

RECENZJA

ROZPRAWY DOKTORSKIEJ MGR INŻ. GRZEGORZA DZIECHCIARUKA PT. „SELECTED ASPECTS OF LITHIUM-ION CELL MODELLING WITH THE USE OF ELECTRICAL EQUIVALENT CIRCUIT AND ARTIFICIAL NEURAL NETWORK”)

Podstawą opracowania recenzji jest uchwała Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Warszawskiej z dnia 21 kwietnia 2022 r.

1. Ocena problematyki rozprawy

Problematyka rozprawy dotyczy zagadnień modelowania baterii litowo jonowych, należących do grupy zasobników elektrochemicznych o jednej z największych gęstości magazynowania energii elektrycznej i stosunkowo dużych mocach. To sprawia, że są one popularne w układach zasobników energii oraz do bezpośredniego zasilania urządzeń elektrycznych. Rozwiązania takie dla układów energetycznych buduje się nawet w wielkiej skali sięgającej setek i tysięcy kWh.

Obecnie technologie baterii litowo-jonowych są intensywnie rozwijane. Dla projektantów układów wykorzystujących te baterie, niezmiernie istotne są badania modelowe, sprawdzające spełnienie wymagań parametrów pracy w rozwiązaniach docelowych. Producenci nie udostępniają jednak szczegółowych informacji nt. technologii wykonania i budowy oraz własności baterii, np. w zależności od parametrów zewnętrznych, wymuszeń oraz zakłóceń, które mogą wystąpić w torze prądu stałego. Stąd wynika pilna potrzeba opracowania modeli numerycznych baterii, dzięki którym znacząco przyspieszy się proces projektowania i uruchamiania, korzystnie wpływając na jakość produktu końcowego, w którym stosuje się tego typu zasobniki.

Zajmując się problematyką modelowania baterii litowo-jonowych, Autor rozprawy bardzo dobrze wpisuje się w oczekiwania badaczy i projektantów układów energoelektronicznych przeznaczonych do współpracy z tymi bateriami. Na podstawie badań laboratoryjnych, dla ogniw litowo-jonowych z materiałem katodowym NMC, przeprowadził On badania modelowe z dynamicznymi zmianami napięcia w przedziale czasowym od 5 s do 1 godz., a wyniki tych prac przedstawione są ocenianej rozprawie.

Biorąc pod uwagę przytoczone argumenty stwierdzam, że problematyka rozprawy jest ważna i istotna. Podjęcie tych badań uważam za trafne i bardzo dobrze wpisujące się w potrzeby środowisk naukowych i przemysłowych.

2. Ocena celów naukowych, tezy badawczej

Kluczową częścią rozprawy, której wnioski pozwoliły sformułować cele i problem badawczy jest rozdział pierwszy. W rozdziale tym Autor interesująco przedstawił stan wiedzy. Scharakteryzował podstawowe cechy budowy, wykreślił charakterystyki i wyjaśnił główne parametry baterii litowo-jonowych, skupiając uwagę na sporządzeniu obszernego przeglądu ich modeli. Wyróżnił trzy kategorie modeli: elektrochemiczne, elektryczne oparte o modele obwodów zastępczych - określane w tekście jako electrical equivalent circuit (EEC) oraz modele wykorzystujące sztuczne sieci neuronowe (ANN). Pierwsza z kategorii, modele elektrochemiczne, jest praktycznie niedostępna dla użytkowników i projektantów układów, gdyż wymaga szczegółowej wiedzy o budowie i technologii wykonania ogniw, która chroniona jest patentami i prawami autorskimi. Kolejna kategoria to modele zastępczych obwodów elektrycznych, które budowane są w oparciu o dane eksperymentalne i nie wymagają jakiegokolwiek wiedzy o fizycznej budowie ogniw. Modele te mogą zawierać elementy elektryczne, które opisują wpływ zjawisk elektrochemicznych na napięcie ogniw. Ostatnia kategoria obejmuje modele sztucznych sieci neuronowych - artificial neural network (ANN), w których równania matematyczne są proponowane jedynie w celu dopasowania danych eksperymentalnych. Do ich uruchomienia modele te wymagają serii danych uczących.

Biorąc pod uwagę dostępność danych, złożoność i osiągalność narzędzi do modelowania matematycznego, modele kategorii drugiej i trzeciej zostały wskazane przez Autora jako przedmiot badań w dysertacji.

Problem badawczy Autor rozprawy sformułował w rozdziale 3.5 (Research objective and scope) w następujący sposób: Głównym problemem modelowania litowo-jonowego z wykorzystaniem modeli EEC jest dobór struktury modelu.

W kolejnych wierszach tego rozdziału podaje cele w następującej formie:

- Głównym celem rozprawy (w zakresie ANN) jest opracowanie i walidacja modelu sztucznej sieci neuronowej z dynamicznym, wstępnym przetwarzaniem sygnału, który może symulować napięcie ogniwa w stanach dynamicznych w całym zakresie DOD;
- Drugim celem jest analiza źródeł błędów szacowanego napięcia ogniwa za pomocą elektrycznego modelu obwodu zastępczego.

Aby zrealizować główne cele rozprawy, Autor wskazał na potrzebę realizacji następujących zadań:

- o zbadanie wybranych aspektów modelowania błędów napięciowych modeli EEC, takich jak: uproszczenia w procedurze estymacji parametrów, aproksymacje charakterystyk rezystancyjnych i pojemnościowych, liczba gałęzi RC oraz implementacja charakterystyki estymacji napięcia ogniwa typu Open circuit voltage OCV,
- o zdefiniowanie nowych wskaźników jakości, które mogą być pomocne do oceny modeli litowo-jonowych,
- o budowa i walidacja modelu EEC,

- o projekt dynamicznego wstępnego przetwarzania sygnałów, który umożliwi modelowanie napięcia ogniwa litowo-jonowego z wykorzystaniem sprzężenia zwrotnego ANN,
- o walidacja modelu ANN z dynamicznym wstępnym przetwarzaniem sygnału ogniwa litowo-jonowego,
- o porównanie modelu ANN z modelem EEC.

W opinii recenzenta podane cele naukowe rozprawy są poprawnie sformułowane. Ze względu na porządek sporządzenia badań, kolejność wykonania zadań służących realizacji celów jest logicznie uzasadniona. Natomiast dość enigmatycznie Autor rozprawy odnosi się do określenia problemu badawczego. Problem badawczy ogranicza tylko do doboru struktury modelowania litowo-jonowego, co uważam za poprawne podejście. Nie formułuje On w tradycyjny sposób tezy naukowej, która formalnie nie jest konieczna, gdyż ustawa Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce w art. 187, ust.1, wymagania w tej kwestii formułuje następująco: "Przedmiotem rozprawy doktorskiej jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej lub społecznej albo oryginalne dokonanie artystyczne". Na tej podstawie uznając, że problem naukowy został poprawnie sformułowany uważam, że Autor spełnił formalne wymaganie ustawodawcy.

3. Ocena źródeł literaturowych

Na źródła literaturowe składają się 74 pozycje bibliograficzne, wśród których przeważają publikacje sprzed ostatnich kilku czy kilkunastu lat. W wykazie tym znajdują się licznie czasopisma IEEE (13), Elsevier (11), MDPI (9), zeszyty uznanych konferencji międzynarodowych (10) i inne wydawnictwa, najczęściej dostępne w wersjach elektronicznych. Na wszystkie te pozycje Autor powołuje się tekście rozprawy, przy czym powołania te są uzasadnione, a studiującemu rozprawę pozwalają poznać źródła i podstawy omawianych zagadnień.

Zdarza się jednak, że nie wszystkie pozycje są poprawnie opisane. Przykładowo dotyczy to 13, 15, 44, 67, w których najczęściej brakuje daty pozyskania materiałów lub niepełnych danych opisujących źródła.

Te drobne uchybienia nie obniżają w żaden sposób wysokiej oceny źródeł bibliograficznych. Zdaniem recenzenta są one rzetelnie wybrane, a ich dobór jest merytorycznie uzasadniony. Cytowane artykuły, doniesienia naukowe i prace doktorskie reprezentują wysoki poziom naukowy. Obecne również w wykazie bibliograficznym materiały techniczne dobrze uzupełniają materiał, pozwalając zapoznać się technicznymi rozwiązaniami lub poznać narzędzia numeryczne.

4. Ocena rozwiązań problemów badawczych

Problem modelowania rozwiązywany był wieloaspektowo. Na jego ostateczne rozwiązanie złożyły się studia literaturowe, prace modelowe, wielotorowe badania laboratoryjne, opracowanie i analiza wyników, walidacja modelu oraz opracowanie wniosków i uogólnień.

Podczas badań nad sformułowaniem modelu obwodowego przeprowadzono liczne testy numeryczne i walidacyjne. Z dużą pieczołowitością dokonano estymacji parametrów, uwzględniając ich wieloczynnikowe zależności. Brano pod uwagę, że identyfikowane podczas różnych etapów badań błędy nie zależą jednostronnie tylko od wybranych przyczyn, a są wynikiem oddziaływania różnorodnych czynników. Dlatego też badania przeprowadzono wieloetapowo, a na etapy te złożyły się:

- Szczegółowy opis procesu estymacji parametrów;
- Sprawdzenie błędów modelowania spowodowanych uproszczeniami wprowadzonymi w procedurze estymacji parametrów;
- Określenie błędów napięcia w pełnym zakresie rozładowania - depth of discharge DOD;
- Przeprowadzenie walidacji w celu obserwacji błędów napięcia dla różnych poziomów obciążeń;
- Przeprowadzenie analizy uzyskanych wyników.

Zastosowane postępowanie uważam za prawidłowe. Podzielona na etapy analiza pozwoliła na identyfikację czynników, które mają największy wpływ na wielkość błędów napięcia wyznaczanego na podstawie modeli EEC. Ponadto, zdefiniowanie nowych zmodyfikowanych wskaźników błędów rms korzystnie wpłynęło na jakość modeli.

Dość niespodziewanym wynikiem tych badań było uzyskanie najlepszej lub równoważnej wiarygodności dla modelu pierwszego rzędu. To bardzo ciekawy i dość zaskakujący rezultat. Rzadko zdarza się, że modele niższego rzędu wierniej odtwarzają rzeczywisty obiekt. Zdaniem doktoranta, tylko dla pewnych warunków obciążenia, polecane są modele wyższych rzędów zwłaszcza, gdy priorytetem jest uzyskanie niższych błędów w odstępach spoczynkowych.

Kolejna konkluzja to wniosek, że aproksymacja stałych czasowych dla modeli różnych rzędów nie wpływa istotnie na błędy tych modeli, a kluczowe znaczenie ma aproksymacja rezystancji. Zaproponowana niestandardowa aproksymacja tych rezystancji pozwala uzyskać dobre dopasowanie do szacowanych charakterystyk parametrów w całym zakresie DOD.

W procedurze aproksymacji napięcia obwodu otwartego OCV dla modelu EEC wykorzystano ciekawą propozycję zastosowania algorytmów ANN, a dzięki temu uzyskano płynną zmianę napięcia OCV dla szerokiego zakresu DOD. Uzyskany wynik charakteryzuje się niższymi błędami niż znane z literatury naukowej aproksymacje tego napięcia.

Kolejnym korzystnym efektem było zastosowanie estymacji parametrów RC metodą optymalizacji roju cząstek (particle swarm optimization PSO), co ograniczyło generowanie dodatkowych błędów estymacji parametrów RC.

Innym modelem rozwijanym przez doktoranta był model sztucznej sieci neuronowej, który zbudowany został w oparciu o strukturę sieci rekurencyjnej ze sprzężeniem do przodu. Dodatkowo model ten wyposażony był we wstępne dynamiczne przetwarzanie sygnału (ANN-dynSP) realizujące funkcje trzech filtrów dolnoprzepustowych. Trenowanie sieci wykonano w oparciu o dane pomiarowe z wykorzystaniem, dostępnych w bibliotekach Matlab, standardowych technik uczenia. Podczas prac walidacyjnych, błędy napięcia modelu ANN-dynSP były oceniane w analogicznych testach jak dla modeli obwodowych EEC. Końcowe wyniki zostały porównane z wynikami modelu obwodowego. W konkluzji

stwierdzono, że dla większości testów walidacyjnych, w całym zakresie poziomu rozładowania DOD, model ANN-dynSP zapewnia niższy poziom błędów niż model EEC. Widać to w szczególności w zakresie nieliniowych charakterystyk rezystancji modelu EEC występujących przy poziomie rozładowania powyżej 85%. Przedstawiona w rozprawie analiza własności modelu potwierdziła zatem, że uzyskiwane wyniki znacząco zależą od zestawu danych uczących.

5. Ocena oryginalności

Oceniana rozprawa jest dziełem oryginalnym, cechującym się indywidualnym rozwiązaniem szeregu problemów, do których zaliczam przede wszystkim opracowanie koncepcję przeprowadzenia badań oraz zaproponowanie sposobu oceny błędów i walidacji wyników. Na podkreślenie zasługuje niebanalne sformułowanie zmodyfikowanych algorytmów błędów rms, uwzględniające specyfikę własności ogniów litowo jonowych. Kolejnym atutem jest zastosowanie algorytmu roju cząstek do estymacji napięcia w stanie otwartym w modelu obwodowym. Ponadto, zwraca uwagę wprowadzenie wstępnego przetwarzania danych wejściowych dla modelu zbudowanego w oparciu o sztuczne sieci neuronowe. Zastosowanie takich rozwiązań i odpowiednie przygotowanie danych świadczą o dużej sprawności i kreatywności doktoranta w rozwiązywaniu problemów badawczych.

6. Praktyczne zastosowanie uzyskanych wyników oraz perspektywy dalszego doskonalenia metody

Sugestię udzielenia przez recenzenta odpowiedzi na to pytanie określiła rada naukowa dyscypliny AEiE PW. W rozprawie odniesienie do tej kwestii można znaleźć w rozdziale pierwszym, gdzie doktorant podaje motywację podjęcia tematu rozprawy, u której podstaw leżało wspomaganie procesu projektowania.

W opinii recenzenta istnieje szereg innych praktycznych możliwości wykorzystania uzyskanych wyników. Opracowane modele, mogą spełniać szczególnie ważne zadania w procesie oceny stanu technicznego, diagnostyce, estymacji wybranych zmiennych i parametrów. W tym przypadku, zdaniem autora recenzji, kluczową wydają się estymacja temperatury, której niebezpieczny wzrost zwiększa zagrożenie pożarem.

Wydaje się, że ze względu na odtwarzanie nieliniowych zależności, szersze możliwości wykorzystania i doskonalenia ma model ANN. Za to model EEC jest prostszy w zastosowaniu, gdyż nie wymaga przygotowywania licznych danych uczących. Skoro jednak Autor dysertacji nie wskazał w rozprawie odpowiedzi na sugerowane pytania, o zagadnienia te będzie On poproszony w punkcie Uwagi problemowe i szczegółowe.

7. Ocena redakcji pracy

Oceniana praca doktorska liczy 141 stron, a jej zawartość podzielona została na cztery rozdziały merytoryczne, bibliografię, streszczenie i abstract oraz osiem załączników. Układ pracy odpowiada strukturze rozpraw doktorskich, jest logiczny, przejrzysty z oczekiwanymi podsumowaniami po każdym z rozdziałów. Praca zredagowana została w j. angielskim, a jej tytuł w j. polskim brzmi "Wybrane aspekty modelowania ogniwa litowo-jonowego z wykorzystaniem zastępczego obwodu elektrycznego i sztucznej sieci neuronowej".

Pod względem redakcyjnym rozprawa opracowana jest bardzo starannie. Jej szata graficzna jest praktycznie bez zarzutu. Styl redakcji i poziom j. angielskiego zasługuje na pochwałę. Zdania są poprawnie skonstruowane, jasne, zwarte, mają prawidłową składnię. To jest wielki atut, zwłaszcza dla prac redagowanych w języku obcym.

Układ pracy spełnia wymagania rozpraw, cechuje ją logiczne następstwo zdarzeń. Ma jasno określone cele i zakres pracy. W podsumowaniu znajduje się odniesienie do spełnienia celów pracy i rozwiązania problemu naukowego. Jedynym mankamentem w tej kwestii jest brak tradycyjnej tezy naukowej rozprawy.

8. Uwagi

Przedstawiane doktorantowi pytania mają charakter problemowy. Z pytań szczegółowych zrezygnowano ze względu na małą istotność ewentualnych pytań.

Pytania pierwsze i drugie inspirowane są pewnymi niedostatkami pracy, ale dwa kolejne wynikają z ciekawości i podkreślają dużą wartość wykonanej przez Doktoranta pracy.

1. Proszę sformułować tezę rozprawy i przedstawić uzasadnienia spełnienia tej tezy.
2. Proszę określić jakie przewiduje Pan praktyczne zastosowanie uzyskanych wyników oraz perspektywy dalszego doskonalenia modeli?
3. W jakim stopniu straty na rezystorze mogą informować o temperaturze ogniwa? Czy mogą to być zależności liniowe czy nieliniowe, a może oszacowanie temperatury wymaga zastosowania dodatkowych członów obliczeniowych?
4. Jakie są ograniczenia zastosowania opracowanych modeli dla przypadku, kiedy prąd rozładowania ma charakter pulsujący ze składową częstotliwością np. 100Hz? (Taki przypadek ma miejsce przy asymetrycznym wysterowaniu faz czterogłęziowego przekształtnika AC/DC. Pojawienie się pulsacji prądu znacząco zwiększa temperaturę ogniwa.)

9. Ocena rozprawy

Oceniana praca spełnia wszystkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim. Opisane osiągnięcia stanowią dużą wartość merytoryczną. Za szczególnie istotne uznają między innymi:

- Umiejętność planowania eksperymentu, projektowania stanowiska, opracowania procedur badawczych, uruchamiania i wykonania badań zarówno laboratoryjnych jak i obliczeniowych wraz z weryfikacją i testowaniem procedur badawczych;
- Opracowanie metody wyznaczenia parametrów modelu obwodowego EEC wraz z wykazaniem, że najbardziej konkurencyjnym modelem jest model pierwszego rzędu;
- Zdefiniowanie zmodyfikowanej oceny wartości skutecznej błędów;
- Rozszerzenie zakresu pracy modelu EEC dzięki określeniu sposobu estymacji rezystancji i napięcia OCV za pomocą autorskich algorytmów PSO i ANN;
- Opracowanie modelu opartego o sztuczne sieci neuronowe ze wstępnym dynamicznym przetwarzaniem danych, który charakteryzuje się niższymi błędami niż model EEC.

Wymienione rezultaty potwierdzają rozwiązanie problemu badawczego oraz realizację celów i zadań naukowych. Jak wcześniej uzasadniono, rozprawa jest dziełem oryginalnym i posiada duży potencjał praktycznego wykorzystania.

10. Podsumowanie i wniosek końcowy

Na podstawie przedstawionej recenzji stwierdzam, że rozprawa doktorska mgra inż. Grzegorza Dziechciaruka stanowi oryginalne rozwiązanie problemu badawczego. Doktorant wykazał się ogólną wiedzą teoretyczną w **dyscyplinie naukowej automatyka, elektronika i elektrotechnika** oraz szczegółową wiedzą w zakresie modelowania ogniw litowo-jonowych z wykorzystaniem zastępczego obwodu elektrycznego i sztucznej sieci neuronowej. Dowiódł posiadania umiejętności stosowania różnych metod badawczych. Wykazał, że potrafi poprawnie formułować problem badawczy i twórczo prowadzić badania, interpretować uzyskane wyniki i formułować własne wnioski. Świadczy to o posiadaniu wysokich kwalifikacji i umiejętności samodzielnego prowadzenia prac naukowych.

Uwzględniając wymienione argumenty wnoszę, aby rozprawę doktorską mgra inż. Grzegorza Dziechciaruka uznać za istotny wkład Autora w rozwój dyscypliny naukowej automatyka, elektronika i elektrotechnika.

Stwierdzam, że opiniowana praca spełnia warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim, określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. Stawiam zatem wniosek o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgra inż. Grzegorza Dziechciaruka do publicznej obrony przed Radą Naukową Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Warszawskiej.



