

doi:10.15199/48.2024.01.58

Wybrane aspekty bezpieczeństwa użytkowania magazynów energii w bateriach złożonych z ogniw litowo-jonowych

Streszczenie. W pracy przedstawiono przebieg procesu ucieczki termicznej i jego wpływ na zagrożenie pożarowe ogniw litowych, Wskazano na istotne różnice w przebiegu pożarów w pojazdach z napędem spalinowym oraz elektrycznym. Przedstawiono także problemy, które mogą znacznie ograniczyć produkcję i wykorzystanie baterii litowych a mianowicie trudności z recyklingiem i pozyskiwaniem litu.

Abstract. The work presents the course of the thermal runaway process and its impact on the fire hazard of lithium cells. Significant differences in the course of fires in combustion and electric vehicles are indicated. Problems that may significantly limit the production and use of lithium batteries are also presented, namely difficulties with recycling and obtaining lithium. (Selected aspects of the safety of using energy storage in batteries composed of li-ion cells).

Słowa kluczowe: proces palenia się ognia litowego, Ucieczka termiczna, bezpieczeństwo ogniw litowo jonowych, bezpieczeństwo magazynów energii.

Keywords: burning process in the Li-Ion cell, Thermal runaway, safety of lithium-ion cells, safety of energy storage.

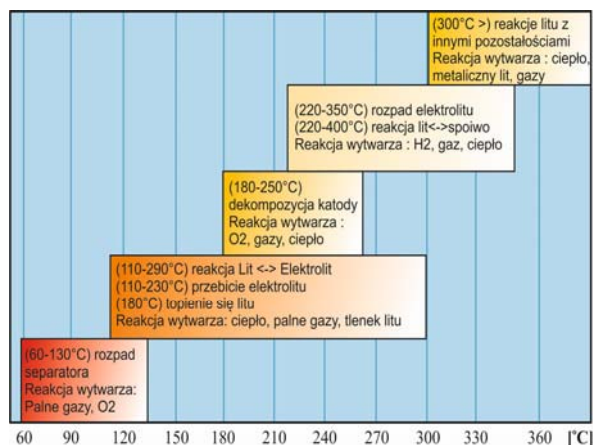
Wstęp

Posiadanie energii, a dokładniej dysponowanie nią, jest jedną z najważniejszych potrzeb człowieka. Jest ona niezbędna we wszystkich procesach wytwórczych i przetwórczych, jednym słowem warunkuje rozwój człowieka, jako gatunku, ale także egzystencję jako pojedynczej istoty. Przez tysiąclecia energię pozyskiwano w większości z przetwarzania paliw. W ostatnich czasach dominuje nurt zamiany tych źródeł na odnawialne (OZE). Niestabilność aktualnie wykorzystywanych OZE jak i zmienność zapotrzebowania powoduje konieczność magazynowania energii. Coraz bardziej znaczącym odbiorcą energii magazynowanej są samochody elektryczne (EV), ale również rozwija się zapotrzebowanie na stacjonarne lub przewożne magazyny energii (ES). Wydają się one być znakomitym rozwiązaniem, ponieważ pozwalają na łagodzenie pików zapotrzebowania na energię. Pozwalają także korzystać z OZE zgromadzonej w okresach jej intensywnego występowania w momentach obniżonej produkcji lub wręcz zaniku. Wydaje się wówczas, że posiadanie jak największego magazynu byłoby rozwiązaniem bardzo korzystnym. Aktualnie najlepsze właściwości pod względem liczby cykli ładowania i energii właściwej, spośród opracowań będących na rynku, posiadają baterie litowe. Wraz z ogromnym wzrostem zarówno liczby różnorodnych zastosowań, a co za tym idzie wielkości produkcji tych ogniw, zaczęły wychodzić na jaw coraz większe niedogodności związane z nimi. W pracy tej zostaną omówione trzy zagadnienia mające ogromne znaczenie mogące znacząco zmniejszyć produkcję i rolę ogniw litowych. Należą do nich: niebezpieczeństwa związane z wybuchem pożaru ogniw, a następnie jego ugaszenia, znaczące problemy i wysokie koszty utylizacji ogniw wycofanych z użycia, oraz ogromne koszty ekologiczne związane z wydobyciem litu i zagrażającym jego niedoborem.

Przebieg palenia się ognia litowego

Jedną z charakterystycznych cech ogniw litowo jonowych szczególnie pierwszych generacji jest możliwość wystąpienia zjawiska zwanego ucieczką termiczną (ang. thermal runaway-TR) wydzielanego ciepła. Jego istotą jest niekontrolowany lawinowy wzrost temperatury oraz ilości wydzielanego ciepła w wyniku spalania i co bardzo istotne nawet bez dostępu powietrza z zewnątrz. W efekcie następuje prawie całkowite wypalenie ognia połączone z wyrzutem pozostałości na zewnątrz. Istnieje szereg badań

związanych z tym procesem [1,2]. Na rysunku 1 zilustrowano kolejne fazy procesu TR.

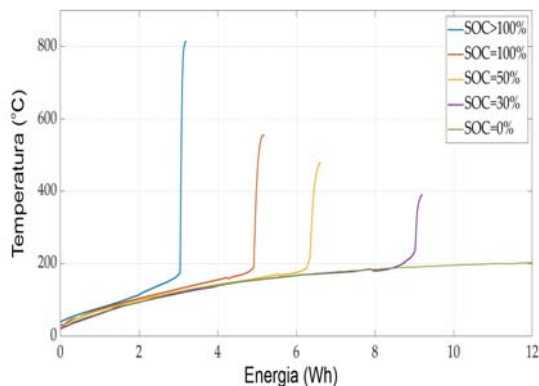


Rys.1. Przebieg procesu ucieczki termicznej [3]

Przebieg procesu palenia się nie jest jednak powtarzalny [4,5]. Jak wykazały badania autorów [6,7] jest on silnie zależny od stanu naładowania ognia. W tym celu wykonano serię eksperymentów polegających na ogrzewaniu ognia poprzez dostarczanie energii ze stałą mocą do specjalnie zbudowanego zespołu zawierającego ogniwo oraz grzałkę elektryczną dobrze odizolowanego termicznie od otoczenia i dodatkowo umieszczonego w kalorymtrze. Obserwowano zmiany temperatury ognia w kilku punktach, oraz otoczenia w kalorymtrze. Dodatkowo ważono ogniwo przed eksperymentem i pozostałości po przeprowadzeniu eksperymentu. Wyniki zilustrowano na rysunku 2 na którym przedstawiono zależność temperatury ognia od ilości dostarczonej do zespołu ognia energii, przy różnych stanach naładowania. Do badań wykorzystano fabrycznie nowe ogniwa typu INR21700.

Z wykresów przedstawionych na rysunku 2 wynika jednoznacznie, że im mocniej naładowane jest ogniwo tym mniej energii zewnętrznej jest potrzebne do zainicjowania zjawiska TR. Obserwacja organoleptyczna dodatkowo wykazała, że w wysokim stanie naładowania przebieg spalania jest znacznie bardziej gwałtowny, a także następuje zmiana składu chemicznego spalin, o czym świadczy pojawienie się dymu o barwie czarnej. W powiązaniu z faktem, że temperatura płaszcza ognia wynosiła wtedy ponad 800°C, czyli zbliżonej do temperatury

topnienia miedzi, można przyjąć, że następuje spalanie folii miedzianej będącej częścią ogniwa i czarna barwa dymu jest wynikiem zawartości oparów tlenu miedzi. Przy spalaniu ogniw mniej naładowanych znajdowano w pozostałościach po spalonym ogniwie albo duże fragmenty folii miedzianej albo strzępy tejże jednak w formie ciała stałego, kolor spalin był wówczas biały.



Rys.2. Zależność temperatury zapłonu ogniwa od dostarczonej energii

Kolejna obserwacja to wykazanie, że w trakcie spalania znacząca część materiałów składowych w przypadku wybuchu zostaje uwolniona do atmosfery w postaci gazowej lub dymu. Przykładowo z ogniwa w pełni naładowanego o masie około 57g pozostawało 19g głównie w postaci wypalanej skorupy, pozostała część masy opuszczała obudowę w postaci dymu lub pyłów zawieszonych.

Oprócz podatności pojedynczego ogniwa na zapłon, istotna jest zdolność propagacji pożaru z ogniwa na ogniwo wewnątrz modułu baterii, a następnie pomiędzy modułami i kolejno z baterii na pozostałą część obiektu zawierającego baterię. Mimo iż temat ten jest intensywnie badany rezultaty badań są raczej mało znane tym bardziej, że wyniki są ściśle zależne od konstrukcji urządzenia jako całości. To z kolei wiąże się z badaniami producentów, którzy nie zawsze są skłonni prezentować najnowsze wyniki.

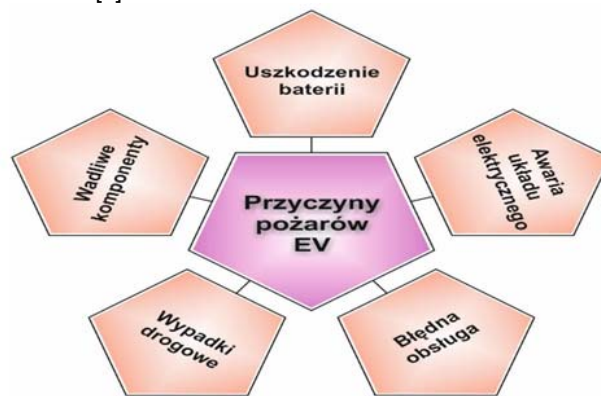
Pożary

Pojawienie się ognia w urządzeniu elektrycznym zawsze rodzi niebezpieczeństwo wywołania pożaru, który może się rozprzestrzenić na sąsiednie sprzęty, urządzenia, budynki i środki transportu lądowe, wodne, a także powietrzne. Skala tych zdarzeń nie jest znana powszechnie, szczególnie jeżeli dotyczą one obiektów niewielkich. Dla przykładu tylko na terenie Londynu w przeciągu pierwszych 8 miesięcy 2023 roku zarejestrowano 137 pożarów rowerów elektrycznych, w których śmierć poniosło 3 osoby, a 50 odniosło obrażenia [8]. Każdy z takich pożarów angażował ekipy ratownicze w liczbie od 15 do 40 osób. Z reguły zdarzenia takie budzą duże zainteresowanie i pojawia się wiele opinii z sobą często sprzecznych.

Wydaje się, że najczęściej występującymi problemami w odniesieniu do baterii litowych są: przegrzanie i zapłon, wybuch, wyciek elektrolitu, degradacja pojemności, niewłaściwe użytkowanie- w sensie zarówno obciążania jak i ładowania [2,3]. Opracowano szereg metod ochrony przed pożarem, opierających się o systemy zarządzania baterią (BMS). Eliminują one większość zagrożeń jednak jak wynika z praktyki nie są w stanie zapewnić pełnej ochrony wszystkich ogniw. Przyczyna tego faktu może tkwić po części w ewidentnym lekceważeniu zasad obsługi ogniw szczególnie w zakresie ładowania i przestrzegania

właściwych warunków eksploatacji (np. wilgoć, zalanie, przegrzanie). W wielu wypadkach jednak można stwierdzić niedostatecznie rozpoznany stan techniczny ogniwa i uznanie go przez BMS za zdatne i obsługiwanie go w dalszym ciągu, mimo iż powinno już być wyłączone z eksploatacji.

Temat pożarów samochodów elektrycznych budzi zainteresowanie szczególnie ze względu na ich coraz większą powszechność, a z drugiej strony obawy co do bezpieczeństwa. Najważniejsze przyczyny powstania pożarów wymieniono na diagramie przedstawionym na rysunku 3 [3].



Rys. 3. Najczęstsze przyczyny pożarów pojazdów elektrycznych

Można stwierdzić że istnieją znaczące różnice pomiędzy pożarem samochodu elektrycznego (EV) a pożarem samochodu spalinowego (SS).

Ilość paliwa w osobowym samochodzie spalinowym posiada masę rzędu kilkudziesięciu kg. Masa akumulatorów w EV to kilkaset kg, a nawet ponad 1000 w niektórych typach pojazdów. Z tego to około 3/4 stanowi materiał mogący ulec spaleniowi nawet w formie wybuchowej.

Paliwo w SS nie zawiera utleniacza w związku z tym odcięcie dopływu tlenu np. pianą gaśniczą bądź za pomocą CO₂ gasi pożar. W przypadku EV składniki zawarte wewnątrz ogniwa litowo-jonowych podtrzymują pożar i nawet po odcięciu dopływu powietrza z zewnątrz możliwe jest dalsze spalanie w tym wybuchowe.

Produktem spalania benzyny lub oleju napędowego w powietrzu jest przede wszystkim dwutlenek węgla i para wodna, oraz relatywnie niewielkie ilości tlenków siarki i azotu. Zawartość metali ciężkich i innych pierwiastków jest śladowa. W wyniku wypalenia zawartości akumulatorów litowo-jonowych pojawiają się związki litu, kadmu, fluoru fosforu i innych pierwiastków wysoce toksycznych i to w ilościach od kilku do kilkudziesięciu kilogramów. Dobra analiza wpływu spalania ogniwa litowych na środowisko została przedstawiona w [9].

Gaszenie EV powinno przebiegać w odzieży całkowicie ognioodpornej i z pełnym zabezpieczeniem dróg oddechowych. W przypadku służb profesjonalnych jest to zapewnione, natomiast próba gaszenia pojazdu EV przez osoby przygodne może spowodować dodatkowo silne zatrucie z poparzeniem chemicznym dróg oddechowych.

Do zgaszenia SS wystarcza zwykle około 2 tysiące litrów wody gaśniczej. W przypadku EV wymagane jest, ze względu na konieczność długotrwałego chłodzenia, ponad 5 razy więcej.

Ilość ścieków po zgaszeniu pojazdu elektrycznego jest duża i są to ścieki wysoce reaktywne. Pewnym remedium na te problemy jest umieszczanie płonącego pojazdu EV lub zagrożonego pożarem w kontenerze gaśniczym (o ile służby ratownicze takim kontenerem w danym przypadku dysponują i o ile to jest jeszcze możliwe), a następnie

zatapianie go. Problem utylizacji ścieków pozostaje, z tym, że sytuacja jest o tyle lepsza, że ścieki nie spływają do otoczenia, a są zamknięte w kontenerze wraz z wrakiem.

Pożary SS mogą mieć różną skalę, a do pożaru zbiornika paliwa dochodzi w nie więcej niż 50% przypadków, wiele jest pożarów mniejszych. Określenie zakończenia pożaru jest relatywnie proste dla doświadczonych ekip. Nawet nie tylko pożary ale również inne uszkodzenia EV niosą z sobą ryzyko posiadania wewnątrz potencjalnego źródła ognia i powinny być traktowane z dużą ostrożnością, szczególnie gdy nastąpiły deformacje przestrzeni zajmowanych przez baterie. Prowadzi to do decyzji o zatopieniu często podejmowanych na wyrost.

Ilość wydzielanej energii cieplnej w przypadku pożaru EV jest większa (choćby ze względu na wskazaną wyżej ilość materiału palnego) co stwarza szczególne problemy w przypadku gaszenia w przestrzeniach zamkniętych np. w garażu podziemnym. Skutkiem tego może być znaczące podniesienie temperatury otoczenia, z powodu ograniczenia ulotu energii poprzez konwekcję. W wyniku tego zjawiska może nastąpić lawinowy zapłon kolejnych pojazdów. Jest to szczególnie groźne w przypadku statków samochodowców, parkingów wielopiętrowych w tym podziemnych stacji ładowania. Ustawienie obok siebie kilku pojazdów w trakcie ładowania dużym prądem powoduje silne rozgrzanie się baterii ale w zakresie dopuszczalnym. Pojawienie się w takiej sytuacji dodatkowej porcji ciepła z zewnątrz, z pojazdu uszkodzonego powoduje przekroczenie wartości dopuszczalnych temperatury i mimo iż system BMS w pojeździe zdającym zareaguje odcięciem zasilania, może być za późno. Kolejny pojazd ulegnie zapłonowi. Przykład takiego zdarzenia pokazano na zdjęciach przedstawionych poniżej na rysunku 4 [10].



Rys. 4. Pożar stacji ładowania autobusów

Pojawienie się magazynów elektrycznych niesie ze sobą podobne problemy jak dla EV. Różnice polegają na tym, że zestawy baterii w magazynach energii ES są zdecydowanie większe niż w EV. Pogłębia to problemy związane z ryzykiem pożaru ale z drugiej strony, na ogół, ES nie są przemieszczane, a przez to narażone na wypadki komunikacyjne.

Utylizacja

W raporcie Brytyjskiej firmy Thatcham Research wskazano, że „brak dokładnych informacji na temat naprawy lub diagnostyki powypadkowej pojazdów elektrycznych stanowi bardzo duże wyzwanie dla ubezpieczycieli [11]. Niestety kończy się na tym, że firmy muszą wydawać polecenia utylizowania takich samochodów, nawet jeśli są one nieznacznie uszkodzone. W tym samym raporcie stwierdzono, że prawdopodobieństwo uszkodzenia akumulatora wysoko napięciowego (HV) wynosi w przypadku jednostrefowego uszkodzenia nadwozia od 1,5% do 7,5%. Przy uszkodzeniu w kilku strefach, wynosi od 25% do 35%. Uszkodzenie podwozia to około 85% prawdopodobieństwa uszkodzenia akumulatora HV.

Jednocześnie ten sam raport [11] stwierdza, że koszty napraw akumulatora są bardzo wysokie i w przypadku jego uszkodzenia już po około roku od pierwszej sprzedaży naprawa pojazdu jest nieopłacalna. Tym samym koszty ubezpieczeń samochodów elektrycznych znacząco rosną wraz z ilością samochodów przeznaczonych do złomowania. Istnieją już ogromne parkingi zawierające po kilkadziesiąt tysięcy przeznaczonych do utylizacji, której jednak nie przeprowadza się, ze względu na jej wysoki koszt i relatywnie niewielki zysk wynikający z odzyskanych materiałów.

Problemy z zasobami litu

Szacunkowa zawartość litu w skorupie ziemskiej to 0,002%. Jest to ilość stosunkowo niewielka. Wydobycie odbywa się z solanek często też ze źródeł geotermalnych, litu poprzez wyplukiwanie ekstrakcją odparowywanie i osadzanie, ze złóż rudy spodumenu, poprzez wydobywanie i przeróbkę chemiczną rudy w celu wytworzenia soli litu. Inną metodą pozyskania litu jest recykling zużytych baterii litowych. Główne metody recyklingu to: kruszenie i sortowanie na poszczególne składniki, hydrometalurgia, pirometalurgia, elektrokataliza, procesy mikrofalowe oraz procesy biologiczne wykorzystujące mikroorganizmy wiążące lit. Mimo iż recykling jest najbardziej zbliżony do metod zrównoważonego rozwoju, w chwili obecnej pozyskiwanie litu tą drogą jest relatywnie małe. Wynika to z wysokich kosztów stosowanych procesów. Metody popularne, takie jak wydobywanie z rudy bądź z solanek niosą jednak ogromne szkody środowiskowe, a ponadto mimo ciągłych intensywnych poszukiwań i znajdowania kolejnych zasobów, udokumentowane złoża są zbyt małe jak na przewidywane potrzeby.

W roku 2021 zużycie litu na świecie wyniosło 540 tys. ton. Światowe Forum Ekonomiczne podało prognozę, że w 2030 r. zapotrzebowanie na ten pierwiastek sięgnie 3 mln ton. W Chinach zużycie litu na przestrzeni lat 2023 – 2032 wzrośnie o 20,4% jednak produkcja własna litu wzrośnie zaledwie o 6%, tym samym wystąpi ogromna presja na światowy rynek litu ze strony producentów w tym chińskich. Wiąże się to z niezbędnymi inwestycjami. Według Benchmark Mineral Intelligence niezbędne nakłady dla zapewnienia popytu na lit do 2030r. są oceniane na 581 mld USD. To z kolei przełoży się na ceny litu, które najprawdopodobniej poważnie wzrosną. W efekcie końcowym jedną z barier dalszego rozwoju ogniw litowo-jonowych może się stać cena materiałów surowych.

Wnioski

Wobec faktu drastycznego wzrostu cen litu rozsądnym rozwiązaniem jest poszukiwanie innych rozwiązań w dziedzinie chemii ogniw. Propozycji jest kilka, mianowicie pojawiają się informacje o wykorzystaniu wapnia, sodu, glinu i innych metali w miejsce litu do budowy ogniw. W wielu przypadkach w tym EV zastąpienie baterii litowych

może być trudne ze względu na osiągnięcie aktualnie wysokiej gęstości energii w pojedynczym ogniwie, jednak w przypadku ES presja na ten parametr jest mniejsza, a większą rolę odgrywa zdolność do wielokrotnego ładowania bez dużej utraty pojemności i ogólnego pogorszenia stanu ogniwa. Stąd też obserwowane jest stosowanie np. akumulatorów litowo-żelazowo-manganowych mających mniejszą gęstość energii lecz znacznie bezpieczniejszych w użyciu i wymagających mniej litu. W efekcie nie można zakładać, że rozwój baterii litowo-jonowych jest kierunkiem wyłącznym. Wobec istniejących wad możliwe jest ich wyparcie przez kolejne generacje ogniw w tym nie zawierających litu.

Problem wysokiej palności akumulatorów litowo-jonowych kieruje prace badawcze wielu zespołów w stronę budowy ogniw z stałym elektrolitem, znacznie mniej podatnych na zapłon. Stały elektrolit utrudnia także tworzenie się dendrytów litowych odpowiedzialnych za samorzutnie powstające zwarcia wewnętrzne. Istnieje wiele doniesień na ten temat, jednak brak jest aktualnie rozwiązań rynkowych, pozwalających na wdrożenie produkcji masowej.

Propagacja pożaru pomiędzy ogniwami jest często wynikiem zbyt późnego zarejestrowania stanu przegrzania pojedynczego ogniwa przez BMS i brak możliwości jego odłączenia od pozostałych ogniw. Wynika to z „oszczędności” w budowie BMS i braku kontroli temperatury każdego pojedynczego ogniwa. Wiele rozwiązań urządzeń znajdujących się na rynku, posiada znacznie mniej czujników temperatury w module aniżeli ogniw, i w ogóle nie posiada układów odłączających pojedyncze ogniwa. Zabezpieczenie wyłącza cały moduł. Tym samym nie ma możliwości reakcji odpowiednio wcześniejszej. Ponadto brak jest informacji co do przebiegu zmian temperatury pojedynczych ogniw. Utrudnia to diagnozę modułu. Opracowanie bardziej rozbudowanych konstrukcji BMS, pozwoliłoby na strefową kontrolę baterii z możliwością odłączania pojedynczych słabych ogniw. Kolejnym pożytkiem płynącym z takiej budowy BMS byłoby wskazanie w fazie demontażu ogniw, tych które w swojej historii wykazały niedomagania i w ten sposób oddzielenie ich od ogniw pozostających w stanie zdatnym. Te z kolei można by skierować na rynek wtórny, do produkcji mniej wymagających urządzeń. Tym samym znacząca część ogniw uzyskiwałaby niejako „drugie życie”, znacząco zmniejszając liczbę ogniw poddawanych recyklingowi bądź utylizowanych w inny sposób.

Postulat rozbudowy BMS do poziomu dokładnej diagnostyki pojedynczego ogniwa jest obowiązujący w szczególności w dużych bateriach obejmujących po kilkaset pojedynczych ogniw w jednej i ich zespołach, w tym w EV i ES. Poprawiłoby to wiedzę o stanie magazynu energii z łatwą możliwością wyodrębnienia elementów uszkodzonych nawet po wypadku.

Kolejny postulat konstrukcyjny to budowa baterii z możliwością wymiany modułów czyli baterii rozbieralnych. Budowa taka w sposób znaczący umożliwiłaby odbudowę pojazdów przeznaczonych do skasowania ze względu na uszkodzony akumulator HV, ponieważ powodowałoby to zmniejszenie kosztów napraw uszkodzeń układu elektrycznego.

Zjawisko pożarów grup pojazdów elektrycznych w trakcie ładowania można ograniczyć poprzez separację pojazdów w wyniku wyznaczenia odpowiednio dużych odstępów pomiędzy pojazdami ładowanymi na wolnym powietrzu. W razie braku miejsca poszczególne stanowiska

ładowania powinny być odgródzone ściankami ognioodpornymi, W razie pożaru jednego pojazdu zmniejszona by była możliwość przerzucania się ognia na kolejne pojazdy.

Lokowanie urządzeń ładujących w garażach podziemnych jest zwiększaniem ryzyka dla całego budynku, gdyż wiele z pożarów EV było inicjowanych w trakcie ładowania.

Transport dużych ilości EV drogą morską powinien odbywać się w stanie rozładowanym do granic możliwości, tak by w razie pożaru ograniczyć palność pojazdu i utrudnić propagację ognia.

Magazyny energii winny być lokowane w lekkich budynkach wolnostojących i nawet duże magazyny powinny być sekcjonowane na oddzielne obiekty, tak by w razie pożaru uniknąć efektu lawinowego. We wnętrzu magazynów powinny być instalowane czujniki wykrywające śladowe ilości gazów resztkowych pojawiających się w fazie przegrzania ogniwa [12]. W razie wykrycia takich śladów, w połączeniu z systemami BMS, winna być natychmiast wdrażana diagnostyka wszystkich modułów z wskazaniem uszkodzonego i co istotne możliwością jego rozładowania awaryjnego.

Autorzy: dr inż. Andrzej Erd, Uniwersytet Radomski, Wydział Transportu Elektrotechniki i Informatyki, ul. Malczewskiego 29, 26-600 Radom, E-mail: a.erd@uthrad.pl, dr. hab. inż. Tomasz Ciszewski, prof. URad, Uniwersytet Radomski, Wydział Transportu Elektrotechniki i Informatyki, ul. Malczewskiego 29, 26-600 Radom, E-mail: t.ciszewski@uthrad.pl

LITERATURA

- [1] Liu, X.; Ren, D.; Hsu, H.; Feng, X.; Xu, G.-L.; Zhuang, M.; Gao, H.; Lu, L.; Han, X.; Chu, Z.; et al., Thermal Runaway of Lithium-Ion Batteries without Internal Short Circuit, *Joule*, (2018), 2, 2047–2064
- [2] Sun P., Bisschop R., Huichang N.; Electric vehicle fire safety: a review of the challenges and solutions; *Fire Technology Springer*, (2020) 56, 1361–1410
- [3] Erd A., Stokłosa J., Energy Dependencies in Li-Ion Cells and Their Influence on the Safety of Electric Motor Vehicles and Other Large Battery Packs, *Energies* (2020), 13, 6738
- [4] Ribière, P., Grugeon, S.; Morcrette, M.; Boyanov, S.; Laruelle, S.; Marlair, G. Investigation on the fire-induced hazards of Li-ion battery cells by fire calorimetry, *Energy & Environmental Science*, (2012), 5, 5271–5280
- [5] Zhang L., Yang S., Liu L., Zhao P., Cell-to-cell variability in Li-ion battery thermal runaway: Experimental testing, statistical analysis, and kinetic modeling, *Journal of Energy Storage*, (2022), 56 Part B
- [6] Erd A.; Stan naładowania ogniwa litowego i jego wpływ na zapłon oraz przebieg procesu palenia, *Przegląd Elektrotechniczny*, 98 (2022), nr 12, 289-293
- [7] Erd A., Ciszewski T., The Dependence of the Burning Process and Ignition Temperature of a Lithium Cell on Its State of Charge, *Sensors*, (2023), 23(2), 753
- [8] <https://news.sky.com/story/food-delivery-driver-suffers-life-changing-injuries-from-e-bike-fire-12964516>, odsłona 10.09.23
- [9] Held M., Tuchschnid M., Zennegg, Figi, R., Schreiner i inni, Thermal runaway and fire of electric vehicle lithium-ion battery and contamination of infrastructure facility, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 165, (2022)
- [10] Electric bus burst in to flames, sets nearby vehicles on fire; [Youtube.com/watch?v=T71cVhxG_v4](https://www.youtube.com/watch?v=T71cVhxG_v4), odsłona 12.04.2023
- [11] <https://www.thatcham.org/thatcham-research-innovate-uk-bev-report-2023/> odsłona 10.09.2023
- [12] Jak kontrolować zagrożenie pożarowe w magazynach energii? *ElektroInfo* (2023), 1-2, 65-67