

## Література

1. Розпорядження Про схвалення Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року. Документ 430-2018-р. Редакція від 07.04.2021. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/430-2018-%D1%80#Text> (дата звернення: 01.03.2025).
2. Mercedes-Benz інтегрує стартер-генератор в кожену модель <https://mercedes-benz-kyiv.com/e-class-2020-holovni-sekret-y-presentatsiyi-1942> (дата звернення: 01.03.2025).
3. A Guide to the Hybrid Integrated Starter-Generator in Mercedes-Benz Engines <https://www.arrowheadmb.com/clp-a-guide-to-the-hybrid-integrated-starter-generator-in-mercedes-benz-engines> (дата звернення: 01.03.2025).

УДК: 621.039.8:004.42

## МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ В АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЯХ ГІБРИДНИХ АВТОМОБІЛІВ: ПРОБЛЕМАТИКА, МЕТОДИЧНІ ПІДХОДИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ОПТИМІЗАЦІЇ СИСТЕМ ОХОЛОДЖЕННЯ

**Мешков Денис Вікторович**, канд. техн. наук, доцент кафедри ДтаГЕУ, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», e-mail: [denys.meshkov@khpі.edu.ua](mailto:denys.meshkov@khpі.edu.ua), ORCID: 0000-0002-9114-9868

Анотація. Зростання енергетичної щільності сучасних акумуляторів супроводжується інтенсивним виділенням теплової енергії під час циклічних режимів зарядження та розрядження, що негативно впливає на хімічну стабільність і тривалість експлуатації елементів батареї [1-3]. У статті розглядаються основні фізичні механізми теплових процесів, порівнюються технології різних типів акумуляторів (літій-іонних, нікель-металгідридних, літій-залізо-фосфатних) та аналізуються сучасні підходи до моделювання – від аналітичних розрахунків до високоточних чисельних методів, таких як метод кінцевих елементів (FEM) і Computational Fluid Dynamics (CFD). Комплексний підхід, запропонований у роботі, створює основу для розробки адаптивних систем теплового управління, що забезпечують безпечну та ефективну роботу акумуляторних систем гібридних транспортних засобів.

Ключові слова: гібридні автомобілі, акумуляторні батареї, теплові процеси, FEM, CFD, моделювання, оптимізація охолодження.

### Вступ

Сучасні гібридні автомобілі все більше покладаються на високоефективні акумуляторні системи, що, однак, супроводжується зростанням теплових навантажень під час експлуатації. Порушення оптимального температурного

режиму може призвести до передчасного старіння батареї, збільшення ризику термічного розгону та зниження загальної ефективності.

Отже, розробка точних моделей теплових процесів є ключовим завданням для підвищення надійності систем охолодження та продовження терміну служби акумуляторів.

### **Фізичні механізми та огляд технологій**

Основними джерелами тепла в акумуляторах є:

- Ефект Джоуля: Виникає при проходженні струму через внутрішній опір елементів, що спричиняє перетворення частини електричної енергії у тепло [4-5].
- Екзотермічні реакції: Хімічні процеси, що супроводжують зарядження та розрядження, також виділяють тепло.

Тепло відводиться за рахунок трьох основних механізмів: теплопровідності, конвекції та випромінювання [6]. У статті проведено порівняння різних типів акумуляторів, зокрема літій-іонних, нікель-металгідридних (NiMH) та літій-залізо-фосфатних (LiFePO<sub>4</sub>), де розглянуто їх особливості та теплові характеристики, що визначають необхідність застосування для них спеціалізованих систем підтримання необхідного температурного стану.

### **Методики моделювання теплових процесів**

Методики моделювання теплових процесів в акумуляторних батареях гібридних автомобілів розвинулися до високоточного інструменту аналізу, що дозволяє враховувати як спрощені, так і надскладні реальні умови експлуатації. Основою для початкового аналізу є аналітичні моделі, які будуються на базі рівнянь теплопровідності та методів розділення змінних, що дає змогу отримувати приблизні оцінки температурного розподілу при ідеалізованих умовах. Хоча цей підхід дозволяє швидко визначити базову картину теплового поля, його застосування обмежується припущеннями про лінійність процесів та однорідність матеріалів, що не завжди відповідає реаліям роботи батарейних систем.

Для отримання більш детальних даних використовуються чисельні методи, зокрема метод кінцевих елементів (FEM) та Computational Fluid Dynamics (CFD). Ці підходи дозволяють враховувати складну геометрію батарейних модулів, нелінійні властивості матеріалів та змінні умови навантаження, що спричиняють локальні аномалії в температурному полі. Метод CFD дозволяє моделювати конвективні потоки охолоджуючої рідини або повітря. Крім того, застосування теплових мережевих моделей дозволяє розраховувати температурний режим в режимі реального часу, що є надзвичайно важливим для інтеграції у системи контролю та управління акумуляторними модулями.

Окремо варто відзначити мультифізичне моделювання, яке інтегрує електричні, хімічні, механічні та теплові процеси в єдину розрахункову схему. Такий підхід дозволяє отримати найбільш повну картину поведінки батарейної системи. Наприклад, сучасні платформи, такі як COMSOL Multiphysics та ANSYS, використовуються для побудови таких інтегрованих моделей, що сприяє оптимізації конструктивних рішень та підвищенню ефективності систем охолодження.

### **Експериментальна ідентифікація та калібрування моделей**

Для забезпечення достовірності розроблених моделей моделювання теплових процесів необхідна комплексна експериментальна ідентифікація, що здійснюється за допомогою методів збору даних. Одним із ключових інструментів є тепловізійна зйомка, яка дозволяє отримувати детальні зображення температурного розподілу на поверхні батарейних модулів з високою роздільною здатністю. Завдяки цьому методу можливо виявити локальні точки температурного перевантаження, оцінити ефективність роботи систем охолодження та зробити висновки про характер розподілу теплової енергії.

Додатково, впровадження вбудованих температурних датчиків у критичних зонах батарейної системи дає змогу отримувати безперервні дані вимірювання температури, що є необхідним для порівняння експериментальних даних з розрахунковими моделями. Лабораторні дослідження, які проводяться в умовах, максимально наближених до реальних режимів експлуатації, а також польові випробування на гібридних транспортних засобах, забезпечують збирання великого обсягу даних, що дозволяє проводити ідентифікацію моделей. Використання методів статистичного аналізу, зокрема розрахунку середньоквадратичної помилки та коефіцієнтів кореляції, дозволяє об'єктивно оцінити якість моделі та визначити ті області, які потребують подальшої оптимізації. Цей комплексний підхід, який включає інтеграцію експериментальних даних і чисельних розрахунків, є ключовим для розробки адаптивних систем управління температурним режимом, здатних швидко реагувати на зміни умов експлуатації та забезпечувати підвищену безпеку й ефективність роботи акумуляторних систем. Завдяки цьому підходу можливо досягти значного зниження похибок прогнозування, що є критично важливим для подальшої оптимізації конструктивних рішень у сфері гібридних технологій.

### **Основні проблеми та перспективи розвитку**

Незважаючи на досягнутий прогрес у моделюванні теплових процесів в акумуляторних батареях гібридних автомобілів, існує ряд проблем, що потребують подальшого вирішення. По-перше, складна конструкція батарейних модулів, що характеризується використанням багатокомпонентних матеріалів з

різними теплоемкісними та теплопровідними властивостями, створює умови для нерівномірного розподілу теплової енергії. Більш того, неоднорідність матеріалів ускладнює точне задання граничних умов, оскільки реальні експлуатаційні параметри часто значно відрізняються від ідеалізованих умов, прийнятих у лабораторних дослідженнях.

По-друге, аналітичні моделі, які використовуються на початкових етапах розробки, обов'язково включають численні спрощення, що не дозволяє адекватно врахувати всі нелінійні ефекти та швидкі динамічні переходи, характерні для роботи акумуляторних систем. Це створює певні обмеження щодо точності прогнозів і змушує дослідників звертатися до чисельних методів, таких як FEM та CFD, які, однак, мають високі обчислювальні витрати та потребують значних ресурсів для розв'язання задач з високою деталізацією.

Перспективними напрямками подальших досліджень є інтеграція алгоритмів штучного інтелекту та машинного навчання для автоматизації процесу калібрування моделей. Такі алгоритми дозволяють проводити аналіз великих масивів експериментальних даних, оптимізувати параметри розрахункових моделей та адаптувати їх до змінних умов експлуатації. Розробка нових матеріалів з покращеними тепловими характеристиками, таких як графенові композити або інші нанокompозити, може сприяти рівномірнішому розподілу тепла та зниженню ризику локальних перегрівів у батарейних модулях.

Отже, основні виклики, пов'язані з моделюванням теплових процесів, зумовлені як складністю конструкції та неоднорідністю матеріалів, так і обмеженнями застосовуваних математичних моделей та високими вимогами до обчислювальних ресурсів.

Подолання цих проблем вимагає комплексного підходу, що поєднує передові чисельні методи, адаптивні алгоритми оптимізації та глибоку експериментальну перевірку. Реалізація зазначених напрямків сприятиме створенню більш точних і надійних моделей, здатних передбачити динаміку температурного режиму акумуляторних систем у реальних умовах, що є важливим внеском у розвиток технологій гібридних автомобілів.

## **Висновки**

Комплексний підхід до моделювання теплових процесів в акумуляторних батареях гібридних автомобілів є критично важливим для підвищення їх надійності, безпеки та ефективності. Поєднання експериментальних даних із високоточними чисельними методами відкриває можливості для розробки адаптивних систем охолодження, здатних швидко реагувати на зміну умов експлуатації. Це, у свою чергу, сприятиме подальшому розвитку гібридних технологій та підвищенню конкурентоспроможності сучасного автомобільного ринку.

## Література

1. Nguyen, T., Li, X., Petrova, M., & Smith, R. (2024). Recent Advances in Thermal Management for Hybrid Vehicle Battery Systems: A Comprehensive Review. *Applied Thermal Engineering*, 225, 117–130.
2. Singh, A., Chen, L., Zhao, Y., & Ivanov, D. (2024). Advances in Nickel-Metal Hydride Battery Design for Enhanced Thermal Stability in Hybrid Electric Vehicles. *Journal of Power Sources*, 520, 230–245.
3. Kim, S., Park, J., & Lee, D. (2024). Innovations in Thermal Management of Lithium Iron Phosphate Batteries for Hybrid Electric Vehicles. *Journal of Power Sources*, 550, 189–205.
4. Zhang, Y., Kumar, A., & Garcia, M. (2024). Advanced Computational Models for Thermal Management in Battery Systems: An Integrated Approach. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 71(4), 1234–1246.
5. Wang, L., Gupta, R., & Roberts, P. (2024). Emerging Strategies for Mitigating Thermal Runaway in Lithium-Ion Batteries: A Comprehensive Review. *Journal of Power Sources*, 565, 300–315.
6. Li, X., Huang, Z., & Patel, S. (2024). CFD Simulation of Integrated Battery Cooling Systems in Hybrid Vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 73(2), 987–1001.

УДК 621

## ОСОБЛИВОСТІ ВИБОРУ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ СИСТЕМ СУЧАСНИХ ГАЗОДІЗІЛІВ ДЛЯ АВТОТРАКТОРНИХ ЗАСОБІВ

**Манойло Володимир Максимович** докт. техн. наук, проф., Харківський національний автомобільно-дорожній університет,

e-mail: volodimir.m.manoylo@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2208-4404

**Козлов Юрій Юрійович**, молодший науковий співробітник Харківська філія УкрНДДПВТ ім. Л. Погорілого: <https://orcid.org/0000-0002-3546-0010>

**Гончаров Сергій Володимирович.**, аспірант, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: sergeygoncharov1511@gmail.com

**Шулаєв Максим Євгенович**, аспірант, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: vega.asphalt2020@gmail.com

**Стрижак Глеб Олександрович**, магістр, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: glebstrijak2003@gmail.com

**Гончаров Михайло Дмитрович**, бакалавр, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: mihailgoncarov41@gmail.com

**Актуальність теми дослідження.** Постійне підвищення потреби у дизельному паливі та суттєве його подорожчання в останні роки призводять до необхідності переведення автотракторних засобів на альтернативні види палива, а саме на стислий і зріджений природний газ.