

Prof. dr hab. inż. Andrzej Cichoń
Politechnika Opolska
Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki
Katedra Elektroenergetyki i Energii Odnawialnej

Opole, 05.05.2023 r.

POLITECHNIKA ŚLĄSKA
Biuro Rady Dyscypliny
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika
i Technologie Kosmiczne
wpłynęło dnia 12.05.2023
nr 20 zał.

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Macieja Klimasa pt. „Comparative analysis and implementation of selected new alternating current electric arc models”.

Podstawa formalna wykonania recenzji:

Niniejsza recenzja została opracowana na zlecenie Przewodniczącej Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Śląskiej, dr hab. inż. Moniki Kwoki, prof. PŚ, zgodnie z uchwałą Rady Dyscypliny nr 6/2023 z dnia 28 lutego 2023 r.

Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Dariusz Grabowski, prof. PŚ.

1. Ocena aktualności tematu, celu i zakresu rozprawy

Jednym z największych odbiorników energii elektrycznej występujących w systemie elektroenergetycznym są piece łukowe wykorzystywane powszechnie do produkcji i przetwarzania stali. Wykorzystują one zjawisko generacji łuku elektrycznego, który paląc się pomiędzy elektrodami i metalowym wsadem wytwarza ciepło służące do topienia umieszczonego wewnątrz metalu. Podczas pracy pieca zapalany jest łuk elektryczny, który jest zjawiskiem silnie nieliniowym i stochastycznym. Ze względu na dużą moc urządzenia generacja łuku powoduje negatywny wpływ na układ zasilania. Eksploatacja pieców łukowych wiąże się z występowaniem dużych zmian w poborze mocy, które mogą skutkować wahaniami napięcia, zjawiskiem odkształcenia napięcia lub prądu oraz mogą zwiększyć niepożądane straty energii elektrycznej. Eksploatacja sieci zasilających piece łukowe często wiąże się z koniecznością stosowania systemów umożliwiających poprawę jakości energii w miejscu zainstalowania pieców. Jednak aby zminimalizować negatywny wpływ pracy pieców, pożądane jest aby na etapie projektowania układów zasilania uwzględnić wpływ palenia się łuku elektrycznego na parametry sieci elektroenergetycznej.

Od wielu lat prowadzone są badania modelowe, których wyniki widoczne są w publikacjach naukowo – badawczych. Zostały one również zaimplementowane w różnych programach wykorzystywanych do symulacji obwodów elektrycznych. Najczęściej spotykane modele składają się przede wszystkim z części deterministycznej opisującej zależność między prądem a napięciem łuku elektrycznego. Opisują one podstawowe zachowanie zjawisk związanych z łukiem elektrycznym. Istnieją różne deterministyczne modele łuku elektrycznego, które mogą opierać się na matematycznym opisie kształtu charakterystyki napięciowo-prądowej lub zależności między napięciem a prądem

wyrażonej w postaci równań. Często komponent deterministyczny jest uzupełniany poprzez dodanie komponentu stochastycznego, poprawiającego zgodność modelu z rzeczywistym zjawiskiem. Część stochastyczną można podzielić na składowe nisko i wysokoczęstotliwościowe. Spotyka się realizację tego komponentu poprzez zastosowanie różnych metod, wśród których bardzo popularne jest stosowanie równań różniczkowych, np. w postaci modelu Cassiego lub Mayra.

W recenzowanej rozprawie opracowano nowe modele łuku elektrycznego, przy wykorzystaniu czterech różnych podejść teoretycznych, tak aby umożliwiły odzwierciedlenie deterministycznego i stochastycznego charakteru pracy pieca. W tym celu opracowano: model oparty o losowe równania różniczkowe, model chaotyczny, model korzystających z płytkich oraz głębokich sztucznych sieci neuronowych oraz model ułamkowego rzędu.

W pracy Autor skoncentrował się na tworzeniu modeli pracy pieca w najgorszym pod względem sieci elektroenergetycznej momencie pracy, jakim jest etap roztapiania wsadu. W procesie modelowania wykorzystał rzeczywiste dane pomiarowe z trzech pieców łukowych charakteryzujących się różną wielkością: dużego przemysłowego pieca, małego przemysłowego pieca oraz laboratoryjnego pieca zaprojektowanego specjalnie do celów realizacji niniejszej rozprawy. Piece te różnią się pojemnością, mocą znamionową oraz poziomem napięcia zasilania. Na podstawie przeprowadzonych analiz Autor dokonał wyboru jednego z opracowanych modeli i przeprowadził jego implementację w programie do symulacji obwodów elektrycznych w dziedzinie czasu.

Uwzględniając powyższe, uważam, że tematyka poruszana w pracy jest aktualna i ważna ze względu na jej znaczenie poznawcze i praktyczne.

W rozprawie sformułowano następujące cele pracy:

- *rozszerzenie istniejącego modelu pieca, bazującego na równaniu bilansu mocy, do postaci losowego równania różniczkowego odzwierciedlającego stochastyczny charakter łuku,*
- *reprezentacja stochastycznego zachowania łuku przy pomocy sygnałów chaotycznych oraz generowanych przez sztuczne sieci neuronowe,*
- *uogólnienie równania bilansu mocy poprzez zastąpienie operatora różniczkowego przez operatorem różniczkowo-całkowym ułamkowego rzędu,*
- *wielokryterialna analiza porównawcza opracowanych modeli,*
- *implementacja wybranego modelu bezpośrednio w programie służącym do symulacji obwodów elektrycznych.*

Uważam, że cele pracy są ambitne i spełniające wymagania stawiane pracom doktorskim.

Autor przedstawił główną tezę pracy oraz tezy pomocnicze, które sformułował w sposób jawny w rozdziale pierwszym:

Główna teza pracy została sformułowana następująco:

„Możliwe jest opracowanie nowych stochastycznych modeli pieca łukowego na podstawie różnych podejść teoretycznych i na podstawie rzeczywistych danych pomiarowych, tak aby poprawić ich dokładność względem istniejących modeli deterministycznych”.

Tezy pomocnicze zostały sformułowane następująco:

„Możliwe jest:

- uwzględnienie procesów stochastycznych o fizycznej interpretacji w równaniu bilansu mocy skutkujące poprawą dokładności modelu,
- dopasowanie wybranych układów chaotycznych, tak aby generowane przez nie sygnały reprezentowały stochastyczne procesy w modelu opartym o równanie bilansu mocy, bez pogorszenia dokładności,
- zastosowanie sztucznych sieci neuronowych, tak aby generowane przez nie sygnały reprezentowały stochastyczne procesy w modelu opartym o równanie bilansu mocy, bez pogorszenia dokładności,
- uogólnienie równania różniczkowego bilansu mocy do równania ułamkowego rzędu skutkujące poprawą dokładności modelu,
- zaimplementowanie najlepszego modelu stochastycznego bezpośrednio w programie EMTP-ATP służącym do symulacji obwodów elektrycznych.”

Tezy pracy są poprawne i odpowiednio sformułowane.

2. Charakterystyka pracy doktorskiej

Recenzowana rozprawa doktorska liczy 131 stron. Zawiera dziesięć rozdziałów, wykaz skrótów, spis rysunków oraz spis literatury zawierający 72 pozycje, wśród których znajdują się zarówno publikacje krajowe, jak i liczne publikacje międzynarodowe. Uważam, że literatura zacytowana w rozprawie doktorskiej została dobrana w sposób poprawny. Doktorant jest współautorem 9 cytowanych pozycji, z czego dwa artykuły zostały opublikowane w wysokopunktowanych czasopismach znajdujących się na liście Ministerstwa Nauki i Edukacji (IEEE Transactions on Power Delivery – 140 pkt., IEEE Transactions on Industry Applications – 140 pkt.).

Rozdział pierwszy stanowi wprowadzenie do podjętej tematyki. Przedstawiono w nim także cele, zakres oraz sformułowano tezy rozprawy doktorskiej. Dodatkowo w rozdziale tym przedstawiono przegląd literatury pod kątem stosowanych do tej pory metod modelowania łuku elektrycznego. W końcowej części rozdziału szczegółowo scharakteryzowano model pieca łukowego oparty na bilansie mocy.

W rozdziale drugim znajduje się opis pieca łukowego uwzględniający jego budowę zarówno od strony mechanicznej, jak i elektrycznej. Ponadto w rozdziale tym scharakteryzowano trzy rodzaje rzeczywistych pieców łukowych, dla których przeprowadzono pomiary stanowiące podstawę do opracowania poszczególnych modeli. Dane pomiarowe składają się z zapisu przebiegów prądów i napięć fazowych zmierzonych w czasie roztapiania wsadu. W pracy wykorzystano trzy zbiory danych pochodzące odpowiednio z dużego przemysłowego pieca, małego przemysłowego pieca oraz laboratoryjnego pieca skonstruowanego do celów badawczych. Jako podstawowe dane wejściowe wykorzystano pomiary z dużego pieca przemysłowego, natomiast pozostałe zbiory zostały wykorzystane do testowania skuteczności poszczególnych modeli.

Za najważniejsze w rozprawie uważam rozdziały trzeci, czwarty, piąty, szósty, siódmy i ósmy, które zawierają oryginalne wyniki badań Doktoranta.

W rozdziale trzecim przedstawiono opracowany przez Autora model oparty o losowe równanie różniczkowe. Model ten uwzględnia zjawiska losowe towarzyszące łukowi elektrycznemu poprzez odpowiednio zdefiniowane procesy stochastyczne. Uwzględniono w nim dwa główne komponenty w części stochastycznej: komponent niskoczęstotliwościowy oraz wysokoczęstotliwościowy. Pierwszy z nich związany jest ze zmianami występującymi w ogólnym kształcie charakterystyki prądowo-napięciowej łuku, natomiast drugi związany jest głównie z wysokoczęstotliwościowymi wahaniami widocznymi w szczególności w przebiegu napięcia, w okolicy wartości szczytowych. Komponent niskoczęstotliwościowy został uwzględniony przez równanie bilansu mocy, w którym trzy współczynniki proporcjonalności zostały zastąpione procesami stochastycznymi. Natomiast komponent wysokoczęstotliwościowy stanowi sygnał napięciowy, który również w obu przypadkach może być reprezentowany poprzez pojedynczy proces stochastyczny.

W rozdziale czwartym przedstawiono model chaotyczny łuku elektrycznego, w którym zastosowano sygnały chaotyczne do odzwierciedlenia sygnałów stochastycznych. Opracowany model chaotyczny jest zbudowany podobnie do modelu opartego o losowe równania różniczkowe, jednak zasadnicza różnica polega na tym, że zmiany współczynników równania nie są odzwierciedlane przez procesy stochastyczne, a przez sygnały generowane przez odpowiednio zoptymalizowane układy chaotyczne. W rozdziale przedstawiono cztery układy chaotyczne, z których każdy dopasowano do poszczególnych współczynników równania bilansu mocy.

W rozdziale piątym przedstawiono kilka modeli wykorzystujących sztuczne sieci neuronowe (SSN). Trzy z nich charakteryzują się prostą strukturą i należą do płytkich SSN, natomiast pozostałe dwa posiadają bardziej złożoną strukturę i wykorzystują metody głębokiego uczenia. Zastosowane płytkie SSN obejmują klasyczną strukturę sieci typu Multilayer Perceptron (MLP), podwójnego MLP wykorzystaną do aproksymacji charakterystyki napięciowo - prądowej oraz strukturę modelu typu Nonlinear Autoregressive Exogenous Model (NARX), który zastępuje blok dynamiczny w modelu równania bilansu mocy. Oprócz zastosowania płytkich sieci neuronowych zaproponowano również rozwiązanie wykorzystujące sieci głębokie typu Long Short-Term Memory (LSTM), których konstrukcja pozwala na zapamiętywanie i samodzielne odzwierciedlanie dłuższych sekwencji.

Rozdział szósty zawiera wyniki prac z wykorzystaniem modelu ułamkowego rzędu. Autor podjął próbę zamodelowania łuku elektrycznego za pomocą równania bilansu mocy uogólnionego w taki sposób aby możliwe było uwzględnienie operatora całkowo-różniczkowego rzędu ułamkowego zamiast klasycznego różniczkowania pierwszego rzędu. W rozdziale tym przedstawiono rozwiązanie zakładające, że rząd równania α stanowi kolejny proces stochastyczny czasu dyskretnego, którego wartości zmieniają się w sposób podobny do procesów reprezentujących współczynniki k_j .

Rozdział siódmy zawiera porównanie opracowanych w ramach recenzowanej rozprawy doktorskiej modeli. Zaproponowano kilka kryteriów, na podstawie których dokonano porównania. Pierwszym z nich była jakościowa analiza modeli pod kątem ich zdolności do poprawnego odzwierciedlenia stochastycznych komponentów charakterystyki łuku. Kolejne przyjęte kryteria miały charakter ilościowy. Biorąc pod uwagę wszystkie kryteria analizy porównawczej oraz możliwości docelowego oprogramowania, wybrano model opracowany na bazie losowych równań różniczkowych do implementacji w środowisku programistycznym.

W rozdziale ósmym przedstawiono wyniki implementacji wybranego modelu w oprogramowaniu wykorzystywanym do symulacji obwodów elektrycznych ETMP-ATP. Do zaimplementowania modelu w środowisku symulacyjnym wykorzystano wbudowany język programowania MODELS oraz element

stanowiący nieliniowy rezystor, którego rezystancja przyjmuje wartość obliczoną przez zdefiniowany przez użytkownika kod programu.

Rozdział dziewiąty zawiera podsumowanie wyników badań zrealizowanych w ramach rozprawy doktorskiej.

3. Główne osiągnięcia rozprawy

Do najważniejszych osiągnięć naukowych Doktoranta zaliczam:

- opracowanie nowatorskiego podejścia do zagadnień związanych z modelowaniem łuku elektrycznego polegające na wprowadzeniu zmienności współczynników k , równania bilansu mocy, odzwierciedlających stochastyczne zmiany charakterystyki pieca łukowego, skutkujące istotną poprawą dokładności modelu,
- budowę stanowiska pomiarowego umożliwiającego prowadzenie pomiarów łuku elektrycznego w warunkach laboratoryjnych,
- zastosowanie zoptymalizowanych układów chaotycznych w celu odzwierciedlenia stochastycznych zmian współczynników równania bilansu mocy,
- opracowanie nowego modelu M-NARX oraz modelu LSTM pozwalających na uwzględnienie dynamicznych i stochastycznych zmian charakterystyki pieca,
- zastosowanie operatora różniczkowo-całkowego ułamkowego rzędu w modelowaniu części deterministycznej charakterystyki pieca łukowego,
- przeprowadzenie wielokryterialnej analizy porównawczej modeli zaproponowanych w pracy oraz zaczerpniętych z literatury, prowadzącą do wybrania i implementacji najlepszego modelu w programie EMTP-ATP,
- implementację autorskiego modelu w oprogramowaniu ETMP-ATP wykorzystywanego do symulacji obwodów elektrycznych.

Doktorant w stopniu biegłym opanował tematykę rozprawy w warstwie nie tylko teoretycznej, ale także praktycznej, w oparciu o dobre rozeznanie problemów obliczeniowych i inżynierskich związanych tematyką rozprawy. Posiada umiejętności prowadzenia eksperymentu badawczego wymagającego wykonywania pomiarów zarówno w warunkach laboratoryjnych, jak również przemysłowych. Potrafił przeprowadzić symulacje komputerowe z wykorzystaniem procedur obliczeniowych opracowanych w środowisku Matlab, a także zaimplementować opracowany przez siebie model pieca łukowego w środowisku symulacyjnym EMTP-ATP, za pomocą wbudowanego języka programowania MODELS.

Stwierdzam, że doktorant dysponuje wymaganym do prowadzenia badań naukowych zasobem wiedzy z zakresu dyscypliny naukowej: automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.

4. Ocena poziomu edytorskiego rozprawy

Podział treści rozprawy jest logiczny i uporządkowany. Styl oraz poziom językowy jest dobry. Szata graficzna jest bardzo staranna i dopracowana. Jedynym mankamentem dotyczącym strony graficznej rozprawy jest zbyt mała wielkość niektórych rysunków przedstawiających wykresy zawierające wyniki przeprowadzonych obliczeń i analiz (np.: 2.3, 4.6, 5.19 itp). Sposób przekazywania treści jest zadowolający. Wszystkie symbole zostały precyzyjnie objaśnione. Informacja jest dość dobrze wyważona.

Czytając lekturę pracy odnosi się wrażenie o wysokiej kompetencji merytorycznej Autora, który potrafi dodatkowo przedstawić swoje wyniki w sposób przyjazny dla czytelnika. W pracy można znaleźć niewielką ilość błędów edytorskich, stylistycznych, gramatycznych. Nie wpływają one w żadnym stopniu na wysoką ocenę redakcji rozprawy.

5. Uwagi merytoryczne

1. Do opracowania modeli wykorzystywano bazę danych zawierającą wyniki pomiarów wykonywanych w warunkach przemysłowych i laboratoryjnych. Ile pomiarów wykonano na tych instalacjach? Ile plików pomiarowych i o jakiej długości wykorzystywano w procesie tworzenia i testowania poszczególnych modeli?
2. Palenie się łuku elektrycznego jest procesem silnie stochastycznym. Czy dane pomiarowe wykorzystywane w procesie modelowania były analizowane pod kątem powtarzalności? W jaki sposób parametry pracy pieca np. rodzaj wsadu wpływa na rejestrowane przebiegi prądów i napięć?
3. W rozdziale 2.2. przedstawiono opis układu pomiarowego i warunków metrologicznych w jakich prowadzono pomiary napięć i prądów dla rozpatrywanych obiektów. Pomiary te wykonywano z różną częstotliwością próbkowania: 5, 8 i 10 kHz. Dlaczego pomiary dla pieców o różnej wielkości i mocy wykonywano przy różnych częstotliwościach? Jaki wpływ ma zmiana częstotliwości sygnału pomiarowego ma na opracowane modele?
4. W przemysłowych sieciach elektroenergetycznych występuje zazwyczaj dużo zakłóceń generowanych przez różnego rodzaju urządzenia. Jakie sygnały zakłócające występowały podczas pracy pieca w warunkach przemysłowych i laboratoryjnych? W jaki sposób zakłócenia te eliminowano z sygnału pomiarowego, który był wykorzystywany w procesie tworzenia modeli?
5. Na jakiej podstawie dobrano układy chaotyczne, które dopasowywano do poszczególnych współczynników równania bilansu mocy łuku elektrycznego?
6. Czy Autor rozważał wykorzystanie innych narzędzi sztucznej inteligencji (np. uczenia maszynowego) do rozwiązania przedstawionego zagadnienia naukowego?

Zawarte w recenzji uwagi i zastrzeżenia nie wpływają w sposób znaczący na wartość merytoryczną rozprawy.

6. Podsumowanie i wnioski końcowe

Autor podjął interesującą próbę opracowania nowych modeli łuku elektrycznego występującego w elektrycznych piecach łukowych. Do budowy tych modeli zaproponował różne podejścia wykorzystujące m. in.: równania różniczkowe, model chaotyczny, sztuczne sieci neuronowe oraz model ułamkowego rzędu. Wszystkie modele opracował przy wykorzystaniu rzeczywistych danych pomiarowych zarejestrowanych dla pieców znajdujących się w eksploatacji oraz pracujących w warunkach laboratoryjnych, a także przy zastosowaniu modelu bazowego w postaci równania różniczkowego wynikającego z bilansu mocy chwilowej łuku elektrycznego. W wyniku przeprowadzonych badań Doktorant wykazał znaczącą poprawę skuteczności odwzorowania modelu łuku elektrycznego w porównaniu z modelem bazowym.

Przeprowadzone badania wymagały od Doktoranta dużej wiedzy teoretycznej obejmującej znajomość zaawansowanych narzędzi matematycznych oraz informatycznych, a także umiejętności zastosowania ich do rozwiązania problemu technicznego związanego z modelowaniem łuku elektrycznego. Realizacja pracy wymagała również znaczącej wiedzy praktycznej z zakresu wykonywania pomiarów w warunkach laboratoryjnych i przemysłowych. Doktorant posiadał umiejętność w zakresie tworzenia modeli i prowadzenia symulacji komputerowej z wykorzystaniem rzeczywistych danych pomiarowych. Z sukcesem zaimplementował swoje rozwiązanie w oprogramowaniu EMTP-ATP wykorzystywanym do symulacji obwodów elektrycznych i wykazał poprawność odzwierciedlenia charakterystyki łuku w symulacji komputerowej.

Doktorant wykazał, że ma niezbędne kwalifikacje do prowadzenia badań naukowych oraz rozwiązał w sposób oryginalny zagadnienie naukowe będące tematem rozprawy.

Rozwiązanie problemu postawionego w pracy jest ciekawe z punktu widzenia możliwości jego praktycznego wykorzystania w analizie układów zasilania pieców łukowych, której celem jest poprawa jakości energii w tych sieciach. Praca zawiera elementy nowości w sensie naukowym, stanowiące udokumentowany dorobek własny Doktoranta.

Stwierdzam, że opiniowana praca jest kompletna i nie wymaga żadnych zmian ani uzupełnień. Spełnia ona wymagania stawiane rozprawom doktorskim określone w stosownej ustawie. Wnioskuje o przyjęcie niniejszej pracy jako rozprawy doktorskiej. Wnoszę o dopuszczenie mgr inż. Macieja Klimasa do publicznej obrony przedłożonej pracy.

Prof. dr hab. inż. Andrzej Cichoń