

ВІДГУК ОПОНЕТА

на дисертацію ГАВРИЛЮКА Андрія Федоровича

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

Актуальність теми. Дослідження, що приведені в дисертації присвяченні вирішенню актуальної науково-прикладної проблеми у сфері пожежної безпеки, а саме розкриттю закономірностей динаміки термодеструктивних процесів у електромобілях залежно від технічних характеристик, конструктивних та експлуатаційних параметрів акумуляторних батарей, як наукове підґрунтя забезпечення протипожежного захисту зазначених об'єктів.

Наведений у дисертації аналіз динаміки світового парку електромобілів, а також статистики їх пожеж, демонструє, що їх кількість невпинно та стрімко зростає. Разом з тим такі пожежі мають небезпечніші параметри у порівнянні із аналогічними пожежами автомобілів, які обладнанні двигунами внутрішнього згоряння.

Особливу небезпеку складають силові акумуляторні батареї електромобілів, маса яких може коливатись від 350 кг до 950 кг і навіть більше. За умов механічних пошкоджень, відхилень від штатних режимів експлуатації, внутрішнього короткого замикання або впливу зовнішніх джерел тепла у корпусі силових акумуляторних батареї можуть виникати термодеструктивні процеси, що призводять до самозаймання та інтенсивного горіння акумуляторних батарей. При цьому довжина полум'я може становити 5-7 м, а пожежа супроводжується вибухами. Це створює труднощі та нові виклики в контексті забезпечення пожежної безпеки електромобілів та гасіння пожеж такого роду.

Зв'язок роботи із науковими програмами, планами, темами. Дисертація виконана відповідно до Концепції наукової діяльності Львівського державного університету безпеки життєдіяльності на 2020-2025 роки; замовлення

Л Д У Б Ж Д	
Вх. №	148
22.04.	2025 р.
КІЛЬКІСТЬ АРКУШІВ:	
ОСН. ДОК.	9
ДОДАТ.	

Департаменту запобігання надзвичайним ситуаціям ДСНС України на науково-дослідні роботи, які окреслені у плані наукової і науково-технічної діяльності Львівського державного університету безпеки життєдіяльності на 2024 рік; Стратегії розвитку системи технічного регулювання на період до 2025 року, затвердженої Розпорядженням Кабінету Міністрів України від 17.11.2020 № 443; програм 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), в яких здобувач був виконавцем.

Наукова новизна отриманих результатів. У дисертації отримано нові науково обґрунтовані результати, які дозволили вирішити актуальну науково-прикладну проблему у сфері пожежної безпеки – розкриття закономірностей динаміки термодеструктивних процесів у силових акумуляторних батареях залежно від їх технічних характеристик, конструктивних та експлуатаційних параметрів, як наукове підґрунтя забезпечення протипожежного захисту електромобілів.

Вперше отримано такі наукові результати:

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:

- при зміні просторового розміщення відносно джерела тепла з вертикального (анодом до джерела тепла) на горизонтальне – нелінійне зменшення з 1225 с до 1115 с для 100 % заряджених літій-іонних елементів;

- для горизонтального просторового розміщення відносно джерела тепла при зміні ступеня заряду з 100 % до 0 % – нелінійно зростає з 1115 с до 1340 с.

2. Розрахунковим методом доведено та експериментально підтверджено, що температура горіння літій-іонних елементів 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 може змінюватись:

- для 100 % заряджених літій-іонних елементів при змінні просторового розміщення відносно джерела тепла з вертикального (анодом до джерела тепла) на горизонтальне – зростати з 690°C до 810°C ;

- при горизонтальному просторовому розміщенні джерела тепла та зміні ступеня заряду з 100 % до 0 % – зменшуватись 810°C до 450°C . Зазначені результати дозволяють формувати вимоги пожежної безпеки електромобілів на стадії проектування.

3. Методами комп'ютерного моделювання 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.

4. Обґрунтовано та розроблено науково-методичний апарат, який дозволяє визначати час займання силових акумуляторних батарей електромобілів, які мають енергетичну ємність від $30 \text{ кВт}\cdot\text{год}$ до $100 \text{ кВт}\cdot\text{год}$ при дії густини теплового потоку в діапазоні від 10 кВт/м^2 до 200 кВт/м^2 , що дає підґрунтя формувати методологію прогнозування пожежної безпеки електромобілів.

Удосконалено:

1. На основі досліджень наслідків реальних пожеж та аналізу технічних параметрів сучасних силових акумуляторних батареї 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. Підходи з оптимізації конструкції силових літій-іонних АКБ електромобілів на підставі експериментальних визначень часових та температурних параметрів виникнення процесів їх горіння.

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.

Практичне значення отриманих результатів. За результатами проведених досліджень обґрунтовано та розроблено науково-методичний апарат, який об'єднує методики проведення натурних досліджень та обґрунтовані критерії, які характеризують умови виникнення горіння, що дозволяє визначати безпекові часові умови до виникнення горіння силових акумуляторних батареї електромобілів, в енергетичному діапазоні від 30 кВт·год до 100 кВт·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/м² до 200 кВт/м² для джерел тепла як з відкритим полум'ям, так і без нього, що дає підґрунтя формувати методологію прогнозування пожежної безпеки електромобілів.

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».

Обґрунтованість і достовірність наукових положень та отриманих висновків підтверджується відповідністю обраних методів досліджень поставленим в роботі меті та завданням; використанням повірених засобів вимірювальної техніки, а також задовільною збіжністю отриманих теоретичних та експериментальних досліджень; впровадженням та апробацією результатів досліджень.

Оцінка змісту дисертації. Дисертація складається із вступу, 7 розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел з 391 найменувань, містить 415 сторінок друкованого тексту (з них 313 сторінок основного тексту), 30 таблиць, 200 рисунків, 5 додатків.

У першому розділі досліджено стан світового та вітчизняного автопарку електромобілів та передумови його стрімкого розвитку, наведено особливості будови електромобілів в цілому та окремих його елементів, в тому числі і силової батареї. Здійснено аналіз статистичних даних пожеж електромобілів в Україні та у світі, охарактеризовано причини їх виникнення та особливості розвитку.

У другому розділі запропоновано характерні сценарії виникнення термодеструктивних процесів з врахуванням конструктивних параметрів та технічних характеристик силових акумуляторних батарей електричних колісних

транспортних засобів. Приведено адаптацію фундаментальних законів нестационарної теплопровідності під особливості виникнення та перебігу термодеструктивних процесів у силових акумуляторних батареях електромобілів, зокрема для визначення розподілу температури у силовій акумуляторній батареї в тому числі під час впливу зовнішнього джерела тепла.

Третій розділ присвячений моделюванню динаміки розвитку пожежі електромобіля. Для цього використаний пакет прикладних програм FDS (Fire Dynamics Simulator), які розроблені Національним інститутом стандартів і технологій США. З врахуванням систематизації основних чинників та особливостей, які впливають на розвиток термодеструктивних процесів у силових літій-іонних акумуляторних батареях електромобілів, проведено дослідження потенційного впливу зазначених процесів на виникнення та розвиток пожежі зазначених транспортних засобів, оцінка її температурних параметрів, а також її можливе поширення на сусідні припарковані автомобілі.

У четвертому розділі наведено експериментальні дослідження процесів горіння силових літій-іонних акумуляторів електромобілів. Обґрунтовано програми методики з виявлення закономірностей впливу технічних характеристик та експлуатаційних параметрів силових літій-іонних елементів і модулів електричних колісних транспортних засобів, а також їх просторове розміщення відносно джерела тепла на особливості виникнення та розвитку термодеструктивних процесів. Це дозволило закласти в основу новий підхід, який ґрунтується на проведенні натурних експериментальних досліджень літій-іонних силових батарей електричних колісних транспортних засобів в масштабі елемента та модуля з використанням, джерела тепла як з відкритим полум'ям, так і без нього.

У п'ятому розділі наведено результати експериментальних досліджень, а саме: закономірності впливу технічних параметрів силових літій-іонних батарей електричних колісних транспортних засобів та їх просторове розміщення відносно джерела тепла на особливості виникнення в них термодеструктивних процесів. Отримані експериментальні дані за кожною серією експериментальних

досліджень оцінені з використанням статистичних критеріїв Грабса та Фішера, а також визначено абсолютні, відносні та середньоквадратичні відхилення.

В шостому розділі приведено результати досліджень з використанням розроблених комп'ютерних газогідродинамічних моделей у середовищі FDS, які відтворюють умови натурних випробувань згідно з розробленою Програмою експериментальних досліджень для елементів та модулів літій-іонних батарей електромобілів з врахування джерел тепла з відкритим полум'ям так і без нього. Реалізація таких моделей дало змогу здійснити комплексний підхід до можливості прогнозування виникнення та розвитку термодеструктивних процесів у літій-іонних елементах батарей електромобілів залежно від варіювання чинників, які на це впливають.

У сьомому розділі узагальнено отримані результати теоретичних та експериментальних досліджень які втілились у розроблений методичний апарат, який забезпечує визначення розрахункової оцінки часу виникнення термодеструктивних процесів у силових літій-іонних батареях електромобілів. З використанням повнофакторного експерименту отримано регресійні залежності та виявлено закономірності часу виникнення термодеструктивного процесу від найбільш значущих параметрів: типу матеріалу катода, заряду батареї, густини теплового потоку та ємності літій-іонної батареї. Також з врахуванням отриманих комплексних результатів досліджень обґрунтовано та розроблено блок-схему алгоритму роботи максимально-динамічного датчика температури із змінними параметрами спрацювання.

Повнота викладу наукових положень, висновків та рекомендацій в опублікованих працях. Основні положення дисертації представлено у 55 наукових роботах: 20 статей (6 з яких опубліковано у виданнях, що входять до міжнародної наукометричної бази даних Scopus), 1 стаття, що додатково відображає наукові результати дисертації, 32 матеріали конференцій різного рівня та наукової специфіки, а також 2 патенти України на корисну модель.

Зауваження до дисертації.

1. У першому розділі наведено детальна статистика автопарку електромобілів у світовому масштабі, а також кількість пожеж такого роду. Однак не розкрито, у повній мірі, причин виникнення таких пожеж та осередків займання.

2. У п.1.3.3. доцільно було б більш ширше описати пожежну небезпеку та особливості розвитку пожеж електромобілів, які використовують паливні елементи.

3. Під час моделювання виникнення та поширення пожежі електромобілів, із застосуванням засобів обчислювальної газогідродинаміки, незрозуміло чому змодельований електромобіль, який горів, розміщувався власне у закритому паркінгу?

4. У наведених методиках експериментальних досліджень для виявлення закономірностей впливу технічних характеристик силових літій-іонних елементів та модулів електричних колісних транспортних засобів та їх просторового розміщення відносно джерела тепла на особливості виникнення та розвитку термодеструктивних процесів не зрозуміло чому автор використовує власне модельне вогнище класу В?

5. Не розкрито, який зміст автором вкладено у поняття «термодеструктивний» процес, що відбувається у силових літій-іонних елементах та модулях електричних колісних транспортних засобів під впливом теплового потоку?

6. Під час перевірки адекватності проведених серій досліджень із виявлення закономірностей виникнення і перебігу термодеструктивних процесів у літій-іонних елементах живлення не обґрунтовано чому використано власне критерій Фішера.

Наведені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку роботи.

Загальний висновок та оцінка дисертації. Враховуючи актуальність теми дослідження, наукову новизну і практичне значення одержаних результатів, впровадження їх у практику, достатню повноту викладення

матеріалів дисертації в опублікованих наукових працях, дотримання принципів академічної доброчесності, відповідність роботи вимогам п. 6, 7, 8, 9 “Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук”, затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 17.11.2021 року № 1197, дисертаційна робота “Розвиток наукових основ протипожежного захисту електричних колісних транспортних засобів (електромобілів)” є завершеною науковою працею, а її автор, ГАВРИЛЮК Андрій Федорович, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 21.06.02 – пожежна безпека.

Опонент:

завідувач кафедри природоохоронної діяльності

Донецького національного технічного університету

доктор технічних наук, професор

В.К. КОСТЕНКО

Підпис д.т.н., професора, завідувача кафедри природоохоронної діяльності ДВНЗ «ДонНТУ» Віктора КОСТЕНКА засвідчую

Перший проректор з НПР ДВНЗ «ДонНТУ» Вікторія ВОРОПАЄВА



18.04.2025