

Częstochowa, dnia 28.05.2026 r.

dr hab. inż. Dariusz Całus, prof. Uczelni
Wydział Elektryczny
Politechnika Częstochowska
e-mail: dariusz.calus@pcz.pl

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Michała Żużalka

pt. „Grzanie indukcyjne materiałów warstwowych łączonych wybuchowo”
wykonanej pod kierunkiem dr hab. inż. Andrzeja WAINDOKA, prof. Uczelni
oraz promotora pomocniczego dr. inż. Pawła PIEKIELNEGO

Niniejszą recenzję sporządzono na podstawie przekazanego egzemplarza rozprawy doktorskiej oraz wytycznych formalnych dotyczących recenzji. Ocenę prowadzono z perspektywy wymagań stawianych rozprawie doktorskiej zaliczającej się do **dziedziny nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne**: oryginalności problemu, poprawności metody badawczej, jakości walidacji, samodzielności Autora, wartości poznawczej wyników, ich przydatności aplikacyjnej oraz sposobu udokumentowania przeprowadzonych badań.

1. Ocena aktualności i znaczenia tematyki badań

Rozprawa dotyczy grzania indukcyjnego materiałów warstwowych łączonych wybuchowo. Już samo zestawienie tych dwóch obszarów — nagrzewnictwa indukcyjnego oraz technologii materiałów platerowanych wybuchowo — wskazuje, że Autor podjął temat wymagający kompetencji z kilku dziedzin, takich jak elektrotechnika, elektrotermia, numeryczna analiza pól sprzężonych, metrologia temperatury oraz inżynieria materiałowa. Nie jest to więc praca mieszcząca się wygodnie w jednym, wąsko rozumianym obszarze specjalności. Jej wartość polega właśnie na tym, że problem techniczny został potraktowany jako problem naukowy, którego nie da się rozwiązać przez proste zastosowanie znanych zależności projektowych dla wsadów jednorodnych.

Materiały warstwowe łączone wybuchowo są układami o wyraźnie niejednorodnych właściwościach elektrycznych, cieplnych, magnetycznych i mechanicznych. W procesie nagrzewania indukcyjnego nie zachowują się one jak materiał zastępczy o uśrednionych parametrach. Rozkład prądów wirowych, strat mocy

i temperatury zależy od kolejności warstw, ich grubości, położenia względem wzbudnika, skokowych zmian przewodności elektrycznej i przewodności cieplnej, a w przypadku warstw ferrytycznych również od nieliniowej charakterystyki magnesowania i zaniku właściwości ferromagnetycznych po przekroczeniu temperatury Curie.

W tym sensie rozprawa ma dobrze określoną lukę poznawczą. Literatura dotycząca nagrzewania indukcyjnego obejmuje liczne rozwiązania dla materiałów jednorodnych, klasycznych geometrii i typowych procesów przemysłowych. Z kolei literatura dotycząca platerowania wybuchowego koncentruje się przede wszystkim na wytwarzaniu połączenia, mikrostrukturze, właściwościach mechanicznych i odporności eksploatacyjnej. Znacznie mniej rozpoznany jest obszar, w którym materiał warstwowy staje się jednocześnie obiektem oddziaływania pola elektromagnetycznego i elementem konstrukcyjnym urządzenia grzewczego. Recenzowana rozprawa lokuje się właśnie w tym miejscu, co uważam za wybór trafny i naukowo uzasadniony.

Na podkreślenie zasługuje również aktualność praktyczna tematu. W wielu urządzeniach procesowych oczekuje się szybkiego, selektywnego i energooszczędnego doprowadzenia ciepła, a jednocześnie wymaga się odporności korozyjnej, odpowiedniej wytrzymałości i równomiernego rozprowadzania temperatury. Konstrukcja wielowarstwowa daje możliwość rozdzielenia tych funkcji pomiędzy poszczególne warstwy. Warstwa ferrytyczna może zapewniać skuteczne sprzężenie elektromagnetyczne, warstwa miedzi może pełnić rolę dystrybutora ciepła, a warstwa użytkowa lub chemoodporna może decydować o warunkach kontaktu z medium. Temat pracy ma istotne znaczenie praktyczne w kontekście projektowania systemów nagrzewania indukcyjnego oraz optymalizacji procesów technologicznych. Autor słusznie rozpoznał tę możliwość jako zagadnienie wymagające pogłębionej analizy.

2. Cel pracy i ocena tez badawczych

Główny cel pracy został sformułowany jako zbadanie materiałów warstwowych łączonych wybuchowo pod kątem zjawisk występujących podczas nagrzewania indukcyjnego. Cel ten ma charakter szeroki, ale nie jest deklaracją ogólną; został rozwinięty w ciąg działań badawczych obejmujących dobór układów materiałowych, identyfikację parametrów, modelowanie numeryczne, budowę stanowisk pomiarowych, walidację modeli oraz wykorzystanie wyników do projektowania wzbudników i rozwiązań aplikacyjnych.

Autor sformułował dwie zasadnicze tezy. Pierwsza głosi, że analiza polowa umożliwia na etapie projektowania wyznaczenie poprawnego rozptyłu prądów wirowych, strat mocy oraz temperatury w materiale warstwowym wytworzonym metodą platerowania wybuchowego. Druga dotyczy możliwości zaprojektowania i wykonania układu wzbudników dedykowanych do grzania materiałów

wielowarstwowych łączonych wybuchowo, w tym w procesach technologicznych ich przetwarzania.

Obie tezy oceniam jako właściwie dobrane z punktu widzenia naukowego i inżynierskiego. Pierwsza jest metodologicznie uzasadniona, ponieważ dotyczy możliwości wykorzystania analizy polowej do wyznaczania rozkładów prądów, strat i temperatur oraz oceny wiarygodności modelowania polowego w układach o zmiennych i niejednorodnych parametrach, a także pozostaje zgodna z aktualnym stanem rozwoju modelowania numerycznego.

Druga teza ma charakter projektowo-aplikacyjny, ponieważ przenosi wyniki modelowania i badań eksperymentalnych na poziom projektowania specjalizowanych induktorów. Jest ona poprawna technicznie i możliwa do praktycznej realizacji, jednak ma przede wszystkim charakter aplikacyjny i w niewystarczającym stopniu formalizuje element nowości naukowej.

Zasadniczo takie sformułowanie tez należy ocenić pozytywnie. Autor nie ogranicza się jedynie do wykazania, że program obliczeniowy potrafi odtworzyć wyniki pomiarów, lecz podejmuje próbę odpowiedzi na pytanie, czy uzyskana wiedza może zostać wykorzystana w projektowaniu rzeczywistych układów grzejnych. Obie tezy są logicznie spójne oraz możliwe do zweryfikowania eksperymentalnie.

3. Charakterystyka rozprawy

Rozprawa jest obszerna i ma strukturę zasadniczo logiczną. Autor prowadzi czytelnika od zagadnień podstawowych, przez opis technologii platerowania wybuchowego i przegląd stanu wiedzy, do części numerycznej, eksperymentalnej, projektowej i wdrożeniowej. Układ ten jest uzasadniony, ponieważ badany problem wymaga zarówno wprowadzenia elektromagnetycznego, jak i materiałowego. Struktura pracy doktorskiej odzwierciedla klasyczny tok badań naukowych — od sformułowania problemu badawczego po praktyczną implementację uzyskanych wyników.

Recenzowana praca liczy 155 stron i została podzielona na 11 rozdziałów, z wyłączeniem bibliografii oraz załączników. Zasadnicza część rozprawy obejmuje 140 stron. Tekst uzupełniają wysokiej jakości ilustracje oraz materiały pomocnicze. Bibliografia zawiera 88 pozycji.

W rozdziałach wprowadzających 1–2 omówiono mechanizmy nagrzewania indukcyjnego, znaczenie przewodności elektrycznej i przenikalności magnetycznej, zjawisko naskórkowości oraz równania pola elektromagnetycznego, a także zagadnienia związane z ciepłem właściwym, pojemnością cieplną i przewodnością cieplną. Przedstawiono również mechanizmy transportu ciepła, takie jak przewodzenie, konwekcja i promieniowanie. Następnie opisano technologię platerowania wybuchowego oraz charakterystykę materiałów wielowarstwowych. Dokonano ponadto systematyzacji współczesnych zastosowań nagrzewania indukcyjnego,

obejmujących m.in. topienie metali, obróbkę cieplną, spawanie i lutowanie, a także specjalistyczne zastosowania technologiczne i naukowe.

Rozdziały te pełnią jednocześnie funkcję przeglądu historycznego, omówienia zastosowań oraz wykładu podstaw teoretycznych, co prowadzi do pewnego przeciążenia części wprowadzającej, która zazwyczaj powinna mieć bardziej ogólny charakter.

W dalszych rozdziałach wykazano, że kluczowym czynnikiem determinującym dokładność modeli nagrzewania indukcyjnego jest uwzględnienie temperaturowej zależności takich parametrów jak pojemność cieplna, przewodność cieplna, przewodność elektryczna oraz właściwości magnetyczne. Przeprowadzono przegląd narzędzi programowych do analizy numerycznej (opartych głównie na metodzie elementów skończonych) oraz zestawiono środowiska obliczeniowe, takie jak ANSYS, COMSOL, FLUX i inne. Krytycznie przeanalizowano podejścia do eksperymentalnej weryfikacji istniejących modeli matematycznych w tej dziedzinie. Podkreślono brak systematycznych badań zachowania materiałów platerowanych wybuchowo w zmiennym polu elektromagnetycznym podczas nagrzewania indukcyjnego, co stanowi podstawę nowości naukowej pracy.

Ponadto opisano środowisko obliczeniowe oraz metodykę budowy modeli numerycznych do analizy nagrzewania indukcyjnego. Wykorzystano pakiet ANSYS z połączeniem modelowania elektromagnetycznego i cieplnego w ramach sprzężonej symulacji nieustalonej, w której wyniki jednego zagadnienia wpływają na drugie z uwzględnieniem temperaturowej zależności właściwości materiałów.

Rozdziały 6–8 tworzą spójny, metodycznie uporządkowany cykl badań, w którym stopniowo zwiększa się złożoność zarówno modelu fizycznego obiektu, jak i zakres uwzględnionych efektów multifizycznych — od podstawowych zjawisk elektromagnetycznych po złożoną interakcję czynników cieplnych, magnetycznych i konstrukcyjnych w próbkach wielowarstwowych.

W rozdziale 6 przeprowadzono wstępne badania podstawowych zjawisk elektromagnetycznych w materiałach o prostej strukturze. Główna uwaga została skupiona na charakterystykach nagrzewania oraz rozkładzie strat wirowych w materiałach o różnym typie przewodności. Na tym etapie potwierdzono prawidłowości związane z wnikaniem pola elektromagnetycznego, generowaniem strat oraz ich zależnością od właściwości elektrofizycznych. Osobno oceniono wpływ warunków pomiaru temperatury na dokładność wyników; wykazano w szczególności, że przygotowanie powierzchni próbek istotnie zwiększa wiarygodność pomiarów bezkontaktowych.

Wyniki przedstawione w rozdziale 6 stanowiły podstawę do dalszego zwiększania złożoności modeli oraz potwierdziły poprawność zastosowanych metod numerycznych w opisie nagrzewania indukcyjnego.

W rozdziale 7 zakres badań został rozszerzony poprzez przejście do materiałów wielowarstwowych zawierających warstwę ferromagnetyczną ze stali AISI 410S. Istotnie zwiększyło to złożoność modelu ze względu na nieliniowe właściwości magnetyczne tej warstwy, ich zależność od temperatury oraz strukturalną niejednorodność parametrów próbki eksperymentalnej. Na szczególne podkreślenie zasługują, moim zdaniem, wyniki uzyskane przez Autora na podstawie badań eksperymentalnych, dotyczące krzywych magnesowania tego materiału w funkcji temperatury w pobliżu punktu Curie. Opracowano rodzinę krzywych magnesowania dla różnych temperatur oraz określono wpływ odkształcenia plastycznego po procesie platerowania na właściwości magnetyczne materiału.

Dodatkowo przeprowadzono walidację modelu numerycznego na podstawie wyników eksperymentalnych nagrzewania trójwarstwowych próbek (stal ferrytyczna — miedź — stal austenityczna), co pozwoliło potwierdzić wysoką dokładność modelowania.

Szczególną uwagę poświęcono analizie nieliniowego zachowania materiału w pobliżu punktu Curie, zmianie głębokości wnikania pola elektromagnetycznego oraz redystrybucji strat w poszczególnych warstwach. Wykazano, że właściwości magnetyczne mają decydujący wpływ na czasoprzestrzenną strukturę procesu nagrzewania.

Zaprezentowano kompleksowe podejście obejmujące modelowanie, weryfikację eksperymentalną oraz analizę fizyczną wielowarstwowych układów nagrzewania elektromagnetycznego z uwzględnieniem temperaturowo zależnych właściwości materiałów.

W rozdziale 8 zakres badań przesuwają się na poziom optymalizacji inżynierskiej struktury wielowarstwowej, w szczególności do analizy wpływu parametru geometrycznego — grubości warstwy przewodzącej ciepło (miedzi) — na jednorodność pola temperatury. W tym miejscu akcent przesuwają się z zagadnień elektromagnetycznych na efektywność cieplną układu oraz jego przydatność praktyczną. Wykazano eksperymentalnie i numerycznie, że zwiększenie grubości warstwy miedzi istotnie poprawia równomierność rozkładu temperatury, ograniczając miejsca lokalnego przegrzewania i gradienty temperatury. Jednocześnie towarzyszy temu wzrost bezwładności cieplnej układu oraz zwiększenie nakładów materiałowych.

Podsumowując wyniki trzech rozdziałów, można wskazać w pełni logicznie uzasadnioną hierarchię zwiększania złożoności modelu: od analizy podstawowych procesów elektromagnetycznych (rozdział 6), poprzez wielofizyczną interakcję w materiałach o nieliniowych właściwościach magnetycznych (rozdział 7), aż do parametrycznej optymalizacji konstrukcji kompozytu wielowarstwowego z uwzględnieniem efektywności cieplnej oraz szeregu ograniczeń praktycznych (rozdział 8). Takie podejście zapewniło stopniowe zwiększanie dokładności modelu oraz

przybliżenie poziomu jego adekwatności do opisu rzeczywistych warunków procesu nagrzewania indukcyjnego.

Rozdział 9 poświęcony jest projektowaniu induktorów do nagrzewania indukcyjnego w laboratoryjnych oraz przemysłowych procesach formowania na gorąco. Zastosowano podejście wielowariantowe z oceną konfiguracji na podstawie rozkładu i wartości strat od prądów wirowych, z uwzględnieniem ograniczeń technologicznych. Wykazano, że w przypadku obiektów przemysłowych o złożonej geometrii układy jednoinduktorowe nie są w stanie zapewnić jednorodności nagrzewania. Najbardziej efektywnym rozwiązaniem okazał się wariant kombinowany z dwoma induktorami (cylindrycznym i płaskim), który ogranicza strefy „niedogrzenia” oraz wyrównuje pole temperatury. Konstrukcję zrealizowano z możliwością regulacji prądów w cewkach poprzez odpowiedni dobór ich parametrów.

W tym rozdziale Autor przechodzi do uogólnienia wyników w postaci metodyki projektowania induktorów.

W rozdziale 10 przedstawiono praktyczne wdrożenie wyników pracy z wykorzystaniem materiałów wielowarstwowych oraz nagrzewania indukcyjnego. Ogólnie potwierdzono wysoki potencjał aplikacyjny opracowanych rozwiązań oraz ich przydatność do zastosowań przemysłowych. Zaprezentowano praktyczną weryfikację i implementację wyników, co stanowi końcowy etap badań o charakterze aplikacyjnym.

W rozdziale 11 Autor podsumowuje uzyskane rezultaty.

Praca charakteryzuje się dobrą czytelnością dla przygotowanego odbiorcy, co wynika z konsekwentnego przejścia od zagadnień teoretycznych do modelowania, badań eksperymentalnych oraz zastosowań praktycznych.

W mojej opinii przedstawiona rozprawa doktorska świadczy o bardzo dobrym poziomie przygotowania teoretycznego i praktycznego mgr inż. Michała Żużalka w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne, w której ubiega się on o nadanie stopnia naukowego.

4. Ocena wartości naukowej rozprawy

4.1. Modelowanie numeryczne zjawisk sprzężonych

Za jeden z najważniejszych elementów rozprawy uważam sposób wykorzystania modelowania numerycznego. Autor stosuje analizę pola elektromagnetycznego oraz analizę cieplną, korzystając z narzędzi Maxwell 3D i Fluent. Istotne jest nie samo użycie zaawansowanego środowiska obliczeniowego, lecz sposób, w jaki Autor podporządkował je problemowi fizycznemu. Model obejmuje rozkład pola, generację strat wiropądowych, transport ciepła, konwekcję, promieniowanie oraz temperaturową zmienność właściwości materiałowych.

W pracach tego typu istnieje częsta pokusa traktowania symulacji jako efektownej ilustracji. W recenzowanej rozprawie model numeryczny pełni rolę narzędzia badawczego: pozwala analizować lokalne zjawiska, których bezpośredni pomiar byłby trudny albo niemożliwy, a następnie jest sprawdzany eksperymentalnie. Jest to podejście poprawne i naukowo bardziej wartościowe niż samo porównanie temperatur końcowych.

Pozytywnie oceniam dyskusję dotyczącą geometrii modeli, wykorzystania symetrii, uproszczeń obliczeniowych i dyskretyzacji. Autor wykazuje świadomość, że automatyczne generowanie siatki nie gwarantuje jakości wyniku w obszarach cienkich warstw, granic materiałowych i lokalnych gradientów pola. Wskazuje również, że uproszczenia geometryczne mogą być dopuszczalne, o ile ich wpływ na wynik jest kontrolowany. W przedstawionych przykładach analiza uproszczeń prowadzi do błędów w obliczeniach strat wiropądowych rzędu kilku procent, co można uznać za akceptowalne dla projektowania inżynierskiego i badań wstępnych.

Najbardziej wymagająca część modelowania dotyczy układów z warstwą ferrytyczną. W takim przypadku model musi uwzględniać nie tylko zmianę rezystywności i przewodności cieplnej z temperaturą, ale również nieliniową zależność $B(H)$, zmianę przenikalności magnetycznej i przejście przez temperaturę Curie. Pominięcie tych efektów prowadziłoby do modelu fizycznie nieadekwatnego. Autor rozpoznał ten problem prawidłowo i wprowadził do modelu dane materiałowe odnoszące się do rzeczywistego stanu badanych próbek.

4.2. Identyfikacja właściwości materiałowych

Wysoko oceniam fragmenty pracy poświęcone parametrom materiałowym. W analizie materiałów warstwowych dane katalogowe są często niewystarczające, ponieważ proces łączenia wybuchowego może zmieniać stan materiału, strukturę, naprężenia własne oraz właściwości magnetyczne. Szczególnie dotyczy to stali AISI 410S, która po procesie platerowania nie musi zachowywać się tak, jak materiał w stanie dostawy.

Autor słusznie wykazał, że identyfikacja właściwości magnetycznych warstwy ferrytycznej ma charakter zasadniczy, a nie pomocniczy. Wyznaczenie charakterystyk magnesowania oraz uwzględnienie wpływu temperatury Curie zwiększa wiarygodność modelu i pozwala uniknąć sytuacji, w której zgodność symulacji z pomiarem byłaby skutkiem przypadkowej kalibracji. Jest to ważny element dojrzałości naukowej pracy.

Interesująca jest autorska procedura wyznaczania temperatury Curie na podstawie zmiany częstotliwości rezonansowej układu. Rozwiązanie to pokazuje dobrą intuicję elektrotermiczną: zmiana stanu magnetycznego próbki wpływa na parametry obwodu, a więc może zostać wykorzystana jako sygnał diagnostyczny. Jednocześnie metoda ta wymaga starannego rozdzielenia wpływu próbki od wpływu zmian temperatury cewki,

kondensatorów, połączeń, układu dopasowania i samego generatora. Ten aspekt powinien być w dalszych badaniach opisany bardziej ilościowo, najlepiej przez analizę niepewności metody.

4.3. Eksperyment i walidacja

Część eksperymentalna rozprawy jest mocnym elementem pracy. Autor wykorzystał przemysłowe nagrzewnice indukcyjne, pomiar prądu wzbudnika cewką Rogowskiego, pomiary temperatury termoparami, pirometrem i kamerą termowizyjną. Zastosowanie kilku technik pomiaru temperatury było konieczne, ponieważ w układach wysokotemperaturowych i metalicznych pojedyncza metoda pomiarowa może prowadzić do błędnych wniosków, zwłaszcza przy nieznanej lub zmiennej emisyjności powierzchni.

Bardzo dobrze oceniam fakt, że walidacja nie została ograniczona do jednego punktu pomiarowego i jednej chwili czasu. Autor porównuje przebiegi nagrzewania i chłodzenia, analizuje temperatury w kilku punktach oraz wykorzystuje obserwację termowizyjną. Faza chłodzenia jest tutaj szczególnie cenna, ponieważ pozwala sprawdzić, czy przyjęte warunki wymiany ciepła z otoczeniem są realistyczne. Zgodność w fazie nagrzewania może wynikać z poprawnego dopasowania mocy, ale zgodność w fazie chłodzenia wymaga już właściwego opisu właściwości termofizycznych materiałów.

Uzyskane poziomy zgodności pomiędzy modelem a pomiarem należy ocenić bardzo pozytywnie. Dla układów bez warstw ferrytycznych średnie błędy względne rzędu 2–4% są wynikiem dobrym, a dla układu 410S + Cu + 316L zgodność w granicach około 1% podczas nagrzewania jest wynikiem bardzo dobrym. W badaniach wpływu grubości miedzi uzyskane błędy około 6%, 5,5% i 4% dla warstw 0,5 mm, 1,5 mm i 3,0 mm również pozostają w granicach akceptowalnych, biorąc pod uwagę złożoność fizyczną problemu, wysoką temperaturę, niejednorodność próbki i trudności metrologiczne.

Osobno należy docenić analizę wpływu przygotowania powierzchni na pomiar bezkontaktowy. Autor wykazał, że dla powierzchni niemalowanej różnica pomiędzy pomiarem pirometrycznym i odniesieniem może osiągać wartość rzędu 116°C, natomiast pokrycie powierzchni czarną matową farbą żaroodporną zmniejsza błąd do poziomu około 2%. To pozornie techniczny szczegół, ale w rzeczywistości jest to bardzo ważna uwaga metrologiczna. Pokazuje ona, że wiarygodność modelu numerycznego zależy również od jakości procedury pomiarowej, a nie tylko od klasy użytego oprogramowania.

Najistotniejszą rezerwą metodyczną pozostaje formalna analiza niepewności. Praca zawiera parametry aparatury i wyniki porównań, natomiast przy pracy o tak silnym komponencie walidacyjnym warto byłoby przedstawić pełniejszy budżet niepewności: dokładność termopar, sposób ich mocowania, bezwładność cieplną spoiny, wpływ

przewodzenia w przewodach, niepewność położenia punktów pomiarowych, dokładność cewki Rogowskiego, niepewność emisyjności, zakres spektralny pirometru i kamery termowizyjnej oraz wpływ niejednorodności powierzchni. Brak takiej analizy nie podważa wyników, ale jej obecność podniosłaby rygor metrologiczny rozprawy.

5. Oryginalny wkład naukowy i najważniejsze osiągnięcia rozprawy

W mojej ocenie rozprawa zawiera oryginalny wkład naukowy w zakresie modelowania, pomiaru i projektowania procesów nagrzewania indukcyjnego materiałów wielowarstwowych. Wkład ten nie sprowadza się do pojedynczego wyniku liczbowego. Ma charakter systemowy: Autor pokazuje, jak przejść od rozpoznania właściwości materiału, przez model sprzężony, do walidacji eksperymentalnej i projektu wzbudnika.

Do najważniejszych osiągnięć i nowości rozprawy zaliczam:

- ✓ opracowanie i zweryfikowanie kompleksowego modelu numeryczno-polowego nagrzewania indukcyjnego materiałów wielowarstwowych otrzymanych metodą platerowania wybuchowego, uwzględniającego temperaturową zależność właściwości elektrofizycznych i cieplnych (przewodność elektryczna, przenikalność magnetyczna, wymiana ciepła), co umożliwiło uzyskanie wysokiej dokładności prognozowania (do ok. 1%) rozkładu temperatury oraz strat w szerokim zakresie warunków. **Na tej podstawie, stwierdzam, że zastosowane przez autora metody badawcze zostały dobrane prawidłowo;**
- ✓ przeprowadzenie pierwszych systematycznych badań zjawisk elektromagnetycznych i cieplnych w strukturach wielowarstwowych podczas nagrzewania indukcyjnego; w szczególności określono wpływ oddziaływania prądów wirowych między warstwami na głębokość wnikania pola oraz rozkład strat, a także zidentyfikowano nietypową zależność strat od temperatury w warstwach ferromagnetycznych, związaną ze zmianami stanu na krzywej magnesowania oraz przejściem przez temperaturę Curie. **W związku z tym uważam, że wyniki uzyskane przez mgr inż. Michała Żużalka, jak również ich analiza i interpretacja przedstawione w recenzowanej rozprawie, świadczą o tym, iż praca stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego;**
- ✓ zaproponowanie i eksperymentalne potwierdzenie metodyki projektowania induktorów do nagrzewania materiałów wielowarstwowych o złożonej geometrii, opartej na wielowariantowej analizie numerycznej rozkładu strat i temperatur, która zapewnia uzyskanie jednorodnego nagrzewania z uwzględnieniem ograniczeń technologicznych oraz możliwości praktycznej realizacji.

Przedstawiona rozprawa doktorska potwierdza zdolność Autora do samodzielnego rozwiązywania problemów naukowych i inżynierskich.

6. Wartość aplikacyjna i wdrożeniowa

Rozprawa ma wyraźny komponent aplikacyjny, co w przypadku elektrotechniki i elektrotermii jest zaletą, o ile nie zastępuje on wartości poznawczej. W tej pracy komponent wdrożeniowy nie jest elementem deklaratywnym, lecz naturalną konsekwencją przeprowadzonych badań. Wyniki modelowania i eksperymentów zostały wykorzystane do projektowania rozwiązań, w których materiał wielowarstwowy pełni funkcję aktywnego elementu układu grzejnego.

Opis topielnika wosku, naczyń typu wok oraz prac nad elementami aparatury destylacyjnej pokazuje, że Autor potrafi przełożyć wyniki badań na konstrukcję. Szczególnie interesujący jest przykład zastąpienia niekorzystnego materiału jednorodnego układem warstwowym 410S + Cu + 316L, w którym każda warstwa ma określone zadanie: sprzężenie elektromagnetyczne, rozprowadzenie ciepła albo odporność użytkową. Jest to myślenie właściwe dla nowoczesnego projektowania materiałowo-procesowego.

Z punktu widzenia dalszego rozwoju wyników warto jednak, aby przyszłe publikacje wdrożeniowe zawierały pełniejsze bilanse energetyczne. Informacja o skróceniu procesu topienia lub poprawie funkcjonalności jest ważna, ale dla naukowej oceny efektywności potrzebne są dane o masie medium, temperaturze początkowej i końcowej, energii pobranej z sieci, energii użytecznej, sprawności całkowitej, warunkach mieszania, stratach cieplnych i porównaniu z rozwiązaniem referencyjnym. Dopiero taki zestaw danych pozwala jednoznacznie oddzielić efekt konstrukcji materiału od efektu zmiany warunków prowadzenia procesu.

7. Uwagi krytyczne i pytania do dyskusji

Moja ogólna ocena rozprawy jest wysoka. Nie stwierdzam uchybień, które podważałyby poprawność przeprowadzonych badań, zasadność przyjętej metodyki lub wartość końcowych wniosków. Poniższe uwagi oraz pytania mają charakter dyskusyjny i nie wpłynęły one na moją końcową ocenę pracy. Formułuję je nie jako zarzuty zasadnicze, lecz jako punkty, na które proszę doktoranta o odniesienie się w trakcie publicznej dyskusji podczas obrony.

1. Autor często posługuje się sformułowaniem „kierunek prądów wirowych”, które w przewodnikach masywnych nie podlega jednoznacznej definicji. Czy nie byłoby bardziej zasadne użycie pojęcia „kierunek wektora gęstości prądu”?

2. Na str. 31 Autor stwierdza, że udział strat na przemagnesowanie histerezy ferromagnetyków wynosi 6–12% w stosunku do strat od prądów wirowych. Chciałbym dowiedzieć się, jakie jest źródło tej informacji oraz jaka jest metoda rozdzielania tych strat.
3. Po przeniesieniu geometrii badanego obiektu oraz rozkładu strat od prądów wirowych z modułu Maxwell do Fluent (str. 59) Autor upraszcza model, eliminując z niego induktor pola, twierdząc, że nie wpływa to na rozkład temperatury, a jedynie komplikuje dalsze obliczenia. W mojej ocenie bezpośrednia bliskość nagrzanej cewki induktora może istotnie oddziaływać na globalny rozkład temperatury w układzie „induktor–próbka”.
4. W środowisku ANSYS dostępne są elementy skończone typu SOLID98 i inne, umożliwiające prowadzenie sprzężonych obliczeń pola gęstości prądu w przewodniku masywnym oraz pola temperatury jednocześnie. Z jakiego powodu Autor zastosował sekwencyjny schemat modelowania, wymagający transferu danych między różnymi środowiskami obliczeniowymi?
5. Na rys. 6.15 widoczne jest, że wzrost temperatury próbki 3 do temperatury około 350°C spowodował zwiększenie strat w warstwie miedzianej o około 100 W (z 266 W do 360 W). W tym zakresie opór miedzi wzrasta około 2, 4-krotnie. Dlaczego zatem straty w tej próbce nie wzrosły proporcjonalnie do zmiany oporu?
6. Jak Autor definiuje ilościowo „poprawność” rozprzysięgu prądów wirowych, strat i temperatury? Czy przyjęto kryterium maksymalnego błędu temperatury, błędu średniego, zgodności energetycznej czy zgodności kształtu rozkładu temperatury?
7. W jaki sposób w metodzie wyznaczania temperatury Curie odseparowano wpływ próbki od zmian parametrów obwodu rezonansowego, cewki, kondensatorów oraz elementów połączeniowych w czasie nagrzewania?
8. W jakim zakresie opracowana metodyka projektowania wzbudników może być uogólniona na inne średnice wsadów, inne grubości warstw, inne częstotliwości i inne moce generatorów?

W warstwie redakcyjnej występują drobne usterki typowe dla obszernych rozpraw (na które nie oczekuję odpowiedzi Autora):

1. miejscami nadmierna szczegółowość wprowadzenia, niekiedy powtórzenia, sporadyczne niejednolitości zapisu jednostek i podpisów oraz drobne potknięcia językowe;
2. brak odniesień do źródeł dla niektórych ilustracji lub fotografii zamieszczonych w pracy;
3. błąd składniowy na str. 19: „Charakter zmian jest inny dla różnych każdego materiału.”;
4. literówka na str. 61: zapisano „intel-vent”, powinno być „inlet-vent”;
5. na rys. 7.7 opis osi rzędnych nie odpowiada przedstawionej wielkości;

Aut

6. w komentarzu do rys. 1.13 należałoby wskazać kierunek pola magnetycznego (wektora indukcji magnetycznej);
7. po raz pierwszy pojęcie „stal ferrytyczna” pojawia się na str. 67 w tytule rozdziału, wskazane byłoby omówienie właściwości fizycznych i mechanicznych tej stali ferrytycznej we wstępnej części rozprawy;
8. części pracy poświęcone procedurze symulacji, zwłaszcza pracy w środowisku ANSYS, zawierają nadmierny poziom szczegółowości narzędziowej, co obniża stopień uogólnienia teorii i częściowo odwraca uwagę od fizycznej istoty analizowanych zjawisk;
9. brak podsumowania wyników pośrednich (wniosków), przynajmniej po kluczowych rozdziałach (6–8), utrudnia czytelnikowi szybkie uchwycenie głównych rezultatów danego etapu oraz zbudowanie spójnego obrazu przed przejściem do kolejnego etapu.

Wymienione uwagi nie wpływają na ocenę merytoryczną, ale przed archiwizacją lub publikacją fragmentów pracy warto przeprowadzić dodatkową korektę redakcyjną.

8. Wniosek końcowy

Na podstawie rozprawy można stwierdzić, że Autor posiada bardzo dobrą znajomość problematyki nagrzewania indukcyjnego oraz umiejętność łączenia wiedzy teoretycznej z praktyką inżynierską. Szczególnie ważne jest to, że Autor nie ograniczył się do jednego typu aktywności badawczej. W pracy występują: analiza literatury, identyfikacja parametrów materiałowych, modelowanie zjawisk sprzężonych, projektowanie stanowisk, pomiary wysokotemperaturowe, walidacja, interpretacja fizyczna wyników oraz projektowanie rozwiązań technicznych.

Taki zakres działań świadczy o samodzielności naukowej. Autor musiał rozumieć zarówno ograniczenia narzędzi obliczeniowych, jak i ograniczenia pomiarowe. Musiał także rozstrzygać typowo badawcze kompromisy: jak uprościć model, aby był obliczalny, ale nie utracił sensu fizycznego; jak mierzyć temperaturę metalu, aby wynik był wiarygodny; jak dobrać materiał, aby spełniał jednocześnie wymagania elektromagnetyczne, cieplne i użytkowe; jak zaprojektować wzbudnik, który będzie nie tylko skuteczny w symulacji, lecz także możliwy do wykonania.

W mojej ocenie rozprawa pokazuje Autora jako badacza o profilu inżynieryjno-naukowym: potrafiącego przełożyć pytanie praktyczne na model fizyczny, zweryfikować ten model pomiarem, a następnie powrócić do praktyki z rozwiązaniem konstrukcyjnym. Jest to cecha szczególnie cenna w dyscyplinach technicznych, gdzie dojrzałość naukowa nie polega wyłącznie na biegłości obliczeniowej, lecz na umiejętności uzasadnionego przechodzenia pomiędzy teorią, eksperymentem i zastosowaniem.

Recenzowana rozprawa doktorska pt. „Grzanie indukcyjne materiałów warstwowych łączonych wybuchowo” dotyczy aktualnego, interdyscyplinarnego i istotnego praktycznie problemu naukowo-technicznego. Autor podjął zagadnienie trudne, wymagające uwzględnienia sprzężenia pola elektromagnetycznego i cieplnego, niejednorodnej struktury materiałowej, temperaturowej zmienności parametrów oraz ograniczeń metrologii wysokotemperaturowej.

Przedstawione wyniki potwierdzają zasadność postawionych tez. Autor wykazał, że analiza polowa, prowadzona z uwzględnieniem właściwości materiałowych i ich zmian temperaturowych, może wiarygodnie wspomagać projektowanie procesu nagrzewania indukcyjnego materiałów warstwowych łączonych wybuchowo. Wykazał również, że na tej podstawie możliwe jest projektowanie i wykonanie dedykowanych wzbudników oraz wykorzystanie opracowanych rozwiązań w rzeczywistych procesach technologicznych.

Rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, wnosi wartościowy wkład do wiedzy o indukcyjnym nagrzewaniu materiałów wielowarstwowych i potwierdza umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Autora. Wysoko oceniam zwłaszcza powiązanie modelowania numerycznego z weryfikacją eksperymentalną, rozpoznanie właściwości warstwy ferrytycznej, analizę wpływu warstwy miedzi na rozkład temperatury oraz przeniesienie wyników do zastosowań wdrożeniowych.

Recenzowana praca zalicza się do dziedziny nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne. Temat rozprawy oceniam jako nowoczesny, aktualny, istotny naukowo oraz odpowiadający potrzebom rozwoju tej dziedziny.

Biorąc pod uwagę zakres i poziom wykonanych badań, poprawność metodyki, oryginalność wyników, jakość walidacji oraz wartość aplikacyjną rozprawy, stwierdzam, że praca spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim, w szczególności wymagania określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2024 r. poz. 1571 z późn. zm.).

Wnioskuje o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr inż. Michała Żużalka do publicznej obrony.

Dariusz Cakus