

Відгук

**опонента на дисертацію ГАВРИЛЮКА Андрія Федоровича
«Розвиток наукових основ протипожежного захисту електричних колісних
транспортних засобів (електромобілів)», яку подану на здобуття наукового
ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 21.06.02 – пожежна
безпека (261 – пожежна безпека)**

1. Актуальність теми.

Електромобілі відіграють важливу роль у зменшенні забруднення атмосфери, яке спричинене викидами відпрацьованих газів від двигунів внутрішнього згоряння, а також відкривають нові можливості для впровадження відновлюваних джерел енергії. Завдяки високій питомій енергоемності та тривалому циклу використання літій-іонні акумуляторні батареї домінують на ринку акумуляторних технологій, і прогнозується, що попит на електромобілі, оснащені такими батареями, продовжить стрімко зростати впродовж наступного десятиліття. Втім, хімічні характеристики таких батарей залишаються вразливими до явища термодеструктивного процесу, особливо за умов експлуатації у складному температурному середовищі. Із зростанням масштабів потужності та енергоемності сучасних акумуляторних батарей проблематика безпеки набуває критичного значення, оскільки виникнення термодеструктивного процесу у корпусі акумулятора призводить до виділення токсичних газів, займання або навіть вибуху, що, своєю чергою, несе загрозу життю, здоров'ю людей і майну. Проблематика пожеж у транспортних засобах, зокрема електромобілях, залишається недостатньо висвітленою в межах загального вивчення пожеж. Зокрема з урахуванням глобального тренду на електрифікацію транспорту та зростаючу кількість електромобілів у міських середовищах, питання їх пожежної безпеки набуває особливої актуальності.

Згідно з сучасними науковими дослідженнями, випадки загоряння електромобілів, мають складніший сценарій розвитку та вимагають особливих

ЛДУБ ЖД	
Вх. №	150
22.04	2025р.
КІЛЬКІСТЬ АРКУШІВ:	
ОСН. ДОК.	10 ДОДАТ.

підходів до виявлення, реагування та ліквідації наслідків. Крім того, недостатній рівень нормативного забезпечення, відсутність уніфікованих методик оцінювання ризиків, а також обмежений доступ до емпіричних даних обумовлюють потребу у систематизованих дослідженнях, спрямованих на підвищення рівня протипожежного захисту електромобілів. Саме тому дисертаційна робота, присвячена розвитку наукових основ забезпечення пожежної безпеки електромобілів, є своєчасною, науково обґрунтованою та має високу прикладну цінність для галузі безпеки електромобілів й акумулюючих систем електроенергії загалом.

Актуальність дисертаційної роботи підтверджується також виконанням в її рамках науково-дослідних робіт: «Підвищення ефективності забезпечення протипожежного захисту електромобілів» (номер державної реєстрації 0119U102482), «Особливості виникнення процесів займань у силових акумуляторних батареях електромобілів (на прикладі TESLA MODEL S)» (номер державної реєстрації 0124U002454), «Обґрунтування вимог пожежної безпеки до електрозаправних станцій» (номер державної реєстрації 0121U112129), «Обґрунтування параметрів та типів первинних засобів пожежогасіння для оснащення колісних транспортних засобів» (номер державної реєстрації 0123U100457).

2. Ступінь обґрунтованості та достовірності наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих у дисертації.

Наукові положення, висновки і рекомендації, які наведені у дисертації достовірні та науково обґрунтовані. Обґрунтованість наукових положень висновків та рекомендацій, їх достовірність та новизна підтверджена значним обсягом експериментального матеріалу, який було отримано під час проведення натурних експериментів, задовільною збіжністю отриманих теоретичних та експериментальних досліджень, впровадженням та апробацією отриманих результатів.

3. Наукова новизна отриманих результатів.

Вперше:

1. Теоретично встановлено та експериментально підтверджено, що у літій-іонних елементах силової АКБ електромобілів з катодним матеріалом NCA

(літій-нікель-кобальт-алюміній оксид $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Al}_z\text{O}_2$) при впливі зовнішнього теплового потоку густиною 30 кВт/м^2 час виникнення займання змінюється: нелінійно зменшується з 1225 с до 1115 с для 100 % заряджених літій-іонних елементів; при зміні ступеня заряду з 100 % до 0 % – нелінійно зростає з 1115 с до 1340 с.

2. Виявлено закономірність зниження часу виникнення займання у АКБ електромобіля залежно від хімічного складу катодів, а саме час виникнення займання АКБ електромобіля з катодним матеріалом літій-нікель-манган-кобальт оксид ($\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$) є на 9-16% менший порівняно з батареєю, катод якої виготовлений на основі літій-нікель-кобальт-алюміній оксид ($\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Al}_z\text{O}_2$) і на 15-19% меншим порівняно з батареєю, катод якої виготовлений на основі літій-ферум фосфату (LiFePO_4), при однакових технічних характеристиках, конструктивних та експлуатаційних параметрах, а також однаковій густині теплового потоку зовнішнього джерела тепла.

3. Розроблено науково-методичний апарат, який дозволяє визначати безпечових часові умови до виникнення горіння силових акумуляторних батарей електромобілів, які становлять в енергетичному діапазоні від $30 \text{ кВт}\cdot\text{год}$ до $100 \text{ кВт}\cdot\text{год}$ з катодними матеріалами літій-нікель-кобальт-алюміній оксид, літій-нікель-манган-кобальт оксид, літій-ферум-фосфат при дії теплового потоку густиною від 10 кВт/м^2 до 200 кВт/м^2 для джерел тепла як з відкритим полум'ям так і без нього.

Удосконалено:

1. На основі досліджень наслідків реальних пожеж та аналізу технічних параметрів сучасних силових акумуляторних батарей електромобілів, обґрунтовано критеріальну базу, а саме: енергетичну ємність, ступінь заряду, просторове розміщення, катодний матеріал, параметри зовнішнього джерела тепла, що дозволяє прогнозувати умови виникнення горіння.

2. Науково-методичну та експериментальну базу дослідження процесів виникнення та протікання процесів горіння у силових літій-іонних АКБ електромобілів в масштабах елемента, модуля та електромобіля в цілому, відмінною рисою якої є обґрунтування розміщення та використання мінімальної кількості термопар для забезпечення точності вимірювань.

Набули подальшого розвитку:

1. Оптимізаційна задача формування конструкції силових літій-іонних АКБ електромобілів, отримана на підставі експериментальних визначень часових та температурних параметрів виникнення процесів їх горіння, що дає змогу удосконалити протипожежний захист електричних колісних засобів.

2. Науково-прикладні засади, які базуються на інтеграції чисельного моделювання та експериментальних досліджень, щодо прогнозування та оцінювання можливості виникнення процесів горіння у силових літій-іонних АКБ, як підґрунтя удосконалення конструкції електромобілів.

4. Практичне значення отриманих результатів.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень з розкриття закономірностей динаміки термодеструктивних процесів у силових акумуляторних батареях залежно від густини зовнішнього теплового потоку, який спричиняє виникнення пожежі, температури поверхні батареї, яка обумовлюється технічними характеристиками, конструктивними та експлуатаційними параметрами, як наукове підґрунтя забезпечення протипожежного захисту електромобілів реалізовано у розробленому державному стандарті України – ДСТУ 9222:2023 «Пожежна безпека. Протипожежний захист систем зарядки електромобілів. Основні положення», а також у проекті змін до Постанови Кабінету Міністрів України №1128 «Про забезпечення колісних транспортних засобів первинними засобами пожежогасіння».

5. Оцінка змісту дисертації.

Дисертація складається із анотації, змісту, переліку умовних позначень вступу, семи розділів і загальних висновків, списку використаних літературних джерел з 391 найменувань. Загальний об'єм дисертації становить 415 сторінок друкованого тексту (з них 313 сторінок основного тексту), дисертація містить 30 таблиць, 200 рисунків та 5 додатків.

У вступі обґрунтовано характеристика дисертаційного дослідження, висвітлено її зв'язок із науковими програмами, планами і темами, сформульовано мету, завдання, об'єкт та предмет дослідження, визначені задачі дослідження, відображено положення наукової новизни та практичної цінності

отриманих результатів, форми їх апробації та використання, а також публікації результатів роботи.

У першому розділі проведено комплексний аналіз сучасного стану світового та вітчизняного парку електромобілів, а також виявлено ключові чинники, що зумовлюють їхнє стрімке зростання в умовах енергетичного переходу та декарбонізації транспортної галузі. Узагальнено технічні особливості конструкції електромобілів, зокрема системи електроприводу, електронного керування, систем теплового менеджменту, а також детально розглянуто будову та функціональні характеристики високовольтної тягової батареї як одного з критичних елементів з точки зору пожежної небезпеки.

Окрему увагу приділено аналізу статистичних даних щодо пожеж за участю електромобілів як в Україні, так і на міжнародному рівні. Досліджено динаміку, частоту та обставини виникнення таких інцидентів, що дозволило виділити типові першопричини загорянь – включаючи дефекти батарей, наслідки механічних ушкоджень, порушення умов заряджання, а також вплив зовнішніх температурних чинників. Встановлено, що розвиток пожежі у електромобілі має специфічний характер, зокрема через ймовірність виникнення теплового розгону в акумуляторних елементах, виділення токсичних продуктів горіння та ускладнення процесів гасіння.

У другому розділі дисертаційної роботи розроблено та запропоновано типові сценарії виникнення термодеструктивних процесів у силових акумуляторних батареях електричних колісних транспортних засобів із врахуванням їхніх конструктивних особливостей та технічних характеристик. Сценарії базуються на аналізі фізико-хімічних процесів, що супроводжують теплову деструкцію електрохімічних елементів за умов аварійного нагріву, пошкодження або теплового розгону. У межах розділу здійснено адаптацію фундаментальних положень нестационарної теплопровідності до умов розвитку термодеструктивних процесів у багатокомпонентному середовищі акумуляторного модуля. Зокрема, сформульовано математичну модель для визначення просторово-часового розподілу температури у структурі силової батареї з урахуванням теплопровідності матеріалів, граничних умов теплообміну та можливого впливу зовнішнього джерела тепла. Розроблена

модель дозволяє більш точно оцінювати температурні поля всередині батареї, що є критично важливим для ідентифікації небезпечних зон локального перегріву та оцінювання ймовірності ініціації теплового розгону.

Третій розділ дисертаційної роботи присвячено чисельному моделюванню динаміки розвитку пожежі в електромобілі з використанням програмного пакету Fire Dynamics Simulator (FDS). Даний програмний інструмент дозволяє здійснювати моделювання фізичних процесів горіння, теплопереносу, конвекції, радіації та динаміки диму в складних геометричних умовах. На основі попередньо проведеної систематизації основних факторів, що впливають на ініціацію та розвиток термодеструктивних процесів у літій-іонних силових акумуляторних батареях, виконано комп'ютерне моделювання сценаріїв пожежі в електричному транспортному засобі. Розрахункові моделі враховували геометричні параметри автомобіля, особливості розміщення акумуляторного модуля, а також параметри тепловиділення, характерні для перебігу теплового розгону. У рамках дослідження здійснено оцінку температурних характеристик пожежі, її інтенсивності та просторового розвитку у часі. Особливу увагу приділено моделюванню можливого поширення пожежі на суміжні припарковані транспортні засоби. Результати чисельних експериментів дозволяють зробити висновки щодо критичних умов, за яких загоряння електромобіля може призвести до масштабного загоряння у щільно заставлених паркінгах, а також сприяти формуванню рекомендацій для підвищення пожежної безпеки таких об'єктів.

У четвертому розділі розроблено та обґрунтовано програму і методику експериментів, спрямованих на встановлення закономірностей впливу конструктивно-технічних характеристик та експлуатаційних параметрів літій-іонних акумуляторних елементів і модулів на ініціювання та розвиток термодеструктивних процесів. Особливу увагу приділено дослідженню впливу просторового розміщення акумуляторних елементів відносно джерела тепла на специфіку протікання термодеструктивного процесу. Доведено, що конфігурація розташування елементів, рівень попереднього заряду, тип електроліту, а також наявність або відсутність охолодження суттєво впливають на характер горіння та інтенсивність тепловиділення. Уперше запропоновано

новий підхід до дослідження пожежної небезпеки літій-іонних батарей, який базується на проведенні натурних експериментів у масштабі як окремих елементів, так і модулів. Під час досліджень застосовувалися різні джерела теплового впливу — як з відкритим полум'ям (імітація впливу зовнішньої пожежі), так і без нього (імітація перегріву або внутрішнього дефекту). Такий комплексний експериментальний підхід дозволив не лише виявити критичні температурні та часові параметри початку теплового розгону, а й оцінити характер викиду газів, швидкість поширення полум'я, а також механізми руйнування конструкцій батарей.

У межах п'ятого розділу наведено результати експериментальних досліджень, спрямованих на встановлення закономірностей впливу технічних параметрів силових літій-іонних батарей електричних колісних транспортних засобів, а також їх просторового розміщення відносно джерела теплового впливу на особливості виникнення та розвитку термодеструктивних процесів. Дослідження охоплювали різні конфігурації акумуляторних елементів, рівні заряду, варіанти теплового навантаження та конструктивні відмінності модулів. Отримані у ході кожної серії експериментів дані були оброблені з використанням статистичних методів. Для виявлення аномальних значень застосовано критерій Граббса, а для перевірки гомогенності дисперсії — критерій Фішера. Проведено обчислення абсолютних, відносних та середньоквадратичних відхилень експериментальних результатів, що забезпечило належну точність і достовірність одержаних висновків. Зазначений підхід дозволив обґрунтовано охарактеризувати вплив ключових факторів на критичні температурні режими, час до настання теплового розгону та інтенсивність викиду енергії.

У шостому розділі представлено результати чисельних досліджень, проведених із використанням розроблених комп'ютерних газогідродинамічних моделей у середовищі Fire Dynamics Simulator (FDS). Зазначені моделі були створені на основі умов натурних експериментів, виконаних згідно з розробленою Програмою випробувань для елементів та модулів літій-іонних батарей електромобілів із врахуванням впливу джерел тепла як з відкритим полум'ям, так і без нього (наприклад, при внутрішньому дефекті або тепловому

навантаженні). Моделювання дозволило відтворити фізичні процеси термодеструкції в умовах, максимально наближених до реальних, і забезпечити можливість аналізу впливу різних чинників на динаміку виникнення та розвитку термодеструктивного процесу в елементах батарей. Зокрема, досліджено вплив варіювання геометрії акумуляторного модуля, типу теплового впливу, умов тепловідведення, попереднього енергетичного стану елементів тощо. Реалізація таких моделей забезпечила комплексний підхід до прогнозування термодеструктивного процесу, дозволила оцінити потенційні ризики поширення теплової деструкції в модулі, а також слугувала інструментом для верифікації експериментальних результатів і уточнення критичних умов настання аварійних режимів.

У цьому розділі дисертаційної роботи здійснено узагальнення результатів теоретичних і експериментальних досліджень, на основі яких розроблено методичний апарат для визначення розрахункової оцінки часу настання термодеструктивних процесів у силових літій-іонних акумуляторних батареях електромобілів. Запропонований підхід дозволяє оцінювати критичний час до ініціації теплового розгону з урахуванням сукупного впливу низки конструктивних та експлуатаційних чинників. З використанням методології повнофакторного експерименту отримано регресійні залежності, що відображають вплив основних параметрів на часові характеристики виникнення термодеструктивного процесу. Встановлено найбільш значущі фактори: тип матеріалу катода, рівень заряду батареї, густина теплового потоку, а також номінальна ємність акумуляторної батареї. На основі статистичної обробки експериментальних даних побудовано емпіричні моделі, що дозволяють прогнозувати час до настання критичних теплових явищ із достатнім рівнем точності. З урахуванням отриманих комплексних результатів обґрунтовано доцільність впровадження адаптивного температурного давача з динамічно змінними параметрами спрацювання. Розроблено блок-схему алгоритму його функціонування, що передбачає зміну чутливості давача залежно від комбінації зовнішніх впливів і технічного стану батареї. Такий підхід забезпечує підвищення ефективності раннього виявлення небезпечних

теплових станів і сприяє удосконаленню систем протипожежного захисту електромобілів.

В дисертаційній роботі не виявлено академічного плагіату, фабрикації чи фальсифікації, а також не використовувалися результати та висновки кандидатської дисертації.

6. Зауваження до дисертації.

1. У третьому розділі незрозуміло, по якому критерію визначалась безпечна протипожежна відстань від електромобіля, що горить до стіни суміжно розташованої будівлі?

2. Під час дослідження теплового впливу відкритим полум'ям на дослідні зразки літій-іонних батарей використовувалась модельне вогнище класу В3 використанням 200 мл бензину. Як було обгрунтовано кількість даного пального?

3. З роботи незрозуміло, чи враховано дію перешкод, таких як корпус батареї, ступінь чорноти тощо, які впливають на тепловий потік що падає на силові літій-іонні батареї електромобілів?

4. У восьмому висновку доцільно було б підсумувати не лише абсолютні відхилення між усередненими результатами експериментальних досліджень та кожною із серій натурних експериментальних досліджень для модельного вогнища та електронагрівальної панелі, але й для досліджень, які стосуються модулів силових літій-іонних батарей.

5. Отримані результати моделювання пожежі бажано було б порівняти з розрахунками, що отримані при застосуванні інших числових методів інтегрування системи диференціальних рівнянь Нав'є-Стокса.

6. Недостатньо приділено уваги обгрунтуванню розміру комірки при накладанні сітки на розрахункову область під час математичного моделювання термодинамічних процесів під час пожежі.

7. Оформлення дисертаційної роботи та реферату. Структура і обсяг дисертаційної роботи відповідають всім вимогам, які висуваються до дисертацій, поданих на здобуття наукового ступеня доктора наук. Реферат і опубліковані праці в повній мірі відображають основні положення дисертації.

Дисертація викладена послідовно, доступно та обґрунтовано. У роботі не були використані результати та висновки кандидатської дисертації.

8. Загальний висновок та оцінка дисертації.

Дисертаційна робота Гаврилюка Андрія Федоровича «Розвиток наукових основ протипожежного захисту електричних колісних транспортних засобів (електромобілів)» за актуальністю теми, науковою новизною результатів та практичною цінністю відповідає вимогам паспорту спеціальності 21.06.02 - пожежна безпека, а також п. 6-9 “Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук”, затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 17.11.2021 року № 1197.

Представлена дисертаційна робота повністю відповідає вимогам, які висуваються до докторських дисертацій, а її автор заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 21.06.02 - пожежна безпека.

Опонент:

професор кафедри пожежної профілактики
в населених пунктах

Національного університету
цивільного захисту України,

доктор технічних наук, професор

Сергій ПОЗДЄСВ

Підпис професора Сергія ПОЗДЄСВА засвідчую
Учений секретар

Національного університету
цивільного захисту України,

кандидат психологічних наук, с.н.с.



Андрій ПОБІДАШ

18.04.2025