

УДК 621.355.9:629.3

doi: 10.32620/aktt.2026.4sup1.02

Д. В. МЕШКОВ, І. О. СЕЛІВАНОВ

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,
м. Харків, Україна*

ФАКТОРИ ТЕПЛОВОЇ СТАБІЛЬНОСТІ ТЯГОВИХ АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ ГІБРИДНИХ І ЕЛЕКТРИЧНИХ АВТОМОБІЛІВ У МІСЬКИХ УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ: АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

Актуальність теми зумовлена стрімким зростанням світового ринку електричних і гібридних транспортних засобів і критичною роллю теплової стабільності тягових акумуляторних батарей у забезпеченні їх енергоефективності, довговічності та безпеки. Особливої уваги потребують міські умови експлуатації, які формують специфічне комбіноване теплове навантаження, що відрізняється від рівномірного заміського руху. **Метою** статті є проведення аналітичного огляду сучасних наукових досліджень щодо факторів, які впливають на теплову стабільність тягових акумуляторних батарей електричних і гібридних автомобілів саме в міських умовах експлуатації. На основі аналізу профільних наукових публікацій систематизовано хімічні особливості акумуляторів NMC і LFP та пов'язаний з ними компроміс між енергоємністю та тепловою безпекою: встановлено, що елементи NMC-811 забезпечують на 48% вищу енергоємність порівняно з LFP, проте тепловий розгін у них відбувається в 9 разів швидше. Розглянуто фізичні механізми внутрішнього тепловиділення (омічний, ентропійний, поляризаційний) і показано, що омічна складова зростає пропорційно квадрату струму, внаслідок чого саме пікові, а не середні навантаження визначають реальний тепловий стан батареї в умовах міського руху автомобіля. Визначено специфічні для міського циклу фактори теплового навантаження – пікові навантаження при розгонах і рекуперації, затори, ефект міського «теплового острова» та особливості гібридних автомобілів. Також проаналізовано наслідки порушення теплової стабільності: від поступової деградації до теплового розгону. Порівняльний аналіз опрацьованих джерел виявив наукову прогалину: відсутність комплексних досліджень одночасної дії притаманних міському циклу теплового навантаження. **Практична цінність** огляду полягає в формуванні систематизованої теоретичної бази для подальшої розробки математичної моделі оцінки теплової стабільності акумуляторів у міських умовах експлуатації.

Ключові слова: електромобіль, гібридний автомобіль, тяговий акумулятор, літій-іонний акумулятор, теплова стабільність, Battery Thermal Management System, міський цикл експлуатації, деградація батареї, thermal runaway.

Вступ

Зі зростанням світового попиту на декарбонізацію транспортного сектору та скорочення викидів парникових газів розвиток електричного транспорту став одним із пріоритетних напрямів сучасної автомобільної промисловості. За даними Міжнародного енергетичного агентства (IEA), у 2025 році світові продажі електромобілів перевищили 20 млн. одиниць, що на 20 % більше порівняно з попереднім роком; частка електромобілів у загальному обсязі продажів нових автомобілів у світі досягла близько 25 %. Для порівняння, в 2019 році цей показник становив лише 2,1 млн. одиниць [1], що демонструє майже десятикратне зростання ринку за останні шість років. Така динаміка свідчить про стрімке поширення електричного та гібридного транспорту, що відповідає зростанню важливості тягових акумуляторних батарей як ключового елемента, від технічного стану якого залежать енергоефективність, ресурс і безпека транспортного засобу.

Незважаючи на високі темпи розвитку напрямку електричних авто, їх широке впровадження супроводжується низкою технічних викликів, одним з яких є забезпечення ефективної та безпечної роботи тягових акумуляторних батарей. Експлуатаційні характеристики літій-іонних акумуляторів значною мірою визначаються температурним режимом їх роботи. Температура безпосередньо впливає на кінетику електрохімічних реакцій, внутрішній опір елементів, ефективність процесів заряджання та розряджання, а також на технічний стан батареї.

Особливо небезпечним є перегрів акумуляторів, який сприяє перебігу побічних електрохімічних реакцій, накопиченню продуктів деградації та підвищує ризик виникнення теплового розгону, що безпосередньо загрожує безпеці експлуатації транспортного засобу. Одночасно зі зростанням питомої енергоємності сучасних акумуляторів і поширенням технологій швидкого заряджання, вимоги до забезпечення теплової стабільності батарей постійно підвищуються, що робить цю проблему одним із ключових напрямів сучасних досліджень у галузі електротранспорту.



Окремої уваги в цьому контексті потребують міські умови експлуатації, оскільки саме вони формують специфічне й нерівномірне теплове навантаження на акумуляторну батарею. Міські фактори формують інший, більш динамічний і менш передбачуваний тепловий режим роботи акумулятора порівняно із заміським чи трасовим циклом експлуатації, що потребує окремого аналізу.

Незважаючи на значну кількість досліджень, присвячених тепловим процесам у акумуляторних батареях, наукова проблема комплексної оцінки теплової стабільності саме в реальних умовах міської експлуатації залишається недостатньо розробленою. Це ускладнює своєчасне виявлення критичних температурних режимів, прогнозування виникнення теплового розгону, оцінку ризиків перегріву за змінних режимів навантаження та обґрунтоване проектування систем теплового керування батареями. Розв'язання цієї проблеми потребує систематизації наявних наукових підходів як бази для подальшої розробки математичної моделі оцінки теплової стабільності акумуляторів у міських умовах експлуатації.

Метою роботи є проведення аналітичного огляду сучасних досліджень щодо факторів, які впливають на теплову стабільність тягових акумуляторних батарей електричних і гібридних автомобілів у міських умовах експлуатації.

1. Особливості конструкції та функціонування тягових акумуляторних батарей EV і HEV

У тягових акумуляторах електричних і гібридних автомобілів домінують дві хімічні системи літій-іонних елементів: нікель-марганець-кобальтові (NMC) і літій-залізо-фосфатні (LFP). Обидві системи мають принципово різне співвідношення енергоємності та теплової стійкості, що безпосередньо визначає вимоги до системи теплового менеджменту.

NMC-елементи забезпечують вищу питому енергоємність за рахунок шаруватої оксидної структури катода, однак саме ця структура за підвищених температур схильна виділяти кисень, що підтримує горіння та прискорює розвиток теплового розгону. LFP-елементи, натомість, мають олівину структуру з міцним фосфор-кисневим зв'язком, який утримує кисень навіть за значного нагріву, забезпечуючи суттєво вищу термічну стійкість, хоча й за нижчої енергоємності [2].

Кількісне порівняння серійних елементів NMC-811 (Mini Cooper SE) і LFP (Tesla Model 3 SR+) показало: питома масова енергоємність NMC-811 становить 248 Вт·год/кг проти 168 Вт·год/кг для LFP (на 48% вище), а об'ємна – 569 Вт·год/л проти 361 Вт·год/л, відповідно. Водночас швидкість реакції теплового розгону на рівні елемента виявилася в 9 разів вищою для NMC-811, ніж для LFP, а з урахуванням

усього інтервалу поширення теплового розгону в модулі – у 5 разів вищою [3]. Це підтверджує фундаментальний інженерний компроміс: підвищення енергоємності акумулятора систематично зводить до нуля запас теплової безпеки, вимагаючи від NMC більш продуктивних систем охолодження, тоді як LFP завдяки вищій термостійкості формує менш жорсткі вимоги до теплового менеджменту [2].

1.1. Принцип роботи ТАБ, робочий діапазон температур

Тепловиділення всередині літій-іонного елемента під час заряджання й розряджання є наслідком омичного опору та електрохімічних реакцій.

Оптимальний робочий діапазон температур літій-іонної батареї становить 15-35°C, за різниці температур усередині пакета не більше 5°C [4]. Відхилення від цього діапазону в обидва боки погіршує експлуатаційні показники. При температурі нижче 15°C уповільнюється кінетика електрохімічних реакцій і зростає внутрішній опір, що знижує потужність і ємність. За температури вище 40 °C прискорюється деградація сепаратора, що може провокувати його механічне пошкодження, і це підвищує ризик короткого замикання та теплового розгону [5].

Типові показники тягових акумуляторів електромобілів становлять: ємність – 20-200 А·год, питома масова енергоємність – 150-250 Вт·год/кг, об'ємна – 300-700 Вт·год/л, питома потужність – 300-500 Вт/кг [5]. Ключовими експлуатаційними параметрами, що характеризують стан батареї та підлягають моніторингу системою керування (BMS) є: ступінь заряду (SoC), технічний стан (SoH), внутрішній опір, швидкість саморозряду, кулонівська та енергетична ефективність [5]. Саме ці параметри визначають межі допустимих температурних режимів.

1.2. Конструктивні відмінності батарейних пакетів EV і HEV

Незважаючи на спільну електрохімічну основу, батарейні пакети електромобілів (EV) і гібридних автомобілів (HEV) суттєво відрізняються за призначенням, розмірами та тепловим навантаженням.

Таблиця 1

Конструктивні відмінності
батарейних пакетів EV і HEV

Параметр	EV	HEV
Середня ємність пакета	≈62 кВт·год	≈1,3 кВт·год
Роль батареї в силовій установці	Єдине джерело енергії	допоміжне (спільно з ДВЗ)
Характер циклів заряд-розряд	глибокі, рідкі	часті, неглибокі
Типове охолодження	рідинне	здебільшого повітряне

Ємність акумулятора EV має забезпечувати автономний рух транспортного засобу, тому середня ємність пакета наразі сягає близько 62 кВт·год [6]. Натомість акумулятор HEV виконує допоміжну функцію – акумулює енергію рекуперативного гальмування для короткочасної підтримки роботи двигуна внутрішнього згоряння, а його середня ємність становить лише близько 1,3 кВт·год [6], тобто приблизно в 40-50 разів менше, ніж у типового EV. Ця різниця в ємності зумовлює й відмінності в характері теплового навантаження. Оскільки акумулятор HEV не заряджається від зовнішньої мережі, а лише циклічно поповнюється за рахунок рекуперації, він працює у вузькому діапазоні ступеня заряду з набагато частішими, але не-

глибокими циклами заряд-розряд. Це принципово інший тепловий профіль порівняно з глибокими циклами EV. Менші габарити та потужність теплового навантаження пакета HEV зазвичай дозволяють обмежитися повітряним охолодженням, тоді як батарейні пакети EV, що інтегровані в підлогу кузова та розраховані на значно вищі струми (зокрема за умов швидкого заряджання), здебільшого потребують рідинного охолодження. Додатковим фактором для HEV є безпосередня конструктивна близькість батарейного пакета до двигуна внутрішнього згоряння та вихлопної системи, що створює додаткове зовнішнє теплове навантаження, нехарактерне для EV.

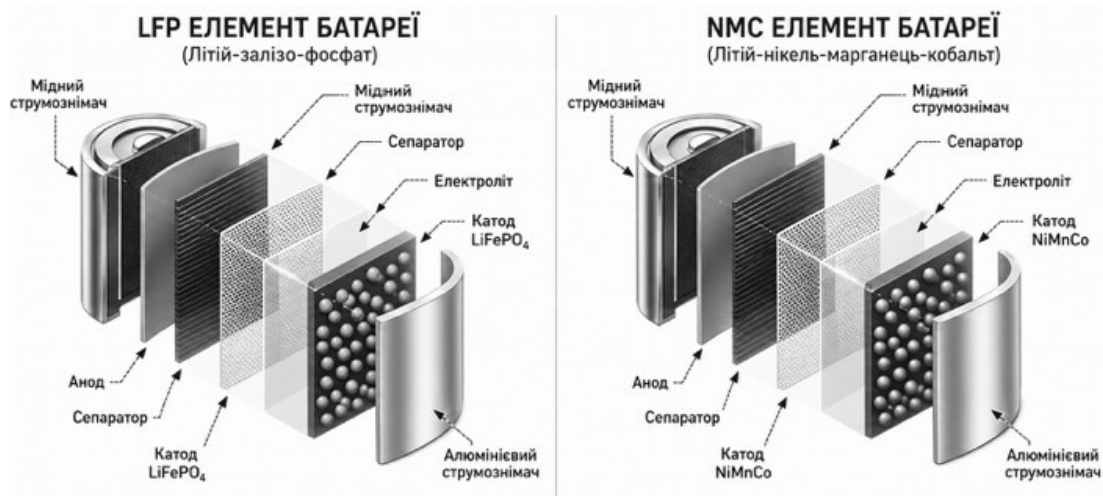


Рис. 1. Порівняння LFP і NMC на рівні елемента

1.3. Вплив температури на ресурс і безпеку батареї

Підвищена температура експлуатації є одним із найсильніших прискорювачів деградації літій-іонних акумуляторів. За результатами прискорених випробувань старіння, витримка елементів протягом 20 тижнів за температури 55°C спричиняє падіння потужності на 55%, а перевищення температури приблизно 50°C призводить до значного зниження ємності [5].

Узагальнений аналіз впливу підвищених температур навколишнього середовища на літій-іонні акумулятори електромобілів підтверджує: високі температури прискорюють деградацію через утворення небажаних побічних продуктів реакцій, пошкодження матеріалів електродів і підвищення ризику теплового розгону, причому цей вплив проявляється по-різному для холодного й жаркого клімату, а також потребує окремого розгляду в поєднанні зі швидким заряджанням [7].

Водночас і знижена температура має негативні наслідки: уповільнення електрохімічної кінетики та зростання внутрішнього опору за температур нижче

15 °C так само погіршують потужність, ємність і швидкість старіння батареї [5]. Таким чином, підтримання акумулятора в межах раніше визначеного оптимального температурного діапазону є визначальною умовою одночасного забезпечення довговічності, енергоефективності та безпеки.

2. Джерела тепловиділення в тягових акумуляторах

У структурі тепловиділення літій-іонного елемента можна виокремити три фізично різні складові: омичну (джоулеву), оборотну ентропійну та поляризаційну.

2.1. Омичні втрати

Джоулеве тепловиділення виникає внаслідок проходження струму через сумарний внутрішній опір елемента R_i , що складається з опору матеріалів електродів, іонного опору електроліту, контактного опору між струмознімачами та активним матеріалом, а також опору шару твердого електролітного інтерфейсу (SEI). Ця складова визначається залежністю

$Q_{\text{омічн}} = I^2 R_i$, тобто зростає пропорційно квадрату струму. Як приклад, подвоєння струму навантаження чи заряджання збільшує омичне тепловиділення вчетверо. Саме ця квадратична залежність робить будь-які режими з високим миттєвим струмом непропорційно більшими джерелами тепла порівняно зі стаціонарним рухом із помірним навантаженням [4].

2.2. Оборотна ентропійна складова

Інший тепловий ефект виникає безпосередньо від самої хімічної реакції всередині елемента. Залежно від напрямку струму (заряджання чи розряджання) та поточного ступеня заряду батареї реакція може або додатково виділяти тепло, або, навпаки, поглинати його й дещо охолоджуючи елемент зсередини. Наприклад, коли розгін постійно чергується з рекуперативним гальмуванням, то за цим ефектом у елементі додається тепло та потім забирається, що ускладнює прогнозування теплового стану батареї в динамічних умовах руху [5].

2.3. Поляризаційні втрати

Ще одне джерело тепла пов'язане з тим, що іонам літію потрібен час, щоб «перескочити» між електродом і електролітом та рухатися крізь них до потрібного місця. Коли струм великий, ці процеси не встигають відбуватися достатньо швидко, то батарея немов «буксує» – витрачає додаткову енергію на подолання цього опору, яка також переходить у тепло. Особливо помітно це проявляється за низьких температур, коли рух іонів вже вповільнений: у поєднанні з високим струмом навантаження це додатково посилює тепловиділення [5].

Отже, всі три внутрішні джерела тепла об'єднують спільна закономірність: інтенсивність тепловиділення різко зростає зі збільшенням миттєвого струму, а не лише середнього навантаження за цикл.

3. Зовнішні фактори теплового навантаження та їх прояв у міських умовах експлуатації

Квадратична залежність тепловиділення від миттєвого струму означає, що не всі зовнішні умови експлуатації однаково небезпечні для теплової стабільності акумулятора. Вирішальну роль відіграють ті фактори, що спричиняють високі пікові струмові навантаження або погіршують тепловіддачу. У міських умовах експлуатації, на відміну від рівномірного руху по шосе, кілька таких факторів систематично діють одночасно, а не поодиночі, що й формує специфіку теплового навантаження акумулятора в місті. Загальний перелік цих факторів окреслено в [8], нижче кожен із них розглянуто детальніше.

3.1. Пікові навантаження: розгони, гальмування, рекуперація та перевантаження (stop-and-go)

Міський трафік характеризується різким чергуванням розгонів, гальмувань і зупинок на короткій дистанції, низькою середньою швидкістю руху та частими зупинками на маршруті. Саме такий характер руху відтворює стандартний випробувальний цикл UDDS (Urban Dynamometer Driving Schedule), що традиційно використовується для моделювання міської їзди в дослідженнях електромобілів.

Кожен епізод розгону означає короточасний пік розрядного струму, а кожне гальмування з рекуперацією – пік зарядного струму протилежного напрямку. Навіть за нижчої середньої потужності руху порівняно з рухом по шосе, стрибкоподібний характер міського навантаження може створювати локально вищу інтенсивність тепловиділення в короткі проміжки часу.

Рекуперативне гальмування додатково означає регулярну зміну напрямку струму – від розрядного до зарядного. Ця циклічність багаторазово перемикає знак ентропійної складової тепловиділення, що ускладнює прогнозування теплового стану батареї.

Граничним випадком того самого механізму є перевантаження, тобто тривала робота батареї в режимах, що перевищують номінальні струмові характеристики, наприклад за буксирування причепа чи екстремального прискорення. У таких умовах інтенсивність тепловиділення може перевищити максимальну продуктивність системи охолодження, що спричиняє прогресуюче зростання температури елемента та за відсутності своєчасного втручання BMS підвищує ризик ініціювання теплового розгону.

3.2. Затори: обмежений обдув батареї, тривала робота на низьких швидкостях

Рух у заторах – інша характерна риса міської експлуатації. Низька швидкість або повна зупинка автомобіля зменшує інтенсивність зустрічного потоку повітря навколо кузова та підлоги, що знижує ефективність конвективного тепловідведення, в особливості для систем, які частково покладаються на природний обдув.

Водночас перебування в заторі не означає відсутності теплового навантаження: допоміжні системи автомобіля продовжують споживати струм від батареї навіть під час стояння в черзі, підтримуючи базовий рівень тепловиділення. У спекотну пору року до цього додається інтенсивна робота системи кондиціонування салону, що подовжує час роботи компресора саме тоді, коли ефективність тепловіддачі від батареї й так знижена через відсутність обдуву [4].

3.3. Висока температура навколишнього середовища та ефект міського «теплого острова»

Температура довкілля не є джерелом тепловиділення як такого, а визначає ефективність відведення вже згенерованого тепла. Швидкість тепловіддачі з поверхні батареї пропорційна різниці температур між акумулятором і навколишнім середовищем, тому підвищення температури довкілля знижує ефективність охолодження за незмінної інтенсивності внутрішнього тепловиділення [7].

Саме тому ефект міського «теплого острова» має пряме значення для теплової стабільності акумулятора. За даними Агентства з охорони навколишнього середовища США (EPA), денна температура

повітря в міських районах у середньому на 0,5-4°C вища, ніж на прилеглих неурбанізованих територіях, а нічна – на 1-3°C. Цей ефект найсильніше проявляється в щільно забудованих містах за тихої, малохмарної погоди [9].

Ще виразніше цей ефект проявляється на рівні поверхонь. Асфальт і темні дорожні покриття в спекотний сонячний день можуть нагріватися на кілька десятків градусів Цельсія вище за температуру навколишнього повітря [9]. Оскільки батарейний пакет електромобіля здебільшого розміщується внизу кузова, то він перебуває в безпосередній близькості до розпеченого дорожнього покриття та зазнає додаткового радіаційного й конвективного нагріву знизу.

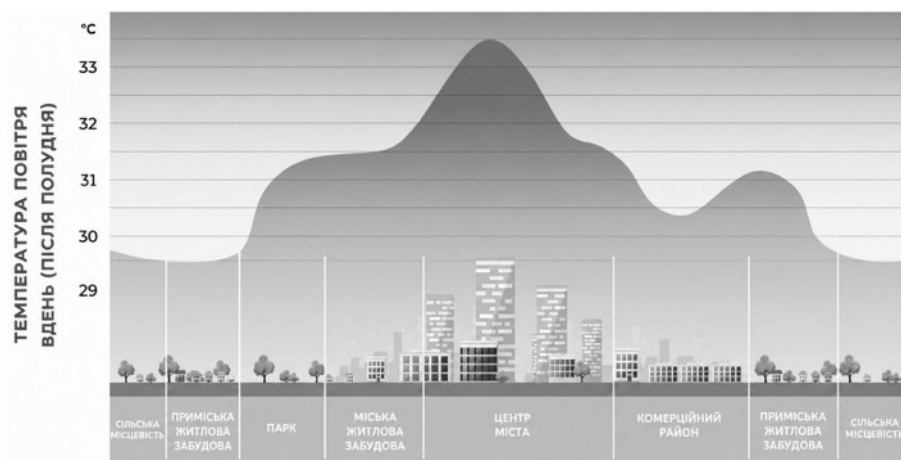


Рис. 2. Ефект міського теплового острова

У поєднанні ці чинники систематично звужують запас температурного діапазону ще до початку руху: батарея в спекотний міський день стартує з вищої базової температури, а ефективність її охолодження одразу нижча.

3.4. Швидке заряджання (DC Fast Charging) у міській інфраструктурі

Швидке заряджання також є одним із факторів теплового навантаження. За оцінками, для тягової батареї ємністю 100 кВт·год 10-хвилинне заряджання (що відповідає струму порядку 6С) може супроводжуватися тепловиділенням на рівні близько 50 кВт. Для обмеження підвищення температури елемента в межах 20°C системі охолодження необхідно відводити приблизно 35 кВт цього тепла [10]. Експериментальні дані також показують, що за відсутності активного охолодження заряджання струмом 3 с може підвищувати температуру елемента приблизно на 50°C відносно початкової температури 20°C [10].

У міських умовах ефект швидкого заряджання посилюється характером використання: часті короткі

сесії заряджання протягом дня означають, що батарея може не встигати повністю охолонути між сесіями. У поєднанні з підвищеною температурою довкілля влітку це формує кумулятивне теплове навантаження, коли кожна наступна сесія швидкого заряджання починається за вже підвищеної базової температури батареї.

3.5. Особливості експлуатації гібридних автомобілів

Для гібридних транспортних засобів до розглянутих вище факторів додаються особливості, зумовлені самою архітектурою силової установки. По-перше, як зазначено вище, близькість батареї HEV до двигуна внутрішнього згоряння створює додаткове зовнішнє теплове навантаження, що нехарактерне для EV.

По-друге, оскільки акумулятор HEV не заряджається від зовнішньої мережі, а лише циклічно поповнюється рекуперацією, він працює в режимі частих, але неглибоких циклів заряд-розряд. Це по суті стан постійного «stop-and-go» на рівні батареї, навіть

якщо сам автомобіль рухається рівномірно. Системи «старт-стоп» двигуна, поширені в гібридних автомобілях, додатково створюють короткочасні піки струму під час кожного запуску чи перезапуску ДВЗ.

По-третє, значно менша ємність акумулятора HEV означає меншу теплову масу пакета. За тієї самої інтенсивності тепловиділення менша теплова маса нагрівається швидше, тобто акумулятор HEV має менший запас часу на реакцію системи охолодження, перш ніж температура вийде за межі оптимального діапазону. У сукупності ці три фактори роблять теплову поведінку батареї HEV в місті специфічною й вимагають окремого розгляду при розробці моделі оцінки теплової стабільності.

Підсумовуючи, жоден із розглянутих у цьому розділі факторів не діє в міських умовах ізольовано: часті пікові навантаження накладаються на обмежене тепловідведення в заторах, підвищена температура довкілля знижує ефективність охолодження саме тоді, коли теплове навантаження й так зростає через кондиціонування салону, а щільна інфраструктура швидкого заряджання посилює кумулятивний ефект підвищеної базової температури. Саме ця одночасна, накопичувальна дія кількох факторів визначає необхідність комплексної моделі оцінки теплової стабільності, а не окремого врахування кожного чинника.

4. Наслідки порушення теплової стабільності

Розглянуті попередньо джерела та фактори теплового навантаження за відсутності адекватного теплового керування призводять до конкретних, вимірюваних наслідків для батареї – від поступової деградації до катастрофічного теплового розгону.

4.1. Деградація

Підвищена температура прискорює кілька паралельних процесів деградації:

- потовщення шару твердого електролітного інтерфейсу на аноді, що незворотно зв'язує рухомий літій;
- руйнування та відшарування активного матеріалу електродів;
- розкладання електроліту.

Натурні випробування в умовах спекотного клімату фіксують вимірюване зниження технічного стану вже за один літній сезон експлуатації [5].

4.2. Зниження ємності

Прямим наслідком цих процесів є зменшення доступної ємності: втрата рухомого літію скорочує

кількість носіїв заряду, а руйнування активного матеріалу – фізичний об'єм, здатний його накопичувати. За температур понад 50 °C зниження ємності стає вираженим [5]. Водночас швидкість втрати ємності зростає з температурою нелінійно й додатково прискорюється за високих струмів заряджання – що особливо актуально для міських умов зі швидким заряджанням.

4.3. Збільшення внутрішнього опору

Ті самі процеси спричиняють і зростання внутрішнього опору елемента: потовщений SEI-шар створює додатковий бар'єр на межі електрод-електроліт, а механічна деградація погіршує контакт активного матеріалу зі струмознімачами. За випробуваннями, найжорсткіші умови зберігання (пряме сонячне опромінення за повного заряду) спричинили зростання опору на 6,5% протягом одного літнього сезону [5]. Небезпека полягає в самопідсиленні цього процесу: вищий опір означає більше тепла, а більше тепла – швидшу деградацію та ще вищий опір.

4.4. Нерівномірність температур

Критерій допустимої різниці температур у межах батарейного пакета (не більше 5°C) існує саме тому, що нерівномірний розподіл температури є самостійним джерелом ризику, а не лише показником якості охолодження. Комірки, розташовані ближче до входу охолоджувального контуру чи з кращим доступом до потоку повітря або рідини, працюють при нижчій температурі, тоді як комірки в «мертвих зонах» охолодження, поруч із додатковими джерелами тепла систематично перегріваються відносно решти.

Ця нерівномірність із часом самопідсилюється: гарячіші комірки деградують швидше, внаслідок чого їхній внутрішній опір зростає сильніше за опір сусідніх, холодніших комірок. Якщо з'єднання паралельне, то це призводить до нерівномірного розподілу струму між комірками, в разі послідовного з'єднання – до дисбалансу ступеня заряду між ними. Обидва ефекти додатково посилюють перегрів вже й так гарячіших комірок, формуючи такий самий процес, але вже на рівні пакета, а не окремого елемента. Саме тому забезпечення температурної однорідності пакета є не менш важливим завданням BTMS (Battery Thermal Management System), ніж підтримання середньої температури в допустимому діапазоні.

4.5. Тепловий розгін

Найнебезпечнішим наслідком порушення теплової стабільності є тепловий розгін (thermal runaway). Цей процес являє собою послідовність ек-

зотермічних реакцій усередині елемента, що розвивається за зростаючою швидкістю й практично не піддається зупинці після ініціації.

Розвиток теплового розгону прийнято описувати послідовністю стадій, прив'язаних до характерних температурних порогів. Першою відбувається стадія розкладання шару SEI на поверхні анода за температур приблизно 80-120°C, що оголює літійований графіт і запускає його екзотермічну реакцію з електролітом [11]. У міру подальшого зростання температури, приблизно за 130-170°C, плавиться сепаратор – тонка полімерна плівка, що фізично розділяє анод і катод; це призводить до внутрішнього короткого замикання, яке різко пришвидшує тепловиділення [11]. За ще вищих температур розкладається матеріал катода з вивільненням кисню, що уможливує додаткові екзотермічні реакції з анодом і формує другий, значно потужніший пік тепловиділення. На цій стадії відбувається спрацювання запобіжного клапана елемента, викид горючих газів, і за несприятливих умов – займання [11].

Хімічний склад катода істотно впливає на температурний поріг ініціації теплового розгону: для елементів NMC-811 цей поріг приблизно на 40°C нижчий, ніж для LFP [12], а швидкість поширення розгону між елементами модуля для NMC-811 у кілька разів вища, ніж для LFP [3]. Крім хімічного складу, важливим є і технічний стан елемента: за даними літератури, зістарені або раніше перезаряджені елементи можуть входити в стадію екзотермічного розкладання на 20-40 °C раніше, ніж нові [11].

Ініціювати тепловий розгін можуть фактори різної природи: теплові, електричні та механічні (пошкодження корпусу елемента). Незалежно від тригера, кінцевий сценарій розвитку залишається незмінним, що і робить тепловий розгін центральною проблемою безпеки тягових акумуляторних батарей.

Таким чином, наслідки порушення теплової стабільності утворюють ієрархію зростаючої тяжкості: від поступової, здебільшого прихованої деградації через нерівномірність теплового стану пакета до катастрофічного теплового розгону. Кожен попередній рівень підвищує ймовірність переходу до наступного.

5. Сучасні системи забезпечення теплової стабільності (BTMS)

Системи теплового менеджменту акумуляторів прийнято поділяти на пасивні, активні та гібридні. Пасивні системи відводять або накопичують тепло за рахунок природних фізичних процесів без витрат додаткової енергії, забезпечуючи простоту конструкції, але обмежену продуктивність за високих навантажень. Активні системи (примусове повітряне та рі-

динне охолодження) забезпечують вищу продуктивність тепловідведення ціною складнішої конструкції та додаткового енергоспоживання. Гібридні системи поєднують переваги обох підходів. Спільна мета всіх цих систем – утримати батарею в межах раніше визначеного оптимального температурного діапазону.

5.1. Повітряне охолодження

Це найпростіший і найдешевший підхід, що передбачає обдув елементів чи модулів потоком повітря, природним або примусовим. Основні переваги – це конструктивна простота, низька маса, відсутність ризику витоку теплоносія та мінімальні витрати на обслуговування. Водночас через відносно низький коефіцієнт тепловіддачі повітря ця система має обмежену продуктивність і недостатня для режимів швидкого заряджання чи інтенсивних міських пікових навантажень. Саме тому повітряне охолодження й досі залишається типовим рішенням здебільшого для HEV з їхньою невеликою тепловою масою пакета.

5.2. Рідинне охолодження

Цей тип охолодження використовує циркуляцію рідкого теплоносія (переважно суміші води з гліколем) через канали чи охолоджувальні пластини, інтегровані в конструкцію батарейного пакета. Завдяки значно вищому коефіцієнту тепловіддачі рідини порівняно з повітрям ця система забезпечує суттєво продуктивніше тепловідведення й краще підходить для умов швидкого заряджання та високих пікових навантажень. Недоліками є конструктивна складність, додаткова маса, ризик витоку теплоносія та енергоспоживання насосів і компресора [2, 4].

5.3. Матеріали з фазовим переходом (PCM)

Охолодження на основі матеріалів із фазовим переходом (Phase Change Materials) використовує приховану теплоту плавлення речовини, що оточує елементи батареї: при досягненні температури плавлення PCM поглинає значну кількість тепла без істотної зміни власної температури, згладжуючи температурні піки. Це суто пасивна система, що не потребує додаткового енергоспоживання під час роботи.

Порівняльне чисельне дослідження циліндричного елемента з ребрами показало: застосування PCM замість повітряного охолодження знижує максимальну температуру елемента з 43°C до 31°C у виконанні без ребер, а мінімальну температуру – з 34°C до 29°C у виконанні з ребрами [13]. Основним обмеженням PCM є те, що його теплопоглинальна здатність не безмежна: за тривалого чи повторюваного

теплого навантаження матеріал може повністю розплавитися й втратити здатність поглинати додаткове тепло, потребуючи часу на регенерацію.

5.4. Теплові трубки (Heat Pipes)

Це герметичні пристрої, що передають тепло за рахунок циклу випаровування й конденсації робочої рідини всередині капілярної структури, забезпечуючи ефективну теплопровідність, на порядки вищу за суцільні металеві провідники, за мінімальної різниці температур між гарячим і холодним кінцями. Це дозволяє ефективно передавати тепло від елементів до єдиної холодної пластини чи радіатора, покращуючи температурну однорідність пакета, при цьому не маючи рухомих частин, що потребують обслуговування [2]. Обмеженнями є чутливість ефективності до просторової орієнтації та обмежена гранична потужність теплопередачі за екстремальних теплових навантажень.

5.5. Гібридні BTMS

Гібридні системи поєднують кілька з розглянутих вище підходів. Найчастіше PCM із рідинним чи повітряним охолодженням і ребрами. Це створено, щоб поєднати здатність PCM згладжувати короточасні пікові навантаження з можливістю активної системи безперервно відводити накопичене тепло, регенеруючи теплопоглинальну здатність PCM. Такий

підхід забезпечує більш стабільну теплову поведінку за різноманітних і змінних режимів експлуатації [2], що особливо актуально саме для міських умов.

5.6. Інтелектуальне керування BMS

Окремим напрямом забезпечення теплової стабільності є не сама конструкція системи охолодження, а алгоритмічна оптимізація її роботи засобами BMS. Прикладом цього є система, що розроблена на основі динамічного програмування онлайн-стратегії керування рідинним охолодженням пакета LiFePO₄, що формулює задачу як мінімізацію сумарної вартості деградації батареї та витрат електроенергії на охолодження. На основі результатів динамічного програмування виведено три прості експлуатаційні правила: «швидке охолодження», «повільне охолодження» та «підтримання температури». Ці режими роботи за можливості пріоритетно використовують енергію рекуперативного гальмування для живлення системи охолодження [14]. Такий підхід має особливе значення для міських умов експлуатації: оскільки рекуперативне гальмування є невід'ємною частиною міського «stop-and-go» руху, інтелектуальне керування дозволяє перетворити цю ж енергію на ресурс для активного охолодження замість додаткового теплового навантаження.

Таблиця 2

Порівняльна характеристика систем теплового менеджменту акумуляторів

Тип BTMS	Принцип дії	Переваги	Недоліки
Повітряне	конвективний обдув елементів потоком повітря	простота, низька маса та вартість, відсутність ризику витоку	низька продуктивність, недостатня для DCFC та пікових навантажень
Рідинне	циркуляція водно-гліколевої суміші через канали чи пластини	висока продуктивність, придатність для швидкого заряджання	складність, маса, ризик витоку, енергоспоживання насоса
PCM	поглинання прихованої теплоти плавлення матеріалу	пасивність, згладжування температурних піків	обмежена теплоємність, потреба в регенерації
Теплові трубки	цикл випаровування конденсації в капілярній структурі	висока ефективна теплопровідність, однорідність поля температур	чутливість до орієнтації, обмежена гранична потужність
Гібридні	комбінація пасивних і активних методів	адаптивність до змінних режимів навантаження	вища конструктивна складність і вартість
Інтелектуальне керування BMS	алгоритмічна оптимізація режиму охолодження	зниження енергоспоживання й деградації	потреба в точній моделі старіння та прогнозі навантаження

Жодна з розглянутих систем не є універсальною та оптимальною для всіх умов експлуатації. Вибір і комбінування підходів залежить від хімії

акумулятора, характерних режимів навантаження та економічних обмежень конкретного транспортного засобу.

6. Порівняльний аналіз сучасних досліджень

Наведені попередньо джерела різняться за методом, методикою та рівнем деталізації – від загальних оглядів до вузькоспеціалізованих експериментальних досліджень.

Дослідження Narasis S. та ін. [7] присвячено впливу підвищеної температури навколишнього середовища на літій-іонні батареї електромобілів. Автори показали, що високі температури прискорюють деградацію по-різному, залежно від хімічного складу елемента, та наголосили на необхідності диференційованого, хімічно-специфічного підходу до теплового захисту батарей, а не єдиної універсальної методики.

Найбільш комплексним серед опрацьованих джерел є огляд Al Janaideh M. та ін. [5], у якому систематизовано модель Бернарді для розрахунку тепловиділення, підтверджено раніше згаданий оптимальний робочий діапазон, а також наведено дані сезонного старіння елементів у спекотному кліматі: під прямим сонячним опроміненням і при повному заряді технічний стан батареї знижується на 6%, а внутрішній опір зростає на 6,5% лише за один літній сезон.

Wen T. та ін. [2] запропонували класифікацію систем теплового менеджменту на пасивні, активні та гібридні й показали, що саме гібридні рішення забезпечують найкращу адаптивність до змінних режимів навантаження. Як висновок, це має пряме значення для міських умов експлуатації з їх поєднанням кількох одночасно діючих теплових факторів.

У роботі Hwang F. S. та ін. [4] здійснено порівняльний аналіз чотирьох основних типів BTMS – повітряного, рідинного, PCM та термоелектричного охолодження. Також були визначені основні критерії – продуктивність тепловідведення, енергоефективність та конструктивна складність. Автори зробили висновок, що жоден із цих типів не є універсальним: кожен має власні критерії застосування залежно від інтенсивності теплового навантаження й конструктивних обмежень конкретного транспортного засобу.

Нарешті, дослідження Schöberl J. та ін. [3], виконане на реальних серійних елементах NMC-811 та LFP (з автомобілів Mini Cooper SE та Tesla Model 3 SR+ відповідно), кількісно підтвердило фундаментальний компроміс між енергоемністю та тепловою безпекою: питома енергоемність NMC-811 на 48% вища за LFP, проте швидкість поширення теплового розгону на рівні елемента виявилася в 9 разів вищою.

Аналіз розглянутих джерел дозволяє виділити кілька стійких закономірностей. По-перше, попри різні об'єкти й методики, джерела одностайні щодо оптимального робочого діапазону 15-35°C та щодо принципової переваги гібридних BTMS над будь-якою окремою пасивною чи активною системою. Ця теза повторюється незалежно від інших, що надає їй статусу усталеного наукового консенсусу, а не окремої гіпотези.

По-друге, в джерелах простежується стійка розбіжність щодо хімічної основи акумулятора: дослідження, орієнтовані на енергоемність, підтверджують перевагу NMC за питомою енергоемністю через суттєво нижчий запас теплової безпеки, тоді як дослідження безпеки послідовно віддають перевагу LFP саме через її термостійкість. Жодне з опрацьованих джерел не пропонує єдиного узгодженого критерію вибору хімічної основи для конкретних умов експлуатації.

Найважливішим результатом цього порівняльного аналізу є виявлена прогалина, безпосередньо пов'язана з науковою проблемою цього дослідження. Абсолютна більшість опрацьованих джерел вивчає теплову поведінку акумулятора або в лабораторних умовах зі сталим чи контрольовано змінним струмовим навантаженням, або в межах одного конкретного сценарію. Таким чином, жодне з надійно перевірених джерел не пропонує комплексної моделі, яка одночасно враховувала б кілька одночасно діючих міських факторів, а не кожен із них окремо. Саме цю прогалину й покликана заповнити подальша розробка математичної моделі в межах цього дослідження.

Висновки

Теплова стабільність є одним із визначальних факторів довговічності, енергоефективності та безпеки тягових акумуляторних батарей EV та HEV: відхилення від оптимального температурного діапазону систематично прискорює деградацію активних матеріалів, а перегрів підвищує ризик теплового розгону.

Тепловиділення в літій-іонному елементі визначається трьома фізично різними механізмами – омичним, ентропійним і поляризаційним. Кожен із них зростає непропорційно швидко саме з миттєвим струмом навантаження, а не з його середнім значенням за цикл. Ця закономірність є ключовою для розуміння того, чому характер зміни навантаження в часі, а не лише його середня інтенсивність, визначає реальне теплове навантаження акумулятора.

Міський цикл експлуатації створює специфічне, комбіноване теплове навантаження: часті пікові навантаження при розгонах і рекуперації, обмежене тепловідведення в заторах і підвищена температура довілля через ефект міського «теплого острова» діють не поодиночки, а одночасно й накопичувально, що якісно відрізняє міський режим від рівномірного заміського руху.

Хімічний склад акумулятора формує фундаментальний і досі не розв'язаний компроміс між питомою енергоємністю та запасом теплової безпеки: підвищення енергоємності систематично звужує цей запас, а вибір хімічної основи для конкретних умов експлуатації залишається радше інженерним компромісом, ніж усталеним науковим рішенням.

Для гібридних транспортних засобів до загальних факторів теплового навантаження додається специфіка архітектури: безпосередня близькість батареї до двигуна внутрішнього згоряння, безперервний режим частого неглибокого циклування та менша теплова маса пакета. Це вимагає окремого розгляду порівняно з електромобілями.

Порівняльний аналіз опрацьованих джерел виявив істотну наукову прогалину: попри значну кількість досліджень теплових процесів в акумуляторах, практично відсутні роботи, що комплексно досліджували б одночасну дію характерних для міста факторів теплового навантаження. Саме усунення цієї прогалини є метою подальшого етапу цього дослідження.

Внесок авторів: формулювання проблеми – Д. В. Мешков; огляд та аналіз інформаційних джерел – І. О. Селіванов.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що немає конфлікту інтересів щодо цього дослідження, фінансового, особистого, авторського чи іншого, який міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в цій статті.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Наявність даних

Рукопис не має супутніх даних.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що вони не використовували методи штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису

Література

1. *Global EV Outlook 2026* // International Energy Agency (IEA). – Paris, 2026. Available et: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2026> (дата звернення: 16.07.2026).
2. *Advances and Challenges in the Battery Thermal Management Systems of Electric Vehicles* / T. Wen, Z. Zhou, Y. Zhang, X. Xu // *Materials*. – 2025. – Vol. 18, iss. 20. – 23 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma18204718>.
3. *Thermal runaway propagation in automotive lithium-ion batteries with NMC-811 and LFP cathodes: Safety requirements and impact on system integration* / J. Schöberl, M. Ank, M. Schreiber et al. // *eTransportation*. – 2024. – Vol. 19. – 17 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2023.100305>.
4. *Review of battery thermal management systems in electric vehicles* / F. S. Hwang, T. Confrey, C. Reidy et al. // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2024. – Vol. 192. – 22 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114171>.
5. *A Comprehensive Review of Thermal Management Challenges and Safety Considerations in Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles* / M. Al Janaideh, A. Alawi, A. Saeed, M. H. Sharqawy // *Batteries*. – 2025. – Vol. 11, iss. 7. – 49 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/batteries11070275>.
6. *EV battery pack capacity: bigger batteries or better technology?* / Nickel Institute. – Available et: <https://nickelinstitute.org/en/blog/2026/july/ev-battery-pack-capacity-bigger-batteries-or-better-technology> (дата звернення: 17.07.2026).
7. Harasis, S. *The impact of high ambient temperatures on lithium-ion batteries in electric vehicles: An in-depth review of thermal performance and chemistry-specific response* / S. Harasis, I. Khan, A. Massoud // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2026. – Vol. 229. – 22 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116623>.
8. Мешков, Д. В. Фактори, що впливають на теплову стабільність акумуляторних батарей у міських умовах експлуатації / Д. В. Мешков, І. О. Селіванов // *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я : тези доп. XXXIV Міжнар. наук.-практ. конф. MicroCAD-2026, Харків, 13–16 трав. 2026 р. – Харків : НТУ «ХПІ», 2026. – С. 234.*
9. *What Are Heat Islands?* / U.S. Environmental Protection Agency (EPA). – Available et: <https://www.epa.gov/heatislands/what-are-heat-islands> (дата звернення: 17.07.2026).
10. *Heat Generation Concerns Associated with Extreme Fast Charging* / M. Keyser, W. Mai, S. Santhanagopalan et al. // U.S. Department of Energy, Vehicle Technologies Office. – 2020. – Available et:

<https://www.osti.gov/biblio/1669483> (дата звернення: 05.08.2026).

11. *Advances in Early Warning of Thermal Runaway in Lithium-Ion Battery Energy Storage Systems* / D. Han, J. Wang, C. Yin, Y. Zhao // *Advanced Sensor Research*. – 2025. – Vol. 4, iss. 5. – 21 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/adsr.202400165>.

12. *Thermal runaway studies of power lithium-ion batteries under various abusive conditions: A review* / H. Fan, J. Zhang, G. Zhang et al. // *Applied Thermal Engineering*. – 2025. – Vol. 283. – 21 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.128945>.

13. Karimi, K. M. *Thermal Management of Lithium-Ion Batteries: A Comparative Study of Phase Change Materials and Air-Cooling Systems Equipped with Fins* / K. M. Karimi. – 2025. – Available et: <https://arxiv.org/abs/2503.10244> (дата звернення: 19.07.2026).

14. *Optimal battery thermal management for electric vehicles with battery degradation minimization* / Y. Wu, Z. Huang, D. Li // *Applied Energy*. – 2024. – Vol. 353, P. A. – 17 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122090>.

References

1. *Global EV Outlook 2026*. International Energy Agency (IEA), Paris, 2026. Available et: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2026> (accessed 16.07.2026).

2. Wen, T., Zhou, Z., Zhang, Y., Xu, X. *Advances and Challenges in the Battery Thermal Management Systems of Electric Vehicles*, *Materials*, 2025, vol. 18, iss. 20. 23 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma18204718>.

3. Schöberl, J., Ank, M., Schreiber, M., Wassiliadis, N., Lienkamp, M. *Thermal runaway propagation in automotive lithium-ion batteries with NMC-811 and LFP cathodes: Safety requirements and impact on system integration*. *eTransportation*, 2024, vol. 19. 17 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2023.100305>.

4. Hwang, F. S., Confrey, T., Reidy, C., Picovici, D., Callaghan, D., Culliton, D., Nolan, C. *Review of battery thermal management systems in electric vehicles*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2024, vol. 192. 22 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114171>.

5. Al Janaideh, M., Alawi, A., Saeed, A., Sharqawy, M. H. *A Comprehensive Review of Thermal Management Challenges and Safety Considerations in Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles*. *Batteries*, 2025, vol. 11, iss. 7. 49 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/batteries11070275>.

6. *EV battery pack capacity: bigger batteries or better technology?* Nickel Institute. Available et: <https://nickelinstitute.org/en/blog/2026/july/ev-battery-pack-capacity-bigger-batteries-or-better-technology> (accessed: 17.07.2026).

7. Harasis, S., Khan, I., Massoud, A. *The impact of high ambient temperatures on lithium-ion batteries in electric vehicles: An in-depth review of thermal performance and chemistry-specific response*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2026, vol. 229. 22 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116623>.

8. Meshkov, D. V., Selivanov, I. O. *Factors affecting the thermal stability of battery packs under urban operating conditions* [Фактори впливу на теплову стабільність акумуляторних батарей у міських умовах експлуатації]. Інформаційні технології: наука, техніка, технології, освіта, здоров'я : тези доп. KhKhKhIV Mizhnar. nauk.-prakt. konf. MicroCAD-2026, Kharkiv, 13–16 trav. 2026 r. NTU «KhPI» [Information Technologies: Science, Engineering, Technology, Education, Health, Proceedings of the XXXIV International Scientific and Practical Conference MicroCAD-2026, Kharkiv, May 13-16, 2026, NTU "KhPI"], Kharkiv, pp. 234.

9. *What Are Heat Islands?* U.S. Environmental Protection Agency (EPA). Available et: <https://www.epa.gov/heatislands/what-are-heat-islands> (accessed 17.07.2026).

10. Keyser, M., Mai, W., Santhanagopalan, S., Dufek, E., Lubner, S. and Prasher, R. *Heat Generation Concerns Associated with Extreme Fast Charging*. U.S. Department of Energy, Vehicle Technologies Office. Available et: <https://www.osti.gov/biblio/1669483>

11. Han, D., Wang, J., Yin, C., Zhao, Y. *Advances in Early Warning of Thermal Runaway in Lithium-Ion Battery Energy Storage Systems*. *Advanced Sensor Research*, 2025, vol. 4, iss. 5. 21 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/adsr.202400165>.

12. Fan, H., Zhang, J., Zhang, G., Jiang, L., Jiang, W., He, Z., Wang, X., Wen, Y., Xu, N. *Thermal runaway studies of power lithium-ion batteries under various abusive conditions: A review*. *Applied Thermal Engineering*, 2025, vol. 283. 21 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.128945>.

13. Karimi, K. M. *Thermal Management of Lithium-Ion Batteries: A Comparative Study of Phase Change Materials and Air-Cooling Systems Equipped with Fins*, 2025. Available et: <https://arxiv.org/abs/2503.10244> (accessed 19.07.2026).

14. Wu, Y., Huang, Z., Li, D., Li, H., Peng, J., Stroe, D., Song, Z. *Optimal battery thermal management for electric vehicles with battery degradation minimization*. *Applied Energy*, 2024, vol. 353, part A. 17 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122090>.

Надійшла до редакції 10.07.2026, отримано в доопрацьованому вигляді 13.08.2026.

Дата ухвалення 19.08.2026, дата публікації 03.09.2026

THERMAL STABILITY FACTORS OF TRACTION BATTERY PACKS OF HYBRID AND ELECTRIC VEHICLES UNDER URBAN OPERATING CONDITIONS: AN ANALYTICAL REVIEW

Denys Meshkov, Ivan Selivanov

The relevance of the topic stems from the rapid growth of the global market for electric and hybrid vehicles and from the critical role that the thermal stability of traction battery packs plays in ensuring their energy efficiency, service life, and safety. Urban operating conditions require particular attention, as they generate a specific combined thermal load that differs from steady suburban driving. The purpose of this article is to carry out an analytical review of current scientific research on the factors affecting the thermal stability of traction battery packs in electric and hybrid vehicles, specifically under urban operating conditions. Based on the analysis of relevant scientific publications, the chemical characteristics of NMC and LFP batteries and the associated trade-offs between energy density and thermal safety have been systematized; the physical mechanisms of internal heat generation (ohmic, entropic, polarization) have been examined; and city-specific thermal load factors have been identified, namely peak loads during acceleration and regenerative braking, traffic congestion, the urban heat island effect and the specific operating profiles of hybrid vehicles. The consequences of loss of thermal stability, ranging from gradual degradation to thermal runaway, as well as modern battery thermal management systems (BTMS), have also been analyzed. A comparative analysis of the reviewed sources revealed a research gap: the lack of comprehensive studies addressing the simultaneous effects of urban thermal load factors. The practical value of the review lies in establishing a systematic theoretical basis for further developing a mathematical model to assess the thermal stability of batteries under urban operating conditions as part of the thesis research.

Keywords: electric vehicle; hybrid vehicle; traction battery; lithium-ion battery; thermal stability; Battery Thermal Management System; urban driving cycle; battery degradation; thermal runaway.

Мешков Денис Вікторович – канд. техн. наук, доцент, професор кафедри «Двигуни та гібридні енергетичні установки», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна.

Селіванов Іван Олексійович – аспірант кафедри «Двигуни та гібридні енергетичні установки», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна.

Denys Meshkov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor at the Department of Engines and Hybrid Power Plants, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine; e-mail: denys.meshkov@khp.edu.ua; ORCID: 0000-0002-9114-9868.

Ivan Selivanov – PhD student of the Department of Engines and Hybrid Power Plants, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine; e-mail: Ivan.Selivanov@ieec.khp.edu.ua; ORCID: 0009-0005-5719-3418.