

Дослідження концепції створення гібридних акумуляторно-суперконденсаторних систем накопичення енергії для електромобілів

Смирнов О.¹, Борисенко А.¹, Мовчан Н.¹

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна
Надійшла: 04.03.2026. Прийнято: 15.05.2026. Опубліковано: 17.05.2026. Відкритий доступ: CC BY 4.0.

Анотація. Стаття присвячена дослідженню концепції створення гібридних акумуляторно-суперконденсаторних систем накопичення енергії для електромобілів. На основі аналізу літератури обґрунтовано актуальність напрямку досліджень та перспективи розвитку гібридних систем накопичення енергії для електромобілів. Здійснено аналіз літій-іонних акумуляторів та суперконденсаторів, розглянуто еквівалентні електричні схеми та моделі. За результатами узагальнення публікацій систематизовано найпоширеніші підходи до схемних рішень побудови гібридної системи накопичення енергії для електромобілів. Проведено дослідження структурних та електричних схем перетворювачів напруги для систем електроприводу електромобіля. Узагальнено стратегії управління гібридними системами накопичення енергії. Проведено аналіз підключення гібридної системи накопичення енергії до фотоелектричної системи та електричної мережі. Виявлені основні переваги, обмеження та перспективи розвитку гібридних систем накопичення енергії для електромобілів.

Ключові слова: акумуляторна батарея, гібридна система накопичення енергії, електромобіль, енергоємність, перетворювач, потужність, суперконденсатор.

Вступ

Створення електромобілів є важливим кроком у глобальному переході до сталого та екологічно чистого транспорту. Завдяки технологічному прогресу ринок електричних транспортних засобів стрімко зростає. Це відіграє ключову роль у зменшенні викидів парникових газів, скороченні залежності від викопного палива й поліпшенні якості повітря.

Найбільшим викликом на шляху до масового впровадження електромобілів залишається розробка потужних і високоефективних систем збереження енергії. Саме вони мають забезпечити збільшення запасу ходу та подовження терміну служби акумуляторних батарей. Але очікувані показники високої потужності й енергоємності таких батарей досі не досягнуті. Вчені всього світу активно працюють над створенням інноваційних рішень для зберігання енергії, здатних відповідати сучасним вимогам електричного транспорту. Одним із перспективних способів вирішення цієї

задачі вважається застосування суперконденсаторів.

Суперконденсатори вважаються однією з найперспективніших і унікальних технологій збереження енергії завдяки своїй винятковій швидкості заряджання та розряджання, здатності передавати більше енергії порівняно зі звичайними акумуляторами, а також довгому терміну служби.

Проведене дослідження ґрунтується на комплексному та системному аналізі літій-іонних акумуляторів, суперконденсаторів, схем побудови гібридних систем накопичення енергії електромобіля, перетворювачів, стратегій керування, можливостей підключення таких систем до електромережі та фотоелектричної станції, а також питань розташування суперконденсаторів в електромобілі.

Аналіз публікацій

На рис. 1 представлено кількісну оцінку останніх публікацій у галузі електромобілів, літій-іонних акумуляторів, суперконденса-

торів та інших пов'язаних систем. Ця оцінка базується на статтях, опублікованих у базі даних Web of Science за останнє десятиріччя [1].

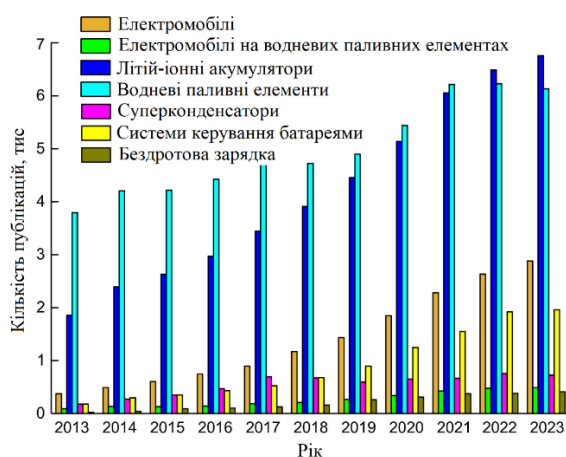


Рис. 1. Наукові статті, присвячені дослідженням у сфері електричних транспортних засобів та їх ключових систем [1]

Акумуляторні батареї є одним із основних елементів систем електричної мобільності та накопичення енергії. У роботі [2] був проведений систематичний аналіз та огляд акумуляторних батарей, які застосовуються в електромобілях. Дослідження [3] зосереджує увагу на оцінці та прогнозуванні нестабільності літій-іонних акумуляторних блоків, базуючись на реальних даних експлуатації таких пристроїв. Надійність і ефективність систем енергозберігання, що використовуються в транспортних засобах на електричній тязі, мають вагоме значення для споживачів. У свою чергу, дослідження [4] пропонує детальний огляд існуючих проблем, пов'язаних із використанням літій-іонних батарей у електромобілях.

Практичним підходом до вирішення питання підвищення ефективності систем накопичення енергії є інтеграція акумулятора із суперконденсатором. Суперконденсатор, будучи електрохімічним елементом зі схожою архітектурою, має переваги у вигляді вищої швидкості заряджання-розряджання та довшого експлуатаційного ресурсу. У такій комбінованій системі суперконденсатор здатний забезпечувати додаткову енергію в моменти, коли акумулятор не встигає задовольнити відповідні енергетичні потреби. Окрім того, критично важливим є проектування оптимальної архітектури гібридної системи накопичення енергії електромобіля, що враховуватиме електротехнічні аспекти такої взаємодії. У статті [5] проаналізовано сучасний стан розробок, присвячених впровадженню

гібридних систем накопичення енергії на базі акумуляторів і суперконденсаторів у конструкції електромобілів.

Застосування енергозберігаючих технологій, що характеризується використанням суперконденсаторів і літій-іонних акумуляторних батарей, набуло значного поширення у транспортній сфері, промисловості та енергетиці, зокрема в розвитку електричних транспортних засобів. Актуальність цих технологій пояснюється їх високою ефективністю та потенціалом для поліпшення характеристик сучасних систем [6, 7].

Оглядовий аналіз, представлений у дослідженні [8], описує новітні досягнення у розробці і впровадженні гібридних систем накопичення енергії, які базуються на комбінації акумуляторів і суперконденсаторів для електромобілів. У дослідженні розглянуто вплив інтеграції таких систем на ключові параметри експлуатації електромобілів, включаючи збільшення запасу ходу, покращення динаміки руху й підвищення довговічності літій-іонних акумуляторів.

Отримані результати дослідження [9] засвідчують, що акумуляторні батареї та суперконденсатори є основними компонентами систем управління енергоспоживанням електричних транспортних засобів. Довготривале зберігання енергії забезпечується високою енергетичною щільністю акумуляторів, яка доповнюється значною потужністю суперконденсаторів та їх здатністю до оперативного заряджання і розряджання. Синергія цих інноваційних рішень сприяє оптимізації управління енергією в електромобілях, збалансовуючи енергетичні потреби та збільшуючи тривалість роботи акумуляторів.

У дослідженні [10] запропоновано гібридну систему накопичення енергії для електромобілів, яка базується на використанні акумуляторних батарей та суперконденсаторів у поєднанні з сонячними фотоелектричними елементами. Над цією системою було виконано численне моделювання в середовищі MATLAB Simulink. У роботі [11] розроблено систему керування для активної гібридної системи накопичення енергії, що поєднує акумулятори та суперконденсатори і призначена для використання в електромобілях.

У публікації [12] представлено гібридний метод управління енергією в системах накопичення, що складаються з акумулятора і суперконденсатора, а також досліджена можливість інтегрованої зарядки електромобілів.

Дослідження [13] зосереджене на вдосконаленій стратегії управління енергією для гібридних систем накопичення, які застосовуються в електромобілях.

У статті [14] представлено оптимізовану стратегію управління енергією, створену на основі адаптивної нейронної нечіткої системи логічного висновку, яка впроваджується для інтеграції живлення акумуляторних батарей та суперконденсаторів в електромобілях. Робота [15] присвячена розробці гібридної системи накопичення енергії в електромобілях, де літій-іонна акумуляторна батарея виступає основним джерелом живлення, а суперконденсатор виконує роль допоміжного резерву енергії.

У статті [16] детально розглянуто новітні досягнення в інтеграції літій-іонних акумуляторів і суперконденсаторів, які ґрунтуються на сучасних стратегіях синтезу та використанні гібридних наноструктур. Автори дослідження [17] проаналізували тенденції розвитку акумуляторів і суперконденсаторів за останні роки та окреслили перспективи їх застосування на найближчі десять років.

Мета та постановка задач дослідження

Метою роботи є проведення дослідження сучасних підходів, архітектур, стратегій керування та перспектив використання гібридних акумуляторно-суперконденсаторних систем накопичення енергії для електромобілів.

Для досягнення мети було виконано такі завдання:

- на основі аналізу літературних джерел обґрунтовано актуальність тематики дослідження та окреслено перспективи розвитку гібридних систем накопичення енергії для електромобілів;

- проведено огляд і систематизовано науково-технічні дані щодо електричних транспортних засобів, систем накопичення енергії, літій-іонних акумуляторів, суперконденсаторів та методів керування за останні роки;

- здійснено аналіз літій-іонних акумуляторів із розглядом еквівалентних електричних схем та моделей, що описують їхню роботу;

- розглянуто характеристики суперконденсаторів, виконано аналіз їхніх електричних схем та моделей, а також визначено основні технічні показники комерційно доступних суперконденсаторів;

- узагальнено та систематизовано найпоширеніші схемні рішення для створення гібридних акумуляторно-суперконденсаторних

- систем накопичення енергії в електромобілях; – досліджено структурні та електричні схеми перетворювачів напруги, необхідних для функціонування систем електропривода електромобіля;

- розглянуто стратегії керування гібридними системами накопичення енергії та виконано їх узагальнення;

- проведено аналіз способів підключення гібридної системи накопичення енергії до фотоелектричних установок і електричних мереж;

- проаналізовано питання розташування суперконденсаторів та інших компонентів гібридної системи накопичення енергії в конструкції електромобіля;

- виявлено переваги, обмеження та перспективи розвитку таких гібридних систем у контексті створення екологічно чистих транспортних засобів.

Результати виконаного дослідження можуть слугувати основою для подальшого вдосконалення технологій енергозбереження в електромобілях, зокрема завдяки розробці гібридних систем накопичення енергії.

Обґрунтування напрямку дослідження

Аналіз сучасних наукових публікацій вказує, що оптимальні характеристики систем накопичення енергії для електромобілів включають високу питому енергоємність і потужність, швидкий відгук на зміну режимів роботи, тривалий життєвий цикл, високий рівень експлуатаційної надійності та низькі витрати на технічне обслуговування.

В теперішній час літій-іонні акумулятори займають провідну позицію серед доступних технологій накопичення енергії завдяки їхній відносно низькій вартості, високим питомим характеристикам і значній кількості циклів заряджання та розряджання. За прогнозами, в перспективі щільність енергії літій-іонних акумуляторів може досягати приблизно 500 Вт·год/кг. Однак такі недоліки, як недостатня питома потужність та схильність до деградації, підкреслюють необхідність інтеграції гібридних систем накопичення енергії, які поєднують акумуляторні батареї та суперконденсатори.

Аналіз публікацій [1–17] свідчить про відсутність ґрунтового та комплексного дослідження, яке б пропонувало читачеві детальний огляд гібридних акумуляторно-суперконденсаторних систем накопичення енергії для

електромобілів. У зв'язку з цим було проведено глибокий аналіз основних характеристик літій-іонних акумуляторів і суперконденсаторів, а також розглянуто теоретичні і практичні підходи до створення гібридних систем накопичення енергії, оптимізованих під вимоги електротранспорту. Надійність, ефективність і тривалість експлуатації гібридних систем накопичення енергії становлять ключові параметри, що мають важливе значення для споживачів електромобілів.

На сьогодні найбільш поширеним джерелом живлення електроприводів електромобілів залишаються літій-іонні акумуляторні батареї, які оснащені вбудованими системами керування та охолодження. Такий варіант обумовлений їхньою порівняно високою питомою енергоемністю, значною номінальною напругою, низьким рівнем саморозряду та здатністю забезпечувати високі струми зарядження. Однак ці системи накопичення енергії мають ряд недоліків, серед яких:

– зниження енергоемності внаслідок процесів деградації літій-іонних батарей, що призводить до скорочення дальності ходу та зменшення строку служби електромобілів [18];

– питання безпеки, яке включає ризик перегрівання, займання або навіть вибуху літій-іонних акумуляторів [19, 20].

Крім того, літій-іонні акумуляторні батареї мають суттєві обмеження як єдине джерело живлення електромобілів. Наприклад, під час подолання крутого підйому, різкого прискорення або швидкого старту електромобілі не можуть повною мірою забезпечити потреби у високошвидкісному розряді. Аналогічно, у процесі рекуперації, особливо на спусках під час гальмування із застосуванням рекуперативної системи, літій-іонні батареї не здатні повністю поглинути відновлювану енергію. При цьому високий струм зарядження спричиняє посилену деградацію батарей, що скорочує їх термін служби.

Тому створення гібридних систем накопичення енергії для електромобілів на основі акумуляторних батарей та суперконденсаторів є актуальним та перспективним напрямом дослідження.

Дослідження літій-іонних акумуляторів

Літій-іонні акумулятори мають суттєві переваги порівняно з іншими технологіями акумуляторних батарей преміум-класу, такими як нікель-метал-гідридні (Ni-Mh) та нікель-

кадмієві (Ni-Cd) системи. Вони вирізняються одним з найвищих рівнів питомої енергетичної ємності серед сучасних технологій – від 200 Вт·год/кг до 500 Вт·год/кг. Окрім того, літій-іонні акумулятори демонструють утричі більшу кількість циклів зарядження-розрядження у порівнянні з іншими типами батарей. Це свідчить про більш тривалий термін служби цих акумуляторів при відносно низькому рівні обслуговування.

Також варто зазначити, що рівень саморозряду літій-іонних акумуляторів є доволі низьким і становить приблизно від 3 % до 5 % на місяць, тоді як у нікель-метал-гідридних батарей, якими обладнані Toyota Prius, рівень саморозряду складає близько 30 % на місяць.

Завдяки своїм численним перевагам, літій-іонні акумулятори поступово зайняли провідну позицію на ринку портативних електронних пристроїв, витіснивши попередні технології, такі як нікель-кадмієві та нікель-метал-гідридні батареї. Наразі вони широко використовуються в різноманітних електронних пристроях, включаючи смартфони та ноутбуки. Окрім того, ці акумулятори знайшли значне застосування у високотехнологічних аерокосмічних системах, де особливого значення набуває зниження ваги обладнання. У транспортній галузі літій-іонні батареї виступають основним джерелом енергії для майже всіх сучасних електромобілів.

Однак, незважаючи на свої численні переваги, літій-іонні акумулятори характеризуються певними недоліками, що насамперед стосуються питань безпеки. Літій-іонні батареї мають схильність до перегріву, а висока напруга може спричинити їх пошкодження. У деяких випадках надмірне нагрівання може призвести до перегріву або навіть спалаху акумулятора. У зв'язку з цим, за останні роки були розроблені численні стратегії з підвищення рівня безпеки та зменшення ризику аварій [22].

У комерційній сфері застосовуються акумулятори на основі літію таких типів:

- літій-кобальт-оксид (LCO);
- літій-залізо-фосфатний (LFP);
- літій-марганцеве-оксидний (LMO);
- літій-нікель-марганцеве-кобальтовий (NMC);
- літій-нікель-кобальт-алюмінієвий (NCA);
- літій-титанатний (LTO).

Літій-кобальтові акумулятори (LCO) набули значного поширення в портативній

електроніці, що спричинено їхньою високою об'ємною щільністю енергії. Крім того, вони знайшли застосування в електромобілях, зокрема таких моделях, як Tesla Roadster та Smart ForTwo. Втім, ключовим обмежувальним фактором для більш масштабного використання цих акумуляторів у транспортних засобах є їх висока вартість, яка зумовлена дефіцитністю кобальту.

Альтернативним катодним матеріалом для електромобілів, зокрема електричних автобусів у Китаї, є літій-залізо-фосфат (LFP). Вибір LFP акумуляторів визначається їхніми перевагами, такими як стабільна напруга, високий ресурс циклів зарядки-розрядки та відмінна термостабільність, що робить їх привабливим рішенням для використання в умовах інтенсивної експлуатації.

Оксид літію-марганцю (LMO) функціонує як катодний матеріал, популярний у комерційному використанні через свої переваги, які включають високу термостабільність та здатність забезпечувати значну потужність за відносно низькою вартістю. Водночас акумулятори на основі LMO характеризуються порівняно низькою щільністю енергії, що обмежує їх потенціал для сучасних вимог, таких як електромобілі високої ефективності. Для підвищення щільності енергії у моделях електромобілів, таких як Nissan Leaf, BMW i3 та Chevrolet Bolt, широко використовується подвійна батарейна система, яка поєднує елементи оксиду літію-марганцю (LMO) із літій-нікель-марганцево-кобальтовими (NMC) компонентами.

Акумулятори, що створені за літій-нікель-марганцево-кобальтовою (NMC) технологією забезпечують високу питому енергію, що робить їх перспективними для застосування у великоємних системах. Проте їхні характеристики термічної стабільності та довговічності при циклічних процесах зарядки-розрядки потребують додаткових оптимізацій системи безпеки перед інтеграцією в електричні транспортні засоби.

Системи накопичення енергії на основі літій-нікель-кобальтово-алюмінію (NCA) також демонструють високу щільність енергії та ефективність, тому знайшли своє активне використання у високотехнологічних електромобілях, таких як Tesla. Ці акумулятори користуються перевагою завдяки високій питомій енергії, що забезпечує більший запас ходу та стрімкіше прискорення.

Літій-титанатні (LTO) акумулятори – це спеціалізовані літій-іонні акумулятори, що характеризуються надзвичайно швидкою зарядкою (менше 15 хв), винятковою безпекою завдяки високій термостабільності, терміном служби понад 20 000 циклів розрядки-зарядки та чудовою роботою за екстремальних температур (від -50 C° до 60 C°). Вони ідеально підходять для електромобілів, що потребують потужної, частої та швидкої зарядки, таких як автобуси, промислове обладнання, незважаючи на значно нижчу щільність енергії.

На рис. 2 представлено порівняння основних характеристик літій-іонних акумуляторів, які активно застосовуються в електротранспорті та інших галузях. Серед ключових параметрів оцінки розглядаються енергоємність, потужність, рівень безпеки, вартість, термін служби та загальна ефективність технології [23].

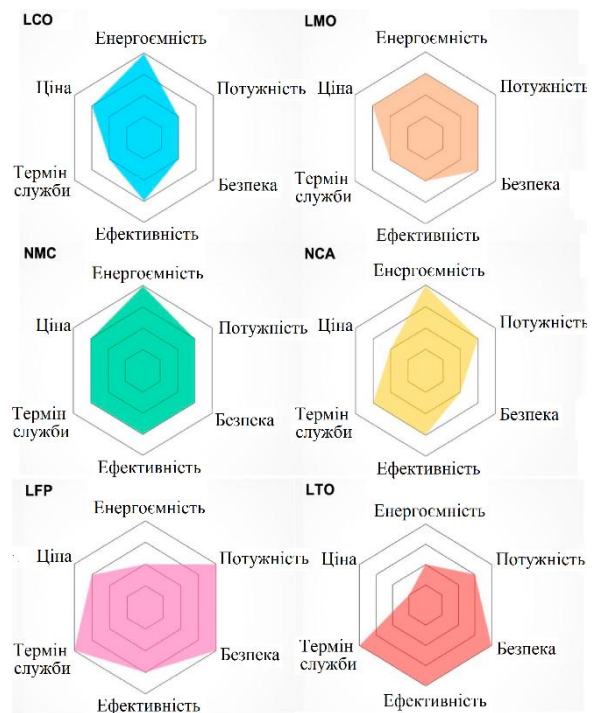


Рис. 2. Порівняння основних характеристик літій-іонних акумуляторів [23]

У дослідженні [24] виконано аналіз електричних моделей літій-іонних акумуляторних батарей для електромобілів, а також представлено модель їх деградації. Еквівалентна електрична схема будь-якого пристрою, включно з літій-іонними акумуляторними батареями та суперконденсаторами, є важливим і ефективним інструментом у процесі проектування різноманітних електронних пристроїв. Еквівалентна електрична схема дозволяє врахувати

всі параметри пристрою, що впливають на його функціонування в цілому.

Однією з популярних електричних моделей літій-іонного акумулятора є модель Тевеніна. Еквівалентна схема акумулятора за цією моделлю включає в себе поляризаційний опір R_{Th} , який підключений паралельно до еквівалентної ємності C_{Th} , що наочно представлено на рис. 3.

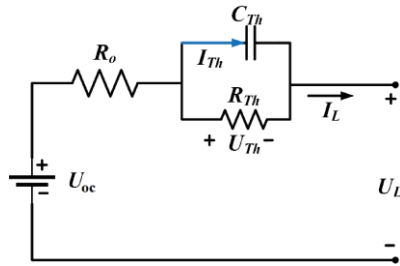


Рис. 3. Розрахункова електрична схема літій-іонного акумулятора Thevenin [25]

Конденсатор Тевеніна C_{Th} враховує перехідні процеси, які відбиваються в процесі заряджання та розряджання літій-іонного акумулятора.

У дослідженні [26] представлено модель літій-іонної акумуляторної батареї типу PNGV (англ. Partnership for a New Generation of Vehicles, PNGV), призначену для електромобілів нового покоління. Особливістю розрахункової електричної схеми акумулятора PNGV є її відмінність від моделі акумулятора Thevenin, зокрема, введення додаткового конденсатора, підключеного послідовно, що ілюструється на рис. 4.

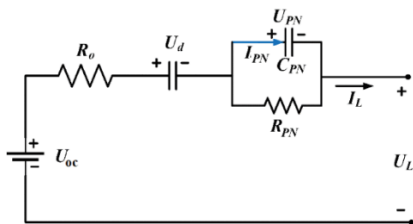


Рис. 4. Розрахункова електрична схема акумулятора моделі PNGV [26]

Цей доданий конденсатор з напругою U_d допомагає пояснити зміни напруги холостого ходу акумуляторної батареї електромобіля, коли протікає струм навантаження.

Дослідження суперконденсаторів

У науковій літературі терміни, такі як електрохімічні двошарові конденсатори (англ. electrochemical double-layer capacitors, EDLCs), ультраконденсатори (англ. Ultracapacitors, UC) і суперконденсатори

(англ. Supercapacitors, SC), широко використовуються для позначення електрохімічних технологій накопичення енергії, які здатні оперативно вивільняти енергію [8, 27-30]. Суперконденсатори характеризуються високим рівнем питомої потужності, швидким процесом зарядження та розрядження, а також тривалим строком служби з великою кількістю циклів заряд-розряд без значної деградації технічних характеристик.

При створенні еквівалентної електричної схеми реального суперконденсатора важливо враховувати ємність подвійного електричного шару на межі контакту електрода з рідким електролітом, що супроводжується певним опором. Крім цього, у суперконденсаторів спостерігається явище саморозряду, яке зумовлене особливостями їх конструкції та електрохімічними процесами. Таким чином, роботу реального суперконденсатора можна змодельовувати за допомогою еквівалентної електричної схеми, зображеної на рис. 5.

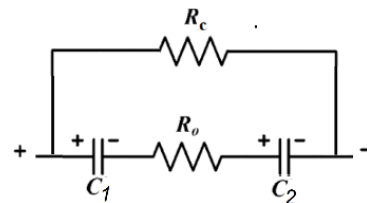


Рис. 5. Розрахункова електрична схема суперконденсатора: C_1 – ємність подвійного електричного шару анода; C_2 – ємність подвійного електричного шару катода; R_o – внутрішній опір; R_c – опір саморозряду

Суперконденсатори характеризуються практично необмеженим терміном служби, що є однією з ключових переваг їх використання. Завдяки унікальному механізму накопичення заряду, ці пристрої здатні витримувати до мільйона циклів заряджання та розряджання. На відміну від традиційних акумуляторних батарей, суперконденсатори зберігають заряд на поверхні електродів фізичним способом, уникаючи незворотних хімічних реакцій. Це суттєво збільшує їх строк експлуатації. Крім того, простота механізму накопичення заряду сприяє зниженню тепловиділення в порівнянні з акумуляторами, що робить суперконденсатори безпечнішими та надійнішими при швидкому заряджанні та розряджанні за умов великих струмів [31].

Особливу увагу заслуговує температурний діапазон роботи суперконденсаторів порівняно з іншими типами пристроїв для

накопичення енергії. Суперконденсатори демонструють ефективну роботу навіть у екстремально низьких температурних умовах, до $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, що є недосяжним для більшості акумуляторів. Ще одним важливим аспектом є характеристики потужності суперконденсаторів, які значно перевершують відповідні показники акумуляторних батарей аналогічного розміру. Водночас їхнім обмеженням є менша здатність до накопичення електричної енергії: цей параметр зазвичай у три-десять разів поступається акумуляторним технологіям [31]

Останнім часом суперконденсатори знаходять усе ширше застосування в галузі транспорту як енергетичні буфери, що функціонують як самостійно, так і в поєднанні з акумуляторними батареями. Однак одним із їхніх основних недоліків є низька питома енергоємність, яка зазвичай коливається в діапазоні від $2,5\text{ Вт}\cdot\text{год}/\text{кг}$ до $15\text{ Вт}\cdot\text{год}/\text{кг}$. Попри це, суперконденсатори вирізняються надзвичайно високою питомою потужністю, яка може сягати до $10\,000\text{ Вт}/\text{кг}$. Завдяки цим характеристикам вони здатні швидко заряджатися та розряджатися, що робить їх особливо ефективними у випадках, де потрібна висока потужність. До таких сфер застосування належать, зокрема, системи рекуперативного гальмування та забезпечення прискорення в електромобілях.

Таблиця 1 містить ключові технічні характеристики комерційно доступних суперконденсаторів, що виробляються різними компаніями [27]

Таблиця 1. Основні характеристики комерційно доступних суперконденсаторів [27]

Компанія	Напруга, В	Ємність, Ф	Опір, мОм
Asahi Glass	2,70	1375	2,50
BatScap	2,70	2680	0,20
Fuji	3,80	1800	1,50
Ioxus	2,70	3000	0,45
JSR Micro	3,80	1100	1,15
LS Mtron	2,80	3200	0,25
Maxwell	2,70	2885	0,38
NessCap	2,70	1800	0,55
Skeleton	3,40	3200	0,47
Yunasko	2,70	510	0,90

У гібридних системах накопичення енергії суперконденсатори виконують важливу роль, забезпечуючи високі показники потужності. Вони сприяють зменшенню навантаження на акумуляторні батареї, що у свою чергу продовжує їхній експлуатаційний термін і підвищує загальну ефективність функціонування електричних транспортних засобів.

Суперконденсатори отримали широке застосування в сфері транспорту. Зокрема, китайська компанія Ningbo CSR New Energy Technology розробила електробуси, обладнані суперконденсаторами CSRCAP, які споживають на 50 % менше енергії порівняно з іншими моделями електричних автобусів. Такий підхід є яскравим прикладом зниження енергоспоживання завдяки впровадженню інноваційних технологій [27].

Таким чином, суперконденсатори є високоєфективними пристроями для накопичення енергії, які мають значний потенціал у розвитку електротранспорту. Водночас їх широке впровадження потребує вдосконалення: необхідно забезпечити зниження вартості, збільшення енергоємності, забезпечити компактність конструкції та розробити оптимальні схеми побудови гібридних систем накопичення енергії на базі акумуляторів і суперконденсаторів.

Схемні рішення побудови гібридної акумуляторно-суперконденсаторної системи накопичення енергії для електромобілів

Гібридні системи накопичення енергії стрімко набувають популярності завдяки їхній здатності інтегрувати переваги різних технологій енергозбереження. Правильний вибір схематичних рішень суттєво впливає на загальну ефективність системи накопичення енергії. У таких системах два джерела енергії – акумуляторна батарея і суперконденсатори – з'єднуються за різними схемами із застосуванням одного або кількох DC/DC перетворювачів. Розглянемо основні типи цих схем:

– пасивна схема є найбільш простою і передбачає паралельне з'єднання акумуляторної батареї та суперконденсаторів, як показано на рис. 6,а [8, 32]. Її легко реалізувати, що робить це рішення економічно привабливим. Однак відсутність активних механізмів контролю може спричинити дисбаланс напруги та загальне зниження ефективності системи;

– напівактивні схеми передбачають використання силових DC/DC перетворювачів для забезпечення часткового контролю над передачею енергії між акумулятором і суперконденсатором, що ілюструється на рис. 6,б і 6,в [8, 32]. Цей підхід підвищує керованість системи порівняно з пасивною схемою;

– активна схема є найбільш доцільним варіантом для електромобілів, оскільки вона

обладнана окремими силовими електронними перетворювачами для кожного з компонентів – як для акумулятора, так і для суперконденсатора (рис. 6,г) [8, 32].

Основні типи гібридних систем, їх переваги, недоліки та сфери застосування зведено в таблиці 2.

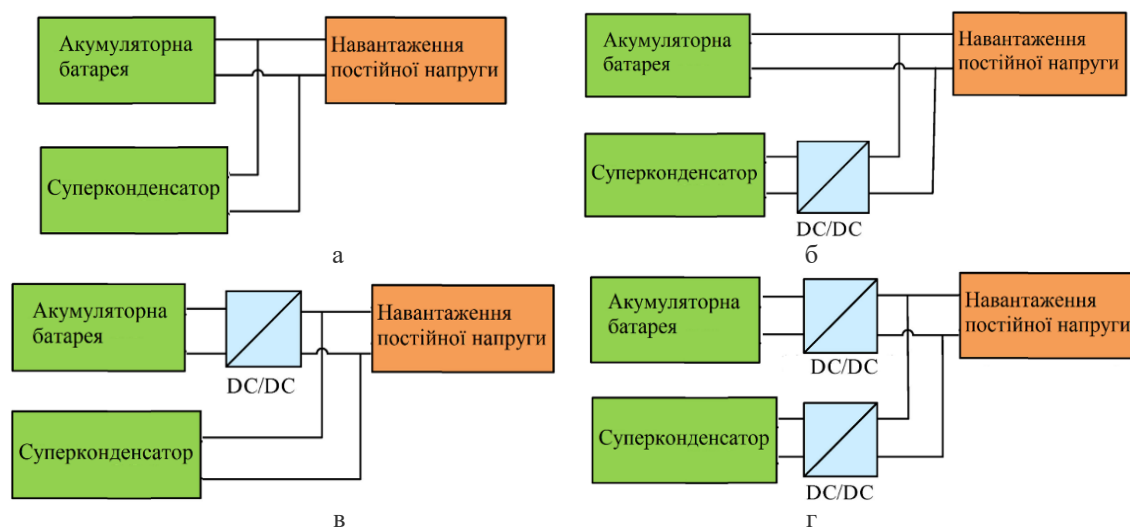


Рис. 6. Схеми структурні гібридних систем накопичення енергії: а – пасивна схема; б – напівактивна схема з керуванням суперконденсаторів; в – напівактивна схема з керуванням акумуляторною батареєю; г – активна схема [8, 32]

Таблиця 2. Порівняння схем структурних гібридних систем накопичення енергії для електромобілів

Схема гібридної системи накопичення енергії	Опис	Переваги	Недоліки	Раціональні сфери застосування
Пасивна схема	Акумуляторна батарея та суперконденсатор підключені паралельно безпосередньо до шини постійного струму	Найнижча вартість, проста конструкція, висока надійність, мала вага та розміри	Відсутність контролю потужності, низька ефективність використання суперконденсатора	Електровелосипеди, скутери
Напівактивна схема з керуванням акумуляторною батареєю	Акумуляторна батарея підключена через DC/DC перетворювач, суперконденсатор напряму	Контроль струму акумуляторної батареї, захист її від пікових навантажень, вища ефективність, ніж у пасивної	Складніша за пасивну, вимагає вимірювання напруги суперконденсатора	Міський електротранспорт, де потрібна часта рекуперація
Напівактивна схема з керуванням суперконденсаторів	Суперконденсатор підключений через DC/DC перетворювач, акумуляторна батарея – напряму.	Повне використання ємності суперконденсатора, стабільна напруга на шині, надійність акумуляторної батареї	Висока вартість перетворювача, обмежена робоча напруга суперконденсатора	Електромобілі з високою динамікою, де потрібна висока потужність
Активна схема	Акумуляторна батарея та суперконденсатор підключені через два незалежні DC/DC перетворювачі	Незалежний контроль акумуляторної батареї та суперконденсатора, максимальна ефективність та термін служби акумуляторної батареї	Найвища вартість, складна система керування	Преміум електромобілі, комерційний транспорт з високими вимогами до надійності

В активній схемі гібридної системи накопичення енергії літій-іонна акумуляторна батарея є основним джерелом живлення електропривода електромобіля та використовується для забезпечення потреби в електроенергії протягом відносно тривалого часу, тоді як суперконденсатор використовується під час пікових навантажень та рекуперації енергії гальмування, щоб зменшити навантаження на батарею. Таким чином, цей підхід є найбільш придатним для виконання вимог сучасних електромобілів щодо ефективності та надійності.

На рис. 7 представлено електричну схему DC/DC перетворювачів гібридної системи накопичення енергії, що демонструє взаємодію окремих компонентів у процесі керування енергоспоживанням. Електрична схема включає два двонаправлені перетворювачі напруги постійного струму, кожен з яких складається з двох транзисторів типу IGBT (T1, T2) та одного індукторного реактора (L).

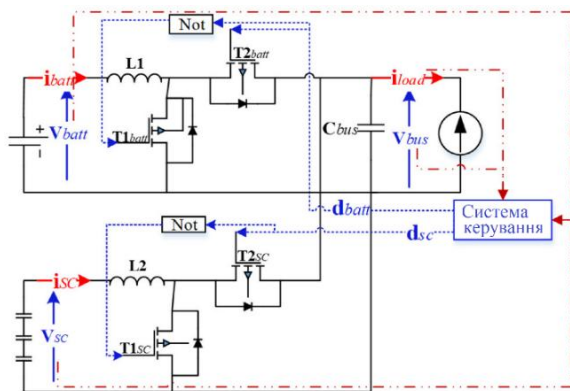


Рис. 7. Схема електрична DC/DC перетворювачів [32]

Індукторний реактор виконує функцію накопичення і вивільнення електроенергії. Функціонування DC/DC перетворювачів визначається поточними потребами системи в енергії, станом зарядженості акумуляторної батареї і суперконденсатора. Ефективним методом регулювання параметрів системи є ПІ-регулятор, спрямований на оптимізацію енергоспоживання від акумуляторів та суперконденсаторів, підвищення загальної ефективності і надійності гібридної системи накопичення енергії.

Структурну схему електропривода електромобіля можна відобразити у вигляді, представленому на рис. 8.

За допомогою двох двонаправлених перетворювачів DC/DC акумуляторна батарея та блок суперконденсаторів інтегруються до шини постійного струму з метою

забезпечення живлення для інвертора DC/AC, який входить до складу системи керування електричним двигуном. Інвертор DC/AC здійснює перетворення енергії постійного струму в змінний, що необхідно для функціонування електродвигуна, який забезпечує привід електромобіля через трансмісійну систему.

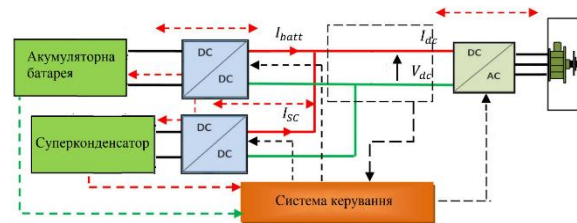


Рис. 8. Схема структурна електропривода електричного транспортного засобу [33]

Система керування виконує контроль та оптимальний розподіл енергії між двома джерелами – акумуляторною батареєю та суперконденсатором – з урахуванням рівня їхнього заряду, характеру руху транспортного засобу та дорожніх умов, включаючи старт руху, набір швидкості, гальмування, підйом або спуск.

Системи керування гібридними системами накопичення енергії

Система керування гібридною системою накопичення енергії сприяє оптимізації розподілу потужності між суперконденсаторами та акумуляторами. Вона забезпечує швидке вивільнення енергії з суперконденсаторів для задоволення короткострокових потреб у потужності, водночас акумуляторні батареї використовуються для довготривалого живлення електропривода.

Для забезпечення ефективного розподілу потужності та енергії між акумуляторними батареями та суперконденсаторами для задоволення потреб навантажень електромобіля було виконано значну кількість досліджень [9-15, 32-35], спрямованих на розробку стратегій енергоменеджменту. Ці методи можна поділити на три категорії:

- методи, засновані на правилах;
- методи, засновані на оптимізації;
- методи, засновані на навчанні.

Методи на основі правил для гібридних систем накопичення енергії на основі акумуляторів та суперконденсаторів в електромобілях використовують попередньо визначену експертами логіку для управління потоком потужності, надаючи пріоритет довговічності акумуляторів та ефективності системи. Методи

на основі правил є обчислювально легкими, що робить їх ідеальними для розгортання в режимі реального часу на стандартних мікроконтролерах транспортних засобів. Але ці методи працюють «відносно жорстко» та не мають можливостей постійного вдосконалення, які можна знайти в системах управління енергосистемою на основі машинного навчання або прогнозного управління за моделями. Це може привести до підвищеного навантаження на акумуляторну батарею або неправильного рівня зарядки суперконденсаторів, що може невідомо скоротити термін служби акумуляторів порівняно з більш просунутими адаптивними стратегіями.

Методи на основі оптимізації для гібридних систем накопичення енергії в електромобілях можна класифікувати на три групи:

- глобальна оптимізація, що знаходить теоретично найкращу ефективність для відомого циклу руху;

- оптимізація в режимі реального часу, що адаптується до реальних умов руху для динамічного управління потоком потужності від акумуляторної батареї та суперконденсаторів;

- оптимізація за допомогою інтелектуальних алгоритмів використовується для вирішення складних, нелінійних задач оптимізації, де традиційні математичні моделі можуть бути занадто жорсткими. Генетичні алгоритми також можна використовувати для оптимального визначення енергоємності акумуляторних батарей та суперконденсаторів, щоб мінімізувати загальну вартість та вагу гібридної системи накопичення енергії електромобіля.

Методи, засновані на навчанні – це найновіша еволюція в гібридних системах накопичення енергії. Ці стратегії навчаються оптимальній поведінці, взаємодіючи з даними від акумуляторних батарей, суперконденсаторів та режимами руху, не покладаючись на математичні моделі. В навчанні з підкріпленням агент вивчає найкращу політику керування, отримуючи «винагороди» за ефективне використання енергії та «штрафи» за надмірне навантаження на батарею. Нейронні мережі використовуються для прогнозування моделей руху або профілів швидкості для оперативного корегування розподілу потужності між акумуляторною батареєю та блоком суперконденсаторів.

У дослідженні [35] висвітлюються переваги застосування суперконденсаторів у гібридній системі накопичення енергії з метою забезпечення динамічних навантажень електромобіля. Також деталізовано моделювання

функціонування гібридної системи накопичення енергії електромобіля в середовищі MATLAB/Simulink. На рис. 9 наведено результати моделювання, які ілюструють розподіл навантаження між акумуляторною батареєю та суперконденсатором у вигляді змін струму в часі для різних сценаріїв динамічного навантаження електромобіля.

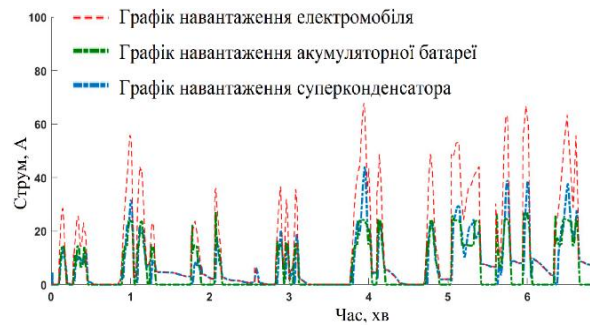


Рис. 9. Результат моделювання розподілу навантаження між суперконденсатором та акумуляторною батареєю [35]

Особливість гібридної системи накопичення енергії, як показують результати моделювання, полягає в її здатності ефективно регулювати струм в двох різних джерелах енергії. Це створює мінімальне навантаження на акумуляторну батарею, що, у свою чергу, збільшує строк її служби, покращує потужність та динамічні характеристики, збільшує запас ходу та загальну ефективність електромобіля.

Підключення гібридної системи накопичення енергії електромобіля до електромережі та фотоелектричної станції

Гібридна система накопичення енергії, що поєднує акумуляторні батареї та блок суперконденсаторів, виявляється раціональною для підключення до зовнішньої електромережі відповідно до технології V2G (Vehicle-to-Grid), а також до фотоелектричної станції. Фотоелектричні системи, які генерують електроенергію, сьогодні стають ключовим рішенням для подолання екологічних проблем і водночас задовольняють зростаючий глобальний попит на енергоресурси. Поєднання сонячної відновлюваної енергії із гібридними акумуляторно-суперконденсаторними системами накопичення енергії електромобілів та їх інтеграція з електромережею мають великий потенціал для зменшення викидів парникових газів у транспортному секторі та сфері енергетики.

Підключення гібридної системи накопичення енергії електромобілів до зовнішньої електромережі за допомогою технології V2G, а також до фотоелектричних станцій, використовується не лише для здійснення зарядки, але й для забезпечення більшої стабільності електромережі. Гібридна система зберігання енергії демонструє високу ефективність у керуванні різними компонентами живлення: акумуляторні батареї забезпечують регулювання низькочастотних коливань потужності, тоді як суперконденсатори реагують на високочастотні зміни, що сприяє загальному підвищенню

ефективності системи. Це дозволяє забезпечити не лише безперерйне постачання електроенергії, але й оперативну підтримку функціонування всієї електричної мережі.

Дослідження [38] демонструє інноваційний підхід до покращення якості електроенергії в мережевих фотоелектричних системах через інтегрування гібридних систем накопичення енергії, які об'єднують переваги акумуляторів та суперконденсаторів. На рис. 10 представлений новий трифазний інвертор із десятима перемикачами.

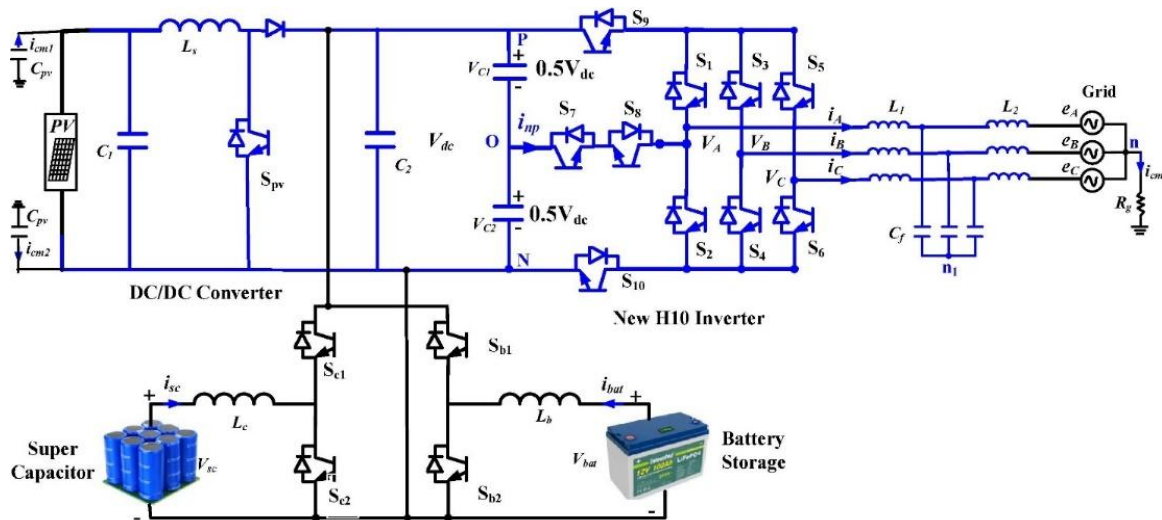


Рис. 10. Схема підключення гібридної системи накопичення енергії до фотоелектричної системи та електричної мережі [38]

Схема підключення гібридної системи накопичення енергії до фотоелектричної системи та електричної мережі складається з дво-направленого перетворювача (DC/DC converter), який ефективно управляє обміном електроенергії між фотоелектричною системою PV (PhotoVoltaic), акумуляторною батареєю (Battery Storage), суперконденсатором (Super Capacitor) і зовнішньою електричною мережею (Grid). В гібридній системі зберігання енергії акумуляторна батарея відповідає за довготривале акумулювання електроенергії для її подальшого постачання в електромережу. Натомість суперконденсатори забезпечують швидкий розряд, пропонуючи миттєву підтримку потужності під час короткочасних змін попиту на електроенергію. У процесі зарядки акумуляторна батарея електромобіля отримує енергію або з зовнішньої електромережі, або з фотоелектричної системи.

Розташування суперконденсаторів в електромобілі

З огляду на те, що суперконденсатори характеризуються невисокою питомою ємністю, питання їх розташування в електромобілі є однією з ключових технічних проблем через їх значний об'єм. У дослідженні [8] запропоновано концепцію, згідно з якою суперконденсатори інтегруються безпосередньо у конструкцію корпусу автомобіля. Зазвичай суперконденсатори з'єднуються послідовно для забезпечення підвищення загальної робочої напруги. Окрім цього, створені послідовні з'єднання доповнюються паралельними, що сприяє зростанню номінальної енергоємності та потужності системи. Модулі суперконденсаторів та інші елементи гібридної системи накопичення енергії розташовуються на даху автомобіля, за сидіннями пасажирів і водія, а також у капоті та дверях. Основне джерело енергії – літій-іонна акумуляторна батарея –

встановлюється під передніми сидіннями, як це продемонстровано на рис. 11.

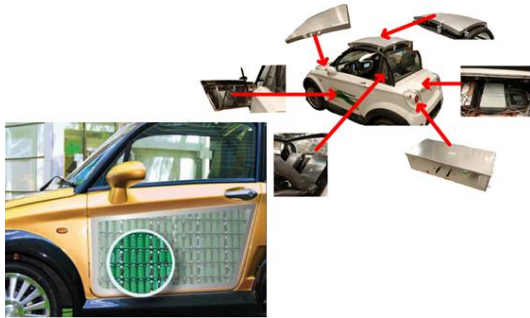


Рис. 11. Схема розташування суперконденсаторів та інших компонентів [8]

Форми панелей суперконденсаторів, вбудованих у кузов автомобіля, адаптовані таким чином, щоб відповідати геометрії оригінальних елементів кузова. У результаті вони органічно інтегруються в структурні складові, такі як двері, кришка багажника, дах або капот. Перетворювачі напруги та системи управління монтується в багажному відділенні.

Висновки

Аналіз сучасних публікацій демонструє, що гібридні системи накопичення енергії, які поєднують переваги літій-іонних акумуляторів та суперконденсаторів, є перспективним рішенням для живлення електроприводів у електромобілях. На основі узагальнення досліджень виділено такі ключові переваги:

- висока потужність, яка забезпечує кращу динаміку руху електромобіля;
- значна енергоємність, що впливає на дальність пробігу;
- збільшення терміну служби літій-іонної батареї;
- підвищення ефективності процесів рекуперації енергії.

Проаналізовано архітектуру схем гібридних систем накопичення енергії для електромобілів. За результатами аналізу публікацій найбільш перспективними можна вважати активні схеми з використанням DC/DC перетворювачів постійного струму, що забезпечують гнучке управління розподілом енергії між складовими системами. Завдяки цьому підтримується стабільна напруга на двигуні навіть у разі значного розряду суперконденсатора. Аналіз також дозволив визначити перспективні стратегії енергоменеджменту між акумуляторами та блоком суперконденсаторів, які базуються на інтелектуальному управлінні із

застосуванням технологій штучного інтелекту.

Гібридні системи накопичення енергії можуть бути інтегровані з концепціями «від автомобіля до електромережі» та «від автомобіля до будинку». У поєднанні з сонячними електростанціями вони сприяють згладжуванню коливань, характерних для виробництва енергії від сонячної генерації.

Окреслено основні переваги, недоліки та перспективи розвитку гібридних систем накопичення енергії для електромобілів. Подальша еволюція цієї концепції тісно пов'язана із прогресом у розробках сучасних систем зберігання енергії та інноваційними підходами до управління. Це відкриває шлях до більш надійного, екологічного і енергоефективного майбутнього для сфери електротранспорту.

Подяка

Ця робота проводилась у рамках науково-дослідної роботи «Удосконалення системи керування поворотом безпілотних вантажівок з поворотними візками, що мають електропривід коліс», державний реєстраційний номер: 0126U002107, що фінансується Міністерством освіти і науки України.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що немає конфлікту інтересів щодо публікації цієї статті.

Література

1. Waseem, M., Lakshmi, G. S., Sreeshobha, E., & Khan, S. (2024). An electric vehicle battery and management techniques: Comprehensive review of important obstacles, new advancements, and recommendations. *Energy Storage and Saving*, 4(1), 83–108. <https://doi.org/10.1016/j.enss.2024.09.002>
2. Liu, F., Shafique, M., & Luo, X. (2024). Unveiling the determinants of battery electric vehicle performance: A systematic review and meta-analysis. *Communications in Transportation Research*, 4, 100148. <https://doi.org/10.1016/j.commtr.2024.100148>
3. Wang, S., Wang, Y., & Soo, Y.-Y. (2025). Evaluation and prediction of lithium-ion battery pack inconsistency in electric vehicles based on actual operating data. *Energy*, 319, 134879. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.134879>
4. Şen, M., Özcan, M., & Eker, Y. R. (2024). A review on the lithium-ion battery problems used in electric vehicles. *Next Sustainability*, 3, 100036. <https://doi.org/10.1016/j.nxsust.2024.100036>
5. Kouchachvili, L., Yaïci, W., & Entchev, E. (2018).

- Hybrid battery/supercapacitor energy storage system for electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 374, 237–248. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.11.040>
6. Benoy, S. M., Pandey, M., Bhattacharjya, D., & Saikia, B. K. (2022). Recent trends in supercapacitor-battery hybrid energy storage devices based on carbon materials. *Journal of Energy Storage*, 52, 104938. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104938>
 7. Hnatov, A., Arhun, S., & Ponikarovska, S. (2017). Energy saving technologies for urban bus transport. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 14(4), 4649–4664. <https://doi.org/10.15282/ijame.14.4.2017.5.0366>
 8. Gopi, C. V. M., & Ramesh, R. (2024). Review of battery-supercapacitor hybrid energy storage systems for electric vehicles. *Results in Engineering*, 24, 103598. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103598>
 9. Ramkumar, M. S., Muthukrishnan, S., Giri, J., Sathish, T., & Fatehmulla, A. (2025). Optimizing battery and supercapacitor management in electric vehicles: A hybrid approach for enhanced performance and reduced harmonics. *Case Studies in Thermal Engineering*, 105815. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2025.105815>
 10. Raut, K., Shendge, A., Chaudhari, J., Lamba, R., & Alshammari, N. F. (2024). Modeling and simulation of photovoltaic powered battery-supercapacitor hybrid energy storage system for electric vehicles. *Journal of Energy Storage*, 82, 110324. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.110324>
 11. Yang, B., Wang, J., Zhang, X., Wang, J., Shu, H., Li, S., He, T., Lan, C., & Yu, T. (2020). Applications of battery/supercapacitor hybrid energy storage systems for electric vehicles using perturbation observer based robust control. *Journal of Power Sources*, 448, 227444. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.227444>
 12. AlKawak, O. A., Kumar, J. R. R., Daniel, S. S., & Reddy, C. V. K. (2024). Hybrid method based energy management of electric vehicles using battery-supercapacitor energy storage. *Journal of Energy Storage*, 77, 109835. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109835>
 13. Takroui, M. A., Idris, N. R. N., Aziz, M. J. A., Ayop, R., & Low, W. Y. (2025). Refined power follower strategy for enhancing the performance of hybrid energy storage systems in electric vehicles. *Results in Engineering*, 25, 103960. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.103960>
 14. Kumaresan, N., & Rammohan, A. (2025). Adaptive neuro fuzzy inference system based optimized energy management strategy for the power integration of battery and supercapacitor in electric vehicle. *Journal of Energy Storage*, 126, 117073. <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.117073>
 15. Abdelhedi, F., Jarraya, I., Bawayan, H., Abdelkeder, M., Rizoug, N., & Koubaa, A. (2024). Optimizing electric vehicles efficiency with hybrid energy storage: Comparative analysis of rule-based and neural network power management systems. *Energy*, 313, 133979. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.133979>
 16. Kazemi, M., Noorizadeh, H., Jadeja, Y., Saraswat, S. K., M. M., R., Shankhyan, A., S., S., & Joshi, K. K. (2025). Advancing CdSe quantum dots for batteries and supercapacitors: Electrochemical frontiers. *RSC Advances*, 15(20), 16134–16163. <https://doi.org/10.1039/d5ra02414e>
 17. Azega, R. K., Smith, A. D., Chowdhury, N. R., Vyas, A., Li, Q., Haque, M., Xun, Q., Zhang, X., Thurakkal, S., Thiringer, T., Enoksson, P., & Lundgren, P. (2024). Supercapacitors and rechargeable batteries, a tale of two technologies: Past, present and beyond. *Sustainable Materials and Technologies*, 41, e01111. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2024.e01111>
 18. Smyrnov, O., & Borysenko, A. (2025). Rozrobka prohnostychnoi modeli dehradatsii yemnosti litiionnykh akumulatornykh batarei elektromobiliv [Development of a predictive model for the degradation of the capacity of lithium-ion batteries in electric vehicles]. *Avtomobil i elektronika. Suchasni tekhnolohii*, 27, 110–122. <https://doi.org/10.30977/VEIT.2025.27.0.1>
 19. Mammacıoğlu, O., & Coskun, G. (2025). A new experimental approach to lithium-ion battery fires in electric vehicles: Investigation of fire behavior and effectiveness of extinguishing agents. *Case Studies in Thermal Engineering*, 106554. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2025.106554>
 20. Chavan, S., Venkateswarlu, B., Salman, M., Liu, J., Pawar, P., Joo, S. W., Choi, G. S., & Kim, S. C. (2024). Thermal management strategies for lithium-ion batteries in electric vehicles: Fundamentals, recent advances, thermal models, and cooling techniques. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 232, 125918. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125918>
 21. Wang, Y. (2023). Rational design of anode materials for high-performance lithium-ion batteries. In Q. Huang (Ed.), *2022 International Conference on Optoelectronic Materials and Devices*. SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.2674115>
 22. Chombo, P. V., & Laounal, Y. (2020). A review of safety strategies of a Li-ion battery. *Journal of Power Sources*, 478, 228649. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228649>
 23. Olabi, A. G., Abdelkareem, M. A., Wilberforce, T., Alkhalidi, A., Salameh, T., Abo-Khalil, A. G., Hassan, M. M., & Sayed, E. T. (2022). Battery electric vehicles: Progress, power electronic converters, strengths, weaknesses, opportunities, and threats. *International Journal of Thermofluids*, 100212. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2022.100212>
 24. Smyrnov, O., & Borysenko, A. (2023). Porivnialnyi analiz elektrychnykh modelei liti-ionnykh akumulatornykh batarei elektromobiliv [Comparative analysis of electrical models of lithium-ion batteries in electric vehicles]. *Avtomobil i*

- elektronika. Suchasni tekhnologii*, 24, 50–61.
<https://doi.org/10.30977/VEIT.2023.24.0.5>
25. Hossain, E., Murtaugh, D., Mody, J., Faruque, H. M. R., Sunny, M. S. H., & Mohammad, N. (2019). A comprehensive review on second-life batteries: Current state, manufacturing considerations, applications, impacts, barriers and potential solutions, business strategies, and policies. *IEEE Access*, 7, 73215–73252. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2917859>
 26. Avadikyan, A., & Larrue, P. (2003). The Partnership for a New Generation of Vehicles and the US DoE Transportation Fuel Cells Programme. In *The Economic Dynamics of Fuel Cell Technologies* (pp. 133–158). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-24822-4_6
 27. Shuja, A., Khan, H. R., Murtaza, I., Ashraf, S., Abid, Y., Farid, F., & Sajid, F. (2024). Supercapacitors for energy storage applications: Materials, devices and future directions: A comprehensive review. *Journal of Alloys and Compounds*, 176924. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.176924>
 28. Arif, H., Akbar, H., Bibi, A., Ciğeroğlu, Z., El-Azeem, S. A. A., Choi, J. R., & Ali, A. (2026). Design and optimization of ZnO/MnO₂ nanocomposites for enhanced energy storage in supercapacitor applications. *Materials Science and Engineering: B*, 327, 119281. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2026.119281>
 29. Khasim, S., Hamdalla, T. A., Ravikumar, C. R., Alghamdi, N., Bani-Atta, S. A., Almasoudi, A., & Alatawi, M. (2026). Synergistic interface engineering of rare-earth multi-oxide/reduced graphene oxide hierarchical nanostructures as high-performance solid-state asymmetric supercapacitors for energy storage applications. *Solid State Sciences*, 108241. <https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2026.108241>
 30. Khan, B. A., Haider, F., Zhang, T., Zahra, S., Hussain, S. E., & Karim, A. (2026). Revealing the potential of MXene composites in advanced energy storage: A review of supercapacitor applications. *Journal of Alloys and Compounds*, 1052, 186100. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2026.186100>
 31. Czagany, M., Hompoth, S., Keshri, A. K., Pandit, N., Galambos, I., Gacsi, Z., & Baumli, P. (2024). Supercapacitors: An efficient way for energy storage application. *Materials*, 17(3), 702. <https://doi.org/10.3390/ma17030702>
 32. Ferahtia, S., Djeroui, A., Mesbahi, T., Houari, A., Zeghlache, S., Rezk, H., & Paul, T. (2021). Optimal adaptive gain LQR-based energy management strategy for battery-supercapacitor hybrid power system. *Energies*, 14(6), 1660. <https://doi.org/10.3390/en14061660>
 33. Boumediene, S., Nasri, A., Hamza, T., Hicham, C., Kayisli, K., & Garg, H. (2023). Fuzzy logic-based energy management system (EMS) of hybrid power sources: Battery/supercapacitor for electric scooter supply. *Journal of Engineering Research*. <https://doi.org/10.1016/j.jer.2023.07.008>
 34. Abu, S. M., Hannan, M. A., Rahman, S. A., Ker, P. J., & Long, C. Y. (2025). Optimization algorithms for hybrid energy storage systems based microgrid performance enhancement. *Energy*, 332, 137304. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.137304>
 35. Kachhwaha, A., Rashed, G. I., Garg, A. R., Mahela, O. P., Khan, B., Shafik, M. B., & Hussien, M. G. (2022). Design and performance analysis of hybrid battery and ultracapacitor energy storage system for electrical vehicle active power management. *Sustainability*, 14(2), 776. <https://doi.org/10.3390/su14020776>
 36. Kumar, G. M. S., Guo, X., Zhou, S., Luo, H., Wu, Q., Liu, Y., Dou, Z., Pan, K., Xu, Y., Yang, H., & Cao, S. (2025). State-of-the-art review of smart energy management systems for supporting zero-emission electric vehicles with X2V and V2X interactions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 208, 115050. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115050>
 37. Smyrnov, O., Borysenko, A., & Trunova, I. (2024). Development of vehicle-to-grid in Ukraine. In *Transport Means 2024* (pp. 503–506). KTU leidykla “Technologija”. <https://doi.org/10.5755/e01.2351-7034.2024.p503-506>
 38. Tawfiq, K. B., Zeineldin, H., Al-Durra, A., & El-Sadaany, E. F. (2025). Enhancing photovoltaic grid integration with hybrid energy storage and a novel three-phase ten-switch inverter for superior power quality. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 167, 110580. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2025.110580>
- Смирнов Олег**¹, д.т.н., проф., професор каф. автомобільної електроніки, тел. +38 068 609 94 58, e-mail: smirnov1oleg@gmail.com, тел. +38 068 609 94 58, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4881-9042>
- Борисенко Анна**¹, к.т.н., доцент, доцент каф. автомобільної електроніки, e-mail: anutochka2111@gmail.com, тел. +38 096 110 69 49, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5992-8274>
- Мовчан Нікіта**¹, аспірант каф. автомобільної електроніки, тел. +38 093 111 08 02, e-mail: nikitamovchan22@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0694-5990>
- ¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків.
- Research on Hybrid Battery-Supercapacitor Energy Storage Systems for Electric Vehicles**
- Abstract. Problem.** *The development of electric vehicles requires efficient energy storage systems that can combine high energy capacity, high power density, fast response, long service life and effective recuperation of braking energy. Lithium-ion batteries*

remain the main energy source for electric vehicles, but their limitations under peak loads and intensive charge-discharge conditions create the need for hybrid energy storage solutions. The combination of lithium-ion batteries and supercapacitors is therefore considered a promising approach for improving the performance, reliability and durability of electric vehicle power systems. **Goal.** The aim of this article is to analyse and systematise modern approaches to the development of hybrid battery-supercapacitor energy storage systems for electric vehicles, including their architectures, equivalent circuits, power converters, control strategies, integration with photovoltaic systems and electrical grids, and possible component placement in the vehicle structure. **Methodology.** The study is based on an analytical review and systematisation of recent scientific publications devoted to lithium-ion batteries, supercapacitors, hybrid energy storage systems, DC/DC converters, electric drive systems and energy management methods for electric vehicles. The paper compares the main structural solutions for hybrid battery-supercapacitor systems and identifies their advantages, limitations and rational areas of application. **Results.** The analysis shows that hybrid energy storage systems can reduce the load on lithium-ion batteries, improve the use of regenerative braking energy, support peak power demand and increase the overall efficiency of electric vehicles. Passive, semi-active and active configurations of hybrid systems are considered. Based on the reviewed sources, active configurations with bidirectional DC/DC converters can be regarded as the most promising for modern electric vehicles, as they provide more flexible control of energy distribution between the battery and the supercapacitor. The article also summarises the main groups of energy management strategies, including rule-based, optimisation-based and learning-based methods. In addition, the possibilities of integrating hybrid energy storage systems with Vehicle-to-Grid technologies

and photovoltaic systems are discussed. The issue of placing supercapacitors and other components within the vehicle structure is also considered. **Originality.** The article provides a systematic overview of battery-supercapacitor hybrid energy storage systems for electric vehicles and summarises their main structural, electrical and control-related features. The work clarifies the role of each component in the hybrid system and presents a comparative assessment of passive, semi-active and active configurations. **Practical value.** The results of the review may be used as a theoretical basis for further development of electric vehicle power supply systems, including the selection of hybrid system architecture, the choice of converter configuration and the development of energy management strategies. The obtained generalisations may also be useful for future studies related to electric drive systems, vehicle energy efficiency and integration of electric vehicles with renewable energy sources and electrical grids.

Key words: battery, energy capacity, converter, electric vehicle, hybrid energy storage system, power, supercapacitor.

Smyrnov Oleh¹, professor, Doct. of Science, Vehicle Electronics Department, tel. +38 068-609-94-58, smirnov1oleg@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4881-9042>

Borysenko Anna¹, Ph.D., Assoc. Prof., Vehicle Electronics Department, tel. +38 096-110-69-49, anutochka2111@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5992-8274>

Movchan Nikita¹, postgraduate, Vehicle Electronics Department, tel. +38 093-111-08-02, nikitamovchan22@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0694-5990>

¹Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, 61002, Ukraine.