



DOI <https://doi.org/10.32447/20786662.45.2024.04>

*Л. Ф. Дзюба, О. В. Лазаренко, О. Ю. Пазен, П. В. Пастухов*  
*Львівський державний університет безпеки життєдіяльності,*  
*м. Львів, Україна*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4261-6490> – Л. Ф. Дзюба  
<https://orcid.org/0000-0003-0500-0598> – О. В. Лазаренко  
<https://orcid.org/0000-0003-1655-3825> – О. Ю. Пазен  
<https://orcid.org/0000-0002-3140-1101> – П. В. Пастухов  
✉ [o.lazarenko@ldubgd.edu.ua](mailto:o.lazarenko@ldubgd.edu.ua)

## ОЦІНЮВАННЯ РИЗИКІВ ЗАГОРЯННЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ

Статистичні показники загорання електромобілів і відповідні дослідження в цьому напрямі свідчать про те, що частота пожеж електромобілів по всьому світу значно менша порівняно зі статистичними даними загорань автомобілів, що працюють на двигунах внутрішнього згорання. У США на 55 випадків загорань електромобілів припадає 284 130 випадків горіння автомобілів із ДВЗ. Окрім того, дослідження показують, що ймовірність займання батареї електромобіля в разі дорожньо-транспортної пригоди значно менша, ніж ймовірність загорання звичайного автомобіля.

Метою роботи визначено оцінювання ризику виникнення загорань літій іонного елемента живлення електромобіля. Для досягнення поставленої мети забезпечено виконання таких завдань: ідентифіковано чинники ризику виникнення загорань літій-іонного елемента живлення електромобіля, проведено аналіз статистичних даних і випадків загорання електромобіля внаслідок відмови літій-іонного елемента живлення, побудовано матрицю ризиків виникнення загорань електромобіля.

Для досягнення мети роботи використано порівняльний аналіз статистичних показників із подальшою аналітичною обробкою отриманих результатів, їх узагальненням і виявленням відповідних закономірностей.

Відповідно до проведеного оцінювання ризику загорань електромобілів, визначено такі основні причини загорання електромобілів, а саме: людську недбалість/халатність на виробництві (10%), самозаймання з невстановлених причин (22%), порушення роботи акумуляторної батареї під час заряджання або після (28%), ДТП (30%), втоплення (5%), дія полум'я (5%). З огляду на аналіз і чинні підходи до порядку оцінювання ризику, сформовано матрицю оцінювання ризиків займання електромобілів.

Отже, отримана матриця ризиків загорання електромобілів наочно продемонструвала та підтвердили таке: ризик займання електромобілів та іншого подібного транспорту переважно можна зарахувати до трьох ступенів ймовірності (дуже низький, низький і високий); відсутність заповнення значної кількості комірок матриці засвідчує про гостру потребу детального аналізу кожного випадку загорання електромобілів із максимально чітким визначенням причини загорання.

Зазначені результати дослідження, відповідно, є передумовою для проведення подальших досліджень і вдосконалення отриманої матриці ризиків загорань електромобілів.

**Ключові слова:** електромобіль, літій-іонний елемент живлення, загорання, ризик, оцінювання безпеки.

*L. F. Dzyuba, O. V. Lazarenko, O. Yu. Pazen, P. V. Pastukhov*  
*Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine*

## ASSESSMENT OF THE FIRE RISKS OF ELECTRIC VEHICLES

Statistics on electric vehicle fires and relevant research in this direction indicate that the frequency of electric vehicle fires worldwide is much lower compared to the statistics of fires in cars running on internal combustion engines. In the USA, 284,130 internal combustion engine fires account for 55 cases of electric vehicle fires. In addition, studies show that the probability of an electric vehicle battery catching fire in a traffic accident is much lower than that of a conventional car catching fire.

The purpose of the work is to assess the risk of ignition of the lithium-ion battery of an electric vehicle. To achieve the set goal, the following tasks were carried out: risk factors for the occurrence of fires in the lithium-ion battery of an electric car were identified, statistical data and cases of electric cars catching fire due to the failure of the lithium-ion battery were analysed, and a matrix of risks of fires in an electric car was constructed.

To achieve the goal of the work, a comparative analysis of statistical indicators was used, followed by analytical processing of the obtained results and their generalization and identification of relevant patterns.

According to the carried out assessment of the risk of electric cars catching fire, the following main reasons for electric cars catching fire were determined, namely: human negligence/negligence in production (10%), spontaneous combustion for unknown reasons (22%), malfunction of the battery during charging or after (28%), road accident (30%), drowning (5%), fire action (5%). Taking into account the conducted analysis and existing approaches to the procedure for conducting risk assessment, a matrix for assessing the risks of ignition of electric vehicles was formed.

The resulting matrix of risks of electric cars catching fire demonstrated and confirmed the following: the risk of catching fire of electric cars and other similar vehicles in the overwhelming majority can be attributed to three degrees of probability (very low, low and high; the lack of filling in a significant number of cells of the matrix indicates the urgent need for a detailed analysis of each case of fire electric cars with the most clear definition of the cause of ignition.

The specified research results, respectively, are a prerequisite for further research and improvement of the resulting risk matrix of electric vehicles.

**Key words:** electric vehicle, lithium-ion battery, ignition, risk, hazard assessment.

**Вступ.** Транспортні засоби на альтернативних джерелах енергії, такі як електромобілі, електромотоцикли, велосипеди, сьогодні набувають усе більшої популярності в різних країнах світу за рахунок своєї екологічності. Відповідно, у суспільстві є тверде переконання, що саме такий вид транспорту відіграватиме вирішальну роль у майбутньому та сприятиме покращенню екологічної ситуації на планеті [1]. Однак випадки загорання такого екологічного транспорту, подекуди з масштабними наслідками, змушують людей і відповідні наглядові органи різних країн більш прискіпливо вивчити питання безпечної експлуатації транспортних засобів на альтернативних джерелах енергії [2].

Статистичні показники загорання електромобілів і відповідні дослідження в цьому напрямі свідчать про те, що частота пожеж електромобілів по всьому світу значно менша порівняно зі статистичними даними загорань автомобілів, що працюють на двигунах внутрішнього згорання (далі – ДВЗ). У США на 55 випадків загорянь електромобілів припадає 284 130 випадків горіння автомобілів із ДВЗ. Окрім того, дослідження показують [3], що ймовірність займання батареї електромобіля в разі дорожньо-транспортної пригоди значно менша, ніж ймовірність загоряння автомобіля з ДВЗ. Це частково пояснюється меншою горючістю літій-іонних акумуляторних батарей порівняно з бензином. Однак зазначені дослідження не виключають ймовірності зміни ситуації в майбутньому за рахунок насичення споживчого ринку електричними транспортними засобами з терміном експлуатації більшим, ніж 10–15 років.

**Постановка проблеми.** Загалом припаркований електромобіль можна розглядати як

акумуляторну систему зберігання енергії. Таке твердження відповідає американському стандарту NFPA 855/2020, за яким оцінюють ризики [4] відповідних систем та об'єктів. Проте вказаний стандарт і додаткові дослідження [5] указують на необхідність подальшого уточнення та деталізації відповідної концепції для оцінювання ризиків, ураховуючи кількість різноманітних чинників, що впливають на виникнення пожежі. У світлі цього аналіз причин відмов і потенційних джерел небезпеки для електромобілів є критично важливим інструментом, який дає змогу надалі запобігти порушенню сталого функціонування системи, а також може використовуватися для оцінювання й пониження рівня системного ризику на будь-якому етапі експлуатації транспортного засобу. Залежності між небезпечними подіями та їх корінними причинами включно з людським чинником (або діями людини), несправністю компонент, зміною навколишнього середовища й умовами експлуатації можуть бути використані для прогнозування та виявлення потенційних чинників ризику в системі й оцінюванні їх можливого впливу на стан речей.

Пов'язаний із транспортними засобами загальний підхід оцінювання ризиків виникнення надзвичайної ситуації (пожежі) може відрізнитися залежно від обраного методу оцінювання й виду транспортного засобу. Для оцінювання ризиків і небезпек автомобіля з ДВЗ автори [6] розподіляють ймовірні причини порушення сталої роботи автомобіля, виходячи з класичного трикутника виникнення пожежі. У такому трикутнику безпосередня кількість чинників виникнення пожежі досить значна й різноманітна (рис. 1а).

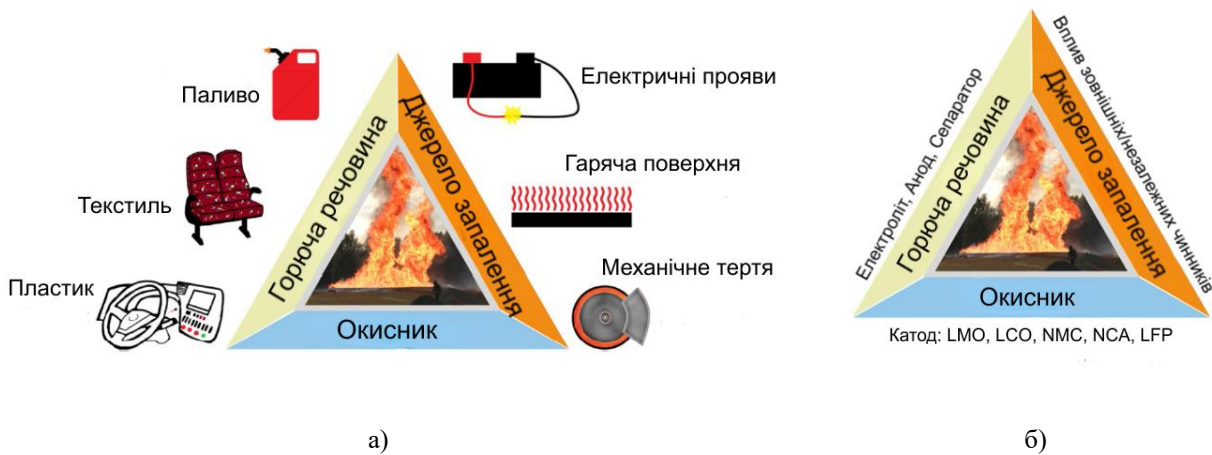


Рис. 1. Класичний трикутник виникнення загорання: а) автомобіль на двигуні внутрішнього згорання; б) електромобіль (транспортний засіб на акумуляторних батареях)

Під час оцінювання пожежної небезпеки й безпеки експлуатації електромобілів автори роботи [7] основну увагу зосередили безпосередньо на літій-іонній акумуляторній батареї або безпосередньо літій-іонному елементі живлення (далі – ЛПЕЖ), виходячи знову ж таки з класичного трикутника виникнення горіння (рис. 1б). Фактично робота [7] підтверджує та черговий раз наголошує, що під час оцінювання ризику та ймовірних небезпек виникнення загорання електромобілів та інших видів електротранспорту першочергову увагу варто звертати безпосередньо на ЛПЕЖ, його вид, тип тощо.

З огляду на актуальність аналізу й оцінювання ризику загорянь електромобілів у роботі [8] запропоновано здійснювати аналіз імовірних відмов і ризику загорянь електромобілів із використанням дерева відмов. Відповідно, в аналіз включено й надалі розділено такі чинники ризику: людська халатність, порушення сталої роботи електромобіля, помилки в організації загального процесу роботи й обслуговування електромобіля, зовнішні чинники. Загалом підхід авторів є зрозумілий і правильний, однак у роботі не приділено достатньої уваги оцінюванню ризику та небезпеки саме ЛПЕЖ, що, відповідно до більшості досліджень, є основною проблемою в цьому напрямі.

Автори [9] на підставі статистики загорянь електромобілів запропонували структурно-логічну схему оцінювання зниження ризику виникнення загорання електромобіля. Відповідно до тверджень дослідників [9], структурно-логічну схему можливо поділити на три основні блоки: визначення ризику, оцінювання ризику, зниження ризику. Тому оцінювання ризику загорянь чи порушення сталої роботи ЛПЕЖ у запропонованій структурно-логічній схемі посідає опосередковане місце.

Отже, подальші дослідження ризику займання транспортних засобів, які працюють на електричних батареях, повинні зосереджуватися на поглибленому вивченні ризиків відхилення від сталої роботи безпосередньо ЛПЕЖ.

**Мети статті (постановка завдання).** Відповідно до аналізу й останніх наукових досягнень, метою роботи є оцінювання ризику виникнення загорянь літій-іонного елемента живлення електромобіля.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

- ідентифікувати чинники ризику виникнення загорянь літій-іонного елемента живлення електромобіля;
- провести аналіз статистичних даних і випадків загорання електромобіля внаслідок відмови ЛПЕЖ;
- побудувати матрицю ризиків виникнення загорянь електромобіля.

**Виклад основного матеріалу.** Відмови транспортних засобів ділять на функціональні й параметричні. За функціональних відмов транспортний засіб втрачає працездатний стан і його експлуатація стає неможливою. Параметричні відмови стосуються безпосередньо технічного стану транспортного засобу, коли деякі його параметри виходять за допустимі межі. Такі відмови усувають під час планового чи позапланового технічного обслуговування. До таких відмов можна зарахувати несправність гальмівної, охолоджуючої та інших систем транспортного засобу, порушення сталої роботи електродвигуна тощо. З огляду на особливості транспортних засобів на електричних батареях (електромобілів), відмова ЛПЕЖ спричинить функціональну відмову електромобіля. Відповідно до [7], оптимальну безпечну роботу ЛПЕЖ можна охарактеризувати поняттям «безпечне вікно», яке залежне від двох основних складників: температури й напруги ЛПЕЖ (рис. 2).

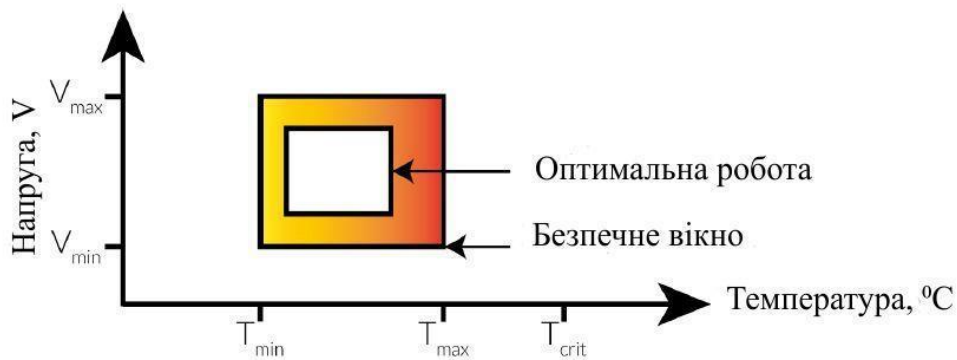


Рис. 2. Схематичне зображення обмежень безпечної експлуатації літій-іонного елемента живлення

Відповідно до рис. 2, відхилення робочих (номінальних) показників температури й напруги ЛПЕЖ призведе до порушення сталої функціонування елемента з подальшим можливим загорянням. Причинами порушення сталої роботи ЛПЕЖ може бути виробничий дефект елемента або поступове його спрацювання.

Виробничі дефекти зумовлюються поганим контролем якості збірки ЛПЕЖ, неправильним укладанням внутрішньої обмотки або потраплянням сторонніх елементів (речовин) у внутрішні шари ЛПЕЖ [8; 10].

Тривале використання ЛПЕЖ у будь-якому разі призводить до поступового спрацювання елемента, як наслідок, спостерігається втрата ємності й збільшення внутрішнього опору елемента [11]. Тривале використання ЛПЕЖ спричиняє втрату активних елементів (літію) та викликає відповідні фізичні й хімічні зміни в ньому. Це надалі є причиною виникнення внутрішнього короткого замикання, перегріву елемента [8].

Однак поряд із перерахованими причинами порушень сталої роботи ЛПЕЖ може виходити з ладу також унаслідок дії сторонніх чинників, до яких належить механічне пошкодження елемента, перегрів елемента від дії стороннього джерела енергії та дії надлишкового або неправильного струму. Зазначені чинники, з огляду на статистичні дані, є основними причинами виникнення загорань електромобілів [12].

Відповідно до [13], механічне пошкодження ЛПЕЖ є одним із найпоширеніших і найнебезпечніших, з огляду на пожежну безпеку, оскільки сприяє миттєвому загоранню елемента (особливо внаслідок проколювання корпусу елемента) і поширенню горіння. Механічне пошкодження елемента найчастіше спричиняється через попадання електромобіля в дорожньо-транспортну пригороду, наїзд на перешкоду (деформація акумуляторної батареї), непередбачувані випадки.

Наявність дії на ЛПЕЖ сторонніх температурних джерел можна умовно поділи на дію

високотемпературних і низькотемпературних. Високотемпературні джерела можуть виникати внаслідок появи неконтрольованого горіння (пожежі) поблизу ЛПЕЖ або умисного підпалу транспортного засобу. Низькотемпературні джерела характерні для відповідних регіонів, де транспортний засіб може перебувати або експлуатуватися в країнах чи регіонах із холодним кліматом (Фінляндія, Норвегія, Швеція). Дія зовнішнього високотемпературного джерела на ЛПЕЖ є прямою причиною виникнення горіння ЛПЕЖ [14]. Відповідно, наявність в електромобілі системи охолодження акумуляторної батареї є додатковим показником безпеки такого транспортного засобу.

Дію надмірного чи неправильного струму на ЛПЕЖ можна зарахувати до найбільшої небезпеки. Упродовж 2–5 секунд дія таких струмів спричиняє горіння елемента, інтенсивне виділення іскор, полум'я та продуктів горіння, а за певних умов вибух ЛПЕЖ [15]. Зазвичай такі випадки можуть виникати під час заряджання електромобілів і використання нетипового або пошкодженого обладнання. Додатково причинами дії надмірного струму на ЛПЕЖ може бути пошкодження або невідповідність відповідних елементів контролю транспортного засобу (BMS плати, програмного забезпечення) за параметрами, видом струму.

Крім того, серед ймовірних причин, що сприятимуть порушенню справної роботи ЛПЕЖ, варто окремо виділити умови експлуатації електромобілів, передусім кліматичні. Експлуатація електромобіля в умовах підвищеної вологості повітря, наявність агресивного середовища (окислене середовище, солоність повітря) спричиняють корозію та порушення роботи або відмову запобіжних елементів ЛПЕЖ. Це переважно стосується циліндричних ЛПЕЖ формату 18500, 21700 тощо, у будові яких наявний вентиляційний клапан для відключення полюсів елемента в разі підвищення його температури. Указані вище можливі причини відмов ЛПЕЖ безпосередньо сприяють



виникненню короткого замикання в елементі з подальшим горінням.

Оцінювання ризику загорань ЛПЕЖ електромобіля виконаємо на підставі рекомендацій ДСТУ ІЕС/ISO 31010:2013 «Керування ризиком. Методи загального оцінювання ризику» [16]. Ризиком вважаємо комбінацію ймовірності загорання ЛПЕЖ і шкоди й тяжкості цієї шкоди для електромобіля. Відповідно до [16], процес загального оцінювання ризиків складається з ідентифікації, аналізу й оцінювання ризиків. Ідентифікацію ризиків загорань електромобілів за результатами аналізу статистичних даних [12] за 2022–2024 роки подано в таблиці 1.

Додатково в таблиці 1 указано відсотковий показник відповідної причини займання електромобілів від загальної кількості задокументованих випадків. Аналіз випадків загорання електромобілів не дає однозначного розуміння впливу тих чи інших чинників на виникнення загорання ЛПЕЖ чи електромобіля загалом, оскільки виявлення точної причини загорання електромобіля чи акумуляторної батареї є комплексним і надзвичайно складним питанням. Відповідно, причини значної частини випадків загорання електромобілів (32%) точно не встановлені. Тому для безпосереднього ранжування ймовірності виникнення загорання ЛПЕЖ та електромобіля буде використано суб'єктивну оцінку з урахуванням логічних

і реальних умов впливу на життя та здоров'я людини.

Виходячи з роботи [6], для оцінювання впливу чинників ризику загорання ЛПЕЖ доцільно використовувати наведені в таблиці 2 критерії.

З метою зменшення й узагальнення деяких причин загорання електромобілів і відповідних імовірних чинників загорань позиції 2 та 4 таблиці 1 можна об'єднати в одне ціле із загальною сумою відсотків 28% (загорання електромобіля під час і після заряджання електромобіля/акумуляторної батареї). Тоді основною причиною загорання буде надлишковий або неправильний струм. З урахуванням характеру горіння ЛПЕЖ унаслідок дії надмірного струму й випадків таких загорань можна стверджувати, що внаслідок такого впливу транспортний засіб зазнає значних ушкоджень або й цілковитого знищення. Водночас імовірність загибелі людей є відносно мінімальна, адже заряджання транспортного засобу або акумуляторної батареї практично завжди здійснюється без присутності людей поблизу. З огляду на відсоток відповідних випадків і те, що більшість зарядних станцій розташовані на відкритих майданчиках або в місцях із дотриманням і врахуванням вимог пожежної безпеки, відповідну причину загорання можна зарахувати до «серйозного» чинника.

Фактично основну кількість випадків загорань електромобілів/ЛПЕЖ становлять ДТП

Таблиця 1

**Зведена таблиця випадків загорань електромобілів за 2022–2024 роки**

№ з/п	Причина загорань	Кількість випадків			Відсоток від загальної кількості, %
		2022	2023	2024	
1	Самозаймання з невстановлених причин	146	147	165	32
2	Під час заряджання або після (упродовж 60 хв)	71	98	90	18
3	ДТП	118	142	155	30
4	Порушення роботи акумуляторної батареї	42	49	51	10
5	Втоплення	25	28	25	5
6	Дія полум'я (підпал, сторонні джерела енергії, ремонт)	17	24	25	5
	<b>РАЗОМ</b>	<b>419</b>	<b>488</b>	<b>511</b>	<b>100</b>

Таблиця 2

**Рівень впливу чинників ризику**

Вплив чинників ризику	Наслідки впливу
Незначний	Ідентифікація відмови роботи літій-іонного елемента живлення за рахунок засобів діагностики без подальшого горіння
Легкий	Наслідок визначений перед початком виникнення загорання (під час зростання температури елемента). Незначні матеріальні затрати на відновлення
Помірний	Незначні матеріальні втрати на відновлення частини (елемента) транспортного засобу, без загрози життю.
Серйозний	Значні пошкодження транспортного засобу. Можливі травми людей.
Катастрофічний	Серйозні пошкодження транспортного засобу та прилеглих конструкцій із випадками людських утрат

(30%). Відповідно до оприлюднених даних Усесвітньої організації здоров'я [17], у ДТП щороку гине 1,19 млн людей. ДТП є основною причиною смерті людей віком від 5 до 29 років. Очевидним є те, що внаслідок ДТП кузов транспортного засобу, так само як й інші елементи конструкції, зазнає значних деформацій і пошкоджень різноманітного характеру. Унаслідок цього спостерігається механічне пошкодження ЛПЕЖ через проколювання чи деформацію корпусу. Відповідно, ДТП або інші чинники, пов'язані із зовнішнім впливом на цілісність елементів конструкції транспортного засобу, необхідно зарахувати до подій із «катастрофічними» наслідками.

За причиною виникнення загорання електромобілів дія стороннього джерела тепла чи полум'я становить лише 5% від загальної кількості загорань. З огляду на той факт, що виникненню стороннього високотемпературного джерела може сприяти необережне поводження з вогнем сторонніх осіб, підпал, несправність різноманітного обладнання, тощо, імовірність виникнення такого випадку досить велика. За статистичними даними, лише в Україні щороку виникає близько 70 тисяч пожеж, під час яких гине більше ніж 1400 людей [18]. Отже, дію відкритого полум'я можна зарахувати до «помірного» впливу чинника ризику.

Згідно з таблицею 1, втоплення становить 5% від загальної кількості загорань електромобілів. На підставі аналізу можливої відмови ЛПЕЖ, що може спричинити загорання, «втоплення» можна зарахувати до дії зовнішніх несприятливих погодних умов, таких як: дія сторонніх низькотемпературних джерел, підвищена вологість повітря, наявність агресивного середовища. Тобто умови експлуатації транспортного засобу/ЛПЕЖ, регіон або країна використання можуть призвести до пришвидшеної корозії ЛПЕЖ, виходу з ладу окремих елементів і блоків керування електроніки, як наслідок, загорання транспортного засобу. Зважаючи на незначний відсоток імовірності виникнення таких випадків, відповідну причину відмови можна зарахувати до чинника ризику з «легкими» наслідками впливу.

Окремо необхідно проаналізувати практично третину загорань електромобілів (32%), коли не встановлено однозначної причини. Із цілком очевидних і зрозумілих причин не завжди вдається однозначно й точно визначити причину пожежі чи загорання, зокрема внаслідок повного вигорання об'єкта. Відповідно до виконаного аналізу ймовірних чинників загорань, сюди можна зарахувати такі: невстановлений виробничий дефект; поганий контроль якості збірки; неправильне укладання внутрішньої обмотки; утрата ємності

й збільшення внутрішнього опору елемента, утрата активних елементів (літію); фізичні та хімічні зміни в ЛПЕЖ і його перегрів; внутрішнє коротке замикання.

Практично всі перелічені чинники зумовлені людською недбалістю або халатністю на виробництві. Водночас такі чинники можуть бути причиною загорання лише за умови подальшої халатності й недбалості всіх другорядних і безпосередніх користувачів транспортного засобу (виробника, власника, сервісного центру). Безпосередня несправність ЛПЕЖ на ранніх стадіях експлуатації обов'язково виявиться у вигляді системної помилки під проходження планового технічного огляду або безпосередньої експлуатації електромобіля. Водночас інші статистичні дані [19] свідчать, що загорання автомобіля досить часто не супроводжується безпосереднім горінням акумуляторної батареї, а в деяких випадках узагалі надзвичайну подію з електромобілем не можна класифікувати як загорання чи пожежу. Саме тому відповідну причину відмови можна зарахувати до «незначного» чинника ризику із загальним відсотком імовірності виникнення близько 10%.

Фізичні й хімічні зміни в ЛПЕЖ, його перегрів, внутрішнє коротке замикання загалом – це чинники, які можна зарахувати до наслідків людської недбалості й халатності на виробництві. Однак це також може бути наслідком непередбачених обставин або сукупності ймовірних некласифікованих випадків. Відповідно, зазначенні чинники пропонується зарахувати до «самозаймання з невстановлених причин», проте з «помірним» впливом.

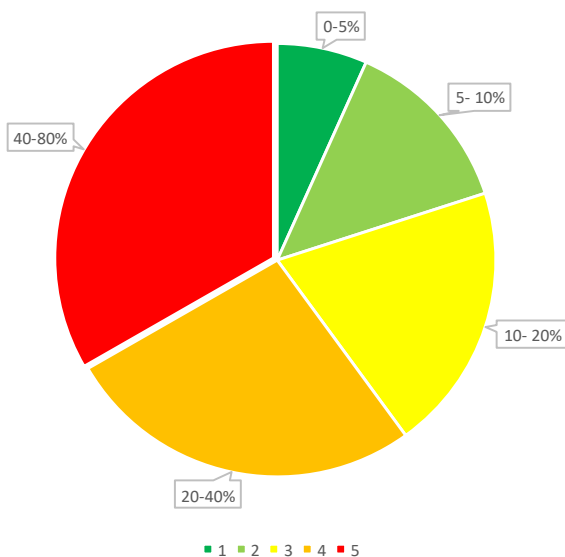
З огляду на сформульовані й обґрунтовані критерії причин і відповідний вплив зазначених чинників, з урахуванням таблицю 1 сформовано таблицю 3.

Для подальшого оцінювання ризиків загорання електромобіля внаслідок горіння ЛПЕЖ прийнято ранжування ймовірності виникнення події (рис. 3), що ґрунтується на відсотковому значенні ймовірності виникнення загорання.

Усі ідентифіковані чинники загорання й імовірності їх виникнення дають змогу сформулювати узагальнену матрицю оцінювання ризиків займання електромобіля. Для позначення рівнів ризиків у матриці розміром 5×5 (таблиця 4) для оцінювання ризиків виникнення загорання прийнято такі позначення: помаранчева зона H(High) – високий; жовта зона M (Moderate) – помірний; зелена зона L(Low) – низький; темно-зелена зона VL(Very Low) – дуже низький. Матриця є зручним інструментом для візуалізації якісного (двовимірної)

**Зведена таблиця причин несправностей і впливу чинників для формування матриці оцінювання ризиків загорань ЛЕЖ та електромобілів**

№ з/п	Причина несправності, що може призвести до загорянь	Вплив чинника	Рівень імовірності	Імовірні чинники загорянь
1	Людська недбалість/ халатність на виробництві (PN)	Незначний	10	<ul style="list-style-type: none"> <li>Невстановлений виробничий дефект.</li> <li>Поганий контроль якості збірки.</li> <li>Неправильне укладання внутрішньої обмотки.</li> <li>Утрата ємності й збільшення внутрішнього опору елемента.</li> <li>Утрата активних елементів (літію)</li> </ul>
2	Самозаймання електромобіля з невстановлених причин (SI)	Помірний	22	<ul style="list-style-type: none"> <li>Фізичні й хімічні зміни в ЛЕЖ.</li> <li>Його перегрів.</li> <li>Внутрішнє коротке замикання.</li> </ul>
3	Порушення роботи акумуляторної батареї під час заряджання або після (упродовж 60 хв) (AF)	Серйозний	28	<ul style="list-style-type: none"> <li>Надлишковий або неправильний струм</li> </ul>
4	ДТП, вплив зовнішніх чинників на цілісність елементів конструкції та обладнання транспортного засобу (CI)	Катастрофічні	30	<ul style="list-style-type: none"> <li>Механічне пошкодження елемента через проколювання чи деформацію корпусу</li> </ul>
5	Втоплення (SM)	Легкий	5	<ul style="list-style-type: none"> <li>Дія сторонніх низькотемпературних джерел.</li> <li>Підвищена вологість повітря.</li> <li>Наявність агресивного середовища.</li> <li>Поступове спрацювання</li> </ul>
6	Дія полум'я (підпал, сторонні джерела енергії, ремонт) (FI)	Помірний	5	<ul style="list-style-type: none"> <li>Дія сторонніх високотемпературних джерел</li> </ul>



**Рис. 3. Прийняте ранжування рівня ймовірностей загорянь**

оцінювання ризиків загоряння електромобіля.

Сформована матриця (таблиця 4) дає чітке розуміння того, що горіння електромобіля фактично не супроводжується виникненням помірного й дуже високого ступеня ризику, таким чином, маємо підстави спростити матрицю до такого варіанта (таблиця 5).

Незважаючи на кінцевий варіант, у матриці є порожні комірки, які фактично визначають необхідність ведення деталізованої статистики подій і надзвичайних ситуацій, пов'язаних із загоранням електричних транспортних засобів, зокрема електромобілів.

**Висновки.** Відповідно до проведеного оцінювання ризику загорянь електромобілів, визначено такі основні причини загорання електромобілів, а саме: людську недбалість/халатність на виробництві (10%), самозаймання з невстановлених причин (22%), порушення роботи акумуляторної батареї під час заряджання або після (28%), ДТП (30%), втоплення (5%), дія полум'я (5%). З огляду

**Спрощена матриця оцінювання ризиків займання електромобіля відповідно до проведеного попереднього оцінювання**

Рівень впливу чинників ризику		Рівень імовірності ризикових подій		
		дуже низький	низький	високий
		0	1	2
Незначний	0	-	(PN)	-
Легкий	1	(SM)	-	-
Помірний	2	(FI)	-	(SI)
Серйозний	3	-	-	(AF)
Катастрофічний	4	-	-	(CI)

Таблиця 4

**Матриця оцінювання ризиків загорання електромобіля**

Рівень впливу чинників ризику		Рівень імовірності ризикових подій				
		дуже низький	низький	помірний	високий	дуже високий
		0	1	2	3	4
Незначний	0	-	(PN)	-	-	-
Легкий	1	(SM)	-	-	-	-
Помірний	2	(FI)	-	-	(SI)	-
Серйозний	3	-	-	-	(AF)	-
Катастрофічний	4	-	-	-	(CI)	-

на аналіз і наявні підходи до порядку оцінювання ризику, сформовано матрицю оцінювання ризиків займання електромобілів. Отримана матриця ризиків загорання електромобілів наочно продемонструвала й підтвердила таке:

1. Ризик займання електромобілів та іншого подібного переважно можна зарахувати до трьох ступенів імовірності (дуже низький, низький і високий).

2. Відсутність заповнення значної кількості комірок матриці засвідчує гостру потребу детального аналізу кожного випадку загорання електромобілів з максимально чітким визначенням причини загорання.

Зазначені результати дослідження, відповідно, є передумовою для проведення подальших досліджень і вдосконалення отриманої матриці ризиків загорань електромобілів.

#### Список літератури

1. Wipa Loengbudn, Kaveh Khalilpour, Gnana Bharathy, Firouzeh Taghikhah, Alexey Voinov. Battery and hydrogen-based electric vehicle adoption: A survey of Australian consumers perspective. *Case Stud. Transp. Policy* 2022, 10, 2451–2463. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2022.11.007>.
2. EVC. State of Electric Vehicles 2021 – Electric Vehicle Council, Electric Vehicle Council – Increasing the Uptake of EVs in Australia. 2021. URL: <https://electricvehiclecouncil.com.au/wp-content/uploads/2021/08/EVC-State-of-EVs-2021.pdf>.

3. Brandsikkerhed i garageanlaeg, oplag af lithium-ion batterier og batterier til solcelleanlaeg i bygninger / N. Kjeld et al. Denmark, 2022. [https://www.sbst.dk/Media/638307217974871855/Analyse%20af%20brandsikkerhed%20i%20garageanl%C3%A6g%20-%20Ved%20batteriopl%C3%A6g%20BESS%202022\\_01\\_14.pdf](https://www.sbst.dk/Media/638307217974871855/Analyse%20af%20brandsikkerhed%20i%20garageanl%C3%A6g%20-%20Ved%20batteriopl%C3%A6g%20BESS%202022_01_14.pdf).

4. Technical Committee on Energy Storage Systems and National Fire Protection Association: NFPA 855: Standard for the Installation of Stationary Energy Storage Systems. 2020. <https://www.nfpa.org/codes-and-standards/nfpa-855-standard-development/855>.

5. Blanco-Muruzábal M., Martín-Gómez C., Zuazua-Ros A. From Combustion Vehicle to Electric Vehicle Parking, Through a Review of Legislation and Publications. *Archit Res*. 2022. № 12 (1). P. 1–11. <https://doi.org/10.5923/j.arch.20221201.01>.

6. Fire risk management procedure for vehicles and mobile machines rise RISE Research Institutes of Sweden. 2019. P. 43. URL: <https://ri.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1368722&dsid=-7754>.

7. Roeland Bisschop Ola Willstrand Francine Amon Max Rosengren Fire Safety of Lithium-Ion Batteries in Road Vehicles. RISE Research Institutes of Sweden. 2019. P. 43. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.18738.15049>.

8. Mohd Zahirasri Mohd Tohir, César Martín-Gómez Electric vehicle fire risk assessment framework using Fault Tree Analysis. *Open Research Europe*. 2023. <https://doi.org/10.12688/openreseurope.16538.1>.



9. Md Kamrul Hassan, Nazra Hameed, Md Delwar Hossain, Fire Incidents, Trends, and Risk Mitigation Framework of Electrical Vehicle Cars in Australia Fire. 2023. № 6 (8). P. 325. <https://doi.org/10.3390/fire6080325>.

10. Zhang Y., Tao L., Xie C. Defect Engineering on Electrode Materials for Rechargeable Batteries. *Adv Mater*. 2020. № 32 (7). <https://doi.org/10.1002/adma.201905923>.

11. Battery degradation and behaviour for electric vehicles: Review and numerical analyses of several models / S. Pelletier, O. Jabali, G. Laporte et al. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2017. № 103. P. 158 G.187. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2017.01.020>.

12. EV FireSafe. Global Electric Vehicle Battery Fires, Ev FIRESAFE. 2022. URL: <https://www.EVFireSafe.com>

13. Lazarenko O., Berezhanskyi T., Pospolitak V., Pazen O. Assessing the effect of mechanical deformation of the Panasonic NCR18650B lithium-ion power cell housing on its fire safety. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. № 2 (7 (122)). P. 69–78. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.276780>.

14. Гаврилюк А. Ф., Яковчук Р. С. Експериментальні дослідження модулів силової батареї Tesla Model S на предмет пожежної небезпеки. *Пожежна безпека*. 2024. № 44. С. 5–12. <https://doi.org/10.32447/20786662.44.2024.01>.

15. Lazarenko O., Berezhanskyi T., Pospolitak V., Pazen O. Experimental evaluation of the influence of excessive electric current on the fire hazard of lithium-ion power cell. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. № 4 (10 (118)). P. 67–75. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.263001>

16. ДСТУ ІЕС/ISO 31010:2013 «Керування ризиком. Методи загального оцінювання ризику».

17. World health organization report Road traffic injuries 2023. URL: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/road-traffic-injuries>.

18. Аналітична довідка про пожежі та їх наслідки в Україні за 2023 рік. URL: <https://idudcz.dsns.gov.ua/upload/2/0/1/8/2/6/2/analitichna-dovidka-pro-pojeji-122023.pdf>.

19. Incidents with alternative fuel vehicles Annual report 2021–20223. URL: <https://nipv.nl/wp-content/uploads/2023/05/20230424-NIPV-Factsheet-Annual-report-2022-Incidents-with-alternative-fuel-vehicles.pdf>.

## References

1. Wipa Loengbudn, Kaveh Khalilpour, Gnana Bharathy, Firouzeh Taghikhah, Alexey Voinov (2022). Battery and hydrogen-based electric vehicle adoption: A survey of Australian consumers perspective. *Case Stud. Transp. Policy* 10, 2451–2463. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2022.11.007>. [in English].

2. EVC. State of Electric Vehicles (2021). Electric Vehicle Council, Electric Vehicle Council – Increasing the Uptake of EVs in Australia.2021. [\[vehiclecouncil.com.au/wp-content/uploads/2021/08/EVC-State-of-EVs-2021.pdf\]\(https://vehiclecouncil.com.au/wp-content/uploads/2021/08/EVC-State-of-EVs-2021.pdf\). \[in English\].](https://electric-</a></p></div><div data-bbox=)

3. Kjeld, N., et al. (2022). Brandsikkerhed i garageanlaeg, oplag af litium-ion batterier og batterier til solcelleanlaeg i bygninger. Denmark, [https://www.sbst.dk/Media/638307217974871855/Analyse%20af%20brandsikkerhed%20i%20garageanl%C3%A6g%20-%20Ved%20batteriopl%C3%A6g%20og%20BESS%2002\\_2022\\_01\\_14.pdf](https://www.sbst.dk/Media/638307217974871855/Analyse%20af%20brandsikkerhed%20i%20garageanl%C3%A6g%20-%20Ved%20batteriopl%C3%A6g%20og%20BESS%2002_2022_01_14.pdf). [in English].

4. Technical Committee on Energy Storage Systems and National Fire Protection Association: NFPA 855 : Standard for the Installation of Stationary Energy Storage Systems. 2020. <https://www.nfpa.org/codes-and-standards/nfpa-855-standard-development/855>. [in English].

5. Blanco-Muruzábal, M., Martín-Gómez, C., & Zuazua-Ros, A. (2022). From Combustion Vehicle to Electric Vehicle Parking, Through a Review of Legislation and Publications. *Archit Res.*; 12(1): 1–11. <https://doi.org/10.5923/j.arch.20221201.01>. [in English].

6. Fire risk management procedure for vehicles and mobile machines rise (2019). RISE Research Institutes of Sweden, p. 43. <https://ri.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1368722&dsid=-7754>. [in English].

7. Roeland, Bisschop, Ola, Willstrand, Francine, Amon, & Max, Rosengren (2019). Fire Safety of Lithium-Ion Batteries in Road Vehicles. RISE Research Institutes of Sweden, p. 43. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.18738.15049>. [in English].

8. Mohd, Zahirasri, Mohd, Tohir, & César, Martín-Gómez (2023). Electric vehicle fire risk assessment framework using Fault Tree Analysis. *Open Research Europe* <https://doi.org/10.12688/openresearch.16538.1>. [in English].

9. Md, Kamrul. Hassan, Nazra. Hameed, Md., & Delwar Hossain (2023). Fire Incidents, Trends, and Risk Mitigation Framework of Electrical Vehicle Cars in Australia Fire 6(8), 325; <https://doi.org/10.3390/fire6080325>. [in English].

10. Zhang, Y., Tao, L., & Xie, C. (2020). Defect Engineering on Electrode Materials for Rechargeable Batteries. *Adv Mater.*; 32(7). <https://doi.org/10.1002/adma.201905923>. [in English].

11. Pelletier, S., Jabali, O., & Laporte, G., et al. (2017). Battery degradation and behaviour for electric vehicles: Review and numerical analyses of several models. *Transportation Research Part B: Methodological*; 103: 158–187. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2017.01.020>. [in English].

12. EV FireSafe. Global Electric Vehicle Battery Fires, Ev FIRESAFE. (2022). Available online: <https://www.EVFireSafe.com>. [in English].

13. Lazarenko, O., Berezhanskyi, T., Pospolitak, V., & Pazen, O. (2023). Експериментальні дослідження модулів силової батареї Tesla Model S на предмет пожежної небезпеки. [Assessing the effect of mechanical deformation of the Panasonic NCR18650B lithium-ion power cell housing on its fire safety]. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*,

2 (7 (122)), 69–78. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.276780>. [in English].

14. Gavryliuk, A., & Yakovchuk, R. (2024). Experimental research of tesla model s power battery cells for open flame fire hazard. *Fire Safety*, 44, 5–12. <https://doi.org/10.32447/20786662.44.2024.01>. [in Ukrainian].

15. Lazarenko, O., Berezhanskyi, T., Pospolitak, V., & Pazen, O. (2022). Experimental evaluation of the influence of excessive electric current on the fire hazard of lithium-ion power cell. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (10 (118)), 67–75. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.263001> [in English].

16. DSTU IEC/ISO 31010:2013 «Keruvannia ryzykom. Metody zahalnoho otsiniuvannia ryzyku» (2023). [DSTU IEC/ISO 31010:2013 «Risk manage-

ment. Methods of general risk assessment» World health organization report Road traffic injuries]. Access mode: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/road-traffic-injuries>. [in Ukrainian].

17. World health organization report Road traffic injuries 2023. URL: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/road-traffic-injuries>. [in English].

18. Analitychna dovidka pro pozhezhi tayikhaslidky v Ukraini za 2023 rik. [Analytical report on fires and their consequences in Ukraine for 2023]. Access mode: <https://idundcz.dsns.gov.ua/upload/2/0/1/8/2/6/2/analitchna-dovidka-pro-pojeji-122023.pdf> [in Ukrainian].

19. Incidents with alternative fuel vehicles Annual report 2021-20223 Access mode: <https://nipv.nl/wp-content/uploads/2023/05/20230424-NIPV-Fact-sheet-Annual-report-2022-Incidents-with-alternative-fuel-vehicles.pdf>. [in English].

© Л. Ф. Дзюба, О. В. Лазаренко, О. Ю. Пазен, П. В. Пастухов, 2024.

**Науково-методична стаття.**

Надійшла до редакції 15.10.2024.

Прийнято до публікації 18.12.2024.