

Krzysztof Turek¹
Akademia WSB
ORCID: 0009-0006-7958-5065

Badanie zależności ryzyka pożaru w magazynach energii od zastosowanych systemów gaszenia

Study of the relationship between fire risk in energy storage
facilities and the fire suppression systems used

Wprowadzenie

Współczesny świat w coraz większym stopniu opiera się na technologii baterii litowo-jonowych, które stały się wszechobecnym źródłem zasilania dla urządzeń mobilnych, pojazdów elektrycznych oraz systemów magazynowania energii. Ich popularność wynika z wysokiej gęstości energii, długiej żywotności i stosunkowo niskiej wagi. Niestety, za tymi zaletami kryje się również poważne zagrożenie – ryzyko wystąpienia gwałtownych i trudnych do opanowania pożarów. Jeśli chodzi o produkcję ogniwi, baterii oraz magazynów energii, największymi producentami są oczywiście Chiny. BloombergNEF prognozuje, że przyrost mocy wzrośnie w roku 2025 o 35%, ustanawiając rekordowy poziom rocznego przyrostu mocy, wynoszący 94 gigawaty/GW (247 gigawatogodzin/GWh), z wyłączeniem hydroenergii szczytowo-pompowej. Następnie nastąpi skumulowany roczny wzrost mocy na poziomie 14,7% do 2035 roku, z rocznym przyrostem mocy sięgającym 220 GW/972 GWh w tym

¹ Krzysztof Turek: mgr, Akademia WSB, e-mail: turekkrzysztof1979@gmail.com

roku, według najnowszych prognoz BNEF (BloombergNEF, 2025b). Wzrasta też produkcja samochodów elektrycznych – według prognoz agencji BloombergNEF Electric Vehicles Outlook w tym roku na całym świecie sprzeda się prawie 22 miliony pojazdów elektrycznych, co stanowi wzrost o 25% w porównaniu z rokiem 2024. Przyczyną jest spadek kosztów akumulatorów litowo-jonowych i wzrost produkcji tańszych modeli pojazdów elektrycznych. Chiny odpowiadają za prawie dwie trzecie światowej sprzedaży pojazdów elektrycznych, następnie Europa – 17% i Stany Zjednoczone – 7% (PV Magazine, 2025). Firma Redwood Materials uruchomiła nowy dział zajmujący się magazynowaniem energii z wykorzystaniem baterii o długim okresie użytkowania. Jej pierwsze duże wdrożenie obejmuje Projekt Second Life, największą w Ameryce Północnej mikrościeć zasilaną bateriami o mocy 12 MW/63 MWh, która zasilą centrum danych Crusoe Energy. System, zlokalizowany w kampusie Redwood w Sparks w stanie Nevada, wykorzystuje setki przerobionych akumulatorów z samochodów elektrycznych i jest połączony z generatorem energii słonecznej. Według firmy jest to jak dotąd największe wdrożenie baterii z odzysku. Dostarczane przez nią modułowe centrum danych zawiera 2000 procesorów graficznych (GPU) i jest zaprojektowane z myślą o obciążeniach AI o wysokim zapotrzebowaniu na energię. Firma szacuje, że w tym roku w Stanach Zjednoczonych wycofanych zostanie z użytku ponad 100 000 pojazdów elektrycznych, co stanowi rosnącą pulę baterii wielokrotnego użytku. Obecnie przetwarza ponad 20 GWh baterii rocznie i spodziewa się rozszerzyć swoją ofertę wdrożeniową o 5 GWh w ciągu najbliższego roku. Redwood poinformował, że rozpoczął już projektowanie projektów o mocy ponad 100 MW. Firma Redwood Materials informuje, że zbiera 20 GWh zużytych baterii litowo-jonowych z około 250 000 pojazdów elektrycznych rocznie, a lista ogniw odzyskanych z modułów i pakietów pochodzi od niemal każdej marki pojazdów elektrycznych. Redwood zawarł umowy recyklingowe z głównymi producentami samochodów, takimi jak Volkswagen/Audi, Toyota, BMW, Ford, Nissan, GM/Ultium, Isuzu (ciężarówki), a także współpracuje z operatorami mikromobilności i flot, takimi jak Lime Scooters/Bikes, Rad Power E-Bikes, Lyft Fleets, Amazon Deliverys i innymi (BloombergNEF, 2025a). Rynki wschodzące z kolei dynamicznie się rozwijają dzięki sprzedaży chiń-

skich producentów samochodów. Wzrasta również liczba sprzedawanych innych pojazdów, gdzie wykorzystywane są baterie litowo-jonowe. Wzrost produkcji powoduje też zwiększenie dostępności zakupu nowych ogniw litowo-jonowych, ale także ogniw z odzysku na różnych portalach sprzedażowych takich jak ogniwa cylindryczne li-ion 18650, 21700, LiFePO₄ cylindryczne oraz pryzmatyczne, moduły samochodowe z samochodów elektrycznych pojedyncze o różnych napięciach oraz całe baterie z samochodów elektrycznych lub hybrydowych. Coraz popularniejsze są moduły do samodzielnego montażu magazynów energii o różnych pojemnościach, gdzie można zakupić obudowę z okablowaniem, izolacją oraz Smart BMS (JKBMS, 2025), zakup ogniw LiFePO₄ o różnych pojemnościach, czasem do jednego typu obudowy. Na portalach sprzedażowych czy też grupach sprzedażowych na social mediach pojawia się coraz więcej ofert zakupu modułów bateryjnych z samochodów elektrycznych oraz innych rodzajów lub też gotowych magazynów nisko lub wysokonapięciowych budowanych na ogniwach z odzysku, które mogą okazać się tykającą bombą z opóźnionym zapłonem, gdyż nie ma gwarancji czy zostały odpowiednio sprawdzone przed złożeniem pod kątem bezpieczeństwa działania. W praktyce mogą być później wykorzystane czy to jako UPS, czy też jako system magazynowania energii z systemów fotowoltaicznych i w tym aspekcie bardzo ważne zachowanie jest wszystkich przepisów bezpieczeństwa w zakresie norm elektrycznych, ale także przeciwpożarowych. Urządzenia takie często są montowane przez samych użytkowników bądź za przyjaźnione osoby i nie zawsze są zgłaszane do operatorów energetycznych. Stanowić to może w przyszłości wyzwanie i niebezpieczeństwo dla strażaków oraz wyzwanie dla agencji ubezpieczeniowych. W związku z tym, aby poprawić bezpieczeństwo pożarowe i pomóc strażakom w pracy, do Rządowego Centrum Legislacji trafił projekt zmian prawa budowlanego, które miały na celu wprowadzenie regulacji związanych z magazynami energii. Proponowane zmiany znalazły się w uchwalonej pod koniec roku 2025 ustawie dotyczącej zmian w prawie budowlanym (Dz.U. z 2025 r., poz. 1847).

Zmiany prawne powodują, że magazyn energii nie może zostać zamontowany w części podziemnej (zapomnijmy o piwnicach). Magazyn energii o pojemności do 10kWh nie może znajdować się w pomieszczeniu przeznaczonym

do pobytu ludzi, co całkowicie blokuje możliwość zainstalowania takowych w mieszkaniach czy blokach i podnosi koszty budowy domu jednorodzinnego. Magazyn energii o pojemności od 10 kWh do 50 kWh musi znajdować się w pomieszczeniu oddzielnym odpornymi na ogień ścianami i stropami (co najmniej EI 60, REI 60) oraz drzwiami (co najmniej EI 30), chyba że znajdzie się w specjalnej obudowie o odporności na ogień wynoszącej co najmniej EI 60; rozporządzenie mówi tutaj tylko o budynkach niebędących wyłącznie budynkami magazynów energii. Do magazynów energii o łącznej pojemności od 50 kWh do 100 kWh stosuje się podobne regulacje, a ponadto muszą stać one w grupach do 50 kWh, oddzielonych przerwami wynoszącymi co najmniej 1 metr. W przypadku montażu magazynów energii na ścianach lub dachach budynków (do 3 metrów od ścian) pojedynczy magazyn może mieć do 20 kWh, a maksymalna pojemność wszystkich nie może przekraczać 100 kWh. Takie urządzenia muszą znajdować się co najmniej 1,5 metra od okien, drzwi i otworów wentylacyjnych, a w przypadku drzwi służących do ewakuacji – w odległości co najmniej 3 metrów. Ściany odporne na ogień (klasy A1 lub A2) muszą znajdować się w odległości co najmniej 1,5 metra od obudowy akumulatora².

Zasadność tych zmian jest kwestionowana poprzez organizacje związane z OZE, ponieważ samochód elektryczny, którego bateria może mieć pojemność od 40 kWh do 100 kWh, można swobodnie parkować w garażu. Paradoksem proponowanych zmian jest także rozwój technologii V2H (Vehicle-to-Home) oraz V2G (Vehicle-to-Grid). Coraz więcej producentów samochodów elektrycznych oferuje pojazdy, które mogą pełnić rolę przenośnego magazynu

² Ta część artykułu omawia projekt zmian. Nowe przepisy, które wprowadziła wspomniana ustawa, przewidują następujące progi pojemnościowe: do 30 kWh – brak jakichkolwiek obowiązków formalnych, 30–300 kWh – obowiązek zgłoszenia budowy, dokumentacja techniczna, uzgodnienia przeciwpożarowe oraz projekt wykonany przez osobę z odpowiednimi uprawnieniami, powyżej 300 kWh – konieczność uzyskania pozwolenia na budowę. Pierwotnie próg zwolnienia z formalności miał wynosić 20 kWh, jednak w toku prac sejmowych został podniesiony do 30 kWh m.in. dzięki postulatom środowiska branżowego, w tym PSME. Dla instalacji wolnostojących przewidziano inne zasady: do 30 kWh – brak obowiązku zgłoszenia i pozwolenia na budowę, 30–300 kWh – obowiązek zgłoszenia budowy, projekt zagospodarowania terenu oraz uzgodnienia przeciwpożarowe, 300–2000 kWh – dodatkowo obowiązek zawiadomienia Państwowej Straży Pożarnej o zakończeniu budowy wraz z planem magazynu, powyżej 2000 kWh – konieczność uzyskania pozwolenia na budowę.

energii. Coraz bardziej popularne staje się to w krajach takich jak Norwegia, Szwecja, Dania.

Specyfika chemiczna baterii litowo-jonowych sprawia, że w przypadku uszkodzenia, przegrzania czy wady produkcyjnej może w nich dojść do zjawiska tzw. ucieczki termicznej (ang. *thermal runaway*) (Feng et al., 2018). Jest to samonapędzający się proces, który prowadzi do gwałtownego wzrostu temperatury, wydzielania toksycznych i palnych gazów, a w konsekwencji do pożaru lub eksplozji. Tradycyjne metody gaśnicze często okazują się niewystarczające do skutecznego stłumienia tego typu ognia, co stwarza poważne wyzwanie dla bezpieczeństwa ludzi i mienia. W odpowiedzi na te zagrożenia, kluczowego znaczenia nabiera rozwój i wdrażanie proaktywnych strategii ochrony przeciwpożarowej. Jednym z najbardziej obiecujących kierunków jest zastosowanie automatycznych systemów gaszenia, zaprojektowanych specjalnie do wykrywania i neutralizowania pożarów baterii litowo-jonowych już w ich wczesnej fazie. Niniejsza praca poświęcona jest analizie możliwości zmniejszenia ryzyka pożarowego związanego z tą technologią właśnie poprzez implementację odpowiednich, zautomatyzowanych rozwiązań gaśniczych.

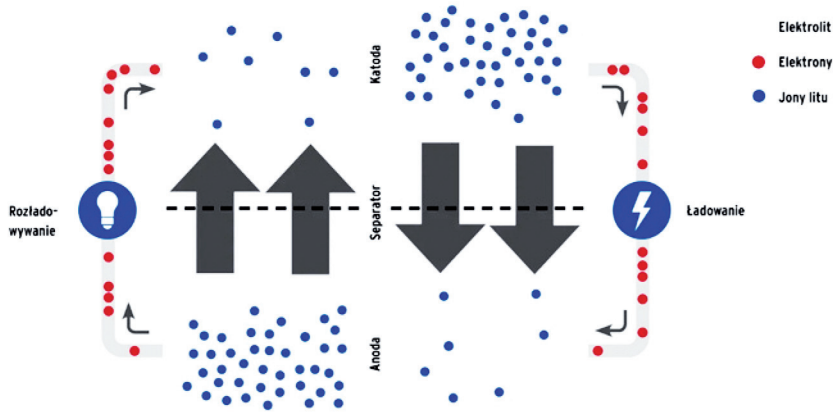
Zagrożenia pożarowe związane z bateriami litowo-jonowymi

Baterie litowo-jonowe, powszechnie stosowane w urządzeniach elektronicznych od smartfonów po samochody elektryczne, niosą ze sobą istotne zagrożenia pożarowe. Ich konstrukcja i skład chemiczny sprawiają, że w określonych warunkach mogą ulec samozapaleniu, a powstały pożar jest trudny do ugaszenia i może mieć gwałtowny przebieg. Baterie litowo-jonowe mogą różnić się właściwościami, takimi jak np. gęstość energii, moc (Wang et al., 2019).

Każda bateria składa się z czterech głównych komponentów: katody, anody, elektrolitu oraz separatora. Nazwa baterii pochodzi na ogół od nazwy materiału, z którego wykonana jest katoda, np. LFP lub NMC. Obecnie spotykane są następujące rodzaje baterii litowo-jonowych (Jesionowski, 2023):

- **LCO (Lithium Cobalt Oxide)**, baterie litowo-kobaltowe (LiCoO_2) – stosowane w telefonach komórkowych oraz laptopach, charakteryzują się niską stabilnością termiczną,

Il. 1. Sposób działania akumulatora litowo-jonowego



Źródło: Denios (2025).

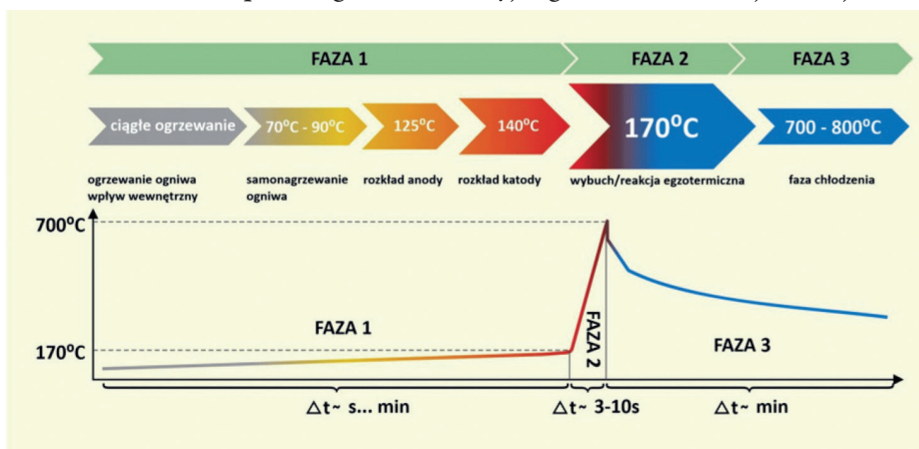
- **LMO (Lithium Manganese Oxide)**, baterie litowo-manganowe (LiMn_2O_4) – wykorzystywane do zasilania narzędzi elektrycznych, instrumentów medycznych oraz samochodów elektrycznych i hybrydowych,
- **NMC (Nickel Manganese Cobalt)**, baterie litowo-niklowo-manganowo-kobaltowe (LiNiMnCoO_2) – stosowane powszechnie do zasilania narzędzi, rowerów elektrycznych, samochodów elektrycznych czy domowych magazynów energii instalacji fotowoltaicznych,
- **LFP (Lithium Iron Phosphate)**, baterie litowo-żelazowo-fosforanowe (LiFePO_4) – stosowane w domowych magazynach energii instalacji fotowoltaicznych, samochodach elektrycznych i rowerach elektrycznych, a także jako zamienniki dla akumulatorów kwasowo-ołowiowych, mają dobrą stabilność termiczną,
- **NCA (Nickel Cobalt Aluminium)**, baterie litowo-niklowo-kobaltowo-glinowe (LiNiCoAlO_2) – charakteryzują się podobnymi właściwościami, jak LFP, wykorzystywane są w napędzie samochodów elektrycznych,
- **LTO (Lithium Titan Oxide)**, baterie litowo-tytanowe (Li_2TiO_3) – są najbezpieczniejsze spośród wszystkich obecnie znanych typów ba-

terii litowo-jonowych, mają bardzo dobre parametry pracy w niskich temperaturach, stosowane są w UPS i oświetleniu ulicznym zasilanym energią słoneczną oraz napędach lokomotyw hybrydowych.

Główne przyczyny pożarów

Ryzyko pożaru baterii litowo-jonowej wynika głównie ze zjawiska tzw. ucieczki termicznej. Jest to niekontrolowany, samonapędzający się proces gwałtownego wzrostu temperatury wewnątrz ogniwa.

II. 2. Schemat przebiegu stanu awaryjnego baterii litowo-jonowej.



Źródło: Ankowski, Majder-Łopatka i Węsierski (2025).

Ucieczka termiczna w ogniwie może mieć różne scenariusze (Ankowski, Majder-Łopatka, Węsierski, 2025):

- a) a) odgazowanie (emisja gazów bez zapłonu) – z baterii (ogniwa) wydzielają się produkty rozkładu, zjawisku towarzyszy gwizd; ze względu na skład chemiczny gazów zwykle po chwili dochodzi do zapłonu;
- b) b) płomień odrzutowy (emisja gazów z zapłonem) – mieszanina gazów wydobywająca się pod ciśnieniem spala się płomieniowo;
- c) c) flara (wyrzut iskier) – proces spalania ogniwa przebiega jak w przypadku materiałów pirotechnicznych, z wyrzutem dużej ilości iskier;

- d) d) pożar kulisty – wydzielające się palne produkty rozkładu po wymieszaniu z powietrzem tworzą mieszaninę palną, która ulega zapłonowi z opóźnieniem;
- e) e) wybuch ogniwa – ogniwo zostaje rozerwane przez gazowe produkty rozkładu.

Do zainicjowania pożaru baterii litowo-jonowych mogą prowadzić:

- a) uszkodzenia mechaniczne, takie jak zgniecenie, przebicie lub silne uderzenie baterii, które mogą doprowadzić do wewnętrznego zwarcia, inicjując ucieczkę termiczną. Aby zminimalizować ryzyko, należy unikać upuszczania, zgniatania i przebijania urządzeń z bateriami (Liu, Yin, Xu, 2016). W przypadku uszkodzenia lub objawów puchnięcia baterii, należy natychmiast zaprzestać jej używania. Stosowanie odpowiednich izolacji spełniających właściwe normy w przypadku budowania baterii we własnym zakresie, a także wykonywanie obudów na baterie/magazyny tak, aby zabezpieczyć przed uszkodzeniami mechanicznymi, pozwoli zniwelować ryzyko pożaru.
- b) przeładowanie lub zbyt szybkie ładowanie: używanie nieodpowiednich lub uszkodzonych ładowarek może prowadzić do przegrzania i niestabilności chemicznej wewnątrz ogniwa (Zhang, 2021)). W celu zminimalizowania ryzyka zawsze korzystaj z ładowarek oryginalnych lub zalecanych przez producenta, a w przypadku własnego projektu dobranej odpowiedniej ładowarki do zastosowanych ogniwa (według kart katalogowych producenta) i kabli z odpowiednimi przekrojami do prądów ładowania oraz rozładowania dedykowanych do danego urządzenia. Zarówno wysoka temperatura otoczenia (powyżej 60°C), jak i mróz mogą uszkodzić strukturę baterii i zwiększyć ryzyko awarii. Zwiększyć możemy bezpieczeństwo użytkowania poprzez niepozostawianie urządzeń z bateriami na słońcu, w nagrzanym samochodzie ani na mrozie. Baterie i urządzenia je zawierające powinny być przechowywane w suchym i chłodnym miejscu, z dala od materiałów łatwopalnych. Zanieczyszczenia lub błędy powstałe na etapie produkcji mogą tworzyć słabe punkty w strukturze ogniwa, prowadząc do zwarcia. Złączenie biegunów baterii przez metalowy

przedmiot może doprowadzić do gwałtownego przepływu prądu i przegrzania (Wang et al., 2019).

Charakterystyka pożaru baterii litowo-jonowej

Požary baterii litowo-jonowych mają gwałtowny przebieg. Gdy rozpocznie się ucieczka termiczna, temperatura wewnątrz baterii może wzrosnąć do kilkuset stopni Celsjusza w ciągu kilku sekund lub minut, prowadząc do zapłonu łatwopalnego elektrolitu. Podczas pożaru emitowane są szkodliwe substancje, takie jak tlenek węgla, cyjanowodór oraz palne gazy (np. wodór, metan, etylen) (Bugryniec et al., 2024). Wzrost ciśnienia wewnątrz obudowy baterii może prowadzić do jej rozerwania i eksplozji, rozrzucając płonące fragmenty. Pożary te są trudne do ugaszenia tradycyjnymi metodami. Woda może wchodzić w reakcję z litem, a środki gaśnicze często nie są w stanie dotrzeć do źródła reakcji wewnątrz hermetycznie zamkniętych ogniw. Nawet po pozornym ugaszeniu, reakcje chemiczne wewnątrz baterii mogą trwać, prowadząc do ponownego zapłonu po kilku minutach, a nawet godzinach (Jeon et al., 2022). Istotnym aspektem bezpieczeństwa pożarowego jest utylizacja zużytych baterii, których nie wolno wyrzucać do zwykłych śmieci. Należy je oddawać do specjalnych punktów zbiórki odpadów niebezpiecznych (NewsOnJapan, b.d.).

Statystyki KG PSP odnośnie do pożarów samochodów elektrycznych (KG PSP, 2025) wykazują:

- 2020 – wrzesień 2023: Odnotowano łącznie 99 pożarów pojazdów elektrycznych i hybrydowych. Z tej liczby 26 dotyczyło aut w pełni elektrycznych (BEV):
- 2023: straż pożarna interweniowała przy 21 pożarach aut elektrycznych.
- 2022: zarejestrowano 7 pożarów tego typu pojazdów.
- 2021: miały miejsce 2 pożary.

Na całym świecie dochodzi do wypadków związanych z systemami magazynowania energii oto kilka przykładów. Do pożaru baterii litowo-jono-

wych doszło w Jamaica w stanie Nowy Jork. Akumulator litowo-jonowy wywołał pożar, który sparaliżował na dziesięć godzin znaczną część systemu kolejowego Long Island Rail Road. Kłęby czarnego dymu unosiły się nad regionem, gdy setki strażaków walczyły z ogniem. Co było przyczyną pożaru zakładu? Okazało się, że pojedynczy akumulator litowo-jonowy zapalił śmieci, stopy papieru i tektury do recyklingu, a porywy wiatru osiągające prędkość do 60 km/h dodatkowo utrudniły akcję gaśniczą. Ugaszenie pożaru zajęło prawie cały dzień. Linie energetyczne uszkodzone przez pożar musiały zostać wymienione. W 2021 roku w opuszczonej papierni w Morris w stanie Illinois wybuchł pożar, który doprowadził do ewakuacji ponad 1000 domów. Właściciel budynku przechowywał tam baterie litowe, które planował wykorzystać do założenia firmy zajmującej się energią słoneczną o nazwie Superior Battery. Uważa się, że wyciek wody z dachu spowodował zapłon baterii, a następnie pożar rozprzestrzenił się po całym budynku. W budynku znajdowało się ponad 200 000 baterii litowych, co spowodowało reakcję łańcuchową eksplozji baterii, która przyczyniła się do pierwotnego pożaru. Władze miasta i straż pożarna nie wiedziały, że w budynku przechowywane są baterie litowo-jonowe, więc najpierw gasili pożar wodą, co jest niebezpieczne i pogorszyło sytuację. Ponieważ woda jest nieskuteczna w gaszeniu pożarów akumulatorów litowo-jonowych na dużą skalę, użyto ponad 450 kilogramów suchego środka chemicznego o nazwie Purple-K, ale to nie pomogło ugasić rozprzestrzeniającego się pożaru. Zamiast tego wpompowano suchy cement, aby przykryć płonące akumulatory warstwą o głębokości metra (ERI, 2022).

Kolejnym przykładem, jak poważne i niebezpieczne w skutkach są pożary baterii litowo-jonowych, jest pożar, który wybuchł wieczorem 26 września 2025 r. w wyniku eksplozji baterii litowo-jonowej. Sparaliżował on znaczną część południowokoreańskich usług rządowych online i sprowokował pilne działania naprawcze ze strony Seulu. Pożar w Narodowym Centrum Informatycznym w Daejeon wybuchł podczas prac konserwacyjnych i trwał prawie 22 godziny, zanim został całkowicie ugaszony 27 września około godziny 18:00 czasu lokalnego. Władze twierdzą, że incydent rozpoczął się, gdy technicy odłączyli moduł baterii UPS, aby przenieść go do piwnicy; jedno z ogniw eksplodowało, powodując niekontrolowany wzrost temperatury w szafie akumu-

latorowej. Moduły, których to dotyczyło, zostały wyprodukowane przez LG Energy Solution i – według rządowych informacji – datowane na sierpień 2014 roku, czyli ponad rok po 10-letnim okresie eksploatacji zalecanych przez producenta. Skutki pożaru były nieproporcjonalne. Władze podają, że zniszczeniu uległo 384 modułów baterii, a około 96 systemów zostało bezpośrednio uszkodzonych; łącznie 647 systemów rządowych zostało wyłączonych podczas awaryjnych wyłączeń – co stanowiło około jedną trzecią krajowych usług publicznych online. Wśród nich znalazły się mobilne uwierzytelnianie tożsamości, poczta e-mail, podpisywanie dokumentów online, usługa śledzenia GPS dla służb ratunkowych (119) oraz internetowe usługi pocztowe. Zakłócenia zmusiły niektóre instytucje publiczne do powrotu do procesów papierowych; odnotowano znaczne straty w logistyce i działalności biznesowej w całym kraju. Strażacy napotkali nietypowe ograniczenia. Woda nie może być swobodnie używana w serwerowniach z obawy przed dalszymi zniszczeniami, a pożary litu są wyjątkowo trudne do ugaszenia. Na miejsce wysłano ponad 200 strażaków i ponad 60 pojazdów; zespoły początkowo stosowały CO₂ i ograniczone opryskiwanie, a później uciekały się do metod zanurzeniowych i chłodzenia, aby kontrolować niekontrolowany wzrost temperatury bez zalewania sprzętu. Jeden pracownik obsługi technicznej doznał lekkich oparzeń; ewakuowano około 100 osób. Urzędnicy rządowi podjęli działania mające na celu ograniczenie skutków awarii. Minister Bezpieczeństwa Administracyjnego Yoon Ho-jung podniósł poziom zarządzania kryzysowego z „alarmowego” na „poważny” i zapowiedział, że priorytetem będzie przywrócenie usług o kluczowym znaczeniu dla bezpieczeństwa publicznego, mienia narodowego i gospodarki. Premier Kim Min-seok przeprosił i nakazał przyspieszenie prac naprawczych; ministerstwo poinformowało, że rozważa migrację 96 poważnie uszkodzonych systemów na platformę chmurową w Daegu, co według szacunków może potrwać kilka tygodni. Incydent wywołał szybką reakcję polityczną. Prezydent Lee Jae-myung określił to zdarzenie mianem „cyfrowego Pearl Harbor”, a Seul zobowiązał się do przyspieszenia decentralizacji centrów danych, wprowadzenia obowiązku stosowania podwójnych kopii zapasowych dla systemów krytycznych oraz zaostrzenia przepisów dotyczących bezpieczeństwa baterii litowych – w tym wprowadzenia skuteczniej-

szych systemów zarządzania bateriami, czujników termicznych i fizycznego oddzielenia punktów UPS od hal serwerowych. Międzynarodowe organizacje i grupy branżowe zwróciły na to wydarzenie uwagę: ponownie zaapelowano o zaostrzenie standardów dotyczących magazynowania energii w bateriach w infrastrukturze krytycznej. W przypadku Korei wydarzenie to podkreśla kompromis między wydajnością a odpornością w centralnie skonsolidowanych systemach cyfrowych i prawdopodobnie zmieni politykę dotyczącą centrów danych i tworzenia kopii zapasowych na lata (Shaw, 2025).

Tradycyjne metody gaszenia pożarów baterii litowo-jonowych

W ostatnich latach prowadzono testy mające ocenić działanie różnych metod oraz środków gaśniczych. Testy te były przeprowadzane przez organizacje takie jak Civil Aviation Authority (CAA), Federal Aviation Administration (FAA) oraz State Key Laboratory of Fire Science (Wang et al., 2015). Proces gaszenia pożaru wiąże się z trudnościami ze względu na skład chemiczny ogniw. Konwencjonalne środki gaśnicze nie zawsze mogą być skuteczne, a wręcz odwrotnie – mogą przyczynić się do nasilenia potencjonalnych skutków pożaru (Lesiak, Pietrzela, Mortka, 2021).

Wszystkie te metody są jednak wykorzystywane już w momencie ucieczki termicznej i pożaru ogniw litowo-jonowych, natomiast stosując automatyczne systemy gaszenia możemy zmniejszyć ryzyko pożaru i poprawić bezpieczeństwo pożarowe.

Automatyczne gaśnice dla magazynów energii

Wraz z rosnącą popularnością pojazdów elektrycznych i magazynów energii, zapewnienie skutecznej ochrony przeciwpożarowej dla baterii litowo-jonowych stało się kluczowym wyzwaniem. Ze względu na specyfikę pożarów tych urządzeń, charakteryzujących się gwałtownym przebiegiem i ryzykiem ponownego zapłonu, standardowe metody gaszenia często okazują się niewystarczające. Odpowiedzią na te zagrożenia są automatyczne systemy gaszenia, zaprojektowane specjalnie do wczesnego wykrywania i neutralizowania pożar-

rów w pakietach bateryjnych. Niektórzy producenci magazynów energii instalują w swoich magazynach systemy gaszenia, aby poprawić bezpieczeństwo urządzeń, które są montowane w różnych miejscach (Aware Fire, b.d.).

Zasada działania i kluczowe komponenty

Automatyczne systemy gaśnicze do baterii to zintegrowane rozwiązania, które łączą w sobie trzy kluczowe elementy:

- a) detekcję: Zaawansowane czujniki stale monitorują warunki wewnątrz obudowy baterii. Najczęściej stosowane są czujniki temperatury, które aktywują system po przekroczeniu określonego progu (np. 72°C). Coraz częściej wykorzystuje się również bardziej zaawansowane detektory, które potrafią wykryć wczesne oznaki awarii baterii, takie jak emisja gazów (wodór, tlenek węgla, lotne związki organiczne – VOC);
- b) aktywację: Po wykryciu zagrożenia system sterowania automatycznie uruchamia mechanizm uwalniający środek gaśniczy. Aktywacja jest natychmiastowa, co ma kluczowe znaczenie w powstrzymaniu niekontrolowanego wzrostu temperatury, znanego jako ucieczka termiczna;
- c) gaszenie: Specjalistyczny środek gaśniczy jest rozprowadzany bezpośrednio w miejscu zagrożenia, tłumiąc ogień i, co najważniejsze, chłodząc ogniwa baterii, aby zapobiec ponownemu zapłonowi.

Rodzaje środków gaśniczych

Wybór odpowiedniego środka gaśniczego jest kluczowy dla skuteczności systemu. Tradycyjne środki, takie jak proszki gaśnicze (BC, ABC) czy dwutlenek węgla (CO₂), są mniej efektywne w przypadku pożarów baterii litowo-jonowych, ponieważ nie zapewniają wystarczającego chłodzenia. Dlatego w automatycznych systemach stosuje się specjalistyczne substancje:

- aerozole kondensowane: gaszą płomień poprzez przerwanie reakcji łańcuchowej spalania. Są skuteczne w zamkniętych przestrzeniach i nie powodują szoku termicznego;

- specjalistyczne środki na bazie wody z dodatkami: zawierają dodatki chłodzące i impregnujące, które skutecznie obniżają temperaturę ogniw i tworzą warstwę izolacyjną;
- środki na bazie wermikulitu (np. LITHALEX 7): wermikulit, pod wpływem wysokiej temperatury, pęcznieje i tworzy barierę, która izoluje płonące ogniwa i pochłania ciepło;
- hydrożele: tworzą na powierzchni baterii warstwę chłodzącą i izolującą, odcinając dopływ tlenu.

Zastosowanie automatycznych systemów gaśniczych (miniaturowe urządzenie gaśnicze, generatory gaśnicze w aerozolu)

Urządzenia te cechują następujące właściwości: wysoce skuteczny środek gaśniczy, znacznie skuteczniejszy niż środki alternatywne, nietoksyczny, niekorozyjny, łatwy w instalacji – nie wymaga zbiorników, rurociągów ani kosztownej instalacji, siły roboczej, przyjazny dla środowiska. Potencjał zubożenia warstwy ozonowej (ODP) = 0, Potencjał globalnego ocieplenia (GWP) = 0, nadaje się do zamkniętych obiektów i przestrzeni lokalnych, niskie wymagania konserwacyjne, nadaje się do pożarów klasy A, B, C, E; nie uszkadza sprzętu elektronicznego ani taśm magnetycznych, kompaktowy – do 90% redukcja zajmowanej przestrzeni i masy.

Asortyment produktów Mini w aerozolu jest szeroki i wszechstronny, co pozwala na dopasowanie do każdego zastosowania. Dzięki szybkiemu czasowi reakcji, niskiemu stężeniu środka gaśniczego i bezpieczeństwu dla środowiska, generatory Mini w aerozolu mogą być szeroko stosowane w krytycznych warunkach. Mają możliwość zastosowania w szerokim spektrum branż. Generatory aerozolu zapewniają obecnie ochronę i nadają się do stosowania w: obiektach telekomunikacyjnych, pomieszczeniach magazynowych cieczy łatwopalnych, pomieszczeniach sterowania procesami, obudowach turbin, pomieszczeniach maszynowni okrętowych, elektrowniach, na sprzęcie mobil-

nym o dużej wartości, w magazynach, na małych łodziach, w obiektach przetwarzania danych, w systemach magazynowania energii i innych.

Działanie mini gaśnic/generatorów w aerozolu

W przypadku wykrycia pożaru generatory Mini Aerosol można aktywować ręcznie lub elektrycznie za pomocą odpowiedniego urządzenia wykrywającego. Generator wytwarza wyjątkowo skuteczny, ultradrobny aerozol na bazie strontu. W przeciwieństwie do systemów gazowych, które działają pod ciśnieniem, generatory aerozolu są bardzo ekonomiczne w instalacji i konserwacji. Nie wymagają zbiorników ciśnieniowych, rurociągów ani drogiej kosztów instalacji związanych z innymi systemami gaśniczymi. Zapotrzebowanie na przestrzeń i wagę jest minimalne. W przeliczeniu na masę środka gaśniczego, aerozol jest ponad dziesięciokrotnie skuteczniejszy niż obecna generacja środków zastępujących halon. Skuteczność generatorów Mini Aerosol jest wynikiem opatentowanej konstrukcji, składu aerozolu i ultradrobnych cząstek. Gaszenie odbywa się głównie poprzez interferencję między ultradrobnymi cząstkami aerozolu a wolnymi rodnikami płomienia, co przerywa rozprzestrzenianie się pożaru. Miniaturowe generatory aerozolu są praktycznie bezobsługowe i mają żywotność ponad 10 lat. W połączeniu z bardzo niskimi kosztami instalacji, czyni to z nich niezwykle ekonomiczne rozwiązanie w zakresie ochrony przeciwpożarowej.

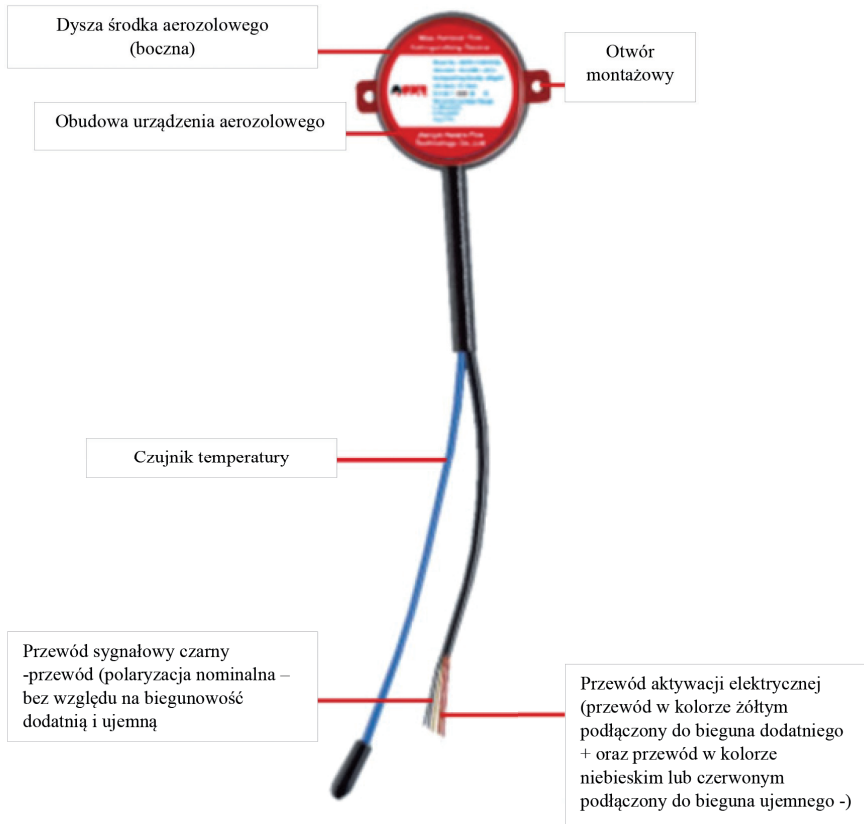
Rozwój technologii bateryjnych i rosnące wymagania w zakresie bezpieczeństwa sprawiają, że automatyczne systemy gaśnicze stają się nieodzownym elementem ochrony przeciwpożarowej w nowoczesnym świecie. Zapewniają one nie tylko ochronę mienia, ale przede wszystkim bezpieczeństwo ludzi w otoczeniu coraz powszechniej stosowanych technologii opartych na bateriach litowo-jonowych.

Warunki zasilania

Mini gaśnice/generatory, aby działać dobrze i bezpiecznie, muszą być zamontowane zgodnie z zaleceniami producenta i muszą być zasilane z ze-

wnętrznego źródła. W zależności od typu, wielkości, miejsca zastosowania gaśnicy, generatora, producent zaleca odpowiednie zasilanie, tak aby gaśnica/generator zareagował w razie pożaru.

Il. 3. Budowa i zasada działania model. QRR0.012G/S/SA



Źródło: Aware Fire (b.d.).

W przypadku modelu QRR0.012G/S/SA producent zaleca stałe zasilanie 24V DC, więc musimy dostarczyć stałe napięcie lub możemy je uzyskać poprzez zastosowanie przetwornicy prądu stałego DC/DC dającą stałe zasilanie 24V (Ejury, 2013).

W przypadku modelu AW-QH-3000E/TH producent zaleca zasilanie 24V DC, więc musimy dostarczyć stałe napięcie lub możemy je uzyskać po-

przez zastosowanie przetwornicy prądu stałego DC/DC na 24V lub też napięcie zmiennie 230V.

II. 4. Mini generator gaśniczy z aerozolem model Nr.:AW-QH-3000E/TH



Źródło: Aware Fire (b.d.).

Parametry gaszenia

Miniaturowe aerozolowe systemy tłumienia ognia, zyskujące na popularności ze względu na swoją kompaktową budowę i wysoką efektywność, stanowią nowoczesną alternatywę dla tradycyjnych systemów gaśniczych. Ich działanie opiera się na generowaniu skondensowanego aerozolu, który chemicznie przerywa łańcuchową reakcję spalania, nie redukując przy tym znacząco poziomu tlenu w chronionej przestrzeni. Poniżej przedstawiono kluczowe parametry techniczne i gaśnicze tych urządzeń.

Zasada działania i skuteczność gaśnicza

Mechanizm gaszenia polega na uwolnieniu w wyniku aktywacji termicznej lub elektrycznej stałej mieszanki chemicznej, która przekształca się w gorący, skondensowany aerozol. Cząsteczki aerozolu, głównie sole metali alkalicz-

nych, wchodzą w reakcję z wolnymi rodnikami podtrzymującymi proces palenia (O, H, OH), skutecznie je neutralizując i tym samym tłumiąc ogień na poziomie molekularnym.

Parametry gaszenia dla poszczególnych gaśnic są różne ze względu na wielkość oraz rodzaj, stąd np. mogą różnić się czasem reakcji na uwolnienie substancji gaszącej, napięcia zasilania gaśnicy, prądu potrzebnego do aktywacji, zakresu temperaturowego, w którym pracuje gaśnica. Dla porównania przedstawiono tabele z dwoma typami gaśnic: model QRR0.012G/S/SA, który może być zastosowany w małych magazynach energii, oraz Model AW-QH-3000E/TH, przeznaczony do kontenerowych magazynów energii.

Tabela 1. Parametry mini gaśnicy – Model QRR0.012G/S/SA

Pozycja	Parametr
Model Numer	QRR0.012G/S/SA
Wymiary	Φ40*H20 mm
Installation Hole Spacing	Φ4*54 mm
Środek w aerozolu ilość	12 gramów
Gęstość	100 (g/m ³)
Objętość ochronna	0.12m ³
Temperatura znamionowa przewodu termicznego	≤175°C
Czas reakcji	≤4 sekundy.
Prąd aktywacyjny	≥700 mA (DC)
Bezpieczny prąd	≤150mA (DC)
Czas aktywacji elektrycznej	≤1 Sekunda.
Temperatura otoczenia/temperatura robocza	-50°C to +95°C
Czas życia (długość życia)	10 lat
Zgodność	Może współpracować z systemami sygnalizacji pożaru

Źródło: Aware Fire (b.d.).

Tabela 2. Parametry generatora gaśniczego – Model No.:AW-QH-3000E/TH

Dawka gasząca: 3000 Gramów	Rzeczywista skuteczność gaszenia: $\leq 100\text{g}/\text{m}^3$
Objętość ochronna (m^3):30	Odpowietrznik i bezpieczna odległość od ludzi:1.5m
Czas rozładowania (S):38	Bezpieczna odległość podczas gaszenia pożaru:0.3m
Rozmiar produktu (mm): $\Phi 219*295$	Okres użytkowania: 10 lat
Waga sprzętu (kg):13.00	
Czas gaszenia: $\leq 30\text{S}$	Typ gaszenia pożaru: A, B, C, E
Temperatura wylewki: $\leq 200^\circ\text{C}$ (5 mm pozycja)	Wiele zestawów połączeń: Seria
Temperatura powierzchni: $\leq 100^\circ\text{C}$	Wspornik montażowy: Wspornik typu U
Temperatura pracy: $-40^\circ\text{C} +70^\circ\text{C}$	Wilgotność robocza: $\leq 95\%$
Napięcie rozruchowe: DC3~24v/ AC3~220V	Minimalny prąd rozruchowy: $\geq 250\text{mA}/5\text{mS}$
Maksymalny prąd bezpieczeństwa: $\leq 150\text{mA}/5\text{mins}$	Temperatura przewodu termicznego: 175°C

Źródło: Aware Fire (b.d.).

Demonstrację działania automatycznej gaśnicy w magazynie energii, w którym podczas testów doprowadzono do zjawiska ucieczki termicznej w ogniach litowo-jonowych, można obejrzeć w Internecie³.

II. 5. Przykłady montażu mini gaśnicy w magazynach energii



Źródło: Aware Fire (b.d.).

³ <https://www.youtube.com/watch?v=4XYKb402Tj0>

Il. 6. Przykłady montażu mini generatorów gaśniczych



Źródło: Aware Fire (b.d.).

Poniżej przedstawione zostały przykłady zastosowania automatycznych systemów gaszenia dla różnych rozwiązań. Do budowy magazynów wykorzystano ogniwa z odzysku, dając im drugie życie:

- magazyn na ogniwach z odzysku cylindrycznych 18650 LGMJ1 13S 30P 105 Ah
 $51 \text{ cm} \times 39 \text{ cm} \times 17 \text{ cm} = 0,033 \text{ m}^3$ dla tej kubatury zastosowano gaśnicę typu QRR0.012G/S/SA 12g środka gaśniczego;
- magazyn na ogniwach z odzysku pryzmatycznych EVE LiFePO₄ 50Ah 16S 2P 100Ah
 $58 \text{ cm} \times 32 \text{ cm} \times 25 \text{ cm} = 0,046 \text{ m}^3$ dla tej kubatury zastosowano gaśnicę typu QRR0.012G/S/SA 12g środka gaśniczego;
- magazyn kontenerowy 2MWh
 $12,2 \text{ m} \times 2,45 \text{ m} \times 4,1 \text{ m} = 120 \text{ m}^3$ dla tej kubatury zastosowano 4 szt. generatora gaśniczego AW-QH-3000E/TH.

Europejskie normy dla magazynów energii skupiają się przede wszystkim na bezpieczeństwie i wydajności, obejmując normy takie jak IEC61000-6-2/4 (dotyczące kompatybilności elektromagnetycznej polegającej na wyma-

ganiach pracy urządzenia, tak aby było odporne na zakłócenia zewnętrzne, ale również samo nie wywoływało zakłóceń), normy dla systemów zarządzania baterią (BMS) oraz normy dotyczące zapobiegania pożarom, takie jak UL9540. To norma bezpieczeństwa dla elektrochemicznych ESS, ustanowiona przez Underwriters Laboratories, niezależną organizację certyfikującą bezpieczeństwo produktów. Jej celem jest zapewnienie, że projektowanie, instalacja i użytkowanie tych systemów są bezpieczne i standardowe. Norma dotyczy technologii magazynowania energii elektrycznej, w tym akumulatorów litowo-jonowych, akumulatorów kwasowo-ołowiowych, ogniwi paliwowych, kół zamachowych i innych elektrochemicznych systemów magazynowania energii (Beny, 2024).

Polska implementuje te standardy, wprowadzając regulacje dotyczące lokalizacji magazynów, systemu rejestru danych i wymogów instalacyjnych, które często odwołują się do europejskich i międzynarodowych wymagań dotyczących bezpieczeństwa. Normy bezpieczeństwa powodują, że producenci magazynów podnoszą swoje standardy bezpieczeństwa tak, aby sprostać wymagom ciągle zmieniającego się rynku magazynowania energii.

Podsumowanie

Zastosowanie systemów automatycznego gaszenia jest jednym z kilku elementów zwiększania bezpieczeństwa pożarowego w systemach magazynowania energii. Jednak aby nie doprowadzić do pożaru, powinno się spełnić wszystkie pozostałe warunki bezpieczeństwa, by system automatycznego gaszenia zaproponowany w pracy nie musiał się uruchomić, ratując przed pożarem baterii. Podstawowym priorytetem powinny być:

- a) odpowiedni dobór ogniwi do potrzeb, czyli pojemności magazynu oraz prądu ładowania oraz rozładowania, oraz przetestowanie ogniwi pod względem spełnienia parametrów (pojemności, rezystancji wewnętrznej ogniwa) oraz grzania się podczas testów przed zmontowaniem ich w całość;
- b) odpowiednia izolacja spełniająca normy (szkło epoksydowe) i chroniąca ogniwa przed uszkodzeniami mechanicznymi oraz dobór od-

powiednich przekrojów przewodów zgodnie z tabelami przekroju przewodu (mm^2) do prądu ładowania/rozładowania (A);

- c) dobór odpowiednich złączy, bezpiecznika oraz jednej z najważniejszych rzeczy BMS – dobór odpowiedniej jakości BMS sprawia, że mamy większą możliwość nadzoru oraz monitorowania pracy magazynu poprzez ciągły wgląd z aplikacji Smart BMS, gdzie mamy również możliwość zmiany hasła z domyślnego na trudniejsze w celu zabezpieczenia cyfrowego.

Często przez sprzedawców oferowane są zestawy do samodzielnego montażu magazynów, które posiadają wszystkie części, od ogniw po BMS, izolacje, obudowę itd. Natomiast w przypadku samodzielnego wykonania obudowy oraz złożenia magazynu należy pamiętać o zachowaniu wszystkich norm i standardów spełniających bezpieczeństwo elektryczno-pożarnicze.

Nowe Standardy GB/T dla Magazynów Energii (ESS): kluczowe zmiany i wymagania

Chiny jako światowy lider w produkcji i wdrażaniu systemów magazynowania energii (ESS) wprowadziły serię nowych, zaktualizowanych norm krajowych (GB/T), które weszły w życie 1 lipca 2024 roku (MPR China Certification, 2024). Norma GB/T 19000-2016 jest chińskim odpowiednikiem międzynarodowej normy ISO 9001:2015 dotyczącej systemów zarządzania jakością. Te nowe regulacje znacząco podnoszą wymagania dotyczące bezpieczeństwa, wydajności i niezawodności bateryjnych systemów magazynowania energii (BESS). Zastępują one starsze wersje, dostosowując przepisy do szybko rozwijającej się technologii i rosnącej skali projektów. Głównym celem aktualizacji jest ujednoczenie wymagań technicznych i zwiększenie poziomu bezpieczeństwa w całym cyklu życia produktu – od projektowania i produkcji, przez transport i instalację, aż po eksploatację i recykling.

Najważniejsze nowe standardy:

- a) GB/T 36276-2023: jest to fundamentalna norma dla najpopularniejszej technologii BESS, zastępuje ona standard GB/T 36276-2018,

- b) GB/T 34131-2023: nowa, kluczowa norma określająca wymagania dla mózgu systemu bateryjnego BMS,
- c) GB/T 36558-2023: określa ogólne ramy dla integracji ESS z siecią,
- d) GB/T 36545-2023: norma dedykowana kontenerowym i innym przenośnym rozwiązaniom.

Nowe standardy wprowadzają szereg istotnych zmian, kładąc szczególny nacisk na bezpieczeństwo i wydajność.

1. Rygorystyczne testy bezpieczeństwa na poziomie ogniwa i modułu.

Ucieczka termiczna: Wprowadzono znacznie bardziej rygorystyczne testy dotyczące ucieczki termicznej. Nowe przepisy wymagają, aby w przypadku zainicjowania ucieczki termicznej w jednym ogniwie, nie dochodziło do rozprzestrzeniania się ognia lub eksplozji na cały moduł lub system. Choć najbardziej ekstremalny wymóg (2 godziny bez pożaru) dotyczy nowej normy dla pojazdów elektrycznych (GB 38031-2025), duch tych regulacji przenika do standardów ESS, wymuszając na producentach stosowanie zaawansowanych materiałów izolacyjnych i systemów chłodzenia. Zaostrzono procedury testowe dotyczące odporności na zwarcia wewnętrzne i zewnętrzne, a także na przeładowanie i nadmierne rozładowanie.

2. Zaawansowane wymagania dla systemu zarządzania baterią (BMS).

Norma GB/T 34131-2023 podnosi wymagania co do precyzji pomiarów napięcia, prądu i temperatury na poziomie ogniw. BMS musi teraz posiadać zaawansowane funkcje wczesnego ostrzegania o potencjalnych anomaliach, które mogłyby prowadzić do awarii, w tym o początkowych oznakach ucieczki termicznej. Standardy kładą większy nacisk na niezawodność i bezpieczeństwo protokołów komunikacyjnych wewnątrz systemu magazynowania. Czołowy światowy producent mikroprocesorów oraz nowej technologii tranzystorów GaN Texas Instruments stworzył projekt referencyjny w celu poprawienia monitorowania pracy akumulatora (monitorowanie każdego ogniwa pod kątem napięcia, temperatury, nadmiernego prądu ładowania, rozładowania oraz zvarciami). Firma Texas Instruments (2025) wprowadziła pierwsze wskaźniki naładowania akumulatorów oparte na algorytmie Dynamic Z-Track, który może dostosowywać się do szybko zmieniających się ob-

ciążeń i dostarczać dokładniejsze prognozy pojemności akumulatora. Według firmy modele BQ41Z90 i BQ41Z50 potrafią oszacować stan naładowania (SOC) i stan sprawności (SOH) z dokładnością do 1%, co pozwala wydłużyć czas pracy wielu urządzeń, od robotów i dronów po elektronarzędzia i rowery elektryczne, nawet o 30%. Wskaźnik naładowania akumulatora służy do szacowania SOC (pozostałej energii akumulatora w porównaniu do jego całkowitej pojemności) oraz SOH (pozostałego czasu pracy akumulatora w porównaniu do stanu sprzed zakupu) poprzez pomiar napięcia, prądu i innych parametrów w czasie rzeczywistym. Monitoruje on również rezystancję, która wpływa na niezawodność, żywotność i ogólną wydajność akumulatora. Tradycyjne metody monitorowania akumulatora najlepiej sprawdzają się jednak w scenariuszach, w których obciążenie pozostaje stałe lub zmienia się tylko nieznacznie (Morra, 2025).

3. Wydajność cykliczna i sprawność.

Nowe normy precyzyjniej definiują metody testowania żywotności cyklicznej baterii. Producenci muszą dostarczać bardziej szczegółowe dane dotyczące degradacji pojemności w czasie, co ułatwia inwestorom ocenę rzeczywistych kosztów i zwrotu z inwestycji. Podniesiono również wymagania dotyczące sprawności w obie strony (ang. *round-trip efficiency*), co promuje rozwój bardziej efektywnych systemów. Wprowadzenie szczegółowych zasad kodowania akumulatorów litowo-jonowych (nowa norma GB/T 45565-2025, która wejdzie w życie w listopadzie 2025 r.) ma na celu ułatwienie identyfikowalności i kontroli jakości na każdym etapie – od produkcji po recykling. Ponieważ Chiny są dominującą dostawcą ogniw, baterii i kompletnych systemów magazynowania energii, nowe standardy GB/T będą miały bezpośredni wpływ na produkty dostępne na całym świecie, w tym w Polsce. Dla importerów i inwestorów oznacza to, że produkty będą certyfikowane zgodnie z nowymi normami, będą oferować wyższy standard bezpieczeństwa pożarowego i elektrycznego. Standaryzowane testy zwiększą przejrzystość i porównywalność parametrów wydajnościowych oferowanych przez różnych producentów. Spełnienie bardziej rygorystycznych wymagań może wiązać się ze wzrostem kosztów produkcji, co może przełożyć się na cenę końcową systemów.

Streszczenie: W obliczu coraz większej liczby produkowanych samochodów elektrycznych, hybrydowych, magazynów energii oraz narzędzi i urządzeń zasilanych z baterii litowo-jonowych, zwiększa się również liczba ogniw dostępnych z odzysku, którym można nadać drugie życie poprzez wykorzystanie w magazynowaniu energii. Trzeba mieć na uwadze, że nie zawsze sprzedawcy oferują dobrej jakości ogniwa, dlatego ważne jest sprawdzenie ich parametrów przed podłączeniem w magazyn. Złej jakości ogniwa oraz lekceważące podejście w trakcie budowy może doprowadzić do niebezpieczeństwa pożaru. W artykule przedstawiono rozwiązanie automatycznych systemów gaszenia baterii-litowo jonowych, co może zminimalizować ryzyko rozprzestrzenienia się pożaru. Opisano również nowe metody podejścia do zwiększenia bezpieczeństwa magazynu oraz jego efektywnej pracy i zarządzania energią zgromadzoną w nim.

Abstract: With the increasing number of electric and hybrid cars, energy storage facilities, and tools and devices powered by lithium-ion batteries being produced, the number of recycled cells available for reuse in energy storage is also growing. It should be borne in mind that sellers do not always offer good quality cells, so it is important to check their parameters before connecting them to the storage facility. Poor quality cells and a careless approach during construction can lead to a fire hazard. The article presents a solution for automatic lithium-ion battery extinguishing systems, which can minimize the risk of fire spreading. It also describes new methods for increasing storage safety and its effective operation and management of the energy stored in it.

Słowa kluczowe: ryzyko, bezpieczeństwo, magazyny energii, pożar ogniw litowo-jonowych, automatyczne systemy gaszenia

Keywords: risk, safety, energy storage facilities, lithium-ion cell fires, automatic extinguishing systems

Bibliografia

- Ankowski, A., Majder-Łopatka, M., Węsierski, T. (2025). *Chemiczna elektromobilność*, <https://www.ppoz.pl/czytelnia/rozpoznawanie-zagrozen/Chemiczna-elektromobilnosc/idn:3249> (dostęp: 18.06.2025).
- Aware Fire (b.d.). <https://www.awarefire.com/> (dostęp: 5.02.2025).
- Beny (2024). *Wyjaśnienie normy UL9540: podstawowe normy bezpieczeństwa dla systemów magazynowania energii*, <https://www.beny.com/pl/ul9540-safety-standards-energy-storage-systems/> (dostęp: 10.08.2025).
- BloombergNEF (2025a). *Global Electric Vehicle Sales Set for Record-Breaking Year, Even as US Market Slows Sharply, BloombergNEF Finds*, <https://about.bnef.com/insights/clean-transport/global-electric-vehicle-sales-set-for-record-breaking-year-even-as-us-market-slows-sharply-bloombergnef-finds/> [dostęp 18.06.2025].
- BloombergNEF (2025b). *Global Energy Storage Growth Upheld by New Markets*, <https://about.bnef.com/insights/clean-energy/global-energy-storage-growth-upheld-by-new-markets/> (dostęp: 18.06.2025).
- Bugryniec, P.J., Resendiz, E.G., Nwophoke, S.M., Khanna, S., James, C., Brown, S.F. (2024). Review of Gas Emissions from Lithium-ion Battery Thermal Runaway Failure – Considering Toxic and Flammable Compounds, *Journal of Energy Storage*, 87, 111288.
- Ejury, J. (2013). Buck Converter Design, *Infineon Technologies North America (TFNA) Corn Desion Note*, 1.2013.
- ERI (2022). *The 5 Biggest Lithium Ion Battery Fires to Date*, <https://eridirect.com/blog/2022/03/the-5-biggest-lithium-ion-battery-fires-to-date/> (dostęp: 23.05.2025).
- Feng, X., Ouyang, M., Liu, X., Lu, L., Xia, Y., He, X. (2018). Thermal Runaway Mechanism of Lithium Ion Battery for Electric Vehicles: A Review, *Energy Storage Materials*, 10, 246–267.
- Jeon, M., Lee, E., Park, H., Yoon, H., Keel, S. (2022). Effect of Thermal Abuse Conditions on Thermal Runaway of NCA 18650 Cylindrical Lithium-Ion Battery, *Batteries*, 8.10, 196.
- Jesionowski, B. (2023). *Rodzaje baterii litowo-jonowych*, <https://akademia-fotowoltaiki.pl/rodzaje-baterii-litowo-jonowych/> (dostęp: 8.09.2025).
- JKBMS (2025). <https://www.jkbms.com/> (dostęp: 11.07.2025).

- KG PSP (2025). <https://www.gov.pl/web/kgpsp/interwencje-psp>.
- Lesiak, P., Pietrzela, D., Mortka, P. (2021). Methods Used to Extinguish Fires in Electric Vehicles, *Safety & Fire Technology*, 58, 38–57, <https://doi.org/10.12845/sft.58.2.2021.3>.
- Liu, B., Yin, S., Xu, J. (2016). Integrated Computation Model of Lithium-ion Battery Subject to Nail Penetration, *Applied energy*, 183, 278–289.
- Morra, J. (2025). *Predictive Battery Management Extends Lithium-Ion Lifetimes*, Electronic Design, <https://www.electronicdesign.com/technologies/power/article/55309488/electronic-design-texas-instruments-debuts-predictive-battery-monitoring-ics-for-portable-devices> (dostęp: 30.08.2025).
- MPR China Certification (2024). *New GB Standards for Battery- and Energy Storage Systems*, <https://www.china-certification.com/en/new-gb-standards-for-battery-and-energy-storage-systems/> (dostęp: 28.09.2025).
- NewsOnJapan (b.d.). Lithium-ion Battery Fires on the Rise, <https://newsonjapan.com/article/139847.php> (dostęp: 18.06.2025).
- PV Magazine (2025). *Redwood, Crusoe Deploy Second-life Batteries at AI Data Center for 63 MWh Storage*, <https://pv-magazine-usa.com/2025/06/30/redwood-crusoe-deploy-second-life-batteries-at-ai-data-center-for-63-mwh-storage/> (dostęp: 29.09.2025).
- Shaw, V. (2025). *South Korea hit by 'digital Pearl Harbor' as aging LGES battery sparks data center fire*, ESS News, <https://www.ess-news.com/2025/09/30/south-korea-hit-by-digital-pearl-harbor-as-aging-lges-battery-sparks-data-center-fire/> (dostęp: 26.06.2025).
- Texas Instruments (2025). <https://www.ti.com/tool/TIDA-010208> (dostęp: 28.08.2025).
- Ustawa z dnia 4 grudnia 2025 r. o zmianie ustawy – Prawo budowlane oraz niektórych innych ustaw (Dz.U. z 2025 r., poz. 1847).
- Wang Q., Xinyan B., Peifeng H., et al. (2015). The Fire Hazard Classification of Lithium-ion Battery, *China Fire Science and Technology Association Annual Conference*, 226–232.
- Wang, Q., Mao, B., Stolarov, S.I., Sun, J. (2019). A Review of Lithium-ion Battery Failure Mechanisms and Fire Prevention Strategies, *Progress in Energy and Combustion Science*, 73, 95–131.
- Zhang, G., Wei, X., Chen, S., Zhu, J., Han, G., Dai, H. (2021). Revealing the Impact of Slight Electrical Abuse on the Thermal Safety Characteristics for Lithium-ion Batteries, *ACS Applied Energy Materials*, 4.11, 12858–12870.