
Твердотільні Li	Різні	250–400*	3,5–4,0	>3000*	Висока безпека, потенційно велика енергоємність	Обмежена комерційна доступність	Перспективні енергетичні установки і транспорт

Роки успішної та стабільної експлуатації літій-іонних акумуляторних батарей у мобільних пристроях, електротранспорті та гібридних енергетичних установках підтвердили їх високу технологічну перспективність і доцільність подальшого науково-технічного розвитку. Накопичений досвід використання таких систем електроживлення засвідчив їх здатність забезпечувати надійну роботу електроприводів, двигунів і енергетичних установок у широкому діапазоні навантажень, а також у змінних режимах експлуатації, характерних для транспортних засобів і мобільних машин. Це обумовило необхідність поглиблених досліджень, спрямованих на вдосконалення конструкції акумуляторів, підвищення їх енергетичних характеристик, ресурсу та безпеки.

На сучасному етапі розвитку активно досліджуються і впроваджуються високотемпературні, високопотужні та спеціалізовані літєві системи накопичення електроенергії, призначені для роботи в умовах

підвищених теплових, механічних і електричних навантажень. Такі системи знаходять застосування в космічній техніці, оборонній промисловості, авіації та важких промислових енергетичних установках, де критичними є стабільність параметрів, надійність і здатність до тривалої роботи без відмов. Для машинобудівних застосувань особливого значення набувають рішення, орієнтовані на підвищення питомої потужності акумуляторів, їх термічної стійкості та сумісності з сучасними системами керування електроприводами і двигунами.

Масове впровадження літій-іонних акумуляторних батарей у різних галузях людської діяльності, зокрема в транспорті, промисловості та енергетичних установках, стимулює безперервне вдосконалення технологій їх виробництва. Це супроводжується зростанням рівня автоматизації виробничих процесів, стандартизацією конструктивних рішень і масштабуванням випуску, що в підсумку призводить до зниження собівартості

акумуляторів і розширення сфер їх практичного застосування. Динаміка здешевлення та зростання обсягів виробництва літій-іонних батарей підтверджується відповідними статистичними та графічними залежностями, зокрема графічною кривою, наведеною на рис. 3, яка ілюструє тенденції розвитку ринку та технологій систем накопичення електроенергії.

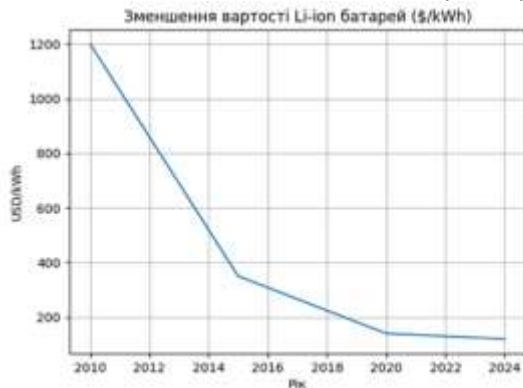


Рис.3. Тенденції щодо здешевлення літій-іонних батарей по рокам[22]

Проблеми та перспективи сучасних літій-іонних технологій в енергетичних установках

Попри широке застосування в різних галузях діяльності людей і величезні переваги на традиційними акумуляторами електричної енергії, літійові акумулятори мають достатньо довгу низку проблем, які потребують швидкого вирішення, зокрема:

На аноді традиційно застосовується графіт, однак дослідники активно працюють над використанням кремнію, літій-титанових структур та композитів (коверсійних сполук) для підвищення ємності. Конверсійні сполуки перехідних металів (СТАМs) набули останнім часом значної уваги як надзвичайно перспективні анодні матеріали для літій-іонних акумуляторів нового покоління завдяки дешевому хімічному складу та високій теоретичній питомій ємності [102–105]. До СТАМs належать оксиди, сульфіді, фосфіді, нітриди, фториди та селеніді перехідних металів. Природна поширеність таких матеріалів забезпечує їм перевагу над сплавними анодами, оскільки потенційно дозволяє знизити вартість виробництва.

Пірит (FeS_2), магнетит (Fe_3O_4) і піролюзит (MnO_2) є показовими прикладами таких матеріалів. Крім того, порівняно з графітовими анодами, СТАМs демонструють *знижений потенціал для інтеркаляції літію*, що зменшує ймовірність утворення літійових дендритів і підвищує безпеку роботи літій-іонних акумуляторів (LIBs) [10]. Попри ці переваги, СТАМs також мають суттєві недоліки, зокрема низьку іонну та електронну провідність,

безперервну деградацію електроліту, а також відносно велике об'ємне розширення (менше ніж 200%) [11].

Деградація і старіння. Основою роботи літійових акумуляторів є інтеркаляція літію — це фізико-хімічний процес проникнення (вбудовування) іонів літію в кристалічну структуру твердого матеріалу без суттєвого руйнування його решітки. Цей процес є основою роботи літій-іонних акумуляторів і визначає: ємність акумулятора, швидкість заряджання, термін служби, безпеку роботи і, в цілому, стійкість до деградації. Старіння проявляється в зменшенні ємності з часом, утворення побічних шарів, структурні зміни електродів.

Сучасні дослідження показують перспективність заміни рідкого електроліту твердим. Твердий електроліт замість рідкого підвищує безпеку, зменшує ризик займання та потенційно збільшує енергетичну щільність. Такі батареї можуть забезпечити на 50–100% більше енергії при тих самих габаритах.

Впровадження покращених електролітів, оптимізованої архітектури електродів та вдосконалених систем керування (BMS) дозволяє: збільшити ресурс до 5–10 тисяч циклів, забезпечити ультрашвидке заряджання без деградації

Перегрів, тепловий розгін, можливість займання при механічних ушкодженнях. Підтримання температури цих акумуляторів у діапазоні $285\text{--}310\text{ K}$ є критично важливим для забезпечення оптимальних експлуатаційних характеристик. Це зумовлює необхідність застосування ефективних систем термічного керування акумуляторами (BTMS), використання негорючих електролітів, використання самовідновлюваних матеріалів на основі нанотехнологій та розвитку і впровадження систем поточного моніторингу стану батарей (BMS) в процесі експлуатації.

Основним завданням системи керування батареєю (BMS) є забезпечення оптимального управління енергією батареї під час руху та під час операцій заряджання/розряджання [12]. Система керування роботою батарей акумулятора надає можливість уникати неправильного використання батареї під час її роботи; це досягається шляхом моніторингу та контролю параметрів акумуляторної батареї EV під час підключення, а також під час водіння [13].

Питання утилізації та вторинної переробки акумуляторів, які вичерпали експлуатаційний ресурс вимагає створення закритого циклу використання літію та переробки батарей і є критично важливим для глобальної енергетики та екологічної безпеки людства.

Подальший розвиток та практичне застосування результатів роботи



Отримані в роботі результати та узагальнення можуть слугувати науково-технічною основою для подальших досліджень і прикладних розробок у галузі двигунів та енергетичних установок машинобудівного призначення, а також транспортних засобів з електричним і гібридним приводом. Подальший розвиток досліджень доцільно спрямувати на поглиблений аналіз взаємодії літєвих систем накопичення електроенергії з електродвигунами в умовах реальних експлуатаційних режимів, зокрема під час роботи в пікових навантаженнях, циклах «пуск–гальмування» та в процесах рекуперації енергії [1, 2].

Перспективним напрямом подальших робіт є розробка та оптимізація конструктивних рішень акумуляторних модулів і батарейних блоків з урахуванням вимог до масо-габаритних показників, теплових режимів і вібраційної стійкості, характерних для енергетичних установок і транспортних засобів. Особливу увагу доцільно приділити інтеграції літєвих акумуляторів із системами термічного керування та інтелектуальними системами керування батареями, що дозволяє підвищити ресурс, безпеку та надійність роботи електроприводів і енергетичних систем упродовж усього життєвого циклу [3–5].

Практичне застосування результатів роботи можливе під час проектування та модернізації електроприводів, автономних і гібридних енергетичних установок, а також електротранспортних засобів різного призначення. Наведені в статті порівняльні характеристики літєвих систем накопичення електроенергії можуть бути використані інженерами-проектувальниками для обґрунтованого вибору типу акумуляторів залежно від вимог до питомої енергоємності, потужності, ресурсу та безпеки конкретної установки або транспортного засобу. Окремі положення роботи можуть застосовуватися при розробці технічних завдань, методик розрахунку та оцінювання ефективності акумуляторних систем у складі машинобудівних виробів [6–8].

Результати дослідження також доцільно використовувати в освітньому процесі під час викладання дисциплін, пов'язаних з електроприводом, енергетичними установками та електротранспортом, а також у науково-дослідних роботах, спрямованих на створення акумуляторів нового покоління, зокрема твердотільних літєвих систем і високопотужних батарей для спеціалізованих застосувань. У довгостроковій перспективі впровадження розглянутих у роботі технічних рішень сприятиме підвищенню енергоефективності, надійності та екологічної безпеки сучасних двигунів і енергетичних установок [9–12].

Висновки. Акумулятори на основі літію пройшли еволюційний шлях від лабораторних досліджень до однієї з ключових технологій сучасних електротехнічних і машинобудівних систем. На сьогодні вони є базовим елементом мобільної електроніки, електротранспорту, автономних і гібридних енергетичних установок, а також систем накопичення електроенергії різного призначення.

У ході роботи встановлено, що літєві системи накопичення електроенергії відіграють визначальну роль у забезпеченні енергоефективності, надійності та експлуатаційної гнучкості сучасних двигунів і енергетичних установок. Висока питома енергоємність, прийнятні масо-габаритні показники та здатність працювати в змінних і пікових режимах навантаження роблять літій-іонні акумулятори найбільш доцільним типом накопичувачів для електроприводів і транспортних систем.

Показано, що ефективність і довговічність літєвих акумуляторних батарей значною мірою визначаються деградаційними процесами, зокрема формуванням міжфазного шару SEI, впливом високих струмових навантажень, температурних перевантажень і режимів швидкого заряджання. Ці фактори зумовлюють необхідність комплексного підходу до проектування та експлуатації акумуляторних систем з урахуванням теплових режимів, алгоритмів керування та вимог безпеки.

Проведений аналіз основних типів літєвих акумуляторів засвідчив, що вибір конкретної хімічної системи повинен базуватися на компромісі між енергоємністю, ресурсом, безпечністю та вартістю, а також відповідати умовам роботи конкретної енергетичної установки або транспортного засобу. Застосування сучасних систем керування батареями та термічного менеджменту дозволяє суттєво підвищити надійність і ресурс літєвих систем накопичення електроенергії.

Незважаючи на наявні проблеми, пов'язані з вартістю, безпекою та ресурсними обмеженнями, інтенсивні наукові дослідження й інженерні розробки забезпечують безперервний розвиток літєвих акумуляторних технологій. Очікується подальше зростання енергетичної щільності, підвищення рівня безпеки, збільшення терміну служби та зниження собівартості виробництва акумуляторів.

У перспективі літєві системи накопичення електроенергії можуть поєднуватися з іншими типами накопичувачів, формуючи гнучкі та ефективні енергетичні екосистеми. Незважаючи на наявні виклики, акумулятори на основі літію демонструють значний потенціал подальшого вдосконалення та залишатимуться фундаментальною



технологією електротехнічних і машинобудівних систем акумулювання електричної енергії XXI століття.

Список використаних джерел

- Schill, W.-P., & Zerrahn, A. (2018). Long-run power storage requirements for high shares of renewables: Results and sensitivities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 83, 156–171. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.205>.
- Augustine, Chad, and Nate Blair. Energy Storage Futures Study: Storage Technology Modeling Input Data Report. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-5700-78694. URL: <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/78694.pdf>.
- Сараєва І.Г. Аналіз експлуатаційних характеристик літій-іонних акумуляторів у транспортних системах. *Вісник ХНАДУ*. 2019. Вип. 86. С. 112–118.
- Бурик М.П., Лободзінський В.В. Дослідження деградації LiFePO₄ акумуляторів у тягових електроприводах. *Вісник Вінницького національного технічного університету*. 2021. № 4. С. 45–52.
- Олефір В.М. Системи накопичення енергії для відновлюваної та транспортної енергетики. *Відновлювана енергетика*. 2018. № 3. С. 26–34.
- Кривенко М.О. Вплив режимів заряджання на ресурс літій-іонних батарей. *Електротехніка і електромеханіка*. 2020. № 6. С. 38–44.
- Поляков О.І., Шевченко Д.М. Безпечність експлуатації літій-іонних акумуляторів у системах резервного живлення. *Науковий вісник НГУ*. 2017. № 5. С. 97–103.
- Романюк В.А. Перспективи твердотільних літєвих акумуляторів для енергетичних установок. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. 2022. № 915. С. 54–61.
- Кузнецов В.Г. Системи керування батареями в електротранспорті. *Вісник КПІ. Серія Електротехніка*. 2019. № 2. С. 21–27.
- Goodenough J.B., Park K.S. The Li-ion rechargeable battery: A perspective. *Journal of the American Chemical Society*. 2013. DOI: 10.1021/ja3091438.
- Yoshino A. Development of the Lithium-Ion Battery and Recent Technological. *Trends Chemical Record*. 2018. DOI: 10.1002/tcr.201700028.
- Tarascon J.M., Armand M. Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries. *Nature*. 2001. DOI: 10.1038/35104644.
- Nitta N., Wu F., Lee J., Yushin G. Li-ion battery materials: present and future. *Materials Today*. 2015. DOI: 10.1016/j.mattod.2014.10.040.
- Lee M., Lee S., Oh P., Kim Y., Cho J. High performance LiMn₂O₄ cathode materials grown with epitaxial layered nanostructure for Li-ion batteries. *Nano Letters*. 2014. DOI: 10.1021/nl404596p.
- Horiba T. Lithium-Ion Battery Systems. *Proceedings of the IEEE*. 2014. Vol. 102. No. 6. С. 939–950. DOI: 10.1109/JPROC.2014.2319832.
- Amin A., Ismail K., Hapid A. Implementation of a LiFePO₄ battery charger for cell balancing application. *Journal of Mechatronics, Electrical Power, and Vehicular Technology*. 2018. Vol. 9. No. 2. С. 81–88. DOI: 10.14203/j.mev.2018.v9.81-88.
- Shen W., Vo T.T., Kapoor A. Charging algorithms of lithium-ion batteries: An overview. *Proceedings of the 7th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*. 2012. С. 1567–1572. DOI: 10.1109/ICIEA.2012.6360973.
- Kai W., Xiao F., Jinbo P., Jun R., Chongxiong D., Liwei L. State of charge estimation of lithium-ion battery based on adaptive square root Unscented Kalman Filter. *International Journal of Electrochemical Science*. 2020. Vol. 15. No. 9. С. 9499–9516. DOI: 10.20964/2020.09.84.
- Wu Q., Zhang B., Lu Y. Progress and perspective of high-voltage lithium cobalt oxide in lithium-ion batteries. *Journal of Energy Chemistry*. 2022. Vol. 74. С. 283–308. DOI: 10.1016/j.jechem.2022.06.015.
- Camargos P.H., dos Santos P.H., dos Santos I.R., Ribeiro G.S., Caetano R.E. Perspectives on Li-ion battery categories for electric vehicle applications. *International Journal of Energy Research*. 2022. Vol. 46. С. 19258–19268. DOI: 10.1002/er.8393.
- Tahir M.U., Sangwongwanich A., Stroe D., Blaabjerg F. Optimized Multi-Stage Constant Current Charging Strategy for Li-ion Batteries. *Proceedings of the 25th European Conference on Power Electronics and Applications*. 2023. С. 1–9. DOI: 10.23919/EPE23ECCEEurope.2023.10123456.
- Смирнов О.П., Борисенко А.О., Марченко А.В. Діагностика високовольтної акумуляторної батареї електромобіля Nissan Leaf. *Vehicle and Electronics. Innovative Technologies*. 2019. Vol. 16. С. 19–25. DOI: 10.30977/VEIT.2019.16.0.19.
- Plett G.L. Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs. Part 1. Background. *Journal of Power Sources*. 2004. Vol. 134. С. 252–261. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2004.02.031.
- Zhang S.S. The effect of the charging protocol on the cycle life of a Li-ion battery. *Journal of Power Sources*. 2006. Vol. 161. С. 1385–1391. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2006.06.040.
- Berecibar M., Gandiaga I., Villarreal I., Omar N., Van Mierlo J., Van den Bossche P. Critical



review of state of health estimation methods of Li-ion batteries for real applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 56. C. 572–587. DOI: 10.1016/j.rser.2015.11.042.

References

- Schill, W.-P., & Zerrahn, A. (2018). Long-run power storage requirements for high shares of renewables: Results and sensitivities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 83, 156–171. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.205>.
- Augustine, Chad, and Nate Blair. Energy Storage Futures Study: Storage Technology Modeling Input Data Report. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-5700-78694. URL: <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/78694.pdf>.
- Saraieva I.H. Analysis of operational characteristics of lithium-ion batteries in transport systems. *Bulletin of KhNADU*. 2019. Issue 86. pp. 112–118.
- Buryk M.P., Lobodzynskyi V.V. (2021) Investigation of degradation of LiFePO₄ batteries in traction electric drives. *Bulletin of Vinnytsia National Technical University*. No. 4. pp. 45–52.
- Olefir V.M. (2018) Energy storage systems for renewable and transport energy. *Renewable Energy*. No. 3. pp. 26–34.
- Kryvenko M.O. (2020) Influence of charging modes on the lifetime of lithium-ion batteries. *Electrical Engineering and Electromechanics*. No. 6. pp. 38–44.
- Poliakov O.I., Shevchenko D.M. (2017) Safety of operation of lithium-ion batteries in backup power supply systems. *Scientific Bulletin of NMU*. No. 5. pp. 97–103.
- Romaniuk V.A. (2022) Prospects of solid-state lithium batteries for power plants. *Bulletin of Lviv Polytechnic National University*. No. 915. pp. 54–61.
- Kuznietsov V.H. (2019) Battery management systems in electric transport. *Bulletin of KPI. Electrical Engineering Series*. No. 2. pp. 21–27.
- Goodenough J.B., Park K.S. (2013) The Li-ion rechargeable battery: A perspective. *Journal of the American Chemical Society*. DOI: 10.1021/ja3091438.
- Yoshino A. (2018) Development of the lithium-ion battery and recent technological trends. *Chemical Record*. DOI: 10.1002/tcr.201700028.
- Tarascon J.M., Armand M. (2001) Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries. *Nature*. DOI: 10.1038/35104644.
- Nitta N., Wu F., Lee J., Yushin G. (2015) Li-ion battery materials: present and future. *Materials Today*. DOI: 10.1016/j.mattod.2014.10.040.
- Lee M., Lee S., Oh P., Kim Y., Cho J. (2014) High performance LiMn₂O₄ cathode materials grown with epitaxial layered nanostructure for Li-ion batteries. *Nano Letters*. DOI: 10.1021/nl404596p.
- Horiba T. (2014) Lithium-ion battery systems. *Proceedings of the IEEE*. Vol. 102. No. 6. pp. 939–950. DOI: 10.1109/JPROC.2014.2319832.
- Amin A., Ismail K., Hapid A. (2018) Implementation of a LiFePO₄ battery charger for cell balancing application. *Journal of Mechatronics, Electrical Power, and Vehicular Technology*. Vol. 9. No. 2. pp. 81–88. DOI: 10.14203/j.mev.2018.v9.81-88.
- Shen W., Vo T.T., Kapoor A. (2012) Charging algorithms of lithium-ion batteries: An overview. *Proceedings of the 7th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*. pp. 1567–1572. DOI: 10.1109/ICIEA.2012.6360973.
- Kai W., Xiao F., Jinbo P., Jun R., Chongxiong D., Liwei L. (2020) State of charge estimation of lithium-ion battery based on adaptive square root unscented Kalman filter. *International Journal of Electrochemical Science*. Vol. 15. No. 9. pp. 9499–9516. DOI: 10.20964/2020.09.84.
- Wu Q., Zhang B., Lu Y. (2022) Progress and perspective of high-voltage lithium cobalt oxide in lithium-ion batteries. *Journal of Energy Chemistry*. Vol. 74. pp. 283–308. DOI: 10.1016/j.jechem.2022.06.015.
- Camargos P.H., dos Santos P.H., dos Santos I.R., Ribeiro G.S., Caetano R.E. (2022) Perspectives on Li-ion battery categories for electric vehicle applications. *International Journal of Energy Research*. Vol. 46. pp. 19258–19268. DOI: 10.1002/er.8393.
- Tahir M.U., Sangwongwanich A., Stroe D., Blaabjerg F. (2023) Optimized multi-stage constant current charging strategy for Li-ion batteries. *Proceedings of the 25th European Conference on Power Electronics and Applications*. pp. 1–9. DOI:10.23919/EPE23ECCEEurope.2023.10123456.
- Smyrnov O.P., Borysenko A.O., Marchenko A.V. (2019) Diagnostics of high-voltage traction battery of the Nissan Leaf electric vehicle. *Vehicle and Electronics. Innovative Technologies*. Vol. 16. pp. 19–25. DOI: 10.30977/VEIT.2019.16.0.19.
- Plett G.L. (2004) Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs. Part 1. Background. *Journal of Power Sources*. Vol. 134. pp. 252–261. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2004.02.031.
- Zhang S.S. (2006) The effect of the charging protocol on the cycle life of a Li-ion battery. *Journal of Power Sources*. Vol. 161. pp. 1385–1391. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2006.06.040.

25. Berecibar M., Gandiaga I., Villarreal I., Omar N., Van Mierlo J., Van den Bossche P. (2016) Critical review of state of health estimation methods of Li-ion batteries for real applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 56. pp. 572–587. DOI: 10.1016/j.rser.2015.11.042.

DEVELOPMENT OF LITHIUM ENERGY STORAGE SYSTEMS FOR ENGINES AND POWER PLANTS

The article examines the stages of formation, the current state, and the development trends of lithium-based electrical energy storage systems as components of engines, power plants, technological machines, and transport vehicles. The prerequisites for the widespread implementation of lithium battery systems in mechanical engineering are analyzed, driven by increasing requirements for energy efficiency, reliability, dynamic performance, and operational flexibility of electric drives and power systems. The main operational parameters of lithium batteries are substantiated, including specific energy, specific power, cycle life, permissible operating temperature ranges, charging rate, and fire and explosion safety indicators, which determine the effectiveness of

their application in engines and power plants of various purposes. A comparative analysis of the main types of lithium batteries is presented according to key technical characteristics and fields of application in vehicles, technological equipment, and autonomous power plants. The influence of energy storage system parameters on electric motor operating modes, energy recuperation processes, load stabilization, and improvement of the overall efficiency of mechanical engineering systems is shown. It is established that the prospects for further development of lithium energy storage systems are associated with improving energy performance, safety level, durability, and environmental friendliness. Particular attention is paid to the analysis of promising technological solutions, including solid-state battery systems, cathode materials with reduced cobalt content, silicon anodes, and fast-charging technologies. It is confirmed that further improvement of lithium batteries is one of the key directions in the development of modern engines and power plants for mechanical engineering applications.

Keywords: power plants; lithium-ion batteries; electric drive; history of development; battery degradation; energy performance; SEI layer; solid-state batteries; electric transport.

Відомості про автора

Червінський Леонід Степанович д.т.н., професор кафедри «Електротехніки, електромеханіки та електротехнологій» Національного університету біоресурсів і природокористування України, (вул. Джона Маккейна 356 кв.28, м.Київ, 01042, Україна), email: lichervinsky@nubip.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0001-7215-2474>

Лисіков Олександр Юрійович - аспірант кафедри «Електротехніки, електромеханіки та електротехнологій» Національного університету біоресурсів і природокористування України, (вул. Джона Маккейна 356 кв.28, м.Київ, 01042, Україна, ,email: alexlynikov2@gmail.com

Chervinskyi Leonid Doctor of Technical Sciences, Professor Profesor of Department of Electrical Engineering, Electromechanics and Electrical Technology, National University of Life Resources and Environmental Sciences of Ukraine (35b John McCain St., apt. 28, Kyiv, 01042, Ukraine) email: lichervinsky@nubip.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0001-7215-2474>

Lysikov Oleksandr PhD student of Department of Electrical Engineering, Electromechanics and Electrical Technology, National University of Life Resources and Environmental Sciences of Ukraine .email: alexlynikov2@gmail.com

Стаття надійшла 12.02.2026

Стаття прийнята 20.02.2026

Опубліковано 17.04.2026