

STRESZCZENIE

Akumulatory litowo-jonowe stanowią kluczową technologię w transformacji ku zrównoważonej mobilności oraz integracji odnawialnych źródeł energii, jednak ich bezpieczeństwo pozostaje istotnym wyzwaniem. Najpoważniejszym zagrożeniem jest zjawisko *ucieczki termicznej* (ang. "thermal runaway") - samonapędzającej się sekwencji reakcji egzotermicznych, mogącej prowadzić do pożaru, eksplozji i emisji toksycznych gazów. Niniejsza rozprawa dotyczy procesów degradacji nowoczesnych materiałów stosowanych w systemach akumulacji energii w pojazdach elektrycznych oraz stacjonarnych magazynach energii, poddanych oddziaływaniu ognia i/lub przeciążeń mechanicznych. W pracy zidentyfikowano kluczowe ograniczenia obecnych regulacyjnych procedur badań ogniowych, w szczególności testu zewnętrznego ognia UNECE R100.03, który charakteryzuje się dużą zmiennością wyników, jakościowymi kryteriami zaliczenia/niezaliczenia, ograniczoną wartością diagnostyczną oraz ryzykiem dla personelu i środowiska.

Rozległy przegląd literatury połączono z analizami eksperymentalnymi, numerycznymi i statystycznymi w celu oceny mechanizmów awarii termicznych, mechanicznych i elektrochemicznych LIB, wpływu chemii i konstrukcji ogniów oraz skuteczności biernych i aktywnych systemów bezpieczeństwa. Szczegółowa analiza aktualnych globalnych norm wykazała niespójności w rozmieszczeniu czujników, kontroli warunków środowiskowych oraz kryteriach oceny. Studium testu odporności ogniowej w warunkach otwartego płomienia wykazało, że niekontrolowane zmienne środowiskowe (np. wiatr, charakterystyka opływu płomieni) powodują niską powtarzalność wyników pomiędzy laboratoriami.

W odpowiedzi opracowano alternatywną, ilościowo ugruntowaną metodologię, adaptującą normę ISO 834-1 / EN 1363-1 – powszechnie stosowaną w inżynierii pożarowej konstrukcji – do oceny obudów akumulatorów litowo-jonowych. Metoda ta zapewnia ściśle kontrolowaną i powtarzalną ekspozycję cieplną, zwiększone bezpieczeństwo oraz wyższą wartość diagnostyczną dzięki precyzyjnej aparaturze pomiarowej i ciągłemu rejestrowaniu danych. Analizy porównawcze wykazały, że testy piecowe znacząco redukują niepewność pomiarową i dostarczają bogatych danych o transferze ciepła, degradacji strukturalnej i progach propagacji, umożliwiając lepsze decyzje inżynierskie w zakresie bezpieczeństwa.

Uzupełnieniem proponowanej metodologii jest zaprojektowany i zwalidowany system oczyszczania emisji powstających podczas ucieczki termicznej (TREAS), ograniczający emisję substancji niebezpiecznych w trakcie badań, zgodnie z nowymi wymaganiami środowiskowymi i BHP. Połączenie kontrolowanej ekspozycji cieplnej z systemem oczyszczania emisji stanowi solidne narzędzie zarówno do badań naukowych, jak i do zastosowań regulacyjnych.

Rezultaty pracy obejmują powtarzalny, bogaty w dane protokół badań odporności ogniowej systemów bateryjnych litowo-jonowych, wraz z praktycznymi rekomendacjami dla rozwoju norm, projektowania bezpieczniejszych obudów oraz poprawy bezpieczeństwa publicznego. Łącząc wiedzę z zakresu inżynierii pożarowej, technologii akumulatorów i standaryzacji, rozprawa wspiera bezpieczne i niezawodne wdrażanie systemów akumulacji energii dużej gęstości w transporcie i infrastrukturze energetycznej nowej generacji.