

Prof. dr hab. inż. Antoni Szumanowski

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż.
Grzegorza Dziechciaruka pt: „Selected
Aspects of Lithium-ion Cell Modelling with
the use Electrical Equivalent Circuit and
Artificial Neural Network”

Modelowanie ogniwa litowo-jonowego, a w szczególności baterii akumulatorów litowo-jonowych, współcześnie ma duże techniczne znaczenie. Związane jest ono z rosnącym zastosowaniem tych akumulatorów w budowie maszyn a przede wszystkim w napędzie pojazdów hybrydowych i elektrycznych (BMS). Opracowanie modeli matematycznych akumulatora litowo-jonowego przetworzonych do praktycznego stosowania z wymaganą dokładnością w układach sterujących czy pomiarowych działających w czasie rzeczywistym, ma więc podstawowe znaczenie.

Recenzowana rozprawa w wybranych aspektach dotyczy takiego modelowania. Jej Autor przeprowadził dokładną analizę literaturową, wybrał do badań elektryczne modele obwodowe od jedno do czterorzędowego. Opracował własne modele matematyczne a ich szczegółowe badania symulacyjne, pozwoliły Mu na obliczenia błędów w estymacji napięcia na zaciskach ogniwa o katodzie LiMnNiCoO_2 w warunkach obciążenia prądowego. Wyznaczone błędy odniesione były do danych pomiarowych rzeczywistego ogniwa oraz do maksymalnego napięcia obwodu otwartego 4,2 V (bliskiego SEM), które oznaczało pełne naładowanie ogniwa. Następnie ogniwo to było rozładowywane stałymi wartościami prądów w cyklach obciążenia i „odpoczynku”

oznaczającego zerowy prąd wyładowania. Aproksymacje uzyskanych krzywych dokonano przy użyciu metody PSO w modelowaniu liniowym (EEC) a dotyczącym silnie nieliniowego ogniwa szczególnie w zakresie głębokich rozładowań. W analizie błędów modelowania Autor zaproponował wskaźniki jakości dla badanych rzędów ekwiwalentnego obwodu elektrycznego (EEC) odniesione do powszechnie stosowanego pierwiastka z błędu średniokwadratowego.

Badania modeli obwodowych w zakresie eksperymentalnym i symulacyjnym stanowiły podstawę do zastosowania modelu neuronowego z jednokierunkową siecią neuronową z wstępnym dynamicznym przetwarzaniem sygnałów, odniesionych do całego zakresu rozładowania badanego ogniwa. Porównano dokładność modeli weryfikując je eksperymentalnie.

Recenzowana praca charakteryzuje się bardzo dużym zakresem badań eksperymentalnych i symulacyjnych, przeprowadzonych szczególnie z zasługującą na mocne podkreślenie, znajomością tematyki i jej właściwym sformułowaniem uwzględniającym światowe źródła literaturowe.

Autor nie tylko w pełni ale z nadmiarem, rozwiązał postawione Mu zadanie, oryginalnie dostosował istniejące metody do właściwych założeń badań.

W praktyce inżynierskiej Jego praca badawcza jest najbardziej przydatna w konstrukcji układów napędowych pojazdów elektrycznych i hybrydowych oraz w elektrochemicznym magazynowaniu energii.

Dyskusja wyników recenzowanej rozprawy

1. Autor przeprowadził liczne testy rozładowań ogniwa dla stałych choć w niektórych przypadkach o różnych amplitudach, wartości prądów obciążenia. Cykle te charakteryzowały długie czasy pauzy obciążenia potrzebne do stabilizacji procesów elektrochemicznych

wewnątrz ogniwa, aby dokładnie określić po każdym jego rozładowaniu wartość napięcia otwartego obwodu elektrycznego jako podstawy równań obwodowych. Takie podejście wynikało z świadomości Autora, że w okresie obciążenia ogniwa, w którym jego pojemność Coulombowska (energia) zmieniała się nieznacznie 3% - 7% - str. 49 (teoretycznie zmiana ta powinna dążyć do zera), można stosować model liniowy. Trzeba tu dodać, że Autor słusznie w celu weryfikacji modeli odnosił się do danych doświadczalnych, gdzie funkcje napięcia zależnego od ładunku elektrycznego wyładowania są wyznaczane dla stałych wartości prądów i temperatury.

A jak takie założenie modelowania można odnieść do rzeczywistych cykli obciążeń ogniwa, gdy prądy wyładowania zmieniają się gwałtownie bez okresu stanu jałowego?

2. W jakim zakresie uwzględnienie temperatury wewnątrz i na zaciskach ogniwa pochodzącej nie tylko z wpływu otoczenia ale też z silnie dynamicznych zmian obciążenia ogniwa – silniejsza jego nieliniowość – wpłynie na skomplikowanie modelu obwodowego oraz jego dokładność?

Trzeba tu dodać, że Autor w testach dokonywał pomiaru temperatury celi i otoczenia w warunkach quasi-ustalonych.

3. W rzeczywistych warunkach obciążenia baterii akumulatorów litowo-jonowych stosowanych w napędach pojazdów elektrycznych i hybrydowych, następują płynne zmiany prądu wyładowania w prąd ładowania ogniwa, np. hamowanie odzyskowe. Autor nie rozważał procesu ładowania ogniwa, odnosił się tylko do niektórych danych literaturowych. Jedne przedstawiają prostą histerezę (str.23) – ładowanie i wyładowanie zależne wyłącznie od dostarczonego i pobranego ładunku. Inne, że taka histereza zanika dla wysokich prądów obciążenia ogniwa. Ostatnie stwierdzenie jest oczywiste ze względu na wykładnik równania Peukerta odniesiony do ilorazu chwilowego prądu obciążenia i prądu nominalnego ogniwa.

Wykładnik ten jest także zależny od temperatury ogniwa. Nominalny prąd ogniwa wynosił 0,5C i był w większości testów prądem wyładowania badanej celi.

W przypadku ładowania ogniwa równanie Peukerta jest pomijane.

Wprawdzie ogniwo LiMnNiCoO_2 charakteryzuje niska wartość omawianego wykładnika ale przy dużej wartości ilorazu prądu obciążenia i nominalnego ma istotny wpływ na zmiany energii dyspozycyjnej ogniwa nawet przy krótko trwających przeciążeniach celi, co jest powszechne w napędach pojazdów. Stan energetyczny ogniwa nie tylko zależy więc od odprowadzonego ładunku elektrycznego.

W jaki sposób opracowane przez Autora modele znajdują zastosowanie w wymienionych warunkach rzeczywistych obciążeń ogniwa?

4. Autor napotkał trudności przy modelowaniu głębokich wyładowań celi. W złożeniu w fazach obciążenia ogniwa stałą wartością prądu, oszacowane wartości parametrów obwodu EEC – R i C - były niezmiennie. Przy głębokich wyładowaniach celi ale dla „krok po kroku” stałych wartości prądów w fazach wyładowania, rezystancja szeregową oraz rezystancja kondensatora w ekwiwalentnym obwodzie elektrycznym gwałtownie rosły (Rys. 23). Jest to zgodne z rzeczywistym procesem elektrochemicznym. Wiadomo, że znacznie wyładowane ogniwo (DOD) zmniejsza swą aktywność jonową, umownie gwałtownie zwiększa swą rezystancję wewnętrzną. Zjawisko to jest konieczne do uwzględnienia w oprogramowaniu BMS w pojazdach elektrycznych, gdyż równie szybko zmniejsza się zasięg jazdy. W literaturze wprowadzono z tego powodu pojęcie „anxiety” czyli niepokój jazdy.

Czy w modelu EEC pierwszego rzędu, który jest wystarczająco dokładny w zakresie małych i średnich wyładowań, można byłoby dla głębokich wyładowań zwiększyć zmienność parametrów R_s , R_1

w czasie trwania faz obciążeń prądowych celi?

5. W zastosowaniach baterii akumulatorów używa się definicję SOC – stan naładowania. Jest to współczynnik równy 1 dla w pełni i nominalnie naładowanej celi - nominalnie dostarczonego ładunku oraz około 0,2 dla konstrukcyjnie dopuszczalnego wyładowania (SOC=0 dla całkowicie wyładowanej baterii).

Pełne naładowanie uzyskuje się dostarczając do celi taki określony konstrukcyjnie ładunek elektryczny, aby zapewnić wystarczający potencjał elektrochemiczny (SEM) celi (SOC=1). Szybkość zmian SOC zależy nie tylko od odebranego z celi ładunku elektrycznego ale także od dynamiki obciążeń prądowych. Autor odnosi się do tego problemu (Rys.28) przy linearyzacji napięcia OCV (aproksymacja dla EEC i ANN).

Czy ze względu na wystarczającą dokładność opracowanych modeli nie należy je zdefiniować w odniesieniu do SOC tak, aby byłyby można wykorzystać je w BMS w warunkach rzeczywistych, gdy wartość SOC maleje a następnie rośnie?

Główne osiągnięcia Autora rozprawy

1. Adaptacja elektrycznych modeli obwodowych do wyznaczania zmian napięcia otwartego obwodu w funkcji zmian ładunku wyładowania z dobozem (krok po kroku ,metoda PSO) stałych parametrów obwodu elektrycznego tak, aby wyniki odpowiadały rzeczywistym charakterystykom napięcia ogniwa, bez rozważania jego nieliniowości.
2. Modelowanie układów elektrycznych wielorzędowych (od 1 do 4) w celu wyznaczenia różnic w dokładności poszczególnych modeli.
3. Dostosowanie modelu celi litowo-jonowej do zaprojektowanej sztucznej sieci neuronowej (ANN).
4. Opracowanie wskaźników jakości odniesionych do obliczeń w zakresie różnych głębokości rozładowania celi i różnych rzędów

ekwiwalentnych obwodów elektrycznych. W tym ostatnim przypadku wymienione wskaźniki określały zależność błędów wyznaczonego napięcia celi wg badanego modelu w odniesieniu do jego rzędu, co nie wynikało z zastosowania powszechnie stosowanego wskaźnika – pierwiastka z błędu średniokwadratowego (RMS) dla całego testu.

5. Proponowany model ANN zapewnia aproksymacje odpowiednich charakterystyk napięcia dla otwartego obwodu (OCV) z większą dokładnością niż znaną dotychczas z literatury.

Wymienione powyżej osiągnięcia Autora są Jego oryginalnym dorobkiem w realizacji postawionego mu zadania w zakresie rozprawy doktorskiej. Cel i teza pracy zostały jasno sformułowane.

Obszerny zakres badań symulacyjnych oraz eksperymentalnych przeprowadzonych na zaprojektowanym przez Autora stanowisku laboratoryjnym, odpowiednie odniesienia do bieżącej literatury światowej, stanowią dodatkowo o pełnej jakości pracy.

Autor spełnił wymagania stawiane rozprawom doktorskim z wyraźnym nadmiarem.

Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa doktorska Grzegorza Dziechciaruka pt. „Selected aspects of lithium-ion cell modelling with the use of electrical equivalent circuit and artificial neural network” spełnia wszystkie wymagania stawiane w Ustawie o Stopniach i Tytule Naukowym oraz o Stopniach i Tytule w Zakresie Sztuki i powinna być dopuszczona do publicznej dyskusji. Jej Autor w pełni zasługuje na otrzymanie stopnia doktora w dyscyplinie Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika.



Warszawa 20 czerwca 2022