УДК 629.064 DOI: 10.30977/VEIT.2025.27.0.7

Дослідження та оптимізація температурного режиму літій-іонних акумуляторів у складі тягової батареї електромобіля

Латвинський В.Д.[1], Багач Р.В.[1], Плахтій О.А.[2], Запорізький В.В.[3]

[1]Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна
[2]Український державний університет залізничного транспорту, Україна
[3]Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна

Анотація. *У статті досліджуються електричні та теплові характеристики модульної літій-іонної акумуляторної батареї в умовах імітаційного моделювання розрядних режимів, характерних для руху легкового електромобіля за різними їздовими циклами. У ході експериментальних випробувань проведено якісну та кількісну оцінку тепловиділення літій-іонних акумуляторів у складі тягової батареї електромобіля, а також підтверджено ефективність пасивного повітряного охолодження акумуляторів у запропонованій конструкції модулів батареї.*

Ключові слова: *електромобіль, тягова акумуляторна батарея, літій-іонний акумулятор, експеримент, випробування навантаження.*

Вступ

Останнім часом спостерігається стійка тенденція до збільшення кількості зареєстрованих електромобілів як у світі, так і в Україні. Однією з ключових переваг електричного транспорту є відсутність викидів токсичних речовин у місці його експлуатації. Водночас виробництво електроенергії для електромобілів, здебільшого, базується на використанні вуглеводневого палива, що супроводжується викидами шкідливих речовин в атмосферу [1-3]. Проте ці фактори не нівелюють екологічні переваги електротранспорту з огляду на такі аспекти:

– технології виробництва електроенергії постійно вдосконалюються, підвищуючи ефективність перетворення первинного палива та покращуючи екологічні показники;

– електростанції є локалізованими джерелами викидів, що дає змогу ефективніше впроваджувати природоохоронні заходи;

– розташування електростанцій за межами густонаселених територій мінімізує вплив шкідливих викидів на міське середовище, на відміну від автотранспорту;

– силова установка електромобіля не генерує токсичних викидів у місці експлуатації, що значно покращує якість повітря.

– ефективне використання енергетики в електромобілях значно перевищує ефективність згоряння палива у двигунах внутрішнього згоряння;

– зарядна інфраструктура електромобілів може сприяти балансуванню енергетичної системи, коригуючи нерівномірність навантажень;

– використання відновлюваних джерел енергії для генерації електроенергії значно підвищує енергетичну та екологічну ефективність електротранспорту.

Таким чином, широке впровадження електромобілів у мегаполісах сприятиме покращенню екологічної ситуації та підвищенню рівня життя [4-7].

Водночас сучасний електромобіль поки що не може повністю конкурувати зі звичайним автомобілем за експлуатаційними характеристиками та вартістю для кінцевого споживача. Основною причиною є висока вартість найбільш дорогої складової електромобіля – тягової літій-іонної акумуляторної батареї, яка становить близько 40% від загальної

вартості транспортного засобу [8,9].

Покращення таких експлуатаційних параметрів, як запас ходу, динамічні характеристики, термін служби та стабільність роботи за різних температур, безпосередньо залежить від оптимізації температурного режиму роботи акумуляторів у складі тягової батареї. Ефективне відведення тепла в процесі розряду та заряду або підтримання необхідного температурного режиму в холодний період року є критичними факторами, що визначають експлуатаційні характеристики електромобіля та довговічність його батареї [9].

Аналіз публікацій

Для роботи тягових акумуляторів у складі ТАБ електромобіля характерні різні режими експлуатації, зокрема короткочасні максимальні струмові розряди та тривалі струмові навантаження, які супроводжуються значним виділенням теплової енергії. Перевищення допустимого температурного діапазону літій-іонних акумуляторів (ЛІА) призводить до зниження їхнього ресурсу, а у критичних випадках – до теплового розгону та виходу з ладу [8-10].

Менш руйнівним, хоча й небажаним фактором, є експлуатація ЛІА за низьких температур, що спричиняє зниження ємності та потужності тягової батареї, а також обмеження зарядних струмів.

Серед методів підтримання оптимального температурного режиму ТАБ ефективним є відведення тепла від акумуляторів до пристрою теплообміну з навколишнім середовищем. Основні технології охолодження ТАБ [11-13] електромобілів включають:

– пасивне охолодження – характеризується простотою та низькою вартістю, проте має значні недоліки: нерівномірне відведення тепла, відсутність нагрівальних елементів і теплоізоляції, що негативно впливає на ємність батареї в умовах низьких температур [14] ;

– примусове повітряне охолодження – забезпечує рівномірний розподіл температури у батареї, має невелику вартість і малу вагу, однак поступається іншим методам за питомою енергією на одиницю об’єму [15];

– рідинне охолодження – найбільш ефективний спосіб термостатування, що забезпечує стабільний температурний режим, проте має високу складність і вартість [16].

У цій статті розглядається запропоноване авторами рішення щодо конструкції ТАБ електромобіля, яке поєднує дві системи термостатування, природну конвекцію та примусову повітряну вентиляцію [17,18].

Мета та постановка задачі

Метою даної роботи є експериментальна оцінка тепловиділення акумуляторних модулів та ефективності реалізованого конвекційного охолодження в складі тягової акумуляторної батареї (ТАБ) електромобіля.

Дослідження спрямоване на покращення експлуатаційних характеристик батареї шляхом оптимізації температурного режиму роботи акумуляторів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

– розрахунок потужності розряду та заряду ТАБ в різних умовах руху електромобіля;

– визначення струмового навантаження в типовому їздовому циклі;

– розрахунок еквівалентного струму розряду акумуляторної батареї;

– експериментальне відтворення розрахункових струмів навантаження на стендових випробуваннях;

– оцінка тепловиділення акумуляторних модулів під час реалізації навантажувальних режимів;

– аналіз ефективності пасивного повітряного охолодження запропонованої конструкції батареї;

– розгляд впливу різних режимів експлуатації на температуру та робочий ресурс акумуляторів.

Опис конструкції тягової батареї електромобіля

Основу батарейного модуля Nissan Leaf становить металева рама, що забезпечує жорсткість конструкції та захищає елементи від пошкоджень.

Внутрішню частину займають призматичні літій-іонні акумуляторні осередки, згруповані у кілька модулів. Для рівномірного розподілу тепла вони розташовані в алюмінієвих корпусах, які також виконують функцію захисту. Модулі батарей Nissan Leaf представлені на рис. 1.

Передача електроенергії відбувається через систему високовольтних кабелів, які мають яскравий помаранчевий колір для легкої ідентифікації та безпечного обслуговування. Ці кабелі з'єднують між собою окремі модулі

акумулятора та забезпечують підключення до силової електроніки автомобіля, яка керує процесами зарядки та розрядки. Високовольтні з'єднання мають спеціальні ізоляційні матеріали, що гарантують їхню надійність та безпеку при експлуатації.



Рис. 1. Модулі батарей Nissan Leaf

Охолодження акумуляторів відбувається пасивним способом, без використання рідинної системи. Відведення тепла забезпечується через конструкційні елементи батареї та вентиляційні зазори між модулями.

Контроль температури здійснюється за допомогою вбудованих термодатчиків, розміщених на ключових елементах батарейного модуля. Вони реєструють температуру осередків та корпусу, передаючи дані в систему управління батареєю (BMS).

BMS виконує не лише функцію моніторингу, а й прогнозує можливі ризики. Якщо система виявляє, що температура наближається до критичних значень, вона може автоматично зменшити струм зарядки або розрядки, щоб запобігти перегріву. Таким чином, управління температурним режимом допомагає продовжити термін служби батареї та забезпечити її стабільну роботу протягом усього періоду експлуатації.

Захисний корпус батареї містить ізоляційний шар, що підвищує безпеку експлуатації, а зверху закривається металевою кришкою, яка забезпечує механічний захист і екранування від зовнішніх впливів.

Завдяки комплексному підходу до розробки, батарейний модуль Nissan Leaf поєднує в собі високу продуктивність, довговічність та безпеку, що робить його одним із ключових елементів успішного функціонування електромобіля.

Визначення режимів роботи ТАБ у складі енергетичної системи електромобіля Nissan Leaf

Режими роботи акумуляторної батареї електромобіля Nissan Leaf залежать від багатьох факторів, серед яких ключовими є характеристики транспортного засобу (маса, площа фронтальної проєкції, аеродинамічний опір, радіус коліс тощо) та умови експлуатації (динаміка швидкості руху, тип дороги, температура навколишнього середовища, стан дорожнього покриття, рівень завантаженості транспортного потоку).

Характеристики Nissan Leaf залишаються незмінними, тоді як умови руху є змінними та залежать від багатьох факторів. Наприклад, у міському циклі середня швидкість нижча, кількість прискорень і гальмувань більша, а частка зупинок значно вища порівняно з рухом за містом. Використання клімат-контролю або підігріву салону впливає на витрату енергії та загальний запас ходу, що необхідно враховувати. Для об’єктивного аналізу роботи ТАБ було вибрано стандартизовані цикли руху, що відображають максимально навантажені умови експлуатації електромобіля, надаючи можливість оцінити ефективність його роботи в різних ситуаціях.

У межах цього дослідження виконано розрахунок струмових навантажень ТАБ при русі Nissan Leaf у типових циклах: ECE15, EUDC, NYCC, HFEDS, NEDC, FTP72, US06. Об’єктом дослідження є модель Nissan Leaf модернізації 2015 р., оснащена літій-іонною тяговою батареєю ємністю 30 кВт·год та номінальною напругою 360 В. Акумулятор складається з 48 модулів (192 осередки) загальною масою 275 кг. Запас ходу електромобіля за циклом NEDC становить 250 км. Життєвий цикл батареї варіюється в межах від 5 до 10 років залежно від умов експлуатації та інтенсивності використання, що є одним з ключових параметрів, які слід враховувати при оцінці довговічності електромобіля.

Для заданих циклів руху, що характеризуються тривалістю T, залежністю швидкості руху V та прискорення (уповільнення) a від часу t для легкового електромобіля, здійснено розрахунок необхідних показників роботи тягового електродвигуна (ТЕД). Зокрема, визначено частоту обертання ротора n_m у функції часу t та необхідного моменту на валу M_m.

Частоту обертання ротора n_m визначаємо за формулою:

$$n_m = \frac{30 \cdot V \cdot i}{\pi \cdot r_k}\ t, \qquad (1)$$

де V – швидкість руху електромобіля в циклі, м/с; r_k – динамічний радіус колеса, м; i – передавальне число трансмісії; t – час, с.

Момент на валу M_m, що вимірюється в Н·м, визначаємо за формулою (2):

$$M_m = \frac{\left[m \cdot (f \cdot g \cdot \cos\alpha + g \cdot \sin\alpha + \delta) + 0.5 \cdot \rho \cdot c_x \cdot S \cdot V^2\right] \cdot r_k}{i \cdot \eta}, \qquad (2)$$

де m – маса електромобіля; f – коефіцієнт опору кочення; g – прискорення вільного падіння, м/с²; cosα – кут підйому або ухилу (градус); sinα – прискорення (гальмування) електромобіля, м/с²; δ – коефіцієнт урахування обертових мас; ρ – густина повітря, кг/м³; c_x – коефіцієнт аеродинамічного опору; S – площа фронтальної проєкції електромобіля, м²; η – ККД трансмісії.

Величини M_m та n_m використовуються для визначення потужності заряду або розряду ТАБ залежно від струму навантаження, який визначається за формулою:

$$I_b = \frac{M_m \cdot n_m}{9550 \cdot U_b \cdot n_m \cdot \eta_i}, \qquad (3)$$

де I_b – струм ТАБ, А; η_m – ККД тягового електродвигуна; η_i – ККД інвертора; U_b – номінальна напруга батареї.

Оскільки струм батареї змінюється в широкому діапазоні, що залежить від режиму руху, доцільно для порівняння енергетичних навантажень використовувати еквівалентне значення струму, яке визначається за формулою:

$$I_{\text{екв}} = \sqrt{\left\{\frac{1}{T}\int_0^T i^2\, dt\right\}}, \qquad (4)$$

де $I_{\text{екв}}$ – еквівалентний струм, що відповідає постійному навантаженню в умовах експериментальних досліджень.

Його використання дозволяє оцінювати нагрівання батареї при різних температурних режимах, наближених до реальних умов експлуатації електромобіля.

Аналіз досліджуваних рухових циклів та оцінка характеристик роботи ТАБ для легкового електромобіля в цих умовах наведені в табл. 1. Отримані результати дозволяють зробити висновок, що серед стандартних рухових циклів найбільш енерговитратним є US06, який імітує рух у міських умовах із високою швидкістю та інтенсивнии прискореннями.

Таблиця 1 – Параметри їздових циклів і струмове навантаження ТАБ електромобіля [17]

Параметр	NYCC	ECE	US06	HFEDS	EUDC	FTP72	NEDC
Тип циклу	Міський			Заміський		Змішаний	
Тривалість циклу, с	598	195	600	765	400	1368	1181
Подолана відстань, м	1898	1013	12800	16512	6955	12100	11007
Максимальна швидкість, км/год	44,6	50	129,2	96,4	120	91,2	120
Середня швидкість, км/год	11,4	19	77,3	77,7	62,6	31,5	33,4
Максимальний струм ТАБ I_{max}, А	105,7	50,2	298,3	96,7	130,7	117,6	130,7
Еквівалентний струм ТАБ $I_{екв}$, А	17,3	14,4	78,2	40,6	44,5	25,2	28,2

Максимальний струм розряду ТАБ у такому режимі досягає 298 А, тоді як еквівалентний струм із урахуванням власних потреб автомобіля становить 78 А.

Представлені результати дозволили сформувати умови роботи ТАБ для експериментальних досліджень теплових режимів роботи акумулятора.

Розрахунок струмів навантаження та теплових режимів ТАБ електротромобіля

У межах цього дослідження було проведено експериментальну оцінку електричних і теплових режимів запропонованого технічного рішення щодо конструкції модулів тягової акумуляторної батареї електромобіля [17,18].

Для комплексного аналізу роботи тягової та енергетичної систем електрообладнання розроблено стенд комплексних випробувань СКІ), який дозволяє досліджувати різні режими роботи акумуляторних батарей та електричних приводів. До складу стенду входять автономний інвертор напруги, електродвигун-генератор, навантажувальний пристрій, блок силової комутації, пульт дистанційного керування, вимірювальні датчики струму та напруги, вимірювальний перетворювач напруги, система контролю стану акумуляторів і персональний комп'ютер. Усі ці компоненти працюють у комплексі для забезпечення точності досліджень та моделювання реальних умов експлуатації.

До стенду підключено тягову акумуляторну батарею, що складається з восьми послідовно з'єднаних модулів, кожен з яких має певні електрохімічні параметри. Важливим аспектом роботи стенду є можливість регулювання навантаження та вимірювання основних параметрів у реальному часі. Принцип роботи стенду базується на встановленні необхідного струму розряду батареї за допомогою електричного приводу змінного струму, який працює на навантажувальний пристрій. Користувач задає робочий режим через пульт дистанційного керування, а вимірювання параметрів струму та напруги здійснюється за допомогою відповідних датчиків. Отримані дані перетворюються і реєструються на персональному комп'ютері, що дозволяє проводити подальший аналіз ефективності роботи акумуляторної батареї та виявляти можливі відхилення від нормативних значень. Контроль стану акумуляторів виконується через спеціалізовану систему моніторингу, яка відстежує рівень заряду та температуру батарей. Таке технічне рішення дозволяє своєчасно виявляти несправності та запобігати передчасному зносу елементів живлення.

У ході експерименту було реалізовано послідовність розрядних режимів, що включали розряд максимальним струмом відповідно до циклу US06, розряд постійним струмом, еквівалентним навантаженню в режимі US06, а також повторення цього режиму після короткої паузи. Максимальні струми застосовувалися в повторно-короткочасному режимі з чергуванням фаз розряду та релаксації. Отримані результати щодо вимірювань струму, напруги та розрахунку потужності навантаження представлені на відповідних графіках та таблицях. Аналіз графіків показує зміну робочих параметрів тягової акумуляторної батареї при поступовому збільшенні струму розряду та його подальшому утриманні на максимальному рівні протягом 16 секунд. Це дозволяє оцінити, як змінюється продуктивність батареї в умовах, наближених до реальної експлуатації. Такі режими характерні для інтенсивного розгону електромобіля до високих швидкостей або руху на підйом.У реальних умовах експлуатації подібні навантаження мають короткочасний характер, складають лише незначну частину загального їздового циклу та зазвичай чергуються з менш інтенсивними режимами роботи. Незважаючи на високу величину струму розряду, такі навантаження чинять обмежений вплив на загальний тепловий режим ТАБ, оскільки після пікових навантажень слідують періоди відносного спокою, що дозволяє батареї частково охолоджуватися. Результати експерименту представлені на рис. 2.

Для оцінки теплового стану модулів ТАБ на другому та третьому етапах випробувань було реалізовано тривалий розряд постійним струмом $I_{екв}$ = 78,2 А. Це значення відповідає умовам експлуатації батареї в змішаному їздовому циклі US06, що включає як міський режим із низькою швидкістю, так і рух по автомагістралі з підвищеним рівнем навантаження. Аналіз отриманих результатів показав, що навіть при тривалих навантаженнях температурний режим батареї залишається в межах допустимих значень, що підтверджує ефективність використання таких акумуляторів у транспортних засобах з електричним приводом. Такі результати дозволяють рекомендувати ці акумуляторні батареї для подальшого використання у комерційних електротранспортних засобах.

Окрім цього, планується дослідження довготривалого впливу різних навантажувальних профілів на деградацію акумуляторів. Вивчення кінетики зміни електрохімічних характеристик дозволить сформулювати рекомендації щодо ефективного використання батарей у транспортних засобах. Подальші дослі-

дження спрямовані на оптимізацію параметрів зарядно-розрядних циклів, покращення системи терморегуляції та підвищення довговічності акумуляторних батарей у реальних умовах експлуатації. Використання сучасних методів аналізу дозволить розширити можливості стенду комплексних випробувань та зробити його більш універсальним для різних типів акумуляторних систем.

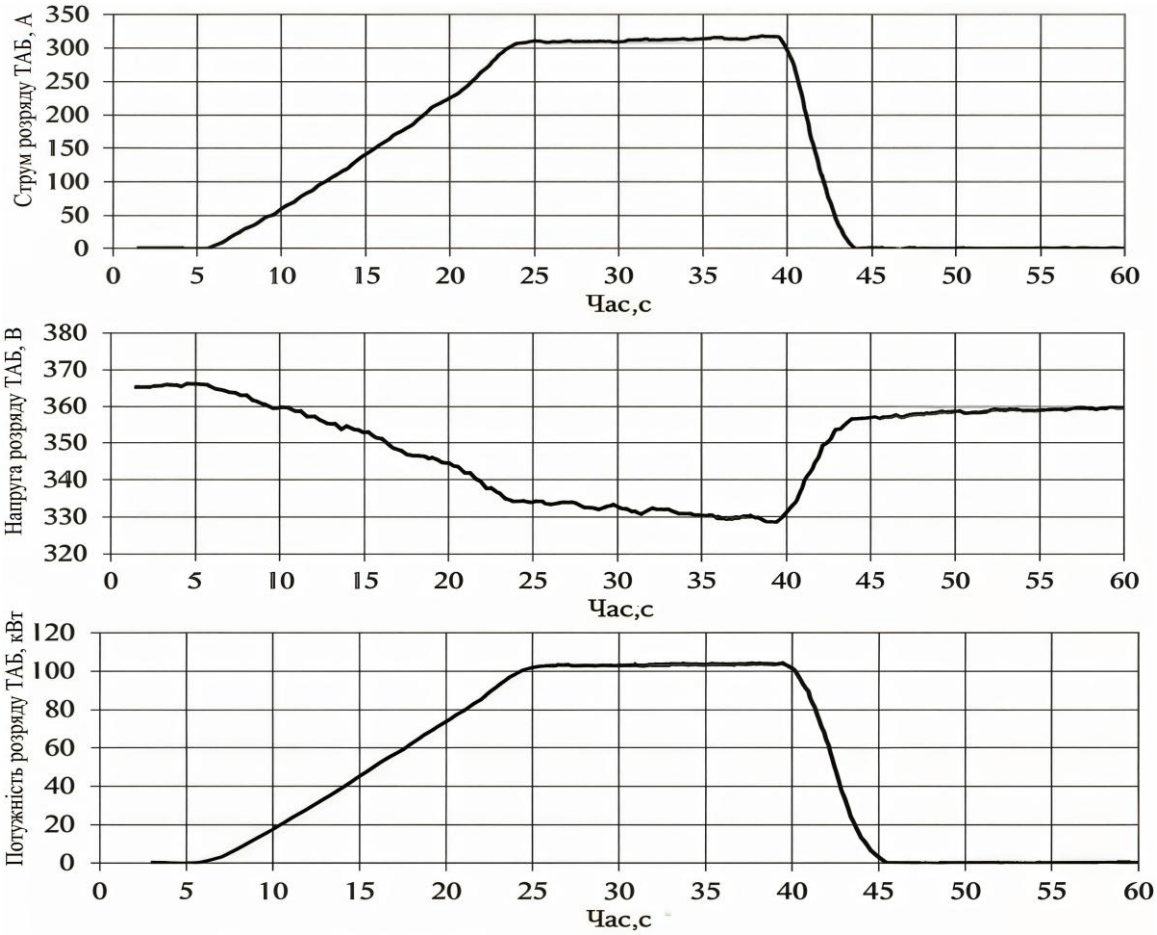


Рис. 2. Показники режиму роботи батареї з підтримкою максимального струму розряду

Для моделювання теплових процесів використовувалося програмне забезпечення COMSOL Multiphysics, яке дозволяє здійснювати високоточне чисельне моделювання з урахуванням геометричних, фізичних та теплотехнічних параметрів. Було застосовано модуль Heat Transfer з налаштуванням граничних умов відповідно до експериментальних параметрів. Такий підхід забезпечив змогу отримати достовірні результати, які відображають реальні фізичні процеси, що відбуваються під час теплового навантаження. Також для попередньої обробки геометричних даних використовувався SolidWorks, а для аналізу результатів – MATLAB.

Під час випробувань температура кожного модуля батареї контролювалася після завершення кожної стадії експерименту. Інфрачервоні зображення модулів у складі ТАБ із зазначенням температурних показників представлені на відповідних рисунках, а рівень нагріву внутрішніх електричних з'єднань – на додатков графіках. Узагальнені результати вимірювань температури наведені в табл. 2.

Отримані дані підтверджують, що запропоноване технічне рішення забезпечує допустимий тепловий режим роботи акумуляторів навіть у найскладніших енергетичних умовах, характерних для їздового циклу US06. Максимальна температура, зафіксована у повітряному проміжку між секціями модулів, склала 24,3°C, а на поверхні тепловідведення акумуляторів – 28,9°C. З огляду на допустиму робочу температуру акумуляторів +55°C, можна зробити висновок про ефективність пасивного охолодження модулів без використання активних систем вентиляції. Варто зазначити,

що передбачена, але не задіяна примусова повітряна вентиляція акумуляторних секцій може значно розширити діапазон робочих температур та забезпечити стабільне підтримання нормального теплового режиму кожного акумулятора. Дослідження в цьому напрямку сприятимуть створенню нових, більш ефективних енергетичних систем для електротранспорту та сприятимуть розвитку сучасних методів енергоменеджменту. Термограма модулів ТАБ представлена на рис. 3.

Додатково було проведено аналіз впливу різних умов експлуатації на температурні характеристики акумуляторних модулів. Випробування в умовах підвищеної вологості та змінного навантаження показали, що запропонована система охолодження ефективно підтримує оптимальний температурний баланс, не допускаючи перегріву окремих елементів.

Таким чином, результати проведених досліджень демонструють значний потенціал для розвитку пасивних систем охолодження, що є важливим кроком у напрямку створення більш надійних і безпечних акумуляторних технологій для сучасного електротранспорту.

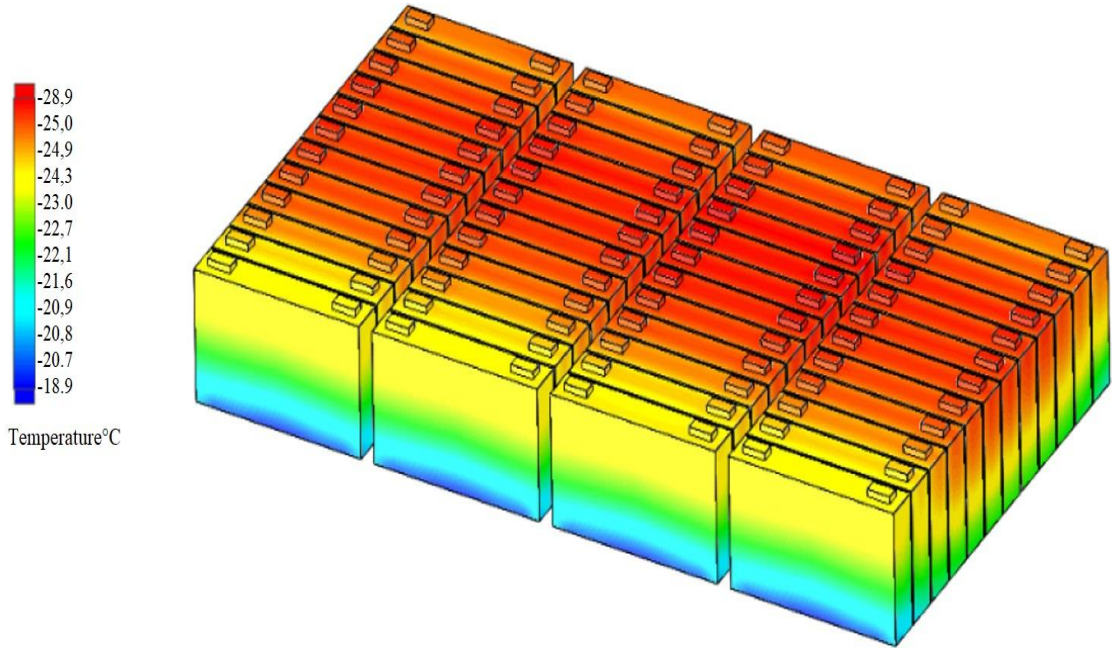


Рис. 3. Термограма модулів ТАБ після третьої стадії випробувань [19]

Таблиця 2 – Результати оцінки теплових режимів ТАБ електромобіля при максимальному струмі та двох послідовних циклах US06

Параметри	Стадії випробувань		
	1	2	3
Максимальна температура тепловідведення ТАБ,°С	22,1	25,0	28,9
Максимальна температура корпусу ТАБ,°С	20,8	22,7	24,3
Середня температура корпусу ТАБ,°С	18,9	20,9	21,6
Максимальна температура з'єднувачів ТАБ,°С	20,7	23,0	24,9

Хоча отримані результати дослідження є значущими та свідчать про ефективність пасивного охолодження, доцільним є більш глибокий аналіз особливостей температурного розподілу в середині модуля. Наприклад, варто враховувати можливі теплові градієнти у різних частинах акумуляторного блоку, які можуть впливати на рівномірність зносу елементів і довготривалу надійність системи. Також існує вплив режимів експлуатації з частими піками навантаження, які можуть створювати короткочасні температурні сплески, не зафіксовані під час стандартного тестування. Такий розширений підхід до аналізу дозволить більш точно оцінити потенціал системи в умовах реальної експлуатації електротранспорту.

Оскільки модуль ТАБ містить значну кількість з'єднаних між собою акумуляторів, важливим аспектом є якість внутрішніх електричних з'єднань.

У зв'язку з цим під час експериментальних досліджень проводився контроль темпера-

тури в місцях з'єднання електродів. Максимальна температура найбільш навантаженого електричного з'єднувача під час випробувань не перевищила 24,9°C, а температурний розкид усіх з'єднувачів у модулі становив близько 0,5°C.

Ці результати підтверджують надійність реалізованого роз'ємного гвинтового з'єднання та ефективність конструктивного виконання електричних контактів у складі модуля ТАБ.

Висновок

Екологічно чисті та енергетично ефективні транспортні засоби є основою автотранспортного комплексу майбутнього, який тісно взаємодіє з електроенергетичною галуззю, що базується на аналогічних принципах.

Оскільки накопичувачі електроенергії є найдорожчим і найвибагливішим елементом сучасного транспорту, їхня експлуатація потребує особливих умов, спрямованих на продовження терміну служби та ефективне використання енергетичних можливостей. Важливим завданням є забезпечення оптимальних умов роботи акумуляторів у складі тягових батарей, особливо з огляду на новітні технології у сфері хімічних джерел струму.

Запропоноване в цій статті конструктивне рішення модульної акумуляторної батареї спрямоване на вирішення цих завдань. Аналіз отриманих результатів підтверджує ефективність застосованих технічних рішень щодо охолодження акумуляторів у складі модуля батареї електромобіля [17-19].

Розглянутий підхід до визначення еквівалентного струмового навантаження дозволяє оцінити режими роботи акумуляторів у складі тягових батарей. Він забезпечує відтворення тепловиділення, яке відповідає умовам як розряду в тяговому режимі, так і заряду під час рекуперативного гальмування. Такий підхід суттєво спрощує відтворення теплових режимів ТАБ у ході експериментальних досліджень, що необхідно для оцінки ефективності різних систем термостатування акумуляторів у складі електромобільного транспорту.

Література

1. Hnatova, A., Bagach, R., & Sokhin, P. (2021). Economic and environmental impact of electric vehicles. *Proceedings of the Fourth International Scientific and Practical Conference "Automotive Transport and Infrastructure"* (pp. 215-217). Kyiv. https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u129/zbirnik_tez_ati_2021.pdf
2. Багач, Р. В. (2024). Підвищення ефективності експлуатації автомобільного електротранспорту з використанням зарядних станцій постійного струму (Докторська дисертація, Харківський національний автомобільно-дорожній університет). Bahach, R. V. (2024). Pidvyshchennia efektyvnosti ekspluatatsii avtomobilnoho elektrotransportu z vykorystanniam zaryadnykh stantsii postijnoho strumu. [Improving the efficiency of electric vehicle operation using DC charging stations.] (Doctoral dissertation, Kharkivskyi natsionalnyi avtomobilno-dorozhnii universytet).https://dspace.khadi.kharkov.ua/handle/123456789/20343 [in Ukrainian].
3. Багач, Р.В., & Кальченко, О.О. (2023). Перспективи та розвиток літієвих акумуляторів в Україні. Світові тенденції ресурсозбереження на електричному транспорті: матеріали Всеукр. наук.-практ. конф., Харків, 25–27 жовт. 2023 р. (с. 31–34). Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова. Bahach, R. V., & Kalchenko, O. O. (2023). Perspektyvy ta rozvytok litiievykh akumuliatoriv v Ukraini. [Prospects and development of lithium batteries in Ukraine.] Svitovi tendentsii resursozberezhennia na elektrychnomu transporti: materialy Vseukr. nauk.-prakt. konf., Kharkiv, 25–27 zhovt. 2023 r. (pp. 31–34). Kharkiv: KhNUMH im. O. M. Beketova https://science.kname.edu.ua/images/dok/konferentsii/2023/Tezy_2023/Tezy_ET_23-25_10_23.pdf#page=31 [in Ukrainian].
4. Латвинський, В., & Багач, Р. (2024). Вплив зарядних станцій на екосистеми урбанізованих територій. *Редакційна колегія*, 28.(с. 28–31) Vplyv zaryadnykh stantsiy na ekosystemy urbanizovanykh terytoriy.[Influence of charging stations on the ecosystems of urbanization areas] Redaktsiyna kolehiya, 28. (pp 28–31) https://science.kname.edu.ua/images/dok/konferentsii/2024/Tezy_2024/Zbirnik_Ekol_stalij_rozv_urbosistem_2024.pdf#page=28 [in Ukrainian]
5. Гнатов, А. В., Аргун, Щ. В., & Ул'янець, О. А. (2017). Електромобілі–майбутнє, яке вже настало. Автомобіль і електроніка. Сучасні технології, (11), 24-28. Hnatov, A. V., Arhun, Sh. V., & Ulyanets, O. A. (2017). Elektromobili–maibutnie, yake vzhe nastalo. [Electric cars are the future that has already arrived.] Avtomobil i elektronika. Suchasni tekhnolohii, (11), 24-28. http://nbuv.gov.ua/UJRN/veit_2017_11_6 [in Ukrainian].
6. Багач РВ (2023). Відновлювана енергетика електротранспорту. Електроенергетика, електромеханіка та технології в АПК: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., 6 листопада 2024 р., Держ. біотехнологічний ун-

т. Харків: ДБТУ, 2024. С. 60-61. Bahach RV. Vidnovlyuvana enerhetyka elek-trotransportu. [Renewable energy for electric transport.] Electric power engineering, electromechanics and technologies in agro-industrial complex: materials of the International Scientific-Practical Conference, November 6, 2024, State Biotechnological University. Kharkiv: DBTU, 2024. P. 60-61. https://repo.btu.kharkov.ua/bitstream/123456789/59440/1/EE_tekhnolohiyi_APK_2024_60-61.pdf [in Ukrainian].

7. Багач, Р.В. (2023). Використання зарядних станцій для електромобілів у Харківській області. Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування СЕУТТОО-2023: 14-а Міжнародна науково-практична конференція (с. 323–327). Херсон: Херсонська державна морська академія. Bahach, R. V. (2023). Vykorystannia zaryadnykh stantsii dlia elektromobiliv u Kharkivskii oblasti. [Use of charging stations for electric vehicles in Kharkiv region.] Suchasni enerhetychni ustanovky na transporti, tekhnolohii ta obladnannia dlia yikh obsluhovuvannia SEUTTO-2023: 14-a Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia (pp. 323–327). Kherson: Khersonska derzhavna morska akademiia https://ksma.ks.ua/wp-content/uploads/2023/05/Матеріали-СЕУТТОО-2023.pdf [in Ukrainian].
8. Багач, Р.В. (2021). Перспективи подальшого вдосконалення акумуляторних батарей для електромобілів. Міжнародна науковопрактична конференція присвячена 90-річчю Харківського автомобільно-дорожнього університету та 90-річчю автомобільного факультету "Новітні технології в автомобілебудуванні, транспорті та при підготовці фахівців" (pp. 346-349). Харків: ХНАДУ. Bahach, R. V. (2021). Perspektyvy podalshoho vdoskonalennia akumuliatornykh batarei dlia elektromobiliv. [Prospects for further improvement of batteries for electric vehicles.] Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia, prysviachena 90-richchiu Kharkivskoho avtomobilnodorozhnoho universytetu ta 90-richchiu avtomobilnoho fakultetu "Novitni tekhnolohii v avtomobiliebuduvanni, transporti ta pry pidhotovtsi fakhivtsiv" (pp. 346–349). Kharkiv: KhNADU https://api.dspace.khadi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/f2cddad8-ee08-4314-831e-018403b09d23/content [in Ukrainian].
9. Латвинський, В. Д., & Багач, Р. В. (2024). Порівняльний аналіз характеристик тягових акумуляторів для сучасних електромобілів. *Сучасне автомобілебудування, автотехнічна експертиза, експлуатація автомобільного транспорту та підготовка фахівців галузі транспорту: Збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції до Дня автомобіліста та дорожника, 22–23 жовтня 2024 р.* (с. 267–271). Харківський національний автомобільно-дорожній університет. Latvynskyi, V. D., & Bahach, R. V. (2024). *Porivnialnyi analiz kharakterystyk tiahovykh akumuliatoriv dlia suchasnykh elektromobiliv* [Comparative analysis of traction battery characteristics for modern electric vehicles]. In *Suchasne avtomobilobuduvannia, avtotekhnichna ekspertyza, ekspluatatsiia avtomobilnoho transportu ta pidhotovka fakhivtsiv haluzi transportu: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference dedicated to Motorist and Road Worker Day* (pp. 267–271). Kharkivskyi natsionalnyi avtomobilno-dorozhnii universytet. https://api.dspace.khadi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/2462be2b-bfa3-4347-8dc9-223b5b385034/content [in Ukrainian].
10. Багач, Р. В., & Нетребенко, О. В. (2024). Тенденції та майбутнє систем контролю літій-іонних батарей. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології: Збірка матеріалів IX Міжнародної науково-технічної Інтернет-конференції (Харків, 21–22 листопада 2024 р.).* (с. 41–43). Харків: Харківський національний автомобільно-дорожній університет. Bahach, R. V., & Netrebenko, O. V. (2024). *Tendentsii ta maibutnie system kontroliu litii-ionnykh batarei* [Trends and future of lithium-ion battery management systems]. In *Avtomobil i elektronika. Suchasni tekhnolohii: Proceedings of the IX International Scientific and Technical Online Conference (Kharkiv, November 21–22, 2024)* (pp. 41–43). Kharkiv: Kharkivskyi natsionalnyi avtomobilno-dorozhnii universytet. [in Ukrainian].
11. Fan, Y., Zhan, D., Tan, X., Lyu, P., & Rao, J. (2021). Optimization of cooling strategies for an electric vehicle in high-temperature environment. *Applied Thermal Engineering*, *195*, 117088. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359431121005305
12. Togun, H., Aljibori, H. S. S., Abed, A. M., Biswas, N., Alshamkhani, M. T., Niyas, H., ... & Paul, D. (2024). A review on recent advances on improving fuel economy and performance of a fuel cell hybrid electric vehicle. *International Journal of Hydrogen Energy*, *89*, 22-47. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319924040072
13. Буряківський, В. А**.** (2024). Аналітичне дослідження впливу температурних режимів тягових батарей електромобілів на їх ефективність**.** Сучасне автомобілебудування, автотехнічна експертиза, експлуатація автомобільного транспорту та підготовка

фахівців галузі транспорт : зб. тез доп. Міжнар. наук.-практ. конф. до Дня автомобіліста та дорожника, 22–23 жовт. 2024 р. / Харків. нац. автомоб.-дор. ун-т. – Харків, 2024. – С. 235–237. Buriakivskyi, V. A. (2024). Analitychne doslidzhennia vplyvu temperaturnykh rezhymiv tiahovykh batarei elektromobiliv na yikh efektyvnist [Analytical study of the impact of temperature regimes of electric vehicle traction batteries on their efficiency].Modern automotive industry, automotive technical expertise, operation of road transport and training of transport industry specialists: collection of abstracts of the International Scientific and Practical Conference on the Day of the Motorist and Road Worker, October 22–23, 2024 / Kharkiv. National Automobile and Road Univ. – Kharkiv, 2024. – P. 235–237. https://dspace.khadi.kharkov.ua/handle/123456789/24035 [in Ukrainian].

14. Mallick, S. S., Neog, S., Mahanta, D. K., & Rafi, M. (2021, April). A review on passive cooling techniques for lithium-ion battery thermal management system of electric vehicle. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1145, No. 1, p. 012046). IOP Publishing. (pp. 1–12). https://www.researchgate.net/publication/351865257_A_review_on_passive_cooling_techniques_for_lithium-ion_battery_thermal_management_system_of_electric_vehicle
15. Saechan, P., Dhuchakallaya, I., & Saat, F. A. Z. M. (2023). Thermal performance improvement of forced-air cooling system combined with liquid spray for densely packed batteries of electric vehicle. *Engineered Science*, *24* (4), 886. (pp.1–14). https://www.espublisher.com/journals/articledetails/886
16. Wang, B., Ou, Y., Wang, P., Li, Z., Zhang, Y., Zhang, X., & He, X. (2022, December). An Analysis of Li-ion Traction Battery System Thermal Simulation Based on Simplified Pipeline Fluid Model and Liquid Cooling Enhancement. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2399, No. 1, p. 012035). IOP Publishing.(pp.1–9). https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2399/1/012035/meta
17. Xie, Y., Wang, X., Hu, X., Li, W., Zhang, Y., & Lin, X. (2021). An enhanced electro-thermal model for EV battery packs considering current distribution in parallel branches. *IEEE Transactions on Power Electronics*, *37*(1), 1027-1043. https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9508844
18. Дослідження літій-іонних батарей для експлуатації електромобілями при різних температурних умовах. ISSN 2074-2630 Наукові праці ДонНТУ. Серія:«Електротехніка і енергетика»№ 1 (30)’2024. 58-64. Latvynskyi, VD, & Bahach, RV (2024). Doslidzhennia litii-ionnykh batarei dlia ekspluatatsii elektromobiliamy pry riznykh temperaturnykh umovakh. [Study of lithium-ion batteries for electric vehicle operation under different temperature conditions.] ISSN 2074-2630 Naukovi pratsi DonNTU. Seriia:«Elektrotekhnika i enerhetyka» № 1 (30)’ 2024. https://doi.org/10.31474/2074-2630-2024-1-58-64 [in Ukrainian]
19. Mei, N., Xu, X., & Li, R. (2020). Heat dissipation analysis on the liquid cooling system coupled with a flat heat pipe of a lithium-ion battery. ACS omega, 5(28), 17431-17441. https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsomega.0c01858?fig=fig6&ref=pdf

Латвинський Владислав Дмитрович[1], асистент кафедри автомобільної електроніки,
e-mail: latvin2000@gmail.com,
тел. +38 0988956781, +38 0992599142

Багач Руслан Володимирович[1], доктор філософії (PhD), доцент кафедри автомобільної електроніки,
e-mail: bagach.ruslan@gmail.com,
тел. +38 0507255660, +38 0935761042,
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0157-5933

Плахтій Олександр Андрійович[2], кандидат наук, доцент, кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки,
e-mail: a.plakhtiy1989@gmail.com
тел. +38 0939176020
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1535-8991

Запорізький Валентин Вікторович[3], аспірант, кафедри комп’ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки
e-mail: valentyn.zaporizkyi@nure.ua
тел. +38 0979486565
ORCID: https://orcid.org/0009-0004-8348-3657

[1]Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

[2]Український державний університет залізничного транспорту, 61001, Україна. м. Харків, майдан Оборонний Вал, 7.

[3]Харківський національний університет радіоелектроніки, 61166, Україна, м. Харків, проспект Науки, 14.

Effects and optimization of the temperature regime of Lithium-ion batteries in the traction battery of an electric car

Abstract. Problem. *The article investigates the electrical and thermal characteristics of a modular lithium-ion battery under conditions of simulation of discharge modes typical for the movement of a passenger electric vehicle in fast*

driving cycles. During experimental tests, a qualitative and quantitative assessment of the heat dissipation of lithium-ion batteries in the traction battery compartment of an electric vehicle was carried out, and the effectiveness of passive air cooling of batteries in the proposed design of battery modules was also confirmed. ***Goal:*** *The purpose of this work is to experimentally assess the heat dissipation of battery modules and the efficiency of the implemented convection cooling in the composition of the traction battery (TAB) of an electric vehicle. The study is aimed at improving the operational characteristics of the battery by optimizing the temperature regime of the batteries.* ***Methodology****. To achieve the set goal, it is necessary to solve several key tasks. First, the discharge and charge power of the TAB must be calculated under various driving conditions of an electric vehicle. Next, the current load in a typical driving cycle needs to be determined, followed by the calculation of the equivalent current of battery discharge. Once these calculations are completed, an experimental reproduction of the calculated load currents will be conducted through bench tests. Additionally, the heat dissipation of battery modules during different load regimes will be assessed. The efficiency of passive air cooling in the proposed battery design will be analyzed, along with the impact of various operating modes on battery temperature and service life.* ***Results****. The study analyzed energy efficiency parameters of an external DC EV charging station using an active rectifier. The conducted research demonstrated that the maximum efficiency of the system is achieved in the mode of minimum charge current. At the same time, reducing the charge current leads to an increase in the charging process duration and a slight deterioration in power quality parameters.****Originality.*** *The findings of this study present a novel approach to battery thermal management, integrating passive cooling techniques with efficient battery module design to optimize energy utilization and extend operational lifespan.* ***Practical value.*** *The results of this study hold significant practical value for the advancement of electric vehicle battery technology. The proposed optimization techniques can be integrated into future battery systems to improve thermal stability and efficiency, thereby supporting the broader adoption of electric vehicles in modern transportation networks.*

Keywords*: electric vehicle, traction battery, lithium-ion battery, experiment, load test.*

Latvynskyi Vladyslav[1], Assistant of the automotive electronics Department,
e-mail: latvin2000@gmail.com,
tel. +38 0988956781, +38 0992599142,
ORCID: https://orcid.org/0009-0002-4891-2925

Bahach Ruslan[1], Doctor of philosophy (PhD), Associate Professor of the automotive electronics Department, e-mail: bagach.ruslan@gmail.com, tel. +38 0507255660, +38 0935761042, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0157-5933

Plakhtii Oleksandr[2], Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Associate Professor, Department of electrical power engineering, electrical engineering and electromechanics,
e-mail: a.plakhtiy1989@gmail.com
tel. +38 0939176020
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1535-8991

Zaporizkyi Valentyn[3], Ph. D. student, Department of computer-integrated technologies, automation and robotics, e-mail: valentyn.zaporizkyi@nure.ua,
tel. +38 0979486565,
ORCID: https://orcid.org/0009-0004-8348-3657

[1]Kharkov National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

[2]Ukrainian state university of railway transport, 7 Obronny Val Square, Kharkiv, 61001, Ukraine

[3]Kharkiv National University of Radio Electronics, 14 Nauky Avenue, Kharkiv 61166, Ukraine.