

Częstochowa, dn. 14 lipca 2023 r.

prof. dr hab. inż. Rafał Scherer  
Katedra Inteligentnych Systemów Informatycznych  
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki  
Politechnika Częstochowska  
al. Armii Krajowej 36  
42-200 Częstochowa

## **Recenzja**

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

Niniejszą recenzję opracowano na wniosek Rada Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Śląskiej, która w dniu 25 kwietnia 2023 roku powołała mnie na recenzenta. Promotorem jest dr hab. inż. Dariusz Grabowski, prof. PŚ.

### **1. Charakterystyka tematu, celu i tezy badawczej rozprawy**

Modele komputerowe pieców łukowych prądu przemiennego mogą pomóc w optymalizacji parametrów pracy pieców łukowych, wykrywania awarii, prognozowaniu trwałości elementów, doskonaleniu jakości wyrobów oraz redukcja kosztów. Piece takie są odbiornikami energii o wyjątkowo dużym poborze prądu i bardzo nieliniowej charakterystyce. Rozprawa ma na celu stworzenie nowych modeli pieców łukowych z wykorzystaniem uczenia maszynowego na podstawie rzeczywistych danych przemysłowych.

### **2. Zawartość rozprawy**

Recenzowana praca mgr inż. Macieja Klimasa składa się z dziewięciu rozdziałów, dodatku, bibliografii oraz spisu rysunków. Dokument liczy 131 stron.

Rozdział pierwszy jest wprowadzeniem do tematyki z krótką historią rozwoju pieców i ich modelowania. Dokonano krótkiego przeglądu literatury oraz podana jest klasyfikacja metod modelowania. Omówiono modelowanie oparte na równowadze mocy.

Rozdział 2 jest omówieniem paleniska łukowego, jego budowy mechanicznej, zastępczego schematu elektrycznego oraz zasady działania. Omówiono dokładnie dane pomiarowe, które charakteryzują palenisko. Przedstawiano piece łukowe z których pochodziły dane pomiarowe, a mianowicie duży piec przemysłowy w hucie w Iranie, mały przemysłowy w Gliwicach oraz laboratoryjny.

Rozdział 3 poświęcony jest modelom opartym o stochastyczne równania różniczkowe. Podana jest systematyka takich modeli, z podziałem na dotyczące komponentów niskoczęstotliwościowych i wysokoczęstotliwościowych. Niskoczęstotliwościowe komponenty podzielone są na równania pełne i zredukowane. Równania rozwiązywane są algorytmami genetycznymi z funkcją celu w formie błędu średniokwadratowego. Wyniki eksperymentów pokazały, że jest możliwe modelowanie pieców łukowych za pomocą stochastycznych równań różniczkowych, a zmienne współczynniki  $k_j$  zmniejszają znacząco błąd średniokwadratowy.

Rozdział 4 dotyczy modeli chaotycznych. Celem jest sprawdzenie zachowania się takich modeli, biorąc pod uwagę fakt, że procesy w piecach łukowych mogą być chaotyczne. Omówiono obwód Chuy, układ Lorenza, układ Rosslera oraz układ czteroskrzydłowego atraktora chaotycznego.

Rozdział 5 dotyczy modelowania pieca łukowych przez sieci neuronowe. Sieci neuronowe są obecnie częstym wyborem w przypadku układów, które trudno modelować za pomocą dokładnych wyrażeń matematycznych. Oczywiście sieci neuronowe są czarnymi skrzynkami co jest ich największą wadą. W rozdziale omówiono sieci jednokierunkowe oraz rekurencyjne LSTM. Autor użył sieci jednokierunkowej typu perceptron wielowarstwowy oraz autorskiej metody podwójnego perceptronu wielowarstwowego. Ponadto stworzył metodę opartą na modelu NARX w połączeniu z siecią neuronową. Ostateczną modyfikacją tej metody był model M-NARX ANN z funkcją ReLU aby nie było ujemnych wartości na wyjściu modelu.

Dalej omawiana jest sieć głęboka składająca się z warstwy rekurencyjny LSTM oraz warstwy w pełni połączonej. Sieć ta modeluje komponenty niskoczęstotliwościowe pieca. Dlatego też został dodany dodatkowy moduł modelujący elementy wysokoczęstotliwościowe.

Rozdział 6 skupia się na poprawie samego składnika deterministycznego. Łuk elektryczny jest modelowany za pomocą równania bilansu mocy, ale z uogólnionym operatorem różniczkowania ułamkowego zamiast klasycznego różniczkowania rzędu 1. Metoda oparta jest na modelu Hammersteina-Wienera.

Rozdział 7 porównuje modele opisane w poprzednich rozdziałach pod kątem własności i miar dokładności. W tabeli 7.1 zebrano własności badanych modeli. Wynika z niej, że tylko modele RDE i LSTM potrafią odwzorować wszystkie trzy komponenty działania pieca łukowego.

Rozdziale 8 model wybrany jako najlepszy w rozdziale 7 został zaimplementowany w popularnym programie do symulacji obwodów elektrycznych ATP-EMTP.

Rozdział 9 jest podsumowaniem pracy.

Dodatek prezentuje kompletną implementację modelu w języku ATP-EMTP.

Pracę kończy bibliografia składająca się z 72 pozycji, zestawienie i definicja skrótów oraz lista rysunków.

### 3. Ocena rozprawy

W ramach rozprawy doktorskiej Doktorant zaproponował wprowadzenie zmiennych współczynników  $k_j$  odzwierciedlających stochastyczne zmiany charakterystyki pieców łukowych, co doprowadziło do znaczącej poprawy dokładności. Zastosował optymalizację systemów chaotycznych dla danych pomiarowych w celu odzwierciedlenia stochastycznych zmian równania bilansu mocy pieca. Opracował nowatorskie modele pieców łukowatych typu M-NARX i LSTM, które pozwalają na odzwierciedlenie dynamicznych zmian lub cech stochastycznych. Poprawił składnik deterministyczny modelu łuku poprzez wprowadzenie różniczkowania rzędu ułamkowego do zwykłego równania bilansu mocy. Dokonał analizy porównawczej wszystkich proponowanych podejść, dzięki czemu wybrał najlepszy model do zaimplementowania w symulatorze ATP-EMTP. Stworzył autorskie stanowisko badawcze do pomiaru i analizy zjawiska łuku elektrycznego.

Rozprawa doktorska uwidacznia wysoką ogólną wiedzę teoretyczną i praktyczną mgra inż. Macieja Klimasa. Doktorant przeanalizował dorobek światowy w dziedzinie dotyczącej modelowania pieców łukowych. Mgr Klimas opublikował szereg prac naukowych w renomowanych czasopismach, m.in. IEEE Transactions on Power Delivery (dwukrotnie), Applied Soft Computing, IEEE Transactions on Industry Applications oraz wiele prac w materiałach konferencji. Zaprezentowany materiał pokazuje, że Doktorant zrealizował cel pracy.

Rozprawa doktorska wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej mgra inż. Macieja Klimasa. Opracował wprowadzenie do tematyki i dokonał przeglądu literatury. Wykonał eksperymenty i przeniósł wybrany model do oprogramowania symulacyjnego. Zadał o popularyzację wyników swoich badań w renomowanych czasopismach i materiałach konferencji branżowych.

Rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Zaproponowane metody mają duże znaczenie dla nauk technicznych, zarówno teoretyczne, jak i aplikacyjne. Optymalizacja pracy pieców łukowych może przynieść wiele korzyści, takich jak poprawienie efektywności procesu, co może skutkować zmniejszeniem czasu potrzebnego na przetwarzanie metali oraz zwiększeniem produkcji i zmniejszeniem kosztów produkcji. Optymalizacja procesu może wpłynąć na jakość produkowanych metali. Poprawa kontroli nad procesem może zmniejszyć ryzyko wystąpienia awarii i wypadków. Zoptymalizowanie zużycia energii i zasobów może skutkować mniejszymi emisjami gazów cieplarnianych i innych substancji szkodliwych.

W pracy znajduje się kilka drobnych błędów literowych. Być może często używany przymiotnik *exemplary* mógłby być zastąpiony słowem *example*.

### 4. Wnioski końcowe recenzji

Podsumowując recenzję stwierdzam, że Pan mgr inż. Maciej Klimas, w rozprawie doktorskiej „Comparative analysis and implementation of selected new alternating current electric arc models” zrealizował cel rozprawy. Zaprezentowane rezultaty stanowią oryginalny wkład

Autora w rozwój dyscypliny automatyka, elektronika, elektrotechnika. Pan Maciej Klimas wykazał się umiejętnością samodzielnej pracy badawczej, znajomością literatury światowej i wiedzą w zakresie modelowania zjawisk fizycznych, w szczególności łuku elektrycznego i pieca łukowego. Stwierdzam, że przedłożona do zaopiniowania rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Macieja Klimasa spełnia warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim, określonym w artykule 187 ust. 1 i ust. 2 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce (Dz.U. z 2018 poz. 1668 z późn. zm.) i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony. Jednocześnie, ze względu na wysoki poziom rozprawy oraz opublikowanie rezultatów w renomowanych czasopismach wnoszę o jej wyróżnienie.

