

Problemy w funkcjonowaniu akumulatorów litowo-jonowych w pojazdach elektrycznych oraz sposoby ich zapobiegania

Streszczenie. W artykule opisano problemy dotyczące akumulatorów litowo-jonowych, jakie mogą wystąpić podczas eksploatacji pojazdów elektrycznych. Wyróżniono trzy rodzaje problemów akumulatora, a także przedstawiono ich przyczyny, skutki i wzajemne oddziaływanie. Opisano, jak akumulatory są zabezpieczone przed tymi problemami poprzez odpowiednią konstrukcję oraz implementację funkcji w systemie BMS. Przybliżono również główne wymogi, jakie muszą spełniać akumulatory w pojazdach elektrycznych, aby zapewnić bezpieczeństwo użytkowników.

Abstract. The article describes the problems against which lithium-ion batteries in electric vehicles must be protected. Three types of battery problems are distinguished: causes, effects and their interaction. It describes how batteries are protected against these problems through proper design and implementation of functions in the BMS. The main requirements that batteries in electric vehicles must meet to ensure user safety are also outlined. (Issues in the functioning of lithium-ion batteries in electric vehicles and the methods of prevention).

Słowa kluczowe: akumulatory litowo-jonowe, pojazdy elektryczne, problemy akumulatorów, bezpieczeństwo

Keywords: lithium-ion batteries, battery electric vehicles, battery issues, safety

Wstęp

Rynek pojazdów elektrycznych jest zdominowany przez akumulatory litowo-jonowe (Li-ion) jako systemy magazynowania energii. Praca ogniwa Li-ion wiąże się z generowaniem znacznej ilości ciepła wynikających z prawa Joule'a oraz uwalniania energii chemicznej. Ciepło to musi być efektywnie rozpraszane, aby spełnić wymagania dotyczące bezpieczeństwa. Istnieją cztery główne typy konstrukcji ogniw, które różnią się m.in. pod względem odprowadzania ciepła, a tym samym ryzyka bezpieczeństwa. Ogniwa guzikowe są głównie używane do testów w skali laboratoryjnej i nie są stosowane w pojazdach. Ogniwa cylindryczne są najlepszą opcją pod względem odprowadzania ciepła, łatwo się je produkuje i zapewniają dobrą stabilność mechaniczną. Jednak główną ich wadą jest niska gęstość energii. Często stosowane w pojazdach elektrycznych są ogniwa kieszeniowe (pouch), które oferują dużą elastyczność. Ich gęstość energii w przeliczeniu na objętość jest zwiększona dzięki lepszemu upakowaniu. Problemem ogniw w formie pouch jest to, że ich obudowa kompozytowa może łatwo ulec deformacji. Ostatnim typem są ogniwa pryzmatyczne, które mogą zapewnić najwyższe pojemności na poziomie ogniwa. W tym przypadku obudowa jest wytrzymała mechanicznie, podobnie jak w ogniwach cylindrycznych, jednak produkcja jest bardziej skomplikowana. Pod względem bezpieczeństwa, transportu cieplnego i gęstości upakowania, ogniwa pryzmatyczne można uznać za rozwiązanie pośrednie między ogniwami w formie pouch, a cylindrycznymi.

Zarówno ogniwa w cylindryczne, kieszeniowe, jak i pryzmatyczne są wykorzystywane do zasilania pojazdów elektrycznych. Pojedyncze ogniwa połączone szeregowo i równolegle tworzą system baterii. Wyzwaniem jest połączenie setek lub tysięcy pojedynczych ogniw w cały bezpieczny system. Projektując pakiety producenci napotykać mnóstwo problemów, którym muszą przeciwdziałać.

Akumulator, jako złożony układ elektrochemiczny, jest podatny na różnorodne problemy przed którymi musi zostać zabezpieczony. Problemy występujące w akumulatorach trakcyjnych pojazdów elektrycznych dzieli się na usterki i awarie. Usterka to zazwyczaj mniejsze uszkodzenie lub nieprawidłowość w funkcjonowaniu akumulatora, które nie powoduje natychmiastowego przerwania pracy. Awaria jest to poważne uszkodzenie akumulatora, które prowadzi do

całkowitej lub częściowej utraty jego funkcji. W sytuacji awarii zazwyczaj konieczna jest natychmiastowa naprawa lub wymiana uszkodzonych elementów [1,2].

Jeśli błędy wykryje się wcześniej i wdroży odpowiednie środki zaradcze, można uniknąć poważnej awarii, a także zmniejszyć straty materialne i zwiększyć bezpieczeństwo podróżujących pasażerów. Dlatego dokładna i efektywna diagnostyka błędów akumulatora jest istotnym zagadnieniem nowoczesnych pojazdów elektrycznych [3].

Wymagania dotyczące bezpieczeństwa akumulatorów

Światowe Forum Harmonizacji Pojazdów (WP 29), działające w ramach Europejskiej Komisji Gospodarczej Organizacji Narodów Zjednoczonych (UNECE), pracuje nad ustanawianiem globalnie zharmonizowanych przepisów dotyczących pojazdów w celu zwiększenia bezpieczeństwa na drogach. Przepisy są obecnie stosowane w 62 krajach na świecie, w tym w Unii Europejskiej, Japonii, Rosji i Australii. Producenci pojazdów, aby uzyskać homologację pojazdu i móc wprowadzić go na rynek muszą spełnić około 130 szczegółowych przepisów dotyczących różnych aspektów pojazdu [4]. Wśród nich są wymagania ECE-R10 oraz ECE-R100 dotyczące akumulatorów w pojazdach elektrycznych. ECE-R10 stanowi zbiór przepisów regulujących zachowanie kompatybilności elektromagnetycznej urządzeń i instalacji zainstalowanych w pojeździe (w tym akumulatorów). ECE-R100 w dwóch częściach reguluje kwestie bezpieczeństwa pojazdów kategorii M i N wyposażonych w elektryczny układ napędowy, z wyłączeniem pojazdów połączonych na stałe z siecią przesyłową oraz układu magazynowania energii elektrycznej w tych pojazdach [5,6]. W części pierwszej części regulacji ECE-R100 zawarto szczegółowe wymagania dotyczące bezpieczeństwa elektrycznego pojazdu poprzez określenie wymagań dotyczących ochrony przed porażeniem prądem elektrycznym, ochrony przed kontaktem bezpośrednim i pośrednim oraz pomiaru rezystancji izolacji [6]. Część druga niniejszej regulacji obejmuje szczegółowe kryteria, które mają na celu zapewnienie, że akumulatory są zaprojektowane i wykonane w sposób minimalizujący ryzyko wystąpienia awarii i zapewniający bezpieczeństwo zarówno dla pasażerów, jak i innych uczestników ruchu drogowego. W tym celu w załącznikach do regulacji zdefiniowano szczegółowe procedury testów, jakie musi przejść akumulator. Wśród opisanych procedur znajdują się badania mechaniczne, takie jak badania wibracyjne sprawdzające

poziom bezpieczeństwa eksploatacji akumulatora pod działaniem wibracji, na które będzie prawdopodobnie narażony w warunkach normalnego użytkowania pojazdu. Regulamin nakłada także wymaganie przeprowadzenia badań odporności na wstrząsy mechaniczne oraz integralność mechaniczną w celu sprawdzenia bezpieczeństwa pojazdu w przypadku kolizji. Akumulator musi również zostać zbadany pod kątem termicznym poprzez sprawdzenie odporności na nagłe zmiany temperatury oraz zabezpieczenie przed wewnętrznym przegrzaniem podczas pracy układu. Dodatkowo wymagane jest sprawdzenie odporności pojazdu na działanie ognia z zewnątrz, spowodowanego np. wyciekami paliwa z pojazdu (w tym pojazdu znajdującego się w pobliżu pojazdu z akumulatorem). Regulacja R100 nakłada obowiązek przeprowadzenia badań mających na celu sprawdzenie skuteczności zabezpieczenia akumulatora przed zwarcieniem, przed nadmiernym naładowaniem lub rozładowaniem, przeciążeniem, zwarcieniem czy też by uchronić akumulator przed konsekwencjami wywołanymi tymi zdarzeniami. Akumulator przejdzie pozytywnie testy tylko jeżeli w ich wyniku nie dojdzie m.in. do wycieku elektrolitu, pęknięcia, odgazowania, pojawienia się ognia czy wybuchu [5].

Rewizja 3 regulaminu nr 100 opublikowana w 2021 nakłada wymogi dotyczące informowania kierowcy pojazdu o potencjalnych zagrożeniach, na przykład o przegrzaniu akumulatora poprzez wydanie sygnału ostrzegawczego w czasie 5 minut przed wystąpieniem zagrożenia w przedziale pasażerskim pojazdu [7], czy też ostrzeżenia o uszkodzeniu układu monitorowania zasobnika energii.

Problemy akumulatorów

Akumulator litowo-jonowy w pojazdach elektrycznych to nie tylko zbiór ogniw, ale też układy odpowiedzialne za nadzorowanie prawidłowego funkcjonowania akumulatora, nazywane BMS (z ang. Battery Management System), które zazwyczaj współpracują z system zarządzania temperaturą akumulatora (BTMS – z ang. Battery Thermal Management System). Z punktu widzenia sterowania można wyróżnić trzy rodzaje problemów akumulatora: związane z akumulatorem, z czujnikami monitorującymi jego parametry oraz z elementami wykonawczymi [3,8]. Pierwsza grupa związana jest z wewnętrznym stanem i parametrami ogniw. W tej grupie w zależności od charakteru uszkodzenia, możemy wyróżnić problemy spowodowane czynnikami mechanicznymi, elektrycznymi i termicznymi [8,9]. Problemy akumulatorów wynikają głównie z nieprawidłowej eksploatacji (nadmierne rozładowanie i ładowanie, ładowanie zbyt wysokim prądem), wypadków (kolizji) oraz stopniowej degradacji ogniw.

Problemy mechaniczne akumulatora

Problemy mechaniczne związane są z deformacjami akumulatorów istotnymi z punktu widzenia ich funkcjonowania. Są one najmniej przewidywalne spośród wszystkich uszkodzeń, ponieważ zazwyczaj wynikają ze zdarzeń spowodowanych działaniem sił zewnętrznych - wypadków i kolizji pojazdu. Siła uderzenia może prowadzić do zgniecenia lub przebicia akumulatora i ogniw. Takie zdarzenie może skutkować poważnymi uszkodzeniami wewnętrznych komponentów baterii, takich jak elektrody, separator czy obudowa i prowadzić do problemów elektrycznych i termicznych [10].

Problemy elektryczne akumulatora

Wśród problemów elektrycznych można wyróżnić: nadmierne rozbalansowanie ogniw, zwarcie wewnętrzne, zwarcie wewnętrzne, nadmierne rozładowanie oraz przeładowanie [9]. Problemy te mają różne przyczyny występowania.

Rozbalansowanie to zjawisko charakterystyczne dla akumulatorów złożonych z wielu ogniw. Ogniwa akumulatora są rozbalansowane, gdy różnią się jakimikolwiek właściwościami lub stanem zużycia. Rozbalansowanie objawia się poprzez różnicę stanu naładowania ogniw i w efekcie napięcia. Różnice w stanie naładowania ogniw jest zjawiskiem naturalnym. Problem pojawia się, gdy różnice te osiągną zbyt wysoki poziom, prowadząc do ich nadmiernego rozbalansowania. Różnice między ogniwami pojawiają się zarówno podczas produkcji, jak i eksploatacji. Podczas produkcji pakiet może być złożony z ogniw o nieco różnych rezystancjach wewnętrznych czy pojemnościach, co oznacza, że taki pakiet zaczyna funkcjonowanie w stanie nierównowagi. Podczas eksploatacji czynniki konstrukcyjne, takie jak rozmieszczenie ogniw, czy połączenia między nimi, mogą spowodować ich nierównomierne rozładowanie [11], dlatego może dojść do sytuacji, w której niektóre ogniwa nie będą pełni naładowane lub rozładowane. Wtedy część użytecznej energii jest niedostępna. Nierównowaga w akumulatorze powoduje szybsze zużywanie i degradację ogniw, a przez to wpływa na wydajność akumulatora [11,12] i może również prowadzić do jego usterek czy awarii. Rozwiązaniem tego problemu jest zastosowanie pasywnych lub aktywnych układów balansowania ogniw. Pasywne balansery wykorzystują rezystory do rozładowywania nadmiernie naładowanych ogniw. W tym przypadku energia nie jest przenoszona między ogniwami, a wytracana w rezystorze. Aktywne obwody balansowania wykorzystują przełączniki elektroniczne do selektywnego przeniesienia energii między ogniwami [11]. Obwody stosowane w aktywnym równoważeniu są bardziej złożone i wymagają zaawansowanych algorytmów sterowania w porównaniu do balanserów pasywnych [13].



Rys.2. Rozbalansowanie akumulatora

Kolejnym problemem należącym do grupy elektrycznych jest zwarcie wewnętrzne, które powstaje, gdy elektrody o różnych potencjałach zostaną połączone przewodnikami. Wewnętrzne zwarcie akumulatora występuje na poziomie systemu lub pakietu akumulatorów w wyniku mechanicznego uszkodzenia – zgniecenie czy odkształcenie obudowy akumulatora, np. podczas wypadku czy kolizji pojazdu. Może także powstać w wyniku zanurzenia akumulatora w wodzie, dostania się pyłu czy pary wodnej wewnątrz obudowy lub uszkodzenia izolacji [10,14]. W wyniku zwarcia zewnętrznego następuje przepływ przez akumulator prądu zwarciovego o bardzo dużej wartości (rzędu kA). Prowadzi to do gwałtownego wzrostu temperatury w wyniku wydzielającego się ciepła uwalnianego w obwodzie zwarcia zewnętrznego, co w efekcie może prowadzić do puchnięcia ogniwa [10]. Aby zapobiec zwarciom zewnętrznym, stosuje się takie zabezpieczenia jak bezpieczniki, czujniki PTC i termostaty. Te urządzenia automatycznie przerywają obwód elektryczny w przypadku wystąpienia niebezpiecznego prądu lub nadmiernego ciepła.

Zwarcie wewnętrzne to proces zachodzący w ogniwie, który występuje, gdy katoda i anoda stykają się ze sobą w wyniku uszkodzenia separatora akumulatora. W wyniku tego zjawiska zmagazynowana energia elektrochemiczna uwalniana jest gwałtownie z wytwarzaniem ciepła, co może prowadzić do zapalenia ogniwa w ciągu kilku sekund.

Zwarcie wewnętrzne ma wiele przyczyn pochodzących z różnych źródeł. Przyczyny występowania zwarcia wewnętrznego można podzielić na trzy kategorie: mechaniczne (przebiecie lub zgniecenie powodujące deformacje lub pęknięcie separatora), elektryczne (powstanie dendrytu powodującego przebiecie separatora), termiczne (bardzo wysoka temperatura powodująca kurczenie się i zapadanie separatora) [10]. Zwarcie wewnętrzne ma zazwyczaj charakter ewolucyjny. Porównując zwarcie wewnętrzne do zewnętrznego, wyróżnić można różnice pod względem poziomu awarii i czasu trwania zwarcia [14].

Przeładowanie akumulatora to przypadek, w którym do ogniwa dostarczana jest energia elektryczna przekraczająca jego pojemność. Może to prowadzić do kilku różnych zjawisk. Po pierwsze, powoduje to osadzanie się metalicznego litu na anodzie (tzw. Li-plating). Osadzony lit może reagować egzotermicznie z warstwą SEI (ang. Solid Electrolyte Interface) (która chroni anodę przed reaktywnością z elektrolitem), a nawet prowadzić do zwarcia wewnętrznego. Po drugie, podczas nadmiernego ładowania osiągnięte są wysokie napięcia, co powoduje utlenianie elektrolitu i/lub rozkład katody, w wyniku czego uwalniane są gazy i ciepło. Przeładowanie może być inicjowane przez szereg czynników, w tym przede wszystkim przez błędy w systemie ładowania, awarie systemów zarządzania akumulatorem (BMS) [16] lub nieprawidłową eksploatację. Przeładowanie może być nieznaczne, gdy napięcie dowolnego ogniwa nie jest dobrze monitorowane. Niewielkie przeładowanie ogniwa będzie prowadziło do przyspieszonej degradacji akumulatora. W skrajnych przypadkach, gdy moduły lub pakiety ogniw są znacznie przeładowywane, wytwarzane jest nadmierne ciepło, co może prowadzić do przegrzania, zwarcia wewnętrznego, a nawet pożaru czy wybuchu. Akumulatory są chronione przed przeładowaniem przez ustawienie progu ochrony napięcia i temperatury w systemie zarządzania akumulatorem [10].

Kolejnym przykładem elektrycznego problemu jest nadmierne rozładowanie akumulatora. Podczas nadmiernego rozładowania miedziany kolektor prądowy anody rozpływa się w elektrolicie. Następnie miedź osadza się na katodzie w postaci dendrytów, co, podobnie jak w przypadku osadzania litu, może prowadzić do zwarcia wewnętrznego. Innym zjawiskiem, do którego może prowadzić nadmierne rozładowanie, jest rozkład warstwy SEI, w wyniku czego powstają gazy i dochodzi do dalszej reaktywności anody z elektrolitem, co prowadzi do wytwarzania ciepła [16]. Tak jak w przypadku przeładowania, akumulator przed nadmiernym rozładowaniem może być zabezpieczony przez system BMS, poprzez określenie minimalnego napięcia pracy ogniwa i całego pakietu.

Problemy termiczne akumulatora

Ostatnią grupą wśród problemów akumulatora są usterki termiczne, dzielone na przegrzania lokalne oraz globalne. Lokalne przegrzanie może wynikać z problemów mechanicznych, elektrycznych akumulatora lub może być spowodowane luźnym stykiem złącza ogniwa. Na luźnym styku wzrasta opór i wydzielane jest ciepło, co prowadzi do lokalnego przegrzania w tym miejscu. Luźny styk może powstać w wyniku wady produkcyjnej lub późniejszej eksploatacji, np. w wyniku drgań [10]. Globalne przegrzanie powstaje w wyniku przepływu prądu o dużej wartości np. podczas zwarcia lub działania wysokiej temperatury zewnętrznej [9].

Problemy z czujnikami

Oprócz uszkodzeń akumulatora, zakłócenia w działaniu czujników mogą powodować poważne problemy w działaniu akumulatorów litowo-jonowych. Wśród usterek czujników

wyróżnia się: błąd systematyczny, dryft, zmniejszenie dokładności, zawieszenie. Działanie systemów BMS oraz BTMS nadzorujących pracę akumulatora oparte jest na algorytmach sprzężenia zwrotnego wykorzystujących informacje z czujników badających parametry pracy (takie jak prąd, napięcie czy temperatura ogniw) [8]. Nieprawidłowe funkcjonowanie czujników może prowadzić do opóźnionej lub błędnej aktualizacji parametrów pracy akumulatora.

Nieprawidłowy pomiar prądu lub napięcia przekłada się na błędne wyznaczenie stanu naładowania akumulatora oraz stanu zużycia. Błędy w pomiarze prądu mogą skutkować przeciążeniem ogniw, co może prowadzić do przegrzania [17]. Awarie czujników napięcia i temperatury mogą powodować błędy wyrównywania napięć i błędy zarządzania termicznego w BTMS [8].

Awaria czujników napięcia wpływa na prawidłowe wyznaczenie stanu naładowania akumulatora, co z kolei przekłada się na pozostałe dopuszczalne parametry pracy akumulatora. Awarie czujników napięcia i temperatury mogą również powodować błędy wyrównywania napięć i błędy zarządzania termicznego w BTMS [8]. W konsekwencji, akumulator może pracować poza dopuszczalnymi zakresami, co przyspiesza jego degradację i prowadzi do zmniejszenia wydajności, a nawet awarii [8]. Ze względu na potencjalne zagrożenia związane z nieprawidłowym funkcjonowaniem czujników, wdrożenie metod diagnostycznych w BMS jest kluczowe dla zapewnienia bezpieczeństwa użytkownika i niezawodności akumulatorów litowo-jonowych [18].

Problemy z elementami wykonawczymi

Problemy z elementami wykonawczymi obejmują usterki styczników, podzespołów BMS [3] czy BTMS. Elementy wykonawcze mają bezpośredni wpływ na awarie akumulatora, gdyż realizują one polecenia wysłane z systemu zarządzania pracą akumulatora. W przypadku układu chłodzenia jego awaria może prowadzić do przegrzania ogniw, co z kolei zwiększa ryzyko pożaru lub wybuchu. Awaria w działaniu styczników przekłada się na brak zabezpieczenia w przypadku konieczności awaryjnego rozłączenia obwodu. Usterki elementów wykonawczych mogą skutkować brakiem zabezpieczenia w przypadku innych awarii.

Efekt wstąpienia i/lub sprzężenia problemów

Usterki mechaniczne, termiczne i elektryczne w akumulatorach litowo-jonowych są zjawiskami sprzężonymi i mogą wzajemnie nasilać swoje działanie. Na przykład w wyniku kolizji pojazdu i usterki mechanicznej, takiej jak zgniecenie akumulatora, może wystąpić zwarcie wewnętrzne, które prowadzi do przegrzania. Wystąpienie usterki lub ich sprzężenie może wywołać zapłon ogniwa, inicjując proces thermal runaway (TR). Thermal runaway w akumulatorach litowo-jonowych jest wynikiem sprzężenia problemów, prowadzącego do niekontrolowanej reakcji, stanowiącej najbardziej niebezpieczny scenariusz dla akumulatora.

TR to niekontrolowany wzrost temperatury w szybkim tempie. Proces następuje zbyt szybko, aby ciepło mogło zostać rozproszone do otoczenia. Spowodowany jest on łańcuchowymi reakcjami egzotermicznymi, związanymi z rozkładem komponentów ogniwa takich jak rozkład SEI, reakcje elektrolitu z elektrodami, topienie separatora i rozkład materiałów aktywnych. Ciepło generowane przez pojedyncze ogniwo może łatwo przenieść się na inne ogniwa, inicjując proces TR w całym pakiecie baterii. Mechanizm TR można opisać jako sekwencję reakcji egzotermicznych, ale należy podkreślić, że w zależności od przyczyny inicjacji reakcji łańcuchowych (rodzaju usterek i awarii), kolejność ich występowania może się różnić.

Mechanizm TR można rozważać w kategoriach pętli Ciepło-Temperatura-Reakcja (HTR). Nieprawidłowe generowanie ciepła podnosi temperaturę, co wywołuje reakcje uboczne, które następnie uwalniają więcej ciepła, tworząc pętlę HTR. Pętla trwa, aż ogniwo przejdzie w stan TR. Ogniwo takie może osiągnąć temperaturę nawet powyżej 600°C. Graniczna temperatura TR oraz jego efekt (ogień lub dym) jest zależny od stosowanych komponentów ogniwa zwłaszcza materiałów katodowych. Stabilność materiałów katodowych jest następująca: LFP > NMC111 > NMC811 > NCA > LCO. Ogniwa oparte na technologii LFP mają najlepsze parametry bezpieczeństwa, co sprawia, że są często wykorzystywane z pojazdami elektrycznymi.

Wnioski

Zapewnienie bezpieczeństwa akumulatorów litowo-jonowych w pojazdach elektrycznych wymaga dogłębnej wiedzy na temat przyczyn występowania poszczególnych problemów. W nowoczesnych pojazdach są one zabezpieczone przed usterkami i awariami poprzez odpowiednie zaprojektowanie konstrukcji mechanicznej pakietu ogniw i modułów wewnątrz oraz odpowiednie podejście do zarządzania parametrami pracy akumulatora. Obudowa pakietu oraz odpowiednie umieszczenie w pojeździe ma w razie kolizji zminimalizować potencjalne uszkodzenie akumulatorów. Konstrukcja mechaniczna jest tak zaprojektowana, aby poszczególne moduły, a także ogniwa wewnątrz i połączenia były zabezpieczone przed nadmiernym nagrzewaniem oraz aby układ chłodzenia mógł zapewnić w różnych warunkach optymalną temperaturę. Wymagania bezpieczeństwa stawiane konstrukcji akumulatorów litowo-jonowych narzucają zastosowanie dodatkowych komponentów, takich osłony termiczne i kanały wentylacyjne w celu minimalizacji ryzyka wystąpienia problemów w trakcie pracy akumulatora. Połączenie równoległe i szeregowo ogniw, modułów oraz pakietów ma zapewnić równomierny rozptył prądu i rozkład napięcia.

Główną funkcją systemu BMS jest zapewnienie bezpiecznej i niezawodnej pracy akumulatorów litowo-jonowych poprzez wykorzystanie czujników, aktuatorów, sterowników i zaimplementowanych algorytmów [19]. System ten ma zaimplementowane mechanizmy zapobiegania usterkom, a w przypadku problemów jest odpowiedzialny między innymi za ich szybkie wykrycie oraz wdrażanie sterowania odpornego na inne usterki [3].

BMS zapewnia monitorowanie i balansowanie ogniw w celu zminimalizowania różnicy napięć. Monitorowanie napięcia pozwala również na wykrycie nadmiernego rozładowania i naładowania akumulatora. BMS dba o przerwanie procesu ładowania, gdy osiągnie maksymalny stan naładowania i nie pozwala na zejście poniżej ustalonego progu. Poprzez monitorowanie natężenia prądu BMS jest w stanie wykryć prąd o zbyt dużej wartości i przerwać obwód, żeby uniknąć awarii akumulatora i niebezpiecznej sytuacji dla użytkowników pojazdu. Za zapewnienie odpowiedniej temperatury pracy akumulatora odpowiedzialny jest system BTMS, który często jest zintegrowany z BMS. W przypadku przekroczenia dopuszczalnej temperatury ogniw uruchamiany jest system grzania lub chłodzenia, lub ograniczany jest prąd. Poszczególne ogniwa w akumulatorze posiadają takie zabezpieczenia jak wentyle, a skład chemiczny ogniw jest dobrany tak, aby spełniać wymagania bezpieczeństwa i ograniczać występowanie niepożądanych reakcji chemicznych [7, 20].

Artykuł finansowany ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa: 0212/SBAD/0614

Autorzy: mgr. inż. Agnieszka Pril, Politechnika Poznańska, Szkoła Doktorska, plac Marii Skłodowskiej-Curie 5, 60-965 Poznań, Solaris

Bus & Coach sp. z o.o., ul. Obornicka 46, 62-005 Owińska, e-mail: agnieszka.pril@solarisbus.com, agnieszka.pril@doctorate.put.poznan.pl; dr hab. inż. Leszek Kasprzyk, prof. PP, Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, e-mail: leszek.kasprzyk@put.poznan.pl; dr. inż. Anna Hanc, Solaris Bus & Coach sp. z o.o., Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk, Józefa Wybickiego 7 A, 31-261 Kraków, e-mail: anna.hanc@solarisbus.com; dr inż. Dariusz Michalak, Solaris Bus & Coach Sp. z o.o., e-mail: dariusz.michalak@solarisbus.com

LITERATURA

- [1] <https://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=192-03-01>
- [2] <https://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=192-04-01>
- [3] Xiong R., Sun W., Yu Q., Sun F., Research progress, challenges and prospects of fault diagnosis on battery system of electric vehicles, *Applied Energy*, 279 (2020)
- [4] <https://www.tuvsud.com/pl-pl/newsletter/past-topics/what-revision-2-of-ece-r100-means-for-rechargeable-battery-manufacturers>
- [5] Regulacja nr 100, Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to specific requirements for the electric power train, <https://unece.org/sites/default/files/2024-01/R0100r3e.pdf>
- [6] Sierszyński M., Chelchowski Ł., Kaczmarczyk B., Muszyński P., Michalak D., Analiza wybranych przepisów i norm istotnych z punktu widzenia projektowania autobusów elektrycznych część 2, *Przegląd Elektrotechniczny*, 98 (2022), nr 8, 163–167
- [7] Schöberl J., Ank M., Schreiber M., Wassiliadis, N., Lienkamp, M., Thermal runaway propagation in automotive lithium-ion batteries with NMC-811 and LFP cathodes: Safety requirements and impact on system integration, *ETTransportation*, 19 (2024)
- [8] Hu, X., Zhang, K., Liu, K., Lin, X., Dey, S., Onori, S., Advanced Fault Diagnosis for Lithium-Ion Battery Systems: A Review of Fault Mechanisms, Fault Features, and Diagnosis Procedures. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 14(2020), No. 3, 65–91
- [9] Qiu Y., Cao W., Peng P., Jiang, F., A novel entropy-based fault diagnosis and inconsistency evaluation approach for lithium-ion battery energy storage systems, *Journal of Energy Storage*, 41 (2021)
- [10] Feng X., Ouyang M., Liu X., Lu L., Xia Y., He, X., Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: A review, *Energy Storage Materials*, 10 (2018), 246–267
- [11] Chen J., Zhou Z., Wang X., Liaw B., Impact of battery cell imbalance on electric vehicle range, *Green Energy and Intelligent Transportation*, 1(2022), No. 3
- [12] <https://www.zitara.com/resources/demystifying-battery-balancing>
- [13] <https://www.linkedin.com/pulse/passive-cell-balancing-vs-active-advantages-dileep-chacko-r9cze>
- [14] Zhou X., Wang Z., Sun B., Zhang, W., Zhang, C., Huang, Q., Wang, S., Yang, X., Gong, H., Study of lithium-ion battery module external short circuit risk and protection design, *Journal of Energy Storage*, 86 (2024)
- [15] Ye J., Chen H., Wang Q., Huang P., Sun J., Lo S., Thermal behavior and failure mechanism of lithium ion cells during overcharge under adiabatic conditions, *Applied Energy*, 182 (2016), 464–474
- [16] L. Zhang, Y. Ma, X. Cheng, C. Du, T. Guan, Y. Cui, Capacity fading mechanism during long-term cycling of over-discharged LiCoO₂/mesocarbon microbeads battery, *J. Power Sources*, 293 (2015), 1006–1015
- [17] W. Lombardi, M. Zarudniev, S. Lesecq, S. Bacquet, 2014 *European Control Conference (ECC)*, (2014)
- [18] Dey, S., Mohon, S., Pisu, P., & Ayalew, B., Sensor Fault Detection, Isolation, and Estimation in Lithium-Ion Batteries, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 24 (2016), No. 6, 2141–2149
- [19] Jia, Y., Brancato, L., Giglio, M., Cadini, F., Temperature enhanced early detection of internal short circuits in lithium-ion batteries using an extended Kalman filter. *Journal of Power Sources*, 591 (2024)
- [20] Offer G. J., Yufit V., Howey D. A., Wu B., Brandon N. P., Module design and fault diagnosis in electric vehicle batteries. *Journal of Power Sources*, 206(2012), 383–392.