

dr hab. inż. Dariusz Czerwiński, prof. uczelni
Politechnika Lubelska
ul. Nadbystrzycka 36D,
20-618 Lublin
tel. +48 81 538 46 73

Lublin, 12 luty 2025 r.

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr. inż. Błażeja Nycza pt.: „Optymalizacja konstrukcji wzbudnika do topienia metali z wykorzystaniem lewitacji elektromagnetycznej”

Niniejsza recenzja została przygotowana na zlecenie Rady Dyscypliny Naukowej Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Politechniki Śląskiej reprezentowanej przez dr. hab. inż. Krzysztofa Simińskiego, prof. PŚ.

Przedstawiona do recenzji rozprawa mgr. inż. Błażeja Nycza dotyczy optymalizacji wzbudnika do topienia metali z wykorzystaniem lewitacji elektromagnetycznej (ETL). Rozprawa liczy 174 strony, w tym 10 rozdziałów oraz obszerną bibliografię obejmującą 154 pozycje, z czego znaczna część to prace z ostatnich 10 lat, świadczące o aktualności podjętej tematyki badawczej. Dysertacja powstała pod kierunkiem promotora – dr. hab. inż. Romana Przyłuckiego, prof. uczelni oraz promotora pomocniczego – dr. inż. Łukasza Malińskiego.

1. Dobór tematu, cel i zakres pracy

Tematyka rozprawy dotyczy istotnych i aktualnych zagadnień związanych z lewitacyjnym topieniem metali, szczególnie w kontekście optymalizacji konstrukcji wzbudnika. Lewitacja elektromagnetyczna, jako metoda bezkontaktowego topienia metali, znajduje zastosowanie w przemyśle kosmicznym, medycynie oraz produkcji zaawansowanych materiałów. Doktorant skoncentrował się na modelowaniu

i optymalizacji wzbudników, co ma kluczowe znaczenie dla poprawy sprawności procesu i ograniczenia strat energetycznych.

Celem pracy jest opracowanie zoptymalizowanej konstrukcji wzbudnika dla wybranych kształtów wsadu, uwzględniającej kryteria wydajności energetycznej, stabilności lewitacji oraz jednorodności nagrzewania wsadu. Autor sformułował następującą tezę: „istnieje metodyka optymalizacji, która dla wybranej metody optymalizacji daje rozwiązanie optymalne lub zbliżone do niej. Dodatkowo istnieje metoda walidacji modelu symulacyjnego, która może potwierdzić jego wiarygodność.”

Zakres pracy doktorskiej obejmuje:

- Modelowanie numeryczne procesów elektromagnetycznych – doktorant dokonuje analizy wpływu parametrów wzbudnika na stabilność lewitacji i efektywność energetyczną.
- Analizę wpływu parametrów konstrukcyjnych wzbudnika – optymalizacja geometrii wzbudnika w kontekście stabilności topienia metali i ograniczenia strat energetycznych.
- Opracowanie modeli obliczeniowych – stworzenie i zastosowanie modeli EM-T (Electromagnetic-Thermal) oraz EM-T-FD (Electromagnetic-Thermal-Fluid Dynamics) do symulacji procesów elektromagnetycznych i termicznych.
- Weryfikację eksperymentalną na stanowisku badawczym – przeprowadzenie testów w rzeczywistych warunkach w celu potwierdzenia wyników symulacyjnych.

Zakres pracy uwzględniał zarówno aspekty teoretyczne, jak i eksperymentalne, mające na celu optymalizację wzbudnika do lewitacyjnego topienia metali.

W mojej opinii temat rozprawy jest dobrze dobrany, aktualny i ma duży potencjał aplikacyjny. Uwzględnia zarówno rozwój wiedzy teoretycznej, jak i możliwości zastosowań przemysłowych. Teza pracy jest jasno określona, a jej weryfikacja została przeprowadzona w sposób rzetelny.

2. Merytoryczna ocena rozprawy i uzyskanych wyników

Rozprawa mgr. inż. Nycza stanowi kompleksowe opracowanie problemu optymalizacji wzbudnika do topienia metali z wykorzystaniem lewitacji elektromagnetycznej. W szczególności doceniam:

- Przegląd literatury: W rozdziałach 2 i 4 autor dokonał starannego przeglądu literatury dotyczącej historii i zastosowań ETL, ze szczególnym uwzględnieniem badań nad optymalizacją wzbudników. Autor odniósł się do licznych publikacji międzynarodowych, w tym badań dot. stabilności lewitacji, optymalizacji geometrii wzbudnika i analizy procesów termo-fizycznych. Wskazano brak jednoznacznych rozwiązań konstrukcyjnych dla wsadów o nietypowych kształtach. Podkreślono, że autor szczególnie dobrze uwzględnił badania nad wpływem geometrii wzbudnika na siłę lewitacyjną oraz analizę przepływów w otoczeniu wsadu. Tego rodzaju zagadnienia mają kluczowe znaczenie dla stabilności procesu ETL, a ich dokładne omówienie świadczy o rzetelności przeprowadzonego przeglądu.

- Modele obliczeniowe: w rozdziale 5 rozprawy doktorskiej Błażeja Nycza opisano proces modelowania numerycznego wzbudnika do elektromagnetycznego topienia lewitacyjnego (ETL) oraz stosowane podejścia obliczeniowe. Doktorant przeprowadził kilka kluczowych kroków. Najpierw wybrał geometrię wzbudnika, identyfikując kluczowe parametry początkowe wpływające na efektywność optymalizacji. Odwzorował rzeczywistą geometrię wzbudnika, co umożliwiło porównanie wyników symulacji z eksperymentami. Następnie zaimplementował model elektromagnetyczny (EM) wykorzystując programy gmsh oraz GetDP. Określił warunki początkowe i brzegowe, bazując na rzeczywistych warunkach eksperymentalnych, oraz wprowadził sprzężenie między modelem elektromagnetycznym a termicznym (EM-T), uwzględniając przewodnictwo cieplne wsadu i wymianę ciepła z otoczeniem. Opracował również zaawansowany model uwzględniający dynamikę płynów (EM-T-FD), analizując zmiany geometrii stopionego wsadu w czasie. Przeprowadził analizę wrażliwości wyników na gęstość siatki dyskretyzacyjnej, określając optymalną liczbę elementów siatki dla efektywnej symulacji. Rozdział 5 prezentuje solidne podejście do modelowania numerycznego i optymalizacji procesu ETL, umożliwiając szczegółową

analizę zachowania wsadu i wzbudnika oraz dostarczając wartościowych danych do dalszej walidacji eksperymentalnej.

- Stanowisko pomiarowe: w rozdziale 6 opisano przygotowanie stanowiska badawczego oraz procedury pomiarowe do analizy procesów podczas elektromagnetycznego topienia lewitacyjnego. Doktorant zaprojektował stanowisko umożliwiające jednoczesną akwizycję danych dotyczących temperatury, położenia wsadu oraz parametrów elektrycznych wzbudnika. Kluczowe elementy stanowiska obejmowały kamerę termowizyjną PI 640 do rejestrowania temperatury wsadu, kamerę wideo Nikon D5300 do rejestracji ruchu i deformacji wsadu, sondę prądową CWT 60xB oraz oscyloskop cyfrowy THS720P. Pomiary koncentrowały się na rejestracji czasu topienia, stabilnej pozycji lewitacji wsadu, kształtu wsadu po osiągnięciu temperatury topienia oraz parametrów elektrycznych wzbudnika. Czas nagrzewania wsadu określano na podstawie nagrań z kamer termowizyjnej i wideo, a pozycję lewitującego wsadu na podstawie analizy obrazu cyfrowego. Kamera wideo kontynuowała nagrywanie po stopieniu wsadu, co pozwalało na analizę zmian geometrii i deformacji materiału. Pomiar napięcia i natężenia prądu realizowano przy użyciu oscyloskopu i sondy prądowej. Opracowana metodyka pomiarowa pozwoliła na dokładne określenie kluczowych aspektów stabilności lewitacji oraz efektywności nagrzewania wsadu. Wyniki uzyskane dzięki przeprowadzonym pomiarom były następnie wykorzystane do walidacji modeli obliczeniowych przedstawionych w poprzednich rozdziałach.

- Symulacje numeryczne: w rozdziale 7 doktorant przeprowadził wstępne symulacje i eksperymenty dotyczące wpływu parametrów elektromagnetycznych na lewitację wsadu oraz sprawność procesu topienia. Celem badań było określenie wpływu wybranych parametrów geometrycznych i elektrycznych na efektywność procesu ETL. Skoncentrowano się na analizie sił, mocy indukowanej we wsadzie oraz sprawności energetycznej procesu. Doktorant przeprowadził obliczenia dla różnych wariantów konstrukcji wzbudnika, zmieniając kluczowe parametry, takie jak częstotliwość prądu, pozycja wsadu oraz geometria wzbudnika. Badania bazowały na modelu elektromagnetycznym opracowanym we wcześniejszych rozdziałach. Podczas eksperymentów monitorowano trzy kluczowe wartości: siłę wznoszącą, moc

indukowaną we wsadzie oraz sprawność procesu topienia. Wyniki badań wykazały, że lewitacja była możliwa dla częstotliwości powyżej 10 kHz oraz kąta stożkowego mniejszego niż $6\pi/32$. Maksymalna moc indukowana we wsadzie została uzyskana dla $f = 35$ kHz, jednak w tym przypadku wsad nie lewitował. Maksymalną siłę lewitacji uzyskano dla $f = 30$ kHz i $\alpha = 3\pi/32$, co zapewniło stabilne unoszenie wsadu. Najwyższą sprawność energetyczną osiągnięto dla $f = 10$ kHz, $\alpha = 2\pi/32$, $z_B = 0,015$ m, jednak nie występowała wówczas lewitacja. Zmienność położenia wsadu miała istotny wpływ na jego stabilność – wzrost z_B powodował zmniejszenie siły F_z , co mogło prowadzić do destabilizacji procesu. Kąt stożkowy wzbudnika wpływał na położenie punktu równowagi – im większy kąt, tym trudniejsza była lewitacja. Uzyskane wyniki posłużyły jako podstawa do dalszych badań nad optymalizacją wzbudnika i poprawą sprawności procesu elektromagnetycznego topienia lewitacyjnego.

W rozdziale 8 pt. „Badania EM-T” doktorant skupił się na rozszerzeniu wcześniejszych analiz o wpływ efektów termicznych na proces elektromagnetycznego topienia lewitacyjnego. Połączono model elektromagnetyczny z termicznym, co pozwoliło na dokładniejszą ocenę sprawności nagrzewania i stabilności lewitacji wsadu. Doktorant przeprowadził walidację modelu EM-T na podstawie eksperymentalnych pomiarów, uwzględniając wpływ ciepła generowanego przez prądy wirowe na nagrzewanie wsadu. Wykorzystano stanowisko pomiarowe opisane w rozdziale 6, rejestrując temperaturę wsadu, pozycję lewitacyjną oraz moc dostarczaną do wzbudnika. Wyniki symulacji były zgodne z rzeczywistymi pomiarami, z czasem topienia wsadu wynoszącym średnio 91 sekund, a w modelu obliczeniowym 86 sekund. Pozycja lewitacyjna wsadu w symulacji była o 2 mm niższa niż w eksperymencie. Doktorant przeprowadził optymalizację geometrii wzbudnika, aby zwiększyć sprawność procesu, wykorzystując algorytm ewolucyjny. Po optymalizacji sprawność procesu wzrosła niemal trzykrotnie, a zmodyfikowany wzbudnik pozwalał na osiągnięcie stabilnej pozycji wsadu dla szerszego zakresu częstotliwości prądu. Rozdział 8 pokazuje, że zaproponowane modele EM-T są skuteczne i zgodne z rzeczywistością, a optymalizacja wzbudnika znacząco poprawiła sprawność procesu, co potwierdza trafność przyjętej metodyki i potencjalne zastosowanie wyników badań w rzeczywistych aplikacjach topienia lewitacyjnego.

- Oryginalność rozwiązań: Doktorant zaproponował nowatorskie podejście do optymalizacji wzbudnika, łącząc algorytmy ewolucyjne z analizą numeryczną. Wyniki wskazują na możliwość redukcji strat energetycznych nawet o 15% przy jednoczesnym zwiększeniu jednorodności nagrzewania wsadu.

3. Uwagi krytyczne

Pomimo tego, że autor starannie przygotował rozprawę to nie ustrzegł się pomyłek, które recenzent zauważył.

Uwagi edytorskie:

Str. 24 – zła odmiana „nie ulega deformacją” – powinno być „nie ulega deformacji”;

Str. 25 – powtórzone wypunktowanie „Zestawy parametrów z najwyższymi wartościami funkcji przystosowania ...”;

Str. 26 - zła odmiana „nie ulega deformacją” – powinno być „nie ulega deformacji”. Zdanie jest bardzo podobne do tego ze strony 24;

Str. 32 – zła odmiana „były aktualizowano wraz” – powinno być „były aktualizowane wraz”;

Str. 49 – błąd ort. w słowie „najprosstrzych” – powinno być „najprostszych”;

Str. 53 – zła odmiana „szybkemu tempo” – powinno być „szybkemu tempu”;

Str. 66 – Rys. 5.1 to nie jest funkcja celu – zły opis rysunku lub zły rysunek w stosunku do opisu;

Str. 69 – zła odmiana „zdecydowano się na geometrie, która” – powinno być „zdecydowano się na geometrię, która”;

Str. 71 – słowa „meshu” (Tabela 5.1 - opis) nie ma w języku polskim – powinno być „siatki”;

Str. 75 – brak w pierwszym zdaniu po „wsadu i wzbudnika” dopisku „opisanych równaniami”;

Str. 81 – doktorant powołuje się na początku rozdziału na 8.3, nie podając czy chodzi o równanie 8.3 czy o rysunek 8.3;

Str. 92 – nastąpiło powołanie się na rysunek 7.7, którego nie ma, podobnie jak 7.3, 7.4, 7.5. 7.8 i 7.9. Prawdopodobnie błędna numeracja rysunków na kolejnych stronach;

Str. 95 – zbędny znak zapytania po zdaniu „... pominięta w tej części pracy”;

Str. 97 – doktorant pisze „Współczynnik mocy (3.1)”, zapewne jak w dalszej części wypowiedzi twierdzi chodzi o sprawność, która to została podana zależnością (3.1);

Str. 125 – sformułowanie „opierały się o wsad aluminiowy” nie jest poprawne w języku polskim (patrz Słownik poprawnej polszczyzny PWN pod hasłem: niepoprawne „w oparciu o coś”);

Str. 131 – brak doprecyzowania powołania się na 9.1, chodzi o rysunek a nie równanie;

Uwagi dyskusyjne:

Str. 42 – zależność (4.21), średni współczynnik wymiany ciepła h_{avg} jest podany dla ściany, czy oznacza to że modelowany obszar był ograniczony innym?;

Str. 70 – zostały podane przewodności elektryczne miedzi i aluminium, doktorant nie doprecyzował jednak dla jakiej czystości oraz temperatury obu metali, zostały podane te wartości.

Str. 72 – doktorant podaje w nawiasie warunki brzegowe tak jak: granice naturalne, zerowe styczne pole H, granice Neumanna i inne. Czym się różnią granice naturalne od granic Neumanna, w aspekcie informacji podanych w Nikolaos D. Katopodes, in Free-Surface Flow, 2019 (1.5.4 Natural Boundary Conditions), czy też „What Are Boundary Conditions?” (<https://www.simscale.com/docs/simwiki/numerics-background/what-are-boundary-conditions/>)

Str. 77 – doktorant podaje, że temperatura na zewnątrz prostopadłościanu była stała, co by oznaczało wybór warunków I rodzaju to znaczy $T=\text{const}$, jak to rozumieć w aspekcie stwierdzenia na stronie 42, gdzie doktorant podaje dla ściany współczynnik wymiany ciepła z otoczeniem co sugeruje zastosowanie warunków II rodzaju?

Str. 78 – doktorant podaje, że „Włączono dwukierunkowe sprzężenie z częścią elektromagnetyczną.”. Czy doktorant może wyjaśnić w jaki sposób zostało to zrobione skoro modele się różnią między sobą?

Na rysunku 5.15 doktorant podaje w algorytmie warunek „Nie przekroczono założonej ilości iteracji”. Czy doktorant może wyjaśnić jak liczba iteracji wpływa na dokładność rozwiązania i czy wartość graniczna jest czymś uzasadniona?

Choć rozprawa przedstawia wyniki na wysokim poziomie, brak bardziej szczegółowej analizy porównawczej z literaturą dotyczącą optymalizacji wzbudników, np. w kontekście stabilności lewitacji dla metali trudnotopliwych.

Przydałoby się bardziej szczegółowe omówienie ograniczeń stosowanych modeli, zwłaszcza w odniesieniu do procesów dynamicznych zachodzących podczas topienia.

Doktorant zastosował algorytm ewolucyjny (EA) do optymalizacji geometrii wzbudnika, co pozwoliło na poprawę sprawności procesu elektromagnetycznego topienia lewitacyjnego. Metoda ta wykorzystuje mechanizmy mutacji, rekombinacji i selekcji, umożliwiając eksplorację różnych konfiguracji wzbudnika oraz znalezienie optymalnych wartości parametrów geometrycznych. Jednakże doktorant nie wykorzystał kilku dostępnych metod optymalizacji, które mogłyby być przydatne w tym kontekście. W literaturze dostępne są również inne podejścia, takie jak:

- Algorytm rojowy (PSO - Particle Swarm Optimization) – który mógłby skutecznie modelować przestrzeń rozwiązań, minimalizując czas obliczeń.

- Algorytm różnicowy (DE - Differential Evolution) – pozwalający na lepsze radzenie sobie z funkcjami wielu zmiennych i dużymi przestrzeniami poszukiwań.
- Optymalizacja metodą gradientową lub hybrydową – które mogłyby poprawić precyzję wyników poprzez iteracyjne ulepszanie znalezionych rozwiązań.

Czy doktorant ma wiedzę, lub też podejrzewa, że któryś z wymienionych algorytmów mógłby być bardziej odpowiedni do opisywanego problemu?

4. Podsumowanie

Rozprawa doktorska mgr. inż. Błażeja Nycza stanowi oryginalny wkład w rozwój wiedzy z zakresu modelowania numerycznego lewitacyjnego topienia metali. Przedstawione wyniki dowodzą skuteczności zaproponowanych metod optymalizacji konstrukcji wzbudnika. Praca łączy podejście teoretyczne z eksperymentalnym, a jej rezultaty mają znaczenie zarówno dla rozwoju wiedzy, jak i zastosowań praktycznych.

Na podstawie całości rozprawy, w szczególności kompleksowej analizy literatury, opracowania nowatorskich modeli obliczeniowych oraz przeprowadzenia rzetelnej walidacji eksperymentalnej, z pełnym przekonaniem stwierdzam, że rozprawa doktorska spełnia warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim, określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (t.j. Dz. U. z 2023 r., poz. 742 z późn. zm.). i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

dr hab. inż. Dariusz Czerwiński, profesor uczelni

