

Бодак М.В., Бодак В.І.
Луцький національний технічний університет

ВИДИ СИСТЕМ ТЕРМОРЕГУЛЯЦІЇ ТЯГОВОЇ БАТАРЕЇ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ ТА ЇХ АНАЛІЗ

Збільшення виробництва електромобілів (ЕМ) значною мірою залежить від надійності та безпеки основних вузлів та агрегатів. Одною з найдорожчих та небезпечних частин електромобіля є силова (тягова) електрична батарея. Найбільшого поширення набули літій-іонні батареї (Li-ion). Важливою характеристикою, що впливає на їхню безпеку, є продуктивність та термін служби. Ці показники батареї залежать від середньої робочої температури, яка повинна знаходитися в оптимальному діапазоні для запобігання ряду негативних явищ. Саме тому робота систем терморегулювання (СТР) акумуляторних блоків ЕМ є важливою для забезпечення коректного функціонування в будь-яких умовах навколишнього середовища та експлуатації.

Літій-іонні (Li-ion) батареї стали домінуючою технологією для автомобільної промисловості завдяки деяким унікальним особливостям, таких як висока потужність, ємність, здатність зберігання та велика кількість можливих перезарядок. Однак, в умовах глибокого розряду генерується велика кількість теплової енергії внаслідок окисно-відновних реакцій, і температура батареї надмірно та неконтрольовано зростає з можливим подальшим samozапаленням. Отже, необхідно розробити таку систему охолодження батареї, щоб запобігти пошкодженню елементів через високу робочу температуру. Виникають і інші проблеми, коли Li-ion батареї досягають температури, нижчої за оптимальні значення, наприклад, нездатність віддавати енергію або швидка деградація та зменшення ємності. Саме тому потрібна ефективна система, здатна розігріти пристрій для досягнення оптимального температурного діапазону, тобто система терморегулювання (СТР).

Ключові слова: електромобілі, терморегуляція, безпека, літій-іонна батарея, теплообмін, енергоефективність

ВСТУП

Батареї перетворюють хімічну енергію, що міститься в їхньому активному матеріалі, безпосередньо в електричну енергію через реакції окиснення та відновлення [1]. Батареї складаються з окремих елементів, з'єднаних послідовно та паралельно для досягнення бажаної номінальної потужності, напруги та струму. Під час нормальної роботи відбувається процес розрядження або процес зарядження.

При розрядженні батарея живить електричне обладнання, і хімічна енергія, що міститься в активному матеріалі, перетворюється на електричну енергію. При зарядженні батарея підключається до генератора (або електричної мережі), і вхідна електрична енергія перетворюється на хімічну енергію та накопичується в активному матеріалі.

Безпека, довговічність та продуктивність батареї значною мірою залежать від того, як вони розряджаються чи заряджаються.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Системи терморегулювання (СТР) Li-ion батареї ЕМ відіграють ключову роль у роботі силової батареї для запобігання негативних явищ, які можуть вплинути на безпеку, продуктивність та деградацію акумуляторного блоку.

Існують типові та нетипові умови, за яких середня температура акумуляторного блоку може неконтрольовано зростати, спричиняючи аномальні хімічні зміни, такі як розкладання електроліту, або реакції між електродами та електролітом. Під час типових циклів зарядження та розрядження тепло, що генерується при електрохімічній реакції підвищує температуру батареї.

Неконтрольоване підвищення температури батареї може відбуватись під час нетипових робочих умов при термічному розгоні (*thermal runaway*). Термічний розгін складається з екзотермічних ланцюгових реакцій усередині батареї, які спричиняють дестабілізацію та деградацію внутрішньої структури [2]. Це явище може виникнути внаслідок різних форм механічного, електричного та термічного впливу, що призводить до короткого замикання між електродами елемента батареї через вихід з ладу електроліту. Тепло, що генерується, впливає на сусідні елементи, які піддаються тому ж явищу. Ця ланцюгова реакція не тільки підвищує температуру акумуляторного блоку, але й виділяє багато легкозаймистих газів, які збільшують внутрішній тиск блоку та можуть спричинити вибух і пожежу силової установки ЕМ [2]. Згідно Peiyi Sun et al. [3], у 2018 році сталося понад п'ятнадцять пожеж різних марок електромобілів через виникнення процесу термічного розгону. Причини цих вибухів різні. Вони виникали під час руху, зарядження або паркування автомобілів. В інших випадках полум'я виникало після зіткнення, яке вплинуло на механічну

поведінку акумуляторного блоку, спричинивши вибух силової установки. Термічний розгін також може мати небезпечний ефект під час природних катастроф, таких як повінь. Електромобілі після цього стають непридатними для використання з міркувань безпеки.

Подібно до того, як неконтрольоване підвищення середньої температури впливає на продуктивність, неконтрольоване зниження температури батареї може зменшити електропровідність електроліту та дифузію літію. Це збільшує електричні та електрохімічні втрати. Це суттєво впливає на роботу електромобілів в тих країнах, де температура навколишнього середовища взимку часто опускається нижче 0°C. Ці втрати збільшуються при температурі нижче -20°C [5].

Процес неконтрольованого нагрівання батареї є більш небезпечним, ніж охолодження, оскільки виникають умови, за яких електромобіль не може відбирати енергію з акумуляторного блоку для активації СТР [5].

Контролювання нагрівання є важливим для запобігання процесу, відповідальному за зниження осаду літію (*lithium plating*). Це осад металевого літію на поверхні анода, виготовленого з графіту, за умов швидкого заряджання або низької температури [6]. Цей процес скорочує термін служби батареї та її здатність накопичувати та вивільняти енергію під час циклів заряджання та розряджання. Незважаючи на численні дослідження, проведені протягом багатьох років, на сьогодні механізм цього процесу не повністю вивчений [6].

Виходячи з цих міркувань, було визначено оптимальний діапазон, у якому повинна знаходитися робоча температура Li-ion батареї, щоб зменшити явища, які зменшують термін служби, безпеку та продуктивність батареї. Згідно з дослідженнями, проведеними Pesaran et al. [7], акумуляторні блоки Li-ion батареї EM не виявляють очевидних пошкоджень та деградації в оптимальному діапазоні між 15°C та 35°C. Загалом, прийнятний температурний діапазон Li-ion батареї ширший за цей діапазон і визначається між -20°C та 60°C. Ще одна характеристика пов'язана з внутрішньою температурою батареї. Важливо рівномірно керувати температурним полем акумуляторного блоку, щоб уникнути різких перепадів температур між елементами, які можуть спричинити небажаний внутрішній теплообмін. Різниця температур елементів в акумуляторному блоці не повинна перевищувати 5°C [8].

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

За останні роки було розроблено декілька варіантів СТР, різних за принципом роботи та конструкцією. До встановлених технологій, розроблених протягом років, належать:

- Повітряні СТР;
- Рідинні СТР ;
- СТР на основі холодоагенту;
- СТР на основі матеріалів зі зміною фазового стану (МЗФС);
- СТР на основі теплових труб (ТТ).

Перші три згадані методи є активними СТР, оскільки для роботи їм потрібна електрична енергія, тоді як останні два є пасивними СТР, оскільки вони не потребують жодного джерела електричної енергії. Комбінація хоча б двох із цих систем утворює гібридну систему терморегулювання (ГСТР).

Основна ціль даної статті є аналіз ключових відмінностей між наведеними варіантами СТР.

В задачі дослідження входили аналіз

принципу роботи кожної з систем, аналіз переваг та недоліків запропонованих СТР.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Повітряні СТР широко використовуються в EM, оскільки вони мають просту структуру, високу надійність, низьку вартість та просте обслуговування. Ці характеристики досягаються завдяки простій схемі установки, що вимагає менше обладнання, ніж інші методи. Основною особливістю повітряних СТР є використання повітря як робочої речовини. Однією з переваг цих систем з точки зору безпеки та впливу на навколишнє середовище є те, що повітря не токсичне та не займає. Існує кілька класифікацій цих систем щодо того, як повітря протікає через мережу труб і як воно обробляється для досягнення бажаної температури акумуляторного блоку. Перша відмінність полягає в наступному:

- Системи примусової конвекції: потік повітря в контурі генерується електричним вентилятором. Ця система вимагає певної кількості електричної енергії через потребу електричного двигуна вентилятора;

• Системи природної конвекції: потік повітря забезпечується рухом транспортного засобу, і вентилятор не потрібен. Щоб зменшити перепади тиску повітря, вирішальне значення має конструкція повітряпроводів та форм.

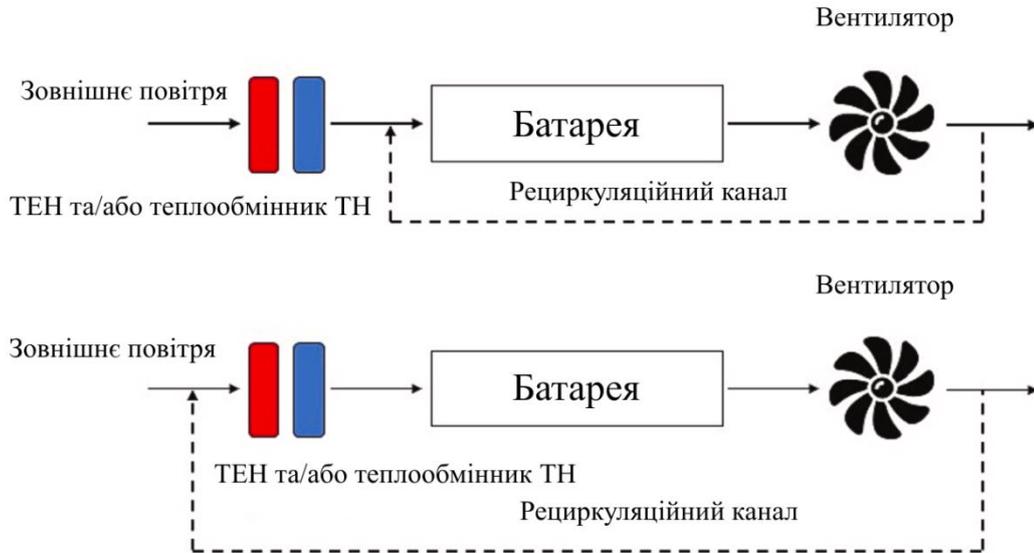


Рисунок 1 – Схема роботи повітряних систем терморегуляції батареї

Друга відмінність полягає в тому, як повітря обробляється за допомогою різних схем установки (рис.1):

- Пасивний метод: повітря забирається безпосередньо з атмосфери та нагрівається, або охолоджується теплообмінником. Потім повітря подається в акумуляторний блок для терморегулювання;
- Активний метод: частина відпрацьованого повітря подається до вхідного отвору та змішується з зовнішнім повітрям з атмосфери. Потім теплообмінник охолоджує або нагріває повітря до досягнення оптимальної температури для керування акумуляторним блоком.



Рисунок 2 – Структура батареї з повітряною системою терморегуляції батареї

Використовуються на практиці обидві системи повітряних СТР. Ці установки можуть використовуватися як системи охолодження, так і нагрівання (рис. 2). Фактично, під час фази

оохолодження є холодний теплообмінник (випарник), у якому температура повітря знижується за допомогою випарника системи HVAC транспортного засобу. Інакше, якщо акумуляторний блок потрібно нагріти, гарячий теплообмінник (нагрівач) дозволяє підвищити температуру повітря.

Рідинні СТР дуже схожі на повітряні СТР, за винятком холодоагенту, яким є рідка речовина, суміш води та гліколю [2] або діелектричні рідини. Порівняно з повітряними СТР, рідинна система охолодження є ефективнішою, оскільки досягає кращого теплообміну та вимагає меншої потреби в електричній енергії від акумуляторного блоку. Завдяки кращим термічним таким як властивостям теплопровідність та питома теплоємність) та вищій густині за однакових умов, конвективний теплообмін покращується, а масова витрата при тій же швидкості потоку та геометрії повітропроводу є вищою. Що стосується схеми системи, рідинні СТР характеризуються замкнутим контуром, у якому рідина знаходиться в обмеженому просторі. Вона представлена на Рис. 3. Схема рідинної СТР має більше компонентів, ніж повітряна. Дійсно, порівняно з попередніми схемами, вона складається з насоса, який необхідний для генерування масової витрати, та розширювального бака для керування змінами об'єму, спричиненими коливаннями температури навколишнього середовища. Як згадувалося раніше, рідинна система може використовуватися як система охолодження, так і нагрівання за допомогою одного проміжного теплообмінника, який може використовуватися як охолоджувач або нагрівач. Як правило, система HVAC транспортного засобу є джерелом теплової або охолоджуючої енергії за допомогою чотирьохходового клапана, який може перемикає функціонування з режиму холодильника на режим теплового насоса. У деяких застосуваннях для холодної погоди тепло, що розсіюється електричним двигуном, може передаватися рідині за допомогою іншого проміжного теплообмінника для відновлення частини теплової енергії, розсіяної в навколишнє середовище [2]. З іншого боку, складність схеми, спричинена більшою кількістю компонентів, є одним із недоліків рідинних систем. Ця проблема збільшує вагу транспортного засобу та займаний об'єм акумуляторного блоку. З цієї причини вартість встановлення вища, ніж інші рішення, і операції з його обслуговування зростають.

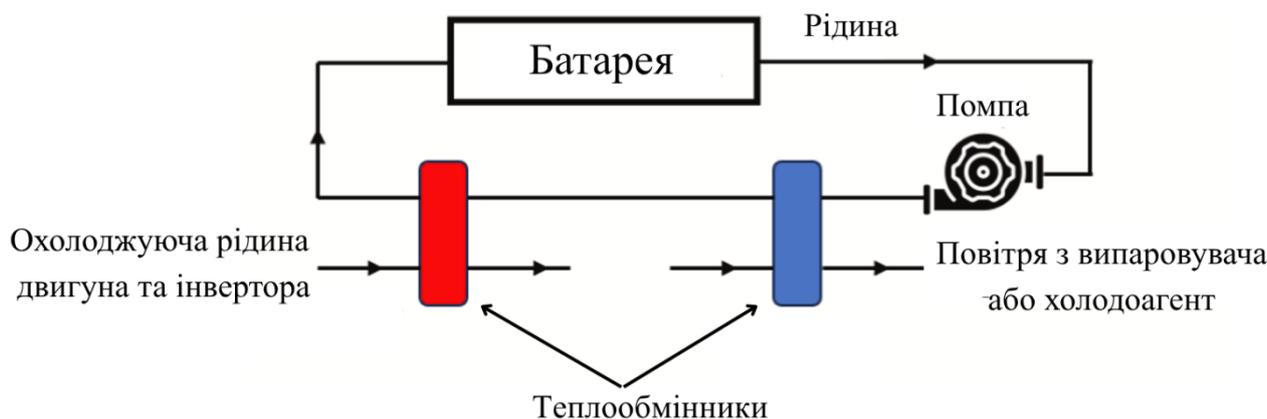


Рисунок 3 – Схема роботи рідинної системи терморегуляції батареї

Щодо того, як робоча рідина взаємодіє з поверхнею батареї, рідинні СТР класифікуються на три категорії:

- Занурювальний теплообмін: елементи акумуляторного блоку повністю занурені в діелектричну рідину. Цей метод характеризується найвищим коефіцієнтом конвективного теплообміну завдяки більшій площі контакту між рідиною та елементами батареї.
- Прямий контакт: рідина протікає безпосередньо навколо елементів батареї. Ця схема є однією з найефективніших завдяки великій площі контактної поверхні. Недоліком цього методу є необхідність використання непровідної рідини, щоб уникнути короткого замикання між елементами.
- Непрямий контакт: рідина протікає через канали в холодній пластині для керування температурою акумуляторного блоку. Холодна пластина розміщується в безпосередньому контакті з поверхнею елементів батареї.

• СТР на основі холодоагенту. В останні роки проводилися дослідження, які зосередили свою увагу на впровадженні машин, заснованих на зворотних циклах. Зокрема, цикли парокомпресійного охолодження можуть використовуватися для охолодження батарей за допомогою спеціального випарника, який має роль зниження середньої температури акумуляторного блоку. Найважливішою

перевагою, досягнутою цими системами, є ефективність теплообміну. Добре відомо, що двофазний теплообмін досягає найвищого коефіцієнта конвективної тепловіддачі порівняно з рідинами та газами, а його робоча температура підтримує постійне значення. Крім того, фіксована температура дозволяє контролювати належні умови для терморегулювання Li-ion батареї та отримувати більш однорідне температурне поле. У літературі є багато прикладів, коли акумуляторні блоки EM охолоджуються за допомогою холодильників. Ці методи зазвичай використовують систему HVAC транспортного засобу, застосовуючи теплообмінник, розташований паралельно до випарника.

- СТР на основі матеріалів зі зміною фазового стану (МЗФС). Матеріали зі зміною фазового стану (МЗФС) — це матеріали, які можуть поглинати та вивільняти значні обсяги прихованої теплоти за відносно постійної температури. Ці СТР є пасивними системами, які не вимагають додаткової електричної енергії. Головна перевага пов'язана з термічною ізоляцією, що є фундаментальним для переривання ланцюгової реакції, яка спричиняє пожежу та вибух акумуляторного блоку.

- СТР на основі теплових труб (ТТ). Теплова труба (ТТ) — це закритий корпус труби, в якому є гнотова структура та певна кількість рідкої робочої рідини. Коли подається тепло, робоча рідина випаровується, і пара переходить на холодну сторону, де вона конденсується, вивільняє приховану теплоту та повертається на гарячу сторону за допомогою капілярної дії гнотової структури. Теплові труби використовуються для передачі тепла з мінімальною різницею температур та зменшення теплового опору акумуляторного блоку. Теплові труби зазвичай використовуються як додатковий компонент до системи охолодження або нагрівання і ще не повністю впроваджені як автономні СТР.

3.6. Гібридні СТР (ГСТР). Гібридні СТР (ГСТР) складаються з двох або більше СТР, які працюють разом для покращення теплообміну та зменшення загальної ваги системи. Наприклад, чисельні симуляції показали, що гібридна конструкція холодної пластини (на основі МЗФС) може забезпечити зменшення ваги на 53% порівняно з базовою конструкцією охолоджувальної пластини через меншу густину МЗФС. Іншим важливим результатом є потужність накачування, яка зменшується на 90%: згідно з оцінками, ця система потенційно може забезпечити економію понад 200 кВт·год електричної енергії.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

СТР	Тип	Переваги	Недоліки
Повітряна	Зовнішнє нагрівання/охолодження	Висока надійність Низька вартість	Низька ефективність. Пил і забруднювачі в повітропроводах.
Рідинна	Зовнішнє нагрівання/охолодження	Просте обслуговування Висока ефективність теплообміну	Велика кількість компонентів. Висока вартість встановлення та обслуговування.
Холодоагентна	Зовнішнє нагрівання/охолодження	Низька потреба в енергії Висока ефективність теплообміну Зменшення ваги транспортного засобу	Висока складність установки. Не завжди зворотний пристрій може бути реверсивним.
МЗФС (PCM)	Зовнішнє нагрівання/охолодження	Фіксована температура під час зміни фазового стану Не потребує додаткової електричної енергії	Низька теплопровідність, що не дозволяє розсіювати тепло під час охолодження. Додавання струмопровідних матеріалів може спричинити пожежі.
Теплові труби	Зовнішнє нагрівання/охолодження	Не потребує додаткової електричної енергії Низька вартість обслуговування Висока теплопровідність	Мала площа контакту. Терморегулювання досягається не завжди. Немає автономних застосувань.
Внутрішні стратегії	Лише внутрішнє нагрівання	Висока ефективність нагрівання Високі швидкості нагрівання Хороша температурна	Для попереднього нагрівання змінним струмом потрібне зовнішнє джерело енергії. Висока деградація

СТР	Тип	Переваги	Недоліки
		однорідність	акумуляторного блоку через утворення літєвого осаду (<i>Li-ion plating</i>).

ВИСНОВКИ

Системи терморегулювання є фундаментальною частиною силових установок електромобілів, незамінною для контролю середньої температури акумуляторного блоку, від ефективності її роботи залежить ємність тягової батареї. Аналіз роботи дає можливість зрозуміти, як автомобільна промисловість впроваджує іновачії та нові технічні рішення та висвітлити зв'язок між дослідженнями науковців та виробниками. Є кілька способів керування температурою акумуляторних блоків при високих та низьких температурах навколишнього середовища за допомогою активних або пасивних систем. Перспективним є застосування внутрішнього нагрівання батареї, при якому можна досягати швидшого нагрівання, ніж при застосуванні звичайної системи розігріву. Проте ця технологія ще не є досконалою та готовою для подальшого впровадження на практиці через утворення осаду літію в батареї.

Для досягнення покращеного теплообміну необхідно використовувати вдосконалені форми повітропроводів та холодних пластин, нових схем установок для підвищення ефективності. Впровадження пасивних методів, такі як МЗФС, дозволяє зменшити споживання енергії СТР, оскільки тепла енергія роботи речовин у фазовому переході може підтримувати постійну температуру протягом часу, не вимагаючи жодних енерговитрат. Крім того, низька теплопровідність МЗФС є важливою для подолання феномену термічного розгону, оскільки елементи Li-іон ізольовані один від одного.

Більшість нових транспортних засобів, випущених на ринок, використовують непряму рідинну СТР, температура якої керується системою кондиціонування автомобіля. Кілька виробників, таких як Nissan та Honda, змінили свою стратегію, відмовившись від повітряного методу на користь рідинних СТР через їхню вищу ефективність конвективного теплообміну.

Виробники автомобілів витрачають значні ресурси на дослідження того, як покращити технологію активного охолодження та нагрівання, домінуючу на автомобільному ринку. Теплопровідні клеї є можливим простим та перспективним рішенням для впровадження для непрямих рідинних СТР з метою збільшення контактної поверхні між холодною пластиною та акумуляторним блоком. Необхідно проводити нові дослідження, що вивчають властивості рідин, таких як діелектричні оливи, рідкі метали та нанорідини для підвищення теплопровідності рідини замість класичних сумішей води та гліколю.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

- 1.K. Ogura, M.L. Kolhe, Battery technologies for electric vehicles, in: *Electric Vehicles: Prospects and Challenges*, Elsevier Inc., 2017, pp. 139–167, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803021-9.00004-5>.
- 2.S. Shahid, M. Agelin-Chaab, A review of thermal runaway prevention and mitigation strategies for lithium-ion batteries, *Energy Conversion and Management*: x. 16 (2022), <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2022.100310>.
- 3.P. Sun, R. Bisschop, H. Niu, X. Huang, A Review of Battery Fires in Electric Vehicles, *Fire Technol.* 56 (2020) 1361–1410, <https://doi.org/10.1007/s10694-019-00944-3>.
- 4.X. Hu, Y. Zheng, D.A. Howey, H. Perez, A. Foley, M. Pecht, Battery warm-up methodologies at subzero temperatures for automotive applications: Recent advances and perspectives, *Prog Energy Combust Sci.* 77 (2020), <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2019.100806>.
- 5.G. Zhao, X. Wang, M. Negnevitsky, C. Li, An up-to-date review on the design improvement and optimization of the liquid-cooling battery thermal management system for electric vehicles, *Appl Therm Eng.* 219 (2023), <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119626>.
- 6.X. Lin, K. Khosravinia, X. Hu, J. Li, W. Lu, Lithium Plating Mechanism, Detection and Mitigation in Lithium-Ion Batteries, *Prog Energy Combust Sci.* 87 (2021), <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2021.100953>.
- 7.A. Pesaran, S. Santhanagopalan, G.-H. Kim, Addressing the Impact of Temperature Extremes on Large Format Li-Ion Batteries for Vehicle Applications (Presentation), NREL (National Renewable Energy Laboratory), 2013. <https://www.nrel.gov/docs/fy13osti/58145.pdf> (accessed October 13, 2023).
- 8.L. He, H. Jing, Y. Zhang, P. Li, Z. Gu, Review of thermal management system for battery electric vehicle, *J Energy Storage.* 59 (2023), <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.106443>.

REFERENCES

- 1.K. Ogura, M.L. Kolhe, Battery technologies for electric vehicles, in: *Electric Vehicles: Prospects and Challenges*, Elsevier Inc., 2017, pp. 139–167, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803021-9.00004-5>.
- 2.S. Shahid, M. Agelin-Chaab, A review of thermal runaway prevention and mitigation strategies for lithium-ion batteries, *Energy Conversion and Management*: x. 16 (2022), <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2022.100310>.
- 3.P. Sun, R. Bisschop, H. Niu, X. Huang, A Review of Battery Fires in Electric Vehicles, *Fire Technol.* 56 (2020) 1361–1410, <https://doi.org/10.1007/s10694-019-00944-3>.
- 4.X. Hu, Y. Zheng, D.A. Howey, H. Perez, A. Foley, M. Pecht, Battery warm-up methodologies at subzero temperatures for automotive applications: Recent advances and perspectives, *Prog Energy Combust Sci.* 77 (2020), <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2019.100806>.
- 5.G. Zhao, X. Wang, M. Negnevitsky, C. Li, An up-to-date review on the design improvement and optimization of the liquid-cooling battery thermal management system for electric vehicles, *Appl Therm Eng.* 219 (2023), <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119626>.
- 6.X. Lin, K. Khosravinia, X. Hu, J. Li, W. Lu, Lithium Plating Mechanism, Detection and Mitigation in Lithium-Ion Batteries, *Prog Energy Combust Sci.* 87 (2021), <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2021.100953>.
- 7.A. Pesaran, S. Santhanagopalan, G.-H. Kim, Addressing the Impact of Temperature Extremes on Large Format Li-Ion Batteries for Vehicle Applications (Presentation), NREL (National Renewable Energy Laboratory), 2013. <https://www.nrel.gov/docs/fy13osti/58145.pdf> (accessed October 13, 2023).
- 8.L. He, H. Jing, Y. Zhang, P. Li, Z. Gu, Review of thermal management system for battery electric vehicle, *J Energy Storage.* 59 (2023), <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.106443>.

M. Bodak, V. Bodak. Types of thermal regulation systems of the traction battery of an electric vehicle and their analysis.

The increase in the production of electric vehicles (EVs) largely depends on the reliability and safety of the main components and assemblies. One of the most expensive and dangerous parts of an EV is the power (traction) electric battery. Lithium-ion batteries (Li-ion) have become the most widespread. An important characteristic that affects their safety is performance and service life. These battery indicators depend on the average operating temperature, which must be in the optimal range to prevent a number of negative phenomena. That is why the operation of thermal control systems (TCS) of EV battery packs is important to ensure correct functioning in any environmental and operating conditions.

Lithium-ion (Li-ion) batteries have become the dominant technology for the automotive industry due to some unique features, such as high power, capacity, storage capacity and a large number of possible recharges. However, under deep discharge conditions, a large amount of thermal energy is generated due to redox reactions, and the battery temperature increases excessively and uncontrollably with possible subsequent self-ignition. Therefore, it is necessary to develop such a battery cooling system to prevent damage to the cells due to high operating temperatures. Other problems arise when Li-ion batteries reach temperatures below optimal values, such as the inability to release energy or rapid degradation and capacity reduction. That is why an effective system is needed that can heat the device to reach the optimal temperature range, i.e., a thermal management system (TMS).

Keywords: electric vehicles, thermal management, safety, lithium-ion battery, heat transfer, energy efficiency

БОДАК Максим Володимирович, викладач кафедри автомобілів та транспортних технологій, Луцький національний технічний університет email: bodak@lutsk-ntu.com.ua, <https://orcid.org/0009-0004-4541-7448>

БОДАК Володимир Іванович, доцент кафедри автомобілів та транспортних технологій, Луцький національний технічний університет email: bodak.lutsk@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2521-7305>

Maksym BODAK, lecturer at the Department of Automobiles and Transport Technologies, Lutsk National Technical University email: bodak@lutsk-ntu.com.ua, <https://orcid.org/0009-0004-4541-7448>

Volodymyr BODAK, associate professor at the Department of Automobiles and Transport Technologies, Lutsk National Technical University email: bodak.lutsk@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2521-7305>

Дата надходження статті до видання: 20.10.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 03.11.2025

DOI 10.36910/automash.v2i25.1917