

ZDITT - mpt. 15.01.2025 v.
M. Skowron

Warszawa, 31 grudnia 2024 r.

dr hab. inż. Bartosz Sawicki, prof. PW
Instytut Elektrotechniki Teoretycznej
i Systemów Informacyjno Pomiarowych,
Wydział Elektryczny,
Politechnika Warszawska

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr. inż. Błażeja Nycza

pt. „Optymalizacja konstrukcji wzbudnika do topienia metali z wykorzystaniem lewitacji elektromagnetycznej”

(na podstawie uchwały nr 40/2024 Rady Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Politechniki Śląskiej, z dnia 24 września 2024 r.)

1. Ocena doboru tematyki rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska pana mgr. inż. Błażeja Nycza dotyczy informatycznych metod optymalizacji kształtu wzbudnika do elektromagnetycznego topienia lewitacyjnego metali. Ze względu na dynamiczny rozwój możliwości platform obliczeniowych tego typu zagadnienia są istotnym i aktualnym problemem badawczym. Tym samym dobór tematyki rozprawy uważam za poprawny.

Praca ma zdecydowanie charakter multidyscyplinarny łącząc w sobie zagadnienia z różnych obszarów nauk technicznych. Jak naukowiec doceniam podejmowanie tego rodzaju tematów i uważam, że mają one ogromną wartość poznawczą, a także praktyczny potencjał oddziaływania na gospodarkę. Jednakże jako recenzent skupię się na ocenie wartości z perspektywy dyscypliny naukowej Informatyka Techniczna i Telekomunikacja. Po pierwsze dlatego, że do tej dyscypliny została ona zgłoszona, a po drugie dlatego, że moje kompetencje nie pozwalają wiarygodnie oceniać aspektów metalurgicznych.

2. Charakterystyka i główne osiągnięcia rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska liczy sobie 174 strony. Podzielona jest na dziesięć rozdziałów, które zostały uzupełnione o spis literatury oraz załącznik z pseudokodem algorytmu ewolucyjnego. Przedstawiając stan wiedzy autor przywołał 154 pozycje aktualnej literatury z wiodących międzynarodowych czasopism naukowych. Ogólna kompozycja tekstu pracy jest

logiczna, a podział na rozdziały dobrze ilustruje kolejne etapy pracy oraz osiągnięte przez Autora wyniki. Tytuł dobrze odpowiada treści pracy.

Pierwszy rozdział to bardzo krótka (1 stronicowa) prezentacja obiektu pracy. Przedstawione zostało zadanie elektromagnetycznego topienia lewitacyjnego, którego dotyczą badania. Nie ma jednak odniesień do żadnych elementów informatycznych, ani do metod numerycznych, ani do narzędzi symulacji, ani algorytmów optymalizacyjnych. Był to pierwszy sygnał, że dyscyplina Informatyka Techniczna nie jest głównym obszarem zainteresowań Autora.

Rozdział 2 to przegląd wiedzy dotyczącej topienia lewitacyjnego. Opisane zostały zarówno na procesy fizyczne stojące za tym zjawiskiem, ale również metody modelowania numerycznego, jak i inne badania dotyczące projektowania optymalnego kształtu wzbudnika. Kompletne i szerokie wykorzystanie źródeł przekonuje do zdolnościach i zainteresowaniach badawczych Doktoranta.

W trzecim rozdziale została postawiony cel i teza pracy. O ile brzmienie celu "opracowanie metodyki optymalizacji i jej walidacja dla wybranego modelu wzbudnika do Elektromagnetycznego Topienia Lewitacyjnego metali" wydaje mi się ciekawe i wartościowe, to teza jest moim zdaniem zbyt ostrożna. Autor chce bronić twierdzenia, że "Istnieje metodyka optymalizacji, która dla wybranej metody optymalizacji daje rozwiązanie optymalne lub zbliżone do niego. Dodatkowo istnieje metoda walidacji modelu symulacyjnego, która może potwierdzić jego wiarygodność". Wydaje mi się, że taki zapis jest sformułowany zbyt i nie wnosi wiele do stanu aktualnej wiedzy. W toku badań zaplanowano 10 szczegółowych zadań dotyczących opracowywania modelu obliczeniowego, weryfikacji jego dokładności oraz optymalizacji geometrii. Pozytywnie oceniam również precyzyjne zdefiniowanie optymalizowanej funkcji projektowej, którą była sprawność procesu topienia, jako stosunek mocy indukowanej we wsadzie do całkowitej mocy w układzie.

Rozdział 4 zawiera opis teoretyczny zjawisk fizycznych występujących podczas lewitacyjnego topienia metali. Doktorant wykorzystał aparat matematyczny, żeby szczegółowo i poprawnie zaprezentować złożone procesy fizyczne dotyczące rozkładów pól elektromagnetycznych, termicznych oraz dynamiki płynów. Zawarte zostało również wprowadzenie do podstaw optymalizacji lokalnej i globalnej. Nie uważam jednak tego elementu za silną stronę rozdziału, trudno się bowiem doszukać powiązań przedstawianych metod optymalizacji (poza algorytmami ewolucyjnymi) z dalszym opisem badań. Zabrakło mi również chociaż krótkiego omówienia metod numerycznych używanych do symulacji procesów fizycznych. Bez odpowiedzi pozostają pytania o metody rozwiązywania równań

przedstawionych w rozdziale 3. Wydaje się więc, że doktorant zdał się w tym zakresie na pakiety symulacyjne i nie podejmował świadomych wyborów metod obliczeniowych.

Rozdział 5 to opis programowania wykorzystywanego do symulacji rozkładu pól fizycznych. Model dotyczący pola elektromagnetycznego został wykonany w oparciu o otwartoźródłowe pakiety Gmsh i GetDP. Model uwzględniający dodatkowo pole temperatury i zjawisko konwencji bazuje na platformie Ansys. Dynamika płynów modelowana była w Ansys Fluent przy połączeniu z GetDP.

Rozdział 6 przedstawia stanowisko pomiarowe zbudowane do weryfikacji poprawności wyników symulacji. Bardzo pozytywnie doceniam trud włożony w zapewnienie zgodności pomiędzy modelem numerycznym, a realnym eksperymentem fizycznym. Tego typu badania są szczególnie ważne, bowiem budują wiarygodność metod obliczeniowych.

Rozdziały 7, 8 i 9 zostały poświęcone prezentacji wyników modelowania, optymalizacji oraz pomiarów weryfikujących. Zwracam uwagę na poprawne metodycznie stopniowanie złożoności modelu. W pierwszym kroku analizy dotyczą modelowania pola elektromagnetycznego, które następnie zostaje rozszerzone o pole temperatury, aby finalnie obejmować również kwestie deformacji kształtu i dynamiki ciekłego metalu. Przeprowadzona optymalizacja kształtu wzbudnika dla kulistego wsadu aluminiowego sprawiła, że sprawność procesu wzrosła prawie 3-krotnie. Eksperymentalna weryfikacja pomiarowa potwierdziła, że czas topienia spadł z 90s. do 30s. (3-krotnie) przy tej samej mocy dostarczonej do układu ok. 3100 W. Podjęto próby dla wsadu tytanowego, ale wyniki badań pokazały, że w tym układzie wzbudnika nie jest możliwe osiągnięcie wystarczającej temperatury.

Podsumowanie wyników zawarte w rozdziale 10 potwierdza główne osiągnięcia autora. Przedstawiona metodyka optymalizacji kształtu wzbudnika pozwoliła osiągnąć imponujący 3-krotny wzrost sprawności procesu topienia, co zostało potwierdzone pomiarami. Jako recenzent nie mam wątpliwości, że cel badań zdefiniowany na początku rozprawy został osiągnięty, a teza z powodzeniem obroniona.

Pozostaje jednak do rozstrzygnięcia kwestia związana z oceną osiągnięć w dyscyplinie Informatyka Techniczna i Telekomunikacja. Ogólne wrażenie mam takie, że większość wyników opisanych w rozprawie nie ma dużej wartości dla nauk informatycznych. Widocznych jest jednak kilka elementów związanych ze zaawansowanym wykorzystaniem narzędzi komputerowych. Pierwszym takim zadaniem było napisanie algorytmu optymalizacji w języku Python i sprzężenie go ze środowiskiem Ansys lub Gmsh / GetDP / Fluent tak aby skrypt używał symulacji jak funkcji celu. Algorytm musiał być ręcznie zaprojektowany, aby możliwe było jego dostosowanie do rozwiązywanego problemu.

Drugim zadaniem typowo informatycznym było dopracowanie algorytmu optymalizacji tak, aby zredukować czas optymalizacji przez redukcję liczby wywołań funkcji celu. Wymagało to zastosowania aproksymacji funkcji modelem wielomianowym (kwadratowym), tak aby zredukować liczbę faktycznych symulacji. Główny ciężar pracy informatycznej skupił się zatem na zautomatyzowaniu symulacji i sprzężeniu jej z ręcznie napisanym algorytmem, który dodatkowo wymagał kilku nietypowych modyfikacji. Doktorant musiał wykazać się wiedzą nie tylko z zakresu syntezy algorytmu optymalizacji, ale także osiągnąć wysoki poziom doświadczenia korzystania z pakietów symulacji numerycznych, aby osiągnąć zamierzony cel.

Ciekawy aspekt informatyczny został także pokazany na końcowym etapie symulacji łączącej pole elektromagnetyczne, pole temperatury i pole deformacji kształtu. Ogromna złożoność obliczeniowa skłoniła doktoranta do wydzielenia regionu o podwyższonym zagęszczeniu siatki, co pozwoliło wyraźnie przyspieszyć obliczenia. Jest to technika typowo informatyczna związana z dużymi zadaniami symulacyjnymi.

Podsumowując opis osiągnięć zaprezentowanych w rozprawie doktorskiej mgr. inż. Błażeja Nycza stwierdzam, że mają one dużą wartość naukową w szeroko rozumianym obszarze techniki. Jednakże osiągnięcia dotyczące metod informatycznych oceniam stosunkowo nisko, ale pozytywnie.

3. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Moje wątpliwości i uwagi krytyczne dotyczą głównie aspektów związanych z wykorzystywanymi w pracy metodami informatycznymi. Liczę na to, że Doktorant podejmie dyskusję naukową we wskazanych obszarach.

Główne uwagi krytyczne

G1. Osiągnięcia informatyczne zostały potraktowane drugorzędnie.

Rozprawa została zgłoszona do dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja, jako dotycząca metod modelowania i optymalizacji. Jednakże Autor główną uwagę poświęcił zjawiskom fizycznym i procesom topienia indukcyjnego. Obserwacja ta znajduje potwierdzenie w treści pierwszego rozdziału, a także w analizie spisu literatury, bowiem tylko 35 z 154 pozycji można powiązać z informatyką techniczną. Nie rozumiem skąd wzięła się ta rozbieżność.

G2. Dobór metody optymalizacji jest słabo uzasadniony.

Do rozwiązania problemu optymalizacji kształtu wzbudnika wybrany został algorytm ewolucyjny, co zostało jedynie krótko uzasadnione w podrozdziale 8.2.4. Jednakże duży koszt obliczenia pojedynczej wartości funkcji celu skłania mnie do zastanowienia, czy to jest najlepszy wybór. Metody ewolucyjne znane są przecież z wolnej zbieżności, oraz potrzeby symulacji wielu osobników. We wstępie teoretycznym omówionych zostało wiele metod, również optymalizacji lokalnej, czy bez gradientowej. Czy były one testowane w badaniach? Wydaje się, że metoda Nelder-Meada mogłaby osiągnąć podobne wyniki, ale znacznie szybciej.

Brakuje mi również opisu badań dotyczących doboru najlepszych parametrów dla metod optymalizacyjnych. Czy autor ma przekonanie, że np. wybrane wartości dla rozmiaru populacji, albo współczynnika mutacji są optymalne?

G3. Zaprezentowany pseudokod jest niskiej jakości.

Wykorzystanie pseudokodu jest znaną i stosowaną od dawna techniką prezentacji algorytmów. Pozwala on zredukować złożoność implementacyjną i skupić się na kluczowych elementach. Jednakże pseudokod zaprezentowany z Dodatku A (strony 171-174) jest tylko lekko zniekształconym skrypcem w języku Python. Jest tam wiele niespójności oraz niezgodności z dobrymi praktykami w zakresie pseudokodu, co jest szczególnie rażące w przypadku pracy pretendującej do obszaru informatyka.

G4. Brak analizy zbieżności metod optymalizacji.

Kluczową cechą iteracyjnych metod optymalizacyjnych jest ich zbieżność. W rozprawie kwestia ta została praktycznie zupełnie przemilczana. Konieczne jest zaprezentowanie wykresów zbieżności algorytmów omawianych w podrozdziałach 8.2 i 9.2. Dopiero ich analiza pozwala na świadome ustawienie wartości kryteriów zakończenia procesu optymalizacji.

Uwagi dyskusyjne

D1. Brakuje uzasadnienia dla współczynników używanych przy obliczeniach średniego współczynnika wymiany ciepła, wzory (4.21)-(4.25)

D2. Warto podać więcej szczegółów w jaki sposób obliczane były parametry materiałowe w modelowaniu zmian kształtu ośrodka nieściśliwego.

D3. Brakuje przekonującego uzasadnienia, że model asymetryczny i trójwymiarowy daje lepsze wyniki niż osiowo-symetryczny model 2D. Jakie byłyby różnice w czasie obliczeń i wartościach obliczonego pola?

D4. Proszę wyjaśnić związek z dyskretyzacji z głębokością wnikania pola. Jak rozumieć, że we wzбудniku wykorzystano dziesięciokrotną wartość wnikania pola. Patrz równanie (4.8)

D5. Trudno mi się zgodzić ze zdaniem "Jednym z niewielu oprogramowań pozwalających na niejednorodny rozkład konduktywności jest GetDP" (str. 83). Modele z niejednorodnym rozkładem konduktywności są zupełnie typowe dla problemów bioelektromagnetyzmu obliczeniowego, w związku z tym istnieje wiele pakietów i bibliotek, które wspierają takie wymagania (np. Comsol, CST, FeniCS).

D6. Warunki brzegowe do modelowania pola elektromagnetycznego zostały zadane na prostopadłościanie dwa razy większym od rozmiaru wzбудnika (podrozdział 5.2.4). Czy Autor badał wpływ rozmiaru otoczenia na wartości pola? Moje doświadczenia pokazują, że szczególnie w przypadku pola magnetycznego warto odsunąć warunki brzegowe (nawet na 3-5 krotność rozmiary obiektu).

Drobne błędy edytorskie

E1. str. 38, niejasny opis działania siły Lorentza

E2. str. 36, brak symbolu całkowania we wzorze (4.5)

E3. str. 43, literówka, powinno być "W niniejszej sekcji ..."

E4. str. 49, literówka, powinno być "Jednym z najprostszych ..."

E5. str. 66, całkowicie pomyłony podpis do Rysunku 5.1

E6. str. 71, błąd językowy, co to jest "długość krawędzi meshu"?

E7. str. 139, literówka, powinno być "stanowią pierwszą populację"

4. Wniosek końcowy

W końcowym podsumowaniu warto zauważyć, że wyniki opisane w rozprawie zostały również częściowo przedstawione w pięciu międzynarodowych publikacjach naukowych:

- Nycz, B., Przyłucki, R., Maliński, Ł., & Golak, S. (2023). A simulation model for the inductor of electromagnetic levitation melting and its validation. *Materials*, 16(13), 4634.

- Golak, S., Geuzaine, C., Przyłucki, R., Nycz, B., & Henrotte, F. (2025). Hybrid numerical 3D model of electromagnetic levitation of molten metal. *Applied Thermal Engineering*, 258, 124697.
- Nycz, B., Malinski, L., & Przyłucki, R. (2021). Influence of selected model parameters on the electromagnetic levitation melting efficiency. *Applied Sciences*, 11(9), 3827.
- Nycz, B., Przyłucki, R., & Maliński, Ł. (2023, May). Comparison of characteristics for two selected inductors for levitation melting. In *2023 14th International Conference on Measurement* (pp. 222-225). IEEE.
- Nycz, B., Przyłucki, R., Maliński, Ł., & Golak, S. (2024). Optimization of an inductor for electromagnetic levitation melting. *COMPEL-The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*.

Doktorant jest pierwszym autorem w czterech z tych prac, a na szczególne wyróżnienie zasługuje artykuł zaakceptowany do druku w prestiżowym czasopiśmie *Applied Thermal Engineering* wydawnictwa Elsevier (IF 6.1). Wszystko to potwierdza posiadanie doświadczenia badawczego oczekiwanego od osoby ubiegającej się o stopień doktora nauk technicznych.

Pomimo istotnych wątpliwości dotyczących skali osiągnięć w obszarze informatyki, stwierdzam, że recenzowana rozprawa mgr. inż. Błażeja Nycza pt. „Optymalizacja konstrukcji wzbudnika do topienia metali z wykorzystaniem lewitacji elektromagnetycznej” spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim. Wnoszę o dopuszczenie jej Autora do publicznej obrony.



dr hab. inż. Bartosz Sawicki

