

Висновки

Комбінована 3D-модель показала, що тунель метрополітену формує стійкий тепловий фон у прилеглому ґрунті, тому при оцінці роботи вертикальних ґрунтових теплообмінників у зоні впливу метро необхідно враховувати сам тунель і прогрітий ним масив. Після введення теплообмінників видно практичний результат: за наявності тунелю система працює в більш сприятливих температурних умовах і має кращі передумови для стабільного відбору теплоти. Порівняння конфігурацій поля (1×30 та 2×15) підтвердило, що компоновка змінює картину охолодження ґрунту та взаємний вплив свердловин, однак тепловий внесок тунелю зберігається в обох випадках. Також встановлено очевидну закономірність: чим ближче поле розташоване до тунелю, тим відчутніший його вплив, а зі збільшенням відстані ефект поступово слабшає, що робить дистанцію до тунелю простим проєктним параметром для міських умов.

Література

1. **Задіранов В. С.** Огляд досвіду утилізації скидної теплоти метрополітену. *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання*. 2024. № 48. С. 50–66. DOI: <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2024.48.50-66>.
2. **Задіранов В. С.** Моделювання утилізації теплоти метрополітену з використанням вертикального ґрунтового теплообмінника та теплового насоса в умовах Харкова. *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання*. 2025. № 54. С. 122–139. DOI: <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2025.54.122-139>.
3. **Задіранов В. С.** Чисельне 3D-моделювання нестационарного температурного поля внутрішньої поверхні тунелю метрополітену. *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання*. 2025. № 55. С. 96–114. DOI: <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2025.55.96-114>.

УДК 629.331:621.355

АНАЛІЗ ТЕПЛОВИХ РЕЖИМІВ АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ У МІСЬКИХ УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Селіванов Іван Олексійович, аспірант,

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,
e-mail: ivan.selivanov@ieee.khpi.edu.ua, ORCID ID: 0009-0005-5719-3418

Розвиток електромобільного транспорту є однією з ключових тенденцій сучасної автомобільної індустрії. В умовах динамічних змін у світовій економіці, зростання вартості енергоресурсів та періодичної нестабільності на ринку паливних ресурсів особливої актуальності набуває пошук ефективних і надійних альтернативних видів транспорту. Збільшення частки використання електромобілів сприяє зменшенню залежності від традиційних видів палива, підвищенню енергетичної незалежності та створенню більш стійких транспортних систем.

Ключовим елементом таких транспортних засобів є акумуляторні батареї. Під час експлуатації електромобілів акумуляторні батареї зазнають значних

теплових навантажень, що виникають у процесі заряджання та розряджання, а також під впливом зовнішніх температурних умов. Підвищення температури акумуляторів може призводити до прискореної деградації активних матеріалів, зниження ємності комірок та скорочення загального терміну служби батарейного модуля [1]. У зв'язку з цим контроль теплових режимів є важливим аспектом забезпечення довговічності акумуляторних систем електромобілів.

Ефективність та безпечність електромобілів значною мірою залежать від конструкції та хімічного складу акумуляторних батарей. Різні типи батарей відрізняються енергощільністю, терміном служби та тепловими характеристиками, що безпосередньо впливає на безпечність їх експлуатації.

Метою роботи є аналіз впливу теплових режимів акумуляторних батарей електромобілів на їх деградацію, безпеку та енергетичну ефективність в умовах міського застосування.

Характеристика літій-іонних акумуляторних батарей

Об'єктом дослідження є літій-іонні акумуляторні батареї (ЛІАБ). Ці батареї є найбільш поширеними у сучасних електромобілях завдяки високій енергощільності та тривалому ресурсу експлуатації. Вони забезпечують значну дальність пробігу на одному заряді та ефективність процесу заряджання, що робить їх привабливими для використання в міських та міжміських умовах. Термін служби ЛІАБ зазвичай складає 8-12 років або 1500-2000 циклів заряд-розряд при дотриманні рекомендованих умов експлуатації [2].

Разом із тим, ЛІАБ мають високу чутливість до теплових навантажень. Інтенсивні цикли заряд-розряд, неправильне керування температурою або зовнішні фактори можуть призводити до перегріву елементів та прискореної деградації. Максимальні допустимі температури ЛІАБ зазвичай перебувають у межах 45-60 °C [3]. Перевищення цих значень негативно впливає на довговічність елементів та безпеку експлуатації.

В межах загальної групи ЛІАБ особливої уваги заслуговують два ключові підтипи, що відрізняються хімічним складом катода та мають різну реакцію на теплові виклики міського циклу руху:

1. літій-нікель-марганець-кобальтові акумулятори (Li-NMC). Ця модифікація ЛІАБ широко застосовується у легкових електромобілях через високу енергоефективність. Технологія NMC дозволяє витримувати значну інтенсивність циклів заряд-розряд, проте потребує суворого температурного контролю;

2. літій-залізо-фосфатні акумулятори (LiFePO₄). Даний підтип ЛІАБ позиціонується як найбільш стійка та безпечна альтернатива класичним рішенням. Попри дещо нижчу енергощільність, LiFePO₄ демонструють вищу термостійкість та можуть витримувати підвищені температури до 60-65 °C. Головною перевагою цього підтипу є мінімальний ризик виникнення теплового розгону та значно більший життєвий цикл – до 4000 циклів [4].

Зв'язок теплових характеристик батарей із безпекою експлуатації є ключовим при розробці моделей оцінки теплової стабільності. Для кожного типу батарей необхідно враховувати максимальні робочі температури, ступінь деградації при перегріві та особливості роботи у циклах міського руху. У

цьому контексті предметом дослідження виступають теплові режими функціонування акумуляторних батарей та вплив температури на їх експлуатаційні характеристики. Вибір хімічного складу та типу батареї безпосередньо впливає на точність прогнозування температурної поведінки.

Проблема нагріву батарей

Нагрів акумуляторних батарей є природним фізико-хімічним процесом, проте його надмірність становить основний виклик для надійності електромобіля. Під час експлуатації батареї виступають як активні джерела теплової енергії, що зумовлено поєднанням фізичних та електрохімічних чинників, серед яких ключове місце займає внутрішній опір, також відомий як ефект Джоуля-Ленца. Під час проходження струму через внутрішні компоненти батареї, такі як електроди, сепаратори та електроліт, виникає внутрішній опір. Це призводить до неминучої трансформації частини електричної енергії в теплову.

Цей процес доповнюється ентропійними змінами, оскільки хімічні реакції всередині акумулятора під час циклів заряджання та розряджання супроводжуються поглинанням або виділенням енергії, інтенсивність якої безпосередньо залежить від поточного стану заряду та щільності струму. У масштабах великих акумуляторних блоків ці явища ускладнюються проблемою нерівномірності температурного поля: комірки, розташовані в центральній частині модуля, охолоджуються значно повільніше за ті, що знаходяться на периферії. Така термічна асиметрія створює стійкий температурний градієнт, який спричиняє нерівномірний знос елементів, знижуючи загальну ефективність та термін служби всієї енергетичної системи електромобіля.

Вплив температурних режимів на функціональні характеристики батарей

Термічна стабільність є важливою умовою для підтримки високих експлуатаційних показників акумуляторів. Будь-яке тривале відхилення температури від оптимального діапазону 15-35 °C ініціює каскад внутрішніх структурних змін, що негативно впливають на роботу всієї енергосистеми електромобіля [3]. Зокрема, досягнення максимальних робочих температур будь-якого типу батарей активує деградаційні механізми на мікрорівні. Це зумовлено інтенсифікацією побічних хімічних реакцій, які спричиняють руйнування активних матеріалів електродів та поступовий розклад електроліту. Такі процеси призводять до незворотної втрати ємності та стрімкого вичерпання розрахункового ресурсу акумулятора.

Окрім впливу на ресурс батареї, порушення теплового балансу створює серйозні ризики для безпеки експлуатації транспортного засобу. Зокрема, тривалий або інтенсивний перегрів може спричинити явище *thermal runaway* – процес неконтрольованого саморозігріву, під час якого швидкість внутрішніх реакцій різко зростає [4]. Такий стан може призвести до займання або руйнування акумуляторного блоку, що робить підтримку стабільних температурних режимів одним із ключових завдань при проектуванні систем керування батареями.

Як було зазначено раніше, нерівномірний температурний розподіл та наявність термічних градієнтів у батарейному модулі впливають на роботу всіх

елементів. На практиці це проявляється у зниженні енергетичної ефективності акумуляторних батарей. Як наслідок, зменшується корисна дальність пробігу на одному заряді, що робить аналіз та контроль теплових режимів критично важливим для забезпечення стабільної роботи електромобіля в реальних умовах експлуатації.

Специфіка теплових режимів у міських умовах експлуатації

Аналіз теплових режимів акумуляторних батарей у межах міста виявляє низку чинників, що зумовлюють підвищену вразливість енергосистеми до теплових навантажень. Особливість міського циклу руху полягає у його високій динамічності, що провокує постійну температурну нестабільність акумулятора. Додатковим фактором термічного напруження виступає система рекуперації гальмування, яка в умовах щільного трафіку активується дуже часто. Короткі, але потужні імпульси зарядного струму під час сповільнення створюють циклічне чергування режимів «заряд-розряд», що заважає стабілізації теплового поля акумулятора. Ситуація ускладнюється в умовах заторів та руху типу «Stop-and-Go», де відсутність стабільного набігаючого потоку повітря погіршує природний тепловідвід [5]. Це змушує штатні системи терморегулювання працювати в екстремальних режимах для запобігання критичному перегріву елементів.

Загалом, інтенсивне циклювання, характерне для активної міської експлуатації, формує специфічний профіль навантаження, який прискорює термічну деградацію компонентів у разі неоптимального керування температурою. Таким чином, міське середовище створює комплекс викликів, де тепловий менеджмент стає вирішальним фактором для збереження ефективності та безпеки акумуляторів протягом усього періоду використання.

Висновки

Аналіз теплових режимів акумуляторних батарей електромобілів у міських умовах експлуатації є важливим для забезпечення їх надійності, безпеки та енергетичної ефективності. Інтенсивні цикли заряджання та розряджання, характерні для міського руху, спричиняють змінні теплові навантаження, що можуть прискорювати деградацію елементів батареї. Дослідження впливу температурних факторів дозволяє визначити критичні режими роботи та оцінити їх вплив на експлуатаційні характеристики акумуляторних систем. Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення систем теплового управління батареї та оптимізації умов їх експлуатації.

Література

1. **Shen W. et al.** Heat Generation and Degradation Mechanism of Lithium Ion Batteries during High Temperature Aging. *ACS Omega*. 2022. Vol. 7. P. 44733–44742. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c0409>.
2. **Zhang J., Huang H., Zhang G.** Cycle life studies of lithium ion power batteries for electric vehicles: A review. *Journal of Energy Storage*. 2024. Vol. 93. 112231.
3. **Wang X., Liu S., Lv S.** A Review of the Power Battery Thermal Management System with Different Cooling, Heating and Coupling System. *Energies*. 2022. Vol. 15. 1963. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15061963>.

4. **Chen Y. et al.** A review of lithium-ion battery safety concerns: The issues, strategies, and testing standards. *Journal of Energy Chemistry*. 2021. Vol. 59. P. 83–99. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2020.10.017>.

5. **Çetin I. et al.** A comprehensive review of battery thermal management systems for electric vehicles. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. 2022. Vol. 237, no. 3. DOI: <https://doi.org/10.1177/09544089221123975>.

УДК 621.311:624.132

ОПТИМІЗАЦІЯ ГІБРИДНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ БУДІВЕЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

Балака Максим Миколайович, канд. техн. наук, доцент каф. будівельних машин, Київський національний університет будівництва і архітектури, e-mail: balaka.mm@knuba.edu.ua, ORCID 0000-0003-4142-9703

Лисак Сергій Іванович, викладач, ВСП Миколаївський будівельний фаховий коледж Київського національного університету будівництва і архітектури, e-mail: rotterdam85as@gmail.com, ORCID 0009-0009-8695-8925

Федишин Богдан Миколайович, доктор філософії, асистент каф. будівельних машин, Київський національний університет будівництва і архітектури, e-mail: fedyshyn_bm@knuba.edu.ua, ORCID 0000-0003-2420-7332

Будівельна техніка є одним з найбільш енергоємних елементів транспортно-технологічних систем, що визначає витрати палива та обсяги викидів шкідливих речовин у будівельному секторі. Домінування дизельних енергетичних установок забезпечує автономність і високу питому потужність машин, однак супроводжується суттєвими викидами CO₂, оксидів азоту та твердих часток. У контексті глобальних кліматичних цілей і трансформації енергетики [1] питання декарбонізації будівельної техніки набуває системного характеру і потребує комплексного інженерного підходу.

Світові тенденції розвитку відновлюваної енергетики і зниження вартості генерації з відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) створюють передумови для інтеграції локальних джерел енергії в структуру будівельного майданчика [2]. Дослідження [3–5] доводять доцільність використання альтернативних моторних палив та гібридизації приводів будівельної техніки як інструменту підвищення енергонезалежності. Окремі аспекти накопичення енергії в приводах машин і можливості рекуперації енергії досліджено у роботі [6], тоді як перехід від дизельних до електрифікованих схем приводу розглянуто у [7]. Разом з тим, наявні дослідження переважно зосереджені на окремих технічних або економічних аспектах модернізації машин. Відсутньою залишається інтегрована модель, яка б поєднувала енергетичний баланс робочого циклу машини, потенціал рекуперації, параметри накопичувача та вплив локальних джерел генерації на техніко-економічні показники експлуатації.