



УДК 343.98:343.14

 <https://doi.org/10.33994/kndise.2026.71.39>


Колесов Едуард Євгенович

*доктор філософії, заступник завідувача
лабораторії інженерно-технічних видів досліджень
Київського науково-дослідного інституту судових експертиз
Міністерства юстиції України*

 <https://orcid.org/0000-0002-7682-890X>
eduard.kolesov@kndise.gov.ua

Шмерего Олександр Борисович

*головний судовий експерт відділу криміналістичних
досліджень Київського відділення Національного наукового
центра «Інститут судових експертиз ім. Засл.
проф. М. С. Бокаріуса» Міністерства юстиції України*

 <https://orcid.org/0009-0006-2870-700X>
a.shmerego@gmail.com

Бібліографічний опис статті: Колесов Е.Є., Шмерего О.Б. (2026). Використання програмного забезпечення задля вчинення злочинів із використанням вибухових пристроїв без вмісту вибухової речовини. *Криміналістика і судова експертиза*, 71, 613–628. doi: <https://doi.org/10.33994/kndise.2026.71.39>

ВИКОРИСТАННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАДЛЯ ВЧИНЕННЯ ЗЛОЧИНІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ВИБУХОВИХ ПРИСТРОЇВ БЕЗ ВМІСТУ ВИБУХОВОЇ РЕЧОВИНИ

У статті досліджено особливості експертного забезпечення розслідування кримінальних правопорушень, пов'язаних із використанням обладнання, оснащеного літій-іонними акумуляторними батареями, у тому числі в умовах їх термічної нестабільності та потенційного використання як джерел займання. Проблематика дослідження полягає у необхідності встановлення причинно-наслідкових зв'язків між технічним станом акумуляторних систем, умовами їх експлуатації та виникненням пожеж або інших небезпечних подій, а також у відсутності уніфікованих підходів до їх судово-експертного дослідження. **Метою дослідження** є комплексний аналіз особливостей функціонування літій-іонних акумуляторних батарей у контексті їх пожежної безпеки, виявлення проблемних аспектів експертного дослідження таких об'єктів та обґрунтування

необхідності розроблення відповідних методичних підходів у межах судової інженерно-технічної та пожежно-технічної експертизи. **Методологічною основою** роботи стали загальнонаукові та спеціальні методи дослідження, зокрема формально-логічний, системно-структурний, порівняльно-технічний, а також метод аналізу і узагальнення нормативно-правових актів, наукових джерел і практики судово-експертної діяльності. Це дозволило комплексно розглянути технічні, пожежно-небезпечні та криміналістичні аспекти використання літій-іонних батарей та визначити їх місце як об'єкта експертного дослідження. **Наукова новизна** полягає у комплексному підході до дослідження літій-іонних акумуляторних батарей як специфічного об'єкта судово-експертної діяльності, визначенні ключових факторів їх пожежної небезпеки, зокрема явища термічного розгону (thermal runaway), а також обґрунтуванні необхідності формування уніфікованих методичних підходів до їх аналізу, оцінки технічного стану та встановлення причин виникнення небезпечних подій. **У висновках** підкреслюється, що ефективне експертне забезпечення розслідування подій, пов'язаних із використанням літій-іонних акумуляторних батарей, потребує вдосконалення нормативного регулювання, впровадження міждисциплінарних підходів з урахуванням вимог пожежної безпеки та цивільного захисту, а також розроблення спеціалізованої методики судово-експертного дослідження таких об'єктів, що дозволить підвищити об'єктивність, повноту та достовірність експертних висновків.

Ключові слова: електромобілі, терморегуляція, безпека, літій-іонна батарея, теплообмін, енергоефективність, судочинство, судова вибухотехнічна, електротехнічна та пожежно-технічна експертиза, шкідливе програмне забезпечення, комп'ютерна злочинність, літій-іонні акумулятори, вибухові пристрої, висновок експерта.

Kolesov Eduard

Ph.D. in History, Deputy Head of the Laboratory of Engineering and Technical Examinations at the Kyiv Scientific Research Institute of Forensic Expertise of the Ministry of Justice of Ukraine



<https://orcid.org/0000-0002-7682-890X>
eduard.kolesov@kndise.gov.ua

Shmeregо Oleksandr

Chief Forensic Expert of the Criminalistics Research Department of the Kyiv Branch of the National Scientific Center "Hon. Prof. M. S. Bokarius Forensic Science Institute" of the Ministry of Justice of Ukraine.



<https://orcid.org/0009-0006-2870-700X>
a.shmeregо@gmail.com

USE OF SOFTWARE TO COMMIT CRIMES INVOLVING EXPLOSIVE DEVICES THAT DO NOT CONTAIN EXPLOSIVE SUBSTANCES

To cite this article: Kolesov E., Shmereg O. (2026). Vykorystannia prohramnoho zabezpechennia zadlia vchynennia zlochyniv iz vykorystanniam vybukhovyykh prystroiv bez vmistu vybukhovoi rechovyny [Use of software to commit crimes involving explosive devices that do not contain explosive substances]. *Criminalistics and Forensics*, 71, 613–628. doi: <https://doi.org/10.33994/kndise.2026.71.39>

The article examines the features of expert support in the investigation of criminal offenses related to the use of equipment equipped with lithium-ion batteries, including conditions of their thermal instability and potential use as sources of ignition. The research problem lies in the need to establish causal relationships between the technical condition of battery systems, their operating conditions, and the occurrence of fires or other hazardous events, as well as in the absence of unified approaches to their forensic examination. **The aim of the study** is a comprehensive analysis of the operational characteristics of lithium-ion batteries in the context of their fire hazard, identification of problematic aspects of the forensic examination of such objects, and substantiation of the need to develop appropriate methodological approaches within forensic engineering-technical and fire-technical examinations. **The methodological basis** of the study includes general scientific and special research methods, in particular formal-logical, system-structural, comparative-technical methods, as well as methods of analysis and generalization of normative-legal acts, scientific sources, and forensic practice. This made it possible to comprehensively consider the technical, fire-hazard, and criminalistic aspects of the use of lithium-ion batteries and to define their place as objects of forensic examination. **The scientific novelty** lies in a comprehensive approach to the study of lithium-ion batteries as a specific object of forensic activity, in identifying key factors of their fire hazard, including the phenomenon of thermal runaway, as well as in substantiating the need to develop unified methodological approaches to their analysis, assessment of technical condition, and determination of the causes of hazardous events. **The conclusions** emphasize that effective expert support for the investigation of incidents involving lithium-ion batteries requires improvement of regulatory frameworks, implementation of interdisciplinary approaches considering fire safety and civil protection requirements, as well as the development of a specialized methodology for forensic examination of such objects, which will enhance the objectivity, completeness, and reliability of expert conclusions.

Keywords: electric vehicles, thermal regulation, safety, lithium-ion battery, heat transfer, energy efficiency, judiciary, forensic explosives, electrical and fire-technical examination, malicious software, cyber-

crime, lithium-ion batteries, explosive devices, expert opinion.

Постановка проблеми

Сучасний розвиток електротранспорту та портативних енергетичних систем зумовив широке використання літій-іонних акумуляторних батарей як основного джерела живлення. Водночас зростання їх поширення супроводжується підвищенням кількості інцидентів, пов'язаних із термічною нестабільністю, самозайманням та пожежами, що створює нові виклики для судово-експертної та правоохоронної практики. Особливу складність становлять випадки, коли такі об'єкти потенційно можуть бути використані як джерела займання або елемент злочинної діяльності без застосування традиційних вибухових речовин.

Проблематика дослідження полягає у відсутності уніфікованих методичних підходів до встановлення причинно-наслідкових зв'язків між технічним станом літій-іонних акумуляторних систем, умовами їх експлуатації та виникненням пожеж чи інших небезпечних подій, що ускладнює їх судово-експертну оцінку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проблематика експертного забезпечення розслідування кримінальних правопорушень, пов'язаних із використанням програмного забезпечення, електронних систем та мереж електрозв'язку, є предметом дослідження у працях вітчизняних правників і криміналістів. Зокрема, питання судової практики розгляду таких справ та особливості доказування проаналізовано у публікації, оприлюдненій у Віснику Верховного Суду України [1], де окреслено ключові підходи до кваліфікації злочинів у сфері використання електронно-обчислювальних систем.

Окрему увагу привертають дослідження сучасних форм використання технічних засобів як інструментів вчинення злочинів. Зокрема, матеріали інформаційного агентства щодо операцій проти угруповання «Хезболла» [2] демонструють практичні приклади застосування електронних пристроїв з автономними джерелами живлення як засобів ураження, що не містять традиційних вибухових речовин, що формує нові виклики для судово-експертної діяльності.

Питання розвитку та значення літій-іонних технологій розглянуто у роботах О. Феї [3], де підкреслюється стрімке поширення літій-іонних акумуляторів у різних галузях, а також їхній вплив на сучасні технологічні процеси.

Аналіз пожежної небезпеки електромобілів та впливу термічної стабільності акумуляторних батарей здійснено у дослідженнях А. Ф. Гаврилюка та А. П. Кушніра [4], які обґрунтовують ключову роль теплових процесів у виникненні пожеж.

У міжнародних дослідженнях O. Willstrand, R. Bisschop, P. Blomqvist, A. Temple та J. Anderson [5] висвітлено питання утворення токсичних газів під час пожеж електромобілів, що має важливе значення для оцінки наслідків таких подій. Безпека літій-іонних акумуляторів та механізми їх деградації та руйнування детально розглянуті у роботі Z. J. Zhang, P. Ramadass та W. Fang [6].

Питання впливу пожеж електромобілів на будівлі та інженерні споруди, зокрема паркінги, досліджено у роботах A. Gavryliuk, R. Yakovchuk, Y. Ballo та Y. Rudyk [7], де наведено результати моделювання теплових впливів.

Практичні випадки аварій, пов'язаних із використанням літій-іонних акумуляторів, зокрема в авіації, відображені у звіті N. Goto [8], що підтверджує високий рівень потенційної небезпеки таких систем.

Окремі прикладні аспекти пожежонебезпеки електромобілів у замкнутих просторах висвітлюються у публікаціях спеціалізованих ресурсів [9], тоді як питання вдосконалення систем терморегуляції акумуляторів досліджуються у сучасних технічних роботах [10].

Таким чином, аналіз наукових джерел свідчить, що значна увага приділяється технічним, фізико-хімічним та пожежно-небезпечним властивостям літій-іонних акумуляторів. Водночас питання їх використання як засобів вчинення кримінальних правопорушень, а також методичне забезпечення їх судово-експертного дослідження залишаються недостатньо розробленими, що обумовлює актуальність подальших наукових досліджень.

Мета дослідження

Мета дослідження – комплексний аналіз особливостей функціонування літій-іонних акумуляторних батарей у контексті їх пожежної та техногенної безпеки, виявлення ключових факторів ризику та обґрунтування необхідності розроблення уніфікованих методичних підходів до їх судово-експертного дослідження.

Виклад основного матеріалу

У більшості випадків літій-іонні акумуляторні батареї не містять вибухових речовин, однак характеризуються наявністю горючих компонентів та здатністю до термічного розгону, що може супроводжуватися виділенням великої кількості тепла та займанням. Водночас відомі випадки вчинення терористичних актів, коли як засоби вчинення злочину використовувалися пристрої, що не містять традиційних вибухових речовин або засобів ініціювання вибуху.

17 вересня 2024 року у Лівані близько 15:30 за місцевим часом у низки осіб, пов'язаних із терористичним проіранським угрупованням «Хезболла», за повідомленнями ЗМІ, відбулися інциденти

з раптовим перегрівом та вибухоподібним руйнуванням електронних пристроїв типу пейджерів, що перебували у руках, кишенях одягу та сумках. Подія тривала протягом приблизно однієї години та призвела до численних травм: ушкоджень органів зору, опіків обличчя, рваних ран у ділянці живота та стегон, а також травматичних ушкоджень кистей із подальшими ампутаціями. За даними «New York Times», пристрої могли подавати звуковий сигнал протягом приблизно 10 секунд перед виникненням вибухоподібного ефекту, що змушувало користувачів підносити їх до обличчя для перегляду повідомлень, унаслідок чого виникали додаткові травми [2].

Залишки одного з зазначених пристроїв (рис. 1) свідчать про наявність джерела живлення на основі літій-іонних акумуляторів.



Рис. 1. Залишки пейджера, що належав члену угруповання «Хезболла», після вибуху елементів його живлення (літій-іонних акумуляторів).

Літій-іонні акумулятори складаються з анода та катода, розділених пористим полімерним сепаратором. Як активний матеріал катода зазвичай використовуються оксиди перехідних металів з інтеркальованими іонами літію. В аноді переважно застосовується графіт. Електроліт являє собою органічний розчин солей літію.

Під час першого циклу заряджання внаслідок інтеркаляції літію в анод на його поверхні формується захисний іонопровідний шар твердого електроліту (Solid Electrolyte Interphase, SEI), що утворюється в результаті часткового розкладу електроліту. Даний шар виконує функцію пасивації поверхні електродів і зменшує інтенсивність побічних (паразитичних) реакцій між електродами та електролітом (рис. 2).

Найчастішою причиною займання літій-іонних акумуляторів є виникнення аварійного режиму, пов'язаного з внутрішнім коротким замиканням в електрохімічному осередку. У наукових дослідженнях

встановлено, що до основних причин втрати термічної стабільності високовольтних акумуляторних батарей належать: внутрішнє коротке замикання, перегрів елемента, перевищення максимально допустимої напруги, заряджання підвищеними струмами та глибокий розряд.

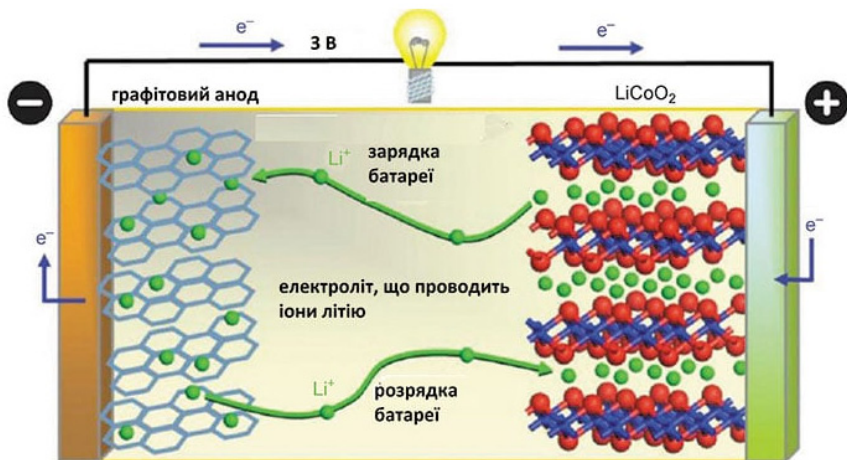


Рис. 2. Принципова схема конструкції та функціонування літій-іонного акумулятора [3]

Зазначені фактори в кінцевому підсумку можуть призводити до розвитку процесу теплового розгону (thermal runaway) та подальшого розкладання електроліту внаслідок інтенсивної взаємодії з електродними матеріалами, при цьому швидкість розвитку реакцій може суттєво відрізнятись залежно від умов експлуатації.

Внутрішнє коротке замикання може бути зумовлене низкою факторів, зокрема: механічним пошкодженням елемента, порушенням технології виробництва, наявністю або потраплянням металевих частинок між анодом і катодом, а також утворенням літєвих дендритів.

Формування дендритів літію відбувається у випадках, коли швидкість інтеркаляції іонів літію в анод недостатня, зокрема при низьких температурах або високих струмах заряджання, а також за умов дисбалансу ємності електродних матеріалів. У таких випадках на поверхні анода відбувається накопичення металевого літію, що з часом призводить до росту дендритних структур і підвищує ризик внутрішнього короткого замикання (рис. 3).

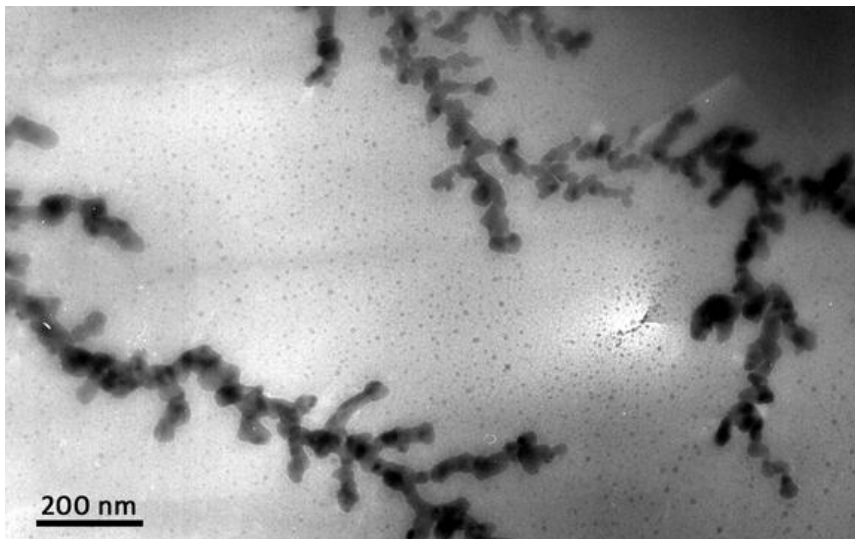


Рис. 3. Зображення ланцюжків проростання металевого літію (дендритів) крізь сепаратор.

Літій-іонні накопичувачі енергії, крім високої енергоємності та робочої напруги, у разі порушення умов експлуатації можуть бути джерелом значного тепловиділення, пожежі та утворення токсичного і густого диму. При пошкодженні літій-іонних акумуляторів можливе виділення газоподібних продуктів розкладу електроліту, до складу яких може входити фтористий водень (плавикова кислота у водному середовищі). У разі виходу горючих газів назовні та їх контакту з киснем повітря можливе займання або інтенсифікація процесу горіння.

Таким чином, навіть за наявності конструктивних захисних систем, при зовнішньому механічному впливі на акумулятор або внутрішніх дефектах існує підвищений ризик виникнення пожежі. Подібні випадки неодноразово фіксувалися під час дорожньо-транспортних пригод за участю електромобілів.

Відомо, що електромобілі можуть зазнавати термічних інцидентів, причиною яких найчастіше є акумуляторні батареї. Дослідження, проведені у Sandia National Laboratories, свідчать, що літій-іонні акумулятори можуть переходити в режим теплового розгону у разі перегріву або використання невідповідних режимів заряджання [2].

У зв'язку з цим у США фінансувалися дослідження причин виникнення пожеж електромобілів під час ДТП. Це було зумовлено, зокрема, окремими випадками загорянь електромобілів Tesla Model S, що привернули значну увагу до питання пожежної безпеки тран-

спортних засобів цього типу. Такі інциденти актуалізували наукову та технічну дискусію щодо пожежних ризиків акумуляторних систем високої енергоємності.

Найбільш поширеним типом накопичувачів електроенергії у сучасних електромобілях є літій-іонні акумуляторні батареї. Вони функціонують за принципом електрохімічного перетворення енергії, аналогічним до портативних електронних пристроїв, однак відрізняються значною кількістю послідовно та паралельно з'єднаних комірок, що забезпечує вихідну напругу у сотні вольт.

Літій-іонні батареї мають низку переваг, зокрема високу енергетичну щільність та ефективність, однак характеризуються чутливістю до порушень експлуатаційних режимів. За певних умов вони можуть переходити в режим теплового розгону, що супроводжується інтенсивним виділенням тепла та газів і може призводити до займання.

У випадку пожежі електромобіля рекомендується дотримуватися заходів безпеки, спрямованих на мінімізацію ризику ураження електричним струмом та вторинного розвитку пожежі. Використання води як основного засобу гасіння може бути обмеженим через ризик електротравм та специфіку поведінки літій-іонних батарей під час горіння.

Виробники електромобілів впроваджують конструктивні заходи для зниження ризику займання батареї, зокрема сегментацію акумуляторних модулів та використання термостійких і вогнезахисних матеріалів. Водночас, через високу енергетичну щільність та можливість розвитку теплового розгону, ефективність таких заходів у випадку глибоких внутрішніх дефектів або механічного руйнування залишається обмеженою.

Останніми роками в окремих країнах фіксується зростання кількості пожеж за участю електромобілів, що частково пов'язано зі збільшенням їх загальної кількості та старінням парку транспортних засобів. Водночас у науково-технічній літературі довгий час домінувала оцінка, згідно з якою пожежі електромобілів є відносно рідкісними подіями у перерахунку на кількість експлуатованих транспортних засобів.

Пожежі в електромобілях характеризуються високою інтенсивністю тепловиділення та складністю локалізації, що зумовлено конструкцією високовольтних акумуляторних систем. При цьому такі події потребують спеціальних підходів до гасіння та підвищених заходів безпеки для пожежно-рятувальних підрозділів.

Згідно з даними Національного інституту громадської безпеки Нідерландів (NIPV), у 2021 році було зафіксовано 58 випадків пожеж електромобілів, тоді як у 2022 році — 201 випадок. Зростання кількості інцидентів частково корелює зі збільшенням частки електромобілів у загальному автопарку. Прогнозні оцінки свідчать про можливе подальше зростання кількості таких подій у разі збільшення

частки електромобілів у структурі транспортних засобів.

Літій-іонні акумуляторні батареї є найбільш поширеним типом джерел живлення в електромобілях. Їх конструкція складається з великої кількості електрохімічних осередків, з'єднаних у модулі, що забезпечує вихідну напругу у сотні вольт. Попри високі енергетичні характеристики, такі системи є чутливими до порушення режимів експлуатації та можуть переходити в режим теплового розгону (thermal runaway), що супроводжується інтенсивним виділенням тепла, газів та можливим займанням.

Основними причинами виникнення аварійних режимів у літій-іонних акумуляторах є внутрішнє коротке замикання, механічні пошкодження, виробничі дефекти, порушення режимів заряджання (перевищення напруги або струму), а також глибокий розряд. Сукупність цих факторів може призводити до деградації електродних матеріалів, руйнування сепаратора та розвитку неконтрольованих екзотермічних реакцій.

У процесі термічного розгону можливе утворення газоподібних продуктів розкладу електроліту, зокрема легкозаймистих органічних сполук, а також токсичних компонентів, включаючи фтористі сполуки (зокрема фтороводень у разі контакту з вологою). Накопичення газів у герметичному корпусі акумуляторного модуля може призводити до підвищення внутрішнього тиску та його подальшої розгерметизації.

Після порушення герметичності можливе виділення горючих газів, які за наявності джерела запалювання та відповідної концентрації в повітрі утворюють пожежонебезпечне середовище. Подальший розвиток процесів у суміжних осередках може сприяти каскадному поширенню аварійного режиму.

Хімічні та електрохімічні процеси, що відбуваються у літій-іонних акумуляторах, можуть спричинити неконтрольовані екзотермічні реакції, які призводять до займання, виділення токсичних газів, руйнування конструкційних елементів та значних матеріальних збитків.

Сучасні системи терморегулювання (СТР) акумуляторних батарей поділяються на повітряні, рідинні, системи на основі холодоагенту, системи з використанням матеріалів із фазовим переходом (PCM), а також теплові труби. Перші три типи належать до активних систем, тоді як останні — до пасивних. Комбінація різних підходів формує гібридні системи терморегулювання (ГСТР).

Повітряні системи терморегулювання широко застосовуються в електромобілях завдяки простоті конструкції, низькій вартості та високій надійності. Водночас їх ефективність є обмеженою у випадках високих теплових навантажень, що характерні для режимів аварійного розвитку процесів у батарейних системах.

Перша відмінність полягає у способі створення повітряного потоку в системі терморегулювання:

- **Системи примусової конвекції:** рух повітря в контурі забезпе-

чується електричним вентилятором. Така система потребує споживання електричної енергії для роботи електродвигуна вентилятора;

- **Системи природної конвекції:** рух повітря здійснюється за рахунок зовнішнього повітряного потоку, що виникає під час руху транспортного засобу, без використання вентилятора. Ефективність таких систем значною мірою залежить від аеродинамічної конструкції повітроводів та елементів корпусу.

Друга відмінність полягає у способі підготовки та обробки повітря в різних схемах систем терморегулювання (рис. 4):

- **Система з прямою подачею повітря (умовно пасивна схема):** повітря надходить безпосередньо з навколишнього середовища та, за необхідності, проходить через теплообмінник для охолодження або нагрівання. Далі підготовлене повітря подається до акумуляторного блоку для забезпечення необхідного температурного режиму;

- **Система з рециркуляцією повітря (умовно активна схема):** частина відпрацьованого повітря повертається на вхід системи та змішується із зовнішнім повітрям. Після цього суміш проходить через теплообмінник, де охолоджується або нагрівається до заданих параметрів, необхідних для підтримання оптимального температурного режиму акумуляторного блоку.

У практичних застосуваннях використовуються обидва типи повітряних систем терморегулювання (СТР). Такі установки можуть функціонувати як у режимі охолодження, так і в режимі нагрівання акумуляторного блоку (рис. 5).

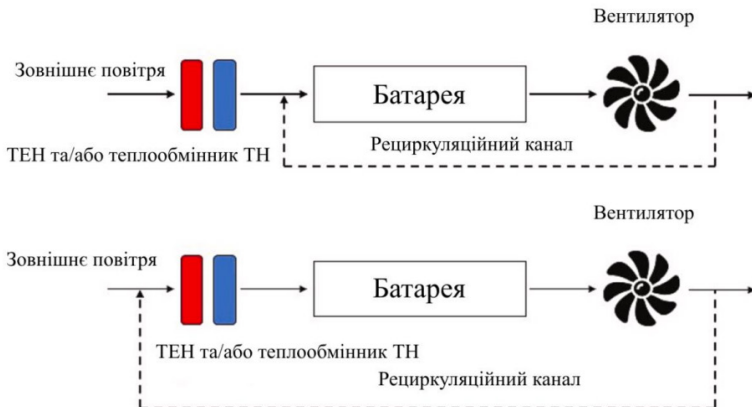


Рис. 4. Схема функціонування повітряних систем терморегулювання акумуляторної батареї.

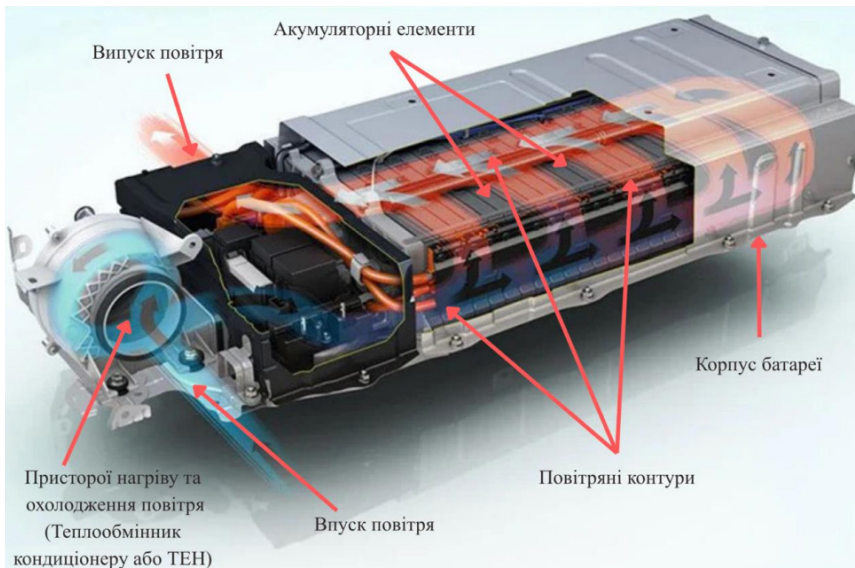


Рис. 5. Структура акумуляторної батареї з повітряною системою терморегулювання.

Фактично, у режимі охолодження використовується холодний теплообмінник (випарник), у якому зниження температури повітря здійснюється за рахунок роботи випарника системи HVAC транспортного засобу. У разі необхідності нагрівання акумуляторного блоку застосовується гарячий теплообмінник (нагрівач), який забезпечує підвищення температури повітря.

Рідинні системи терморегулювання (СТР) за принципом роботи подібні до повітряних систем, однак як теплоносії використовують рідину — як правило, водно-гліколеві суміші або діелектричні рідини. Порівняно з повітряними СТР, рідинні системи є більш ефективними, оскільки забезпечують інтенсивніший теплообмін і потребують меншої енергетичної витрати від акумуляторної системи.

Завдяки вищим теплофізичним властивостям рідин (зокрема теплопровідності та питомій теплоємності), а також більшій густині порівняно з повітрям, підвищується ефективність конвективного теплообміну. Це дозволяє забезпечити більшу теплову потужність відведення або підведення тепла при однакових габаритах системи та параметрах потоку.

З точки зору конструктивного виконання рідинні СТР характеризуються замкненим контуром, у якому теплоносії циркулює в обмеженій системі трубопроводів. Загальна схема такої системи наведена на рис. 6.

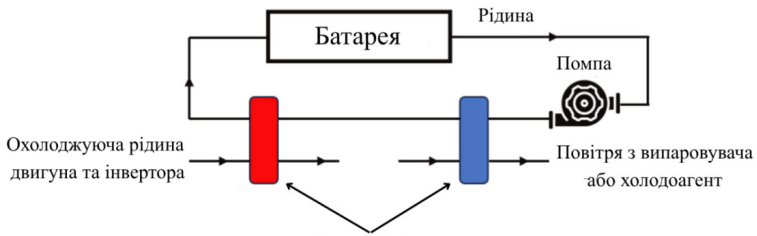


Рис. 6. Схема функціонування рідинної системи терморегулювання акумуляторної батареї.

Порівняльний аналіз систем терморегулювання (СТР) акумуляторних батарей показує, що рідинні системи характеризуються більшою конструктивною складністю порівняно з повітряними аналогами. До їх складу входять насосні агрегати для забезпечення циркуляції теплоносія та розширювальні баки, призначені для компенсації змін об'єму робочої рідини при температурних коливаннях.

Рідинні СТР забезпечують як охолодження, так і нагрівання акумуляторного блоку за рахунок використання проміжних теплообмінників, які можуть працювати в режимі охолоджувача або нагрівача. У сучасних транспортних засобах джерелом теплової або холодної енергії є HVAC-система, що функціонує на основі чотириходового клапана з можливістю перемикання між холодильним циклом і режимом теплового насоса. У холодних кліматичних умовах додатково застосовується рекуперація тепла силового електропривода, що підвищує загальну енергоефективність системи.

Разом із тим, збільшення кількості конструктивних елементів призводить до зростання маси, габаритів та вартості системи, що є ключовим недоліком рідинних СТР порівняно з повітряними рішеннями.

За способом теплового контакту з елементами батареї рідинні СТР поділяються на три основні типи: занурювальні системи (immersion cooling), системи прямого контакту та системи непрямого контакту через холодні пластини. Найбільш поширеним у серійних електромобілях є непрямий контактний підхід, що забезпечує баланс між ефективністю теплопередачі та конструктивною безпекою.

Окрему групу становлять системи на основі холодоагенту, що реалізують зворотні термодинамічні цикли. Такі системи забезпечують високу ефективність двофазного теплообміну та стабілізацію температурного режиму акумуляторного блоку за рахунок фазового переходу робочого середовища.

Матеріали зі зміною фазового стану (PCM/МЗФС) належать до пасивних систем терморегулювання та характеризуються здатністю акумулювати і вивільняти значну кількість прихованої теплоти при

відносно сталих температурах. Їх використання забезпечує вирівнювання температурного поля акумуляторного блоку та обмеження швидкості температурного зростання, що є важливим фактором зниження ризику теплового розгону.

Теплові труби (heat pipes) застосовуються як високоефективні елементи теплопередачі, що працюють за рахунок фазових переходів робочої рідини. Вони забезпечують передачу тепла при мінімальному температурному градієнті та здебільшого використовуються як допоміжні компоненти в системах терморегулювання акумуляторів.

Гбридні системи терморегулювання поєднують активні та пасивні підходи з метою підвищення ефективності тепловідведення та зниження енергоспоживання. Поєднання рідинного охолодження з РСМ дозволяє зменшити пікові теплові навантаження та підвищити стабільність температурного режиму акумуляторного блоку.

Отримані результати свідчать, що сучасні електромобілі переважно використовують непрямі рідинні системи терморегулювання, інтегровані з HVAC-системами транспортних засобів, що зумовлено їх вищою ефективністю теплопередачі порівняно з повітряними системами.

Водночас аналіз експлуатаційних інцидентів свідчить, що ефективність терморегулювання залишається критичним фактором безпеки літій-іонних акумуляторів. Недостатній рівень теплового контролю або конструктивне спрощення систем можуть призводити до розвитку теплового розгону, що супроводжується виділенням горючих газів, підвищенням внутрішнього тиску та займанням.

Окремо слід відзначити, що у частині автономних енергетичних систем (зокрема портативних накопичувачів енергії) можуть застосовуватися спрощені або відсутні активні системи охолодження, що потенційно підвищує ризики теплової нестабільності за умов інтенсивної експлуатації.

Висновки

Дослідження механізмів виникнення пожеж і вибухів у літій-іонних акумуляторних системах, а також аналіз їхніх слідів і наслідків, є важливою науково-практичною основою для формування методичних підходів до проведення комплексних електротехнічних і пожежно-технічних судових експертиз.

Результати таких досліджень можуть бути використані для визначення причин та умов виникнення аварійних ситуацій, встановлення технічних факторів, що сприяли розвитку теплового розгону, а також для аналізу можливих способів і засобів умисного або необережного впливу на акумуляторні системи.

Окреме значення має розроблення рекомендацій щодо фіксації та збереження криміналістично значущої інформації під час огляду місця події, пов'язаної з пожежами або вибухами електрохімічних джерел живлення.

Список використаних джерел:

1. Судова практика розгляду справ про злочини у сфері використання електронно-обчислювальних машин (комп'ютерів), автоматизованих систем та комп'ютерних мереж і мереж електроз'язку. *Вісник Верховного Суду України*. 2010. № 2. С. 29–34. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vsu_2010_2_7 (дата звернення: 06.04.2026).
2. Як Ізраїль провів унікальну операцію проти «Хезболли». *Українформ*. 18.09.2024. URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-ato/3907132-ak-izrail-proviv-unikalnu-operaciu-proti-hezbollahi.html> (дата звернення: 06.04.2026).
3. Фея О. Літієва доба. *Український тиждень*. 2019. № 42(622). 20 жовт. URL: <https://tyzhden.ua/litiieva-doba/> (дата звернення: 06.04.2026).
4. Гаврилюк А. Ф., Кушнір А. П. Аналіз пожежної небезпеки електромобілів за термічною стабільністю силової літієвої акумуляторної батареї. *Пожежна безпека*. 2022. № 40. С. 31–39. DOI: <https://doi.org/10.32447/20786662.40.2022.04>
5. Willstrand O., Bisschop R., Blomqvist P., Temple A., Anderson J. Toxic Gases from Fire in Electric Vehicles. 2020. 240 p. URL: <https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1522149&dsid=3634> (дата звернення: 06.04.2026).
6. Zhang Z. J., Ramadass P., Fang W. Safety of lithium-ion batteries. *Lithium-ion Batteries*. 2014. P. 409–435. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59513-3.00018-2>.
7. Gavryliuk A., Yakovchuk R., Ballo Y., Rudyk Y. Thermal Modeling of the Electric Vehicle Fire Hazard Effects on Parking Building. *SAE International Journal of Transportation Safety*. 2023. Vol. 11, Issue 3. P. 1–14. DOI: <https://doi.org/10.4271/09-11-03-0013>
8. Goto N. Aircraft serious incident investigation report: All Nippon Airways Co. Ltd. JA804A. *Tokyo : Japan Transport Safety Board*, 2014. 115 p. URL: https://jtsb.mlit.go.jp/eng-air_report/JA804A.pdf (дата звернення: 06.04.2026).
9. Пожежі електромобілів: серйозна загроза в підземних паркінгах. *Automotive24*. 20.01.2025. URL: <https://automotive24.com.ua/article/pozezi-elektromobiliv-seriozna-zagroza-v-pidzemnix-parkingax> (дата звернення: 06.04.2026).
10. Бодак М., Бодак В. Види систем терморегуляції тягової батареї електромобіля та їх аналіз. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2025. № 2(25). С. 114–120. DOI: <https://doi.org/10.36910/automash.v2i25.1917>

References:

1. Sudova praktyka rozghliadu sprav pro zlochyyny u sferi vykorystannia elektronno-obchysliuvalnykh mashyn (kompiuteriv), avtomatyzovanykh system ta kompiuternykh merezh i merezh elektrosvyazku [Judicial practice in cases concerning crimes in the field of use of electronic computing machines/computers, automated systems, computer networks and telecommunication networks]. (2010). *Visnyk Verkhovnoho Sudu Ukrainy*, 2, 29–34. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vsu_2010_2_7 (accessed: 06.04.2026) [in Ukrainian].

2. Yak Izrail proviv unikalnu operatsiiu proty "Khezbolly" [How Israel conducted a unique operation against Hezbollah]. (2024). Ukrinform, September 18, 2024. URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-ato/3907132-ak-izrail-proviv-unikalnu-operaciu-proti-hezbollahi.html> (accessed: 06.04.2026) [in Ukrainian].
3. Feya O. (2019). Litiieva doba [The lithium age]. *Ukrainskyi tyzhden*, 42(622), October 20, 2019. URL: <https://tyzhden.ua/litiieva-doba/> (accessed: 06.04.2026) [in Ukrainian].
4. Havryliuk A.F., Kushnir A.P. (2022). Analiz pozhezhnoi nebezpeky elektromobiliv za termichnoiu stabilnistiu sylovoi litiievoi akumuliatornoj batarei [Analysis of the fire hazard of electric vehicles by the thermal stability of the power lithium battery]. *Pozhezhna bezpeka*, 40, 31–39. DOI: <https://doi.org/10.32447/20786662.40.2022.04> [in Ukrainian].
5. Willstrand O., Bisschop R., Blomqvist P., Temple A., Anderson J. (2020). Toxic Gases from Fire in Electric Vehicles. 240 p. URL: <https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1522149&dswid=3634> (accessed: 06.04.2026) [in English].
6. Zhang Z.J., Ramadass P., Fang W. (2014). Safety of lithium-ion batteries. *Lithium-ion Batteries*, 409–435. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59513-3.00018-2> [in English].
7. Gavryliuk A., Yakovchuk R., Ballo Y., Rudyk Y. (2023). Thermal modeling of the electric vehicle fire hazard effects on parking building. *SAE International Journal of Transportation Safety*, 11(3), 1–14. DOI: <https://doi.org/10.4271/09-11-03-0013> [in English].
8. Goto N. (2014). Aircraft serious incident investigation report: All Nippon Airways Co. Ltd. JA804A. Tokyo: Japan Transport Safety Board. 115 p. URL: https://jtsb.mlit.go.jp/eng-air_report/JA804A.pdf (accessed: 06.04.2026) [in English].
9. Pozhezhi elektromobiliv: seriozna zahroza v pidzemnykh parkinhakh [Electric vehicle fires: a serious threat in underground parking lots]. (2025). *Automotive24*, January 20, 2025. URL: <https://automotive24.com.ua/article/pozezi-elektromobiliv-seriozna-zagroza-v-pidzemnix-parkingax> (accessed: 06.04.2026) [in Ukrainian].
10. Material iz сайtu zbirnyka naukovykh zhurnaliv LNTU [Material from the website of the collection of scientific journals of Lutsk National Technical University]. URL: <https://eforum.lntu.edu.ua/index.php/jurnal-mbf/uk/article/view/1917> (accessed: 06.04.2026) [in Ukrainian].

Надійшла до редакції / Received: 27.02.2026

Отримана після доопрацювання / Received after revision: 14.04.2026

Прийнято до друку / Accepted for publication: 15.04.2026

Опубліковано / Published: 29.05.2026

Фінансування: відсутнє / Funding: none.

Конфлікт інтересів: автор(и) заявляє(ють) про відсутність конфлікту інтересів / Conflict of interest: the author(s) declare no conflict of interest.

Дотримання етичних норм: дослідження виконано з дотриманням принципів академічної доброчесності / Ethical compliance: the study was conducted in accordance with the principles of academic integrity.

Дані дослідження: усі дані, необхідні для обґрунтування висновків, наведено у статті / Research data: all data necessary to substantiate the conclusions are presented in the article.