

dr hab. inż. Cezary Jędrzycka, prof. PP
Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej
Wydział Automatyki, Robotyki i Elektrotechniki
Politechnika Poznańska

Recenzja rozprawy doktorskiej

Pana mgr. inż. Michała Żużalka

pt. „Grzanie indukcyjne materiałów warstwowych łączonych wybuchowo”

1. Podstawa formalna opracowania recenzji

Recenzja pracy doktorskiej Pana mgr. inż. Michała Żużalka na temat Grzania indukcyjnego materiałów warstwowych łączonych wybuchowo została przygotowana na zlecenie dra hab. inż. Andrzeja Waindoka, Przewodniczącego Rady naukowej dyscypliny automatyka, robotyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne, na podstawie pełnomocnictwa udzielonego przez dra hab. inż. Marcina Lorenca, JM Rektora Politechniki Opolskiej. Przewód doktorski prowadzony jest w dyscyplinie naukowej automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne. Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Andrzej Waindok, prof. Uczelni, a promotorem pomocniczym dr inż. Paweł Piekielny.

2. Ocena wyboru tematu i celu pracy

Tytuł przedłożonej do recenzji rozprawy doktorskiej *„Grzanie indukcyjne materiałów warstwowych łączonych wybuchowo”* odzwierciedla zarówno główny przedmiot badań, jak również ich interdyscyplinarny charakter. Zreferowane w rozprawie badania obejmują zagadnienia z zakresu elektrotechniki, inżynierii materiałowej oraz modelowania numerycznego. Tematyka pracy wpisuje się w aktualny nurt badań dotyczących zaawansowanych metod obróbki i przetwarzania materiałów wielowarstwowych znajdujących zastosowanie w wielu sektorach przemysłu.

Materiały warstwowe łączone metodą platerowania wybuchowego stanowią grupę zaawansowanych technologicznie materiałów, umożliwiających uzyskanie połączenia metali o różnych właściwościach fizycznych i mechanicznych. Technologia platerowania wybuchowego pozwala na wytwarzanie układów materiałowych charakteryzujących się wysoką wytrzymałością mechaniczną, odpornością korozyjną oraz właściwościami eksploatacyjnymi, niedostępnymi dla materiałów jednorodnych. Jednocześnie złożona struktura geometryczna oraz zróżnicowane właściwości elektromagnetyczne poszczególnych warstw powodują, że procesy oddziaływania

szybkodziennego pola elektromagnetycznego z tego typu materiałami są znacznie bardziej złożone niż w przypadku klasycznych materiałów monolitycznych.

W aktualnym stanie wiedzy zagadnienia związane z nagrzewaniem indukcyjnym materiałów jednorodnych są stosunkowo dobrze rozpoznane zarówno od strony eksperymentalnej, jak i numerycznej. Intensywny rozwój metod polowych, w szczególności opartych na metodzie elementów skończonych, umożliwił tworzenie zaawansowanych modeli sprzężonych elektromagnetyczno-cieplnych. Nadal jednak istnieje istotna luka badawcza dotycząca materiałów wielowarstwowych, zwłaszcza materiałów platerowanych wybuchowo, dla których występują dodatkowe zjawiska wynikające z obecności granic międzywarstwowych, zmienności parametrów elektromagnetycznych, niejednorodności strukturalnych oraz silnej zależności właściwości materiałowych od temperatury.

Podjęta w rozprawie tematyka odpowiada zatem na aktualne potrzeby nauki i przemysłu związane z poszukiwaniem precyzyjnego opisu procesów nagrzewania indukcyjnego materiałów o złożonej strukturze. Szczególne znaczenie ma uwzględnienie zmian właściwości elektromagnetycznych materiałów pod wpływem temperatury, w tym zmian przenikalności magnetycznej oraz występowania punktu Curie. W praktyce przemysłowej uproszczenia polegające na pomijaniu tych efektów często prowadzą do znacznych błędów w prognozowaniu rozkładów temperatury oraz parametrów procesu. W pracy wykazano, że poprawne odwzorowanie tych zjawisk ma kluczowe znaczenie dla uzyskania zgodności pomiędzy wynikami symulacji i pomiarami eksperymentalnymi.

Istotnym uzasadnieniem podjęcia tematu jest również rozwój metod i narzędzi symulacyjnych wykorzystywanych do analizy procesów technologicznych. Opracowanie wiarygodnych modeli numerycznych umożliwia ograniczenie kosztownych badań eksperymentalnych, skrócenie czasu wdrożeń technologicznych oraz optymalizację parametrów pracy urządzeń indukcyjnych. Rozprawa odpowiada na te potrzeby poprzez opracowanie metodyki tworzenia i kalibracji modeli numerycznych materiałów wielowarstwowych, obejmującej zarówno identyfikację parametrów materiałowych, jak i analizę wpływu geometrii oraz konfiguracji warstw na przebieg procesu nagrzewania.

Dodatkową wartość naukową pracy stanowi analiza zjawisk charakterystycznych wyłącznie dla materiałów wielowarstwowych, takich jak wpływ warstw rozpraszających ciepło na końcowy rozkład temperatury, czy oddziaływanie granic materiałowych na rozptył prądów wirowych. Zagadnienia te pozostają obecnie relatywnie słabo opisane w literaturze, mimo ich dużego znaczenia praktycznego.

Tematyka rozprawy posiada również wyraźny wymiar aplikacyjny. Wyniki badań oraz opracowane modele mogą znaleźć zastosowanie w projektowaniu nowoczesnych systemów nagrzewania indukcyjnego wykorzystywanych w przemyśle, szczególnie tam, gdzie stosowane są materiały bimetaliczne i wielowarstwowe. Praca stanowi tym samym połączenie badań podstawowych dotyczących zjawisk elektromagnetycznych i cieplnych z praktycznymi aspektami implementacji technologii indukcyjnych w warunkach przemysłowych.

W konsekwencji tytuł przedłożonej do recenzji rozprawy trafnie oddaje zarówno zakres merytoryczny prowadzonych badań, jak i ich aktualność naukową oraz znaczenie aplikacyjne. Tematyka pracy wpisuje się w rozwój nowoczesnych metod modelowania procesów

elektromagnetycznych i cieplnych oraz odpowiada na rosnące zapotrzebowanie przemysłu na efektywne technologie syntezy zaawansowanych materiałów warstwowych.

Cel rozprawy został jasno sformułowany i poprawnie uzasadniony aktualnym stanem wiedzy. Autor rozprawy wskazuje lukę badawczą dotyczącą nagrzewania indukcyjnego materiałów wielowarstwowych łączonych wybuchowo, podkreślając, że dotychczasowe badania koncentrowały się głównie na ich właściwościach mechanicznych. Podjęta tematyka ma charakter interdyscyplinarny i odpowiada na aktualne potrzeby związane z modelowaniem oraz optymalizacją procesów nagrzewania indukcyjnego materiałów o złożonej strukturze.

Sformułowane tezy pracy są spójne z jej celem i zakresem badań. Pierwsza teza dotycząca możliwości wykorzystania analizy polowej do wyznaczania rozptyłu prądów wirowych, strat mocy i rozkładów temperatury posiada istotne znaczenie naukowe, natomiast druga, odnosząca się do projektowania dedykowanych układów wzbudników, podkreśla aplikacyjny charakter pracy. Całość należy ocenić bardzo pozytywnie zarówno pod względem merytorycznym, jak i potencjalnych zastosowań przemysłowych.

Podsumowując uważam, że tematyka rozprawy jest w pełni uzasadniona, zarówno z naukowego, jak i z technicznego punktu widzenia. Praca ma duży potencjał aplikacyjny i wnosi istotny wkład w dziedzinę projektowania zaawansowanych systemów nagrzewania indukcyjnego.

3. Redakcja i zakres rozprawy

Przedłożona rozprawa doktorska mgr. inż. Michała Żużalka została napisana w języku polskim i liczy 148 stron. Składa się z jedenastu rozdziałów podstawowych, spisu treści oraz spisu bibliografii. Spis literatury obejmuje 88 pozycji, w tym trzy współautorskie z udziałem Doktoranta. Przedstawione źródła literaturowe są aktualne, obejmują szereg pozycji książkowych, referaty konferencyjne oraz artykuły naukowe powiązane z poruszaną tematyką. Cytowane publikacje obejmują zarówno klasyczne prace dotyczące nagrzewania indukcyjnego, jak i współczesne artykuły naukowe poświęcone modelowaniu numerycznemu procesów sprzężonych. Literatura została wykorzystana w sposób świadomy i stanowi rzeczywiste uzasadnienie podejmowanych analiz. W rozprawie umieszczono także trzy załączniki zawierające odpowiednio wykazy wykorzystanej aparatury pomiarowej i nagrzewnic indukcyjnych oraz listę publikacji Doktoranta.

Rozdział pierwszy przedstawia podstawy teoretyczne oraz aktualny stan wiedzy dotyczący nagrzewania indukcyjnego. Doktorant omówił rozwój technologii nagrzewania indukcyjnego, poczynwszy od odkrycia zjawiska indukcji elektromagnetycznej przez Faradaya, poprzez pierwsze piece indukcyjne, aż po współczesne układy wykorzystujące energoelektroniczne źródła zasilania i zaawansowane układy sterowania. Przedstawiono również zastosowania nagrzewania indukcyjnego, obejmujące między innymi topienie metali, hartowanie, lutowanie, zgrzewanie, obróbkę plastyczną, podgrzewanie rurociągów.

Znaczną część rozdziału Doktorant poświęcił analizie zjawisk związanych z nagrzewaniem indukcyjnym. Omówione zostały podstawowe parametry materiałowe, takie jak przewodność elektryczna, przenikalność magnetyczna, ciepło właściwe oraz przewodność cieplna, ze szczególnym uwzględnieniem zależności tych parametrów od temperatury. Przedstawione

zostały również kluczowe zjawiska elektromagnetyczne, w tym zjawisko naskórkowości, efekt zbliżeniowy oraz efekty krawędziowe występujące w materiałach wielowarstwowych.

W końcowej części rozdziału Autor zawarł podstawy teorii pola elektromagnetycznego oraz zależności wykorzystywane do modelowania procesów nagrzewania indukcyjnego i analizy rozkładów prądów wirowych oraz temperatury.

W rozdziale drugim Doktorant omówił technologię platerowania wybuchowego jako metodę trwałego łączenia różnych materiałów metalicznych. Przedstawił historię rozwoju platerowania wybuchowego od pierwszych obserwacji podczas I wojny światowej po współczesne zastosowania przemysłowe. Wyjaśniony został mechanizm procesu, w którym pod wpływem detonacji materiału wybuchowego dochodzi do zderzenia warstw z bardzo dużą prędkością i ich zespolenia na poziomie atomowym. Scharakteryzowano optymalne zakresy parametrów procesu tworzących tzw. „okno zgrzewania” zapewniające poprawne połączenie materiałów. Autor wskazał także główne zalety technologii platerowania wybuchowego, takie jak możliwość łączenia materiałów trudno spawalnych, zachowanie właściwości materiałów bazowych.

W rozdziale trzecim został sformułowany cel oraz postawiona teza pracy. Autor wskazał na istniejącą lukę badawczą dotyczącą braku metod kompleksowego modelowania i optymalizacji procesów nagrzewania indukcyjnego materiałów o złożonej strukturze oraz uzasadnił praktyczny charakter prowadzonych badań.

Rozdział czwarty przedstawia przegląd literatury dotyczącej nagrzewania indukcyjnego oraz metod numerycznego modelowania procesów elektromagnetyczno-cieplnych. Wskazano, że problematyka nagrzewania materiałów wielowarstwowych łączonych wybuchowo jest słabo opisana w literaturze, a większość dotychczasowych badań dotyczących materiałów platerowanych koncentruje się głównie na ich właściwościach mechanicznych. Omówiono wpływ temperatury na parametry materiałowe, takie jak przewodność elektryczna, przewodność cieplna, ciepło właściwe oraz krzywa magnesowania, podkreślając istotny wpływ uwzględnienia zmiany parametrów materiałowych na dokładność modeli numerycznych. Przedstawiono również najczęściej wykorzystywane środowiska symulacyjne, między innymi ANSYS, COMSOL, FLUX oraz JMAG, wraz z przykładami ich zastosowań w analizie nagrzewania indukcyjnego. Szczególną uwagę zwrócono na konieczność eksperymentalnej weryfikacji modeli numerycznych oraz znaczenie badań termowizyjnych i analiz prowadzonych w szerokim zakresie temperatur, w tym powyżej temperatury Curie. W końcowej części rozdziału omówiono budowę generatorów mocy wysokiej częstotliwości oraz podstawowe elementy nowoczesnych nagrzewnic indukcyjnych.

Rozdział czwarty przedstawia szczegółowy opis środowiska obliczeniowego oraz metodyki budowy modeli numerycznych wykorzystanych do analizy nagrzewania indukcyjnego materiałów warstwowych. Do realizacji badań zastosowano pakiet ANSYS, obejmujący moduły Maxwell do modelowania pola elektromagnetycznego oraz Fluent do symulacji zjawisk cieplno-przepływowych. Przedstawiono ideę symulacji sprzężonej, w której rozkład strat wiropądowych wyznaczony w modelu elektromagnetycznym stanowi źródło ciepła dla modelu termodynamicznego, a zmieniająca się temperatura wpływa na aktualizację parametrów materiałowych w kolejnych iteracjach.

W rozdziale piątym Doktorant opisał kolejne etapy przygotowania modeli numerycznych, obejmujące tworzenie geometrii 3D, definiowanie materiałów, warunków brzegowych, wymuszeń oraz konfigurację procedur formowania i rozwiązywania równań modelu dyskretnego. Szczególną

uwagę poświęcono procesowi dyskretyzacji modeli oraz autorskim metodom poprawy jakości siatki obliczeniowej w obszarach występowania silnego zjawiska naskórkowości. Przedstawiono również podstawowe równania wykorzystywane przez algorytmy obliczeniowe modułów Maxwell i Fluent.

Końcowa część rozdziału dotyczy analizy i wizualizacji wyników symulacji, obejmujących analizę rozkładu prądów wirowych, strat mocy, pola temperatury oraz ruchu powietrza w domenie obliczeniowej.

Kolejne rozdziały, szósty i siódmy, zawierają wyniki badań Doktoranta. Doktorant przeprowadził kompleksowe badania nagrzewania indukcyjnego materiałów wielowarstwowych bez warstw ferrytycznych oraz opracował i zweryfikował modele numeryczne umożliwiające analizę sprzężonych zjawisk elektromagnetycznych i cieplnych.

W pierwszym etapie badań Doktorant przygotował stanowisko pomiarowe oraz wytypował trzy różne układy materiałowe wykonane z materiałów para- i diamagnetycznych, charakteryzujących się odmiennymi właściwościami elektrycznymi i cieplnymi. Opracował i wykonał wzbudnik roboczy oraz stanowisko pomiarowe wyposażone w układ pomiaru temperatury metodą stykową i bezstykową. Doktorant wykazał również konieczność odpowiedniego przygotowania powierzchni próbek podczas pomiarów pirometrycznych poprzez zastosowanie czarnej farby żaroodpornej stabilizującej współczynnik emisyjności.

W ramach badań Autor rozprawy opracował modele numeryczne w środowisku ANSYS Maxwell i Fluent. Doktorant przeanalizował możliwości uproszczenia geometrii modeli przy zachowaniu wysokiej zgodności wyników obliczeń. Wykazał, że odpowiednie wykorzystanie symetrii układu pozwala znacząco ograniczyć liczbę elementów dyskretnych oraz czas obliczeń przy zachowaniu niewielkiego błędu obliczeniowego. Uzyskane uproszczenia umożliwiły niemal dziesięciokrotne przyspieszenie symulacji.

Przeprowadzona weryfikacja modeli numerycznych potwierdziła wysoką zgodność wyników symulacji z wynikami eksperymentalnymi. Dla wszystkich analizowanych próbek rozbieżności pomiędzy temperaturami obliczonymi i zmierzonymi pozostawały na niskim poziomie, najczęściej poniżej kilku procent. Doktorant wykazał, że opracowane modele poprawnie odwzorowują zarówno proces nagrzewania, jak i chłodzenia materiałów wielowarstwowych. Analizy umożliwiły również obserwację zjawisk niemożliwych do bezpośredniego pomiaru w obiekcie, takich jak rozkład prądów wirowych, lokalne straty wiropądowe, czy rozkład temperatury we wnętrzu materiału.

Istotnym osiągnięciem pracy jest szczegółowa analiza zjawisk zachodzących na granicach warstw materiałów wielowarstwowych. Doktorant wykazał występowanie lokalnych skoków wartości prądów wirowych wynikających z różnic przewodności elektrycznej sąsiadujących warstw. Zaobserwowano także lokalne koncentracje strat wiropądowych oraz zmiany głębokości wnikania pola elektromagnetycznego zależne od konfiguracji materiałów i grubości warstw.

W dalszej części badań Doktorant przystąpił do analizy materiałów wielowarstwowych zawierających warstwę ferrytyczną. Opracował autorską metodę wyznaczania temperatury Curie oraz zmian krzywej magnesowania w funkcji temperatury dla stali AISI410S wykorzystywanej w badanych strukturach. Wykazał wpływ procesu platerowania wybuchowego na właściwości magnetyczne materiału oraz potwierdził konieczność uwzględnienia zmian parametrów magnetycznych podczas modelowania nagrzewania indukcyjnego materiałów ferrytycznych.

Uzyskane wyniki stanowią istotny wkład w rozwój metod modelowania procesów nagrzewania indukcyjnego materiałów wielowarstwowych oraz mają znaczący potencjał aplikacyjny.

W rozdziale ósmym Doktorant przeprowadził analizę wpływu grubości warstwy funkcjonalnej odpowiedzialnej za rozpraszanie ciepła na rozkład temperatury w materiałach wielowarstwowych nagrzewanych indukcyjnie. W badaniach wykorzystano próbki trójwarstwowe zawierające warstwę ferrytyczną AISI410S, warstwę miedzi o różnej grubości oraz warstwę tantalu. Opracowano i zweryfikowano modele numeryczne, które wykazały wysoką zgodność z wynikami pomiarów termowizyjnych. Doktorant potwierdził, że zwiększenie grubości warstwy miedzi znacząco poprawia jednorodność rozkładu temperatury, zmniejszając gradienty cieplne na powierzchni próbki. Wykazał również, że większa grubość warstwy rozpraszającej ciepło wydłuża czas nagrzewania wskutek wzrostu pojemności cieplnej układu. Analiza numeryczna potwierdziła, że w obecności warstwy ferrytycznej pole elektromagnetyczne wnika jedynie w bardzo cienką warstwę przypowierzchniową, a generowanie strat wirowych zachodzi niemal wyłącznie w warstwie ferromagnetycznej. Uzyskane wyniki mają istotne znaczenie aplikacyjne przy projektowaniu materiałów warstwowych i przemysłowych układów nagrzewania indukcyjnego.

W rozdziale dziewiątym Doktorant opisał wielowariantową analizę projektowania wzbudników do nagrzewania indukcyjnego materiałów wielowarstwowych przeznaczonych do procesów kształtowania plastycznego w podwyższonej temperaturze. Opracowano i przeanalizowano numerycznie różne konfiguracje cewek dla dwóch obiektów – laboratoryjnego oraz przemysłowego. Autor wykazał, że klasyczne podejścia analityczne są niewystarczające dla złożonych geometrii wsadu, dlatego zastosował metodę selekcji wariantów na podstawie rozkładów strat wirowych oraz oceny jednorodności nagrzewania.

W badaniach uwzględniono zarówno efektywność energetyczną, jak i ograniczenia technologiczne związane z wykonaniem rzeczywistych wzbudników. Doktorant wykazał istotny wpływ geometrii cewek, ich wzajemnego położenia oraz częstotliwości pracy na rozkład prądów wirowych i temperatury w materiale. Dla obiektów laboratoryjnych jako najkorzystniejsze rozwiązanie wytypowano cylindryczny układ cewek zapewniający stabilny i równomierny rozkład temperatury. W przypadku geometrii przemysłowej został opracowany układ dwóch niezależnych wzbudników umożliwiających ograniczenie występowania zimnych punktów oraz lokalnych przegrzań materiału.

Końcowym etapem było wykonanie rzeczywistego układu wzbudników i jego dostosowanie do warunków przemysłowych, co potwierdziło aplikacyjny charakter prowadzonych badań.

W rozdziale dziesiątym Doktorant przedstawił praktyczne wdrożenia wyników badań dotyczących nagrzewania indukcyjnego materiałów wielowarstwowych łączonych wybuchowo. Opracowana wiedza została wykorzystana między innymi przy projektowaniu i wykonaniu indukcyjnego topielnika wosku o pojemności 1000 litrów, zrealizowanego we współpracy z francuską firmą ID Partner. W urządzeniu zastosowano materiał trójwarstwowy 410S + Cu + 316L, który zapewnił równomierny rozkład temperatury oraz wysoką efektywność procesu nagrzewania. Według informacji użytkownika wydajność urządzenia była około pięciokrotnie większa niż w klasycznych rozwiązaniach wykorzystujących płaszcz parowy lub olejowy.

Kolejnym wdrożeniem było wytworzenie prototypowych naczyń typu WOK wykonanych z materiału 410S + Cu, przeznaczonych do przemysłowych urządzeń grzewczych wykorzystujących

indukcję. Doktorant wykazał również konieczność obróbki cieplnej materiału po procesie platerowania, co pozwoliło niemal trzykrotnie zwiększyć jego plastyczność i umożliwiło poprawne formowanie naczyń. Dodatkowo opracowano i wykonano pilotażową dennicę do kotłów destylacyjnych wykorzystujących nagrzewanie indukcyjne.

Przedstawione wdrożenia potwierdzają wysoki potencjał aplikacyjny uzyskanych wyników badań oraz możliwość ich wykorzystania w rzeczywistych rozwiązaniach przemysłowych. Na podstawie uzyskanych i omówionych w rozprawie wyników Doktorant sformułował wnioski, które przedstawił w rozdziale jedenastym.

Podsumowując stwierdzam, że treść i zakres rozprawy są zgodne z jej tytułem. Układ pracy jest poprawny. Rozprawa napisana jest komunikatywnie, a jej redakcja jest na akceptowalnym poziomie. Autor w sposób jasny i jednoznaczny precyzuje cel, tezę i założenia upraszczające. Poprawnie formułuje wynikające z przeprowadzonych badań wnioski. Niewątpliwie świadczy to o Jego dojrzałości naukowej.

4. Ocena wartości naukowej

Pan mgr inż. Michał Żużalek udowodnił słuszność postawionej w rozprawie tezy oraz osiągnął zamierzony cel.

Rozprawa cechuje się odpowiednim poziomem naukowym. Do najważniejszych osiągnięć naukowych rozprawy należy zaliczyć opracowanie i eksperymentalną weryfikację sprzężonych modeli numerycznych nagrzewania indukcyjnego materiałów wielowarstwowych łączonych wybuchowo. Doktorant wykazał możliwość poprawnego modelowania rozptyłu prądów wirowych, strat wiropądowych oraz rozkładów temperatury w materiałach o złożonej strukturze warstwowej, z uwzględnieniem zmian parametrów materiałowych pod wpływem temperatury. Szczególnie istotnym osiągnięciem było potwierdzenie kluczowego znaczenia zmian właściwości elektromagnetycznych materiałów ferromagnetycznych, w tym wpływu temperatury Curie oraz zmian krzywej magnesowania na dokładność modeli numerycznych.

Wartościowym osiągnięciem naukowym jest również identyfikacja i analiza zjawisk charakterystycznych wyłącznie dla materiałów wielowarstwowych, takich jak lokalne koncentracje prądów wirowych i strat mocy na granicach warstw, zmiany głębokości wnikania pola elektromagnetycznego, czy wpływ warstw rozpraszających ciepło na jednorodność rozkładu temperatury. Doktorant wykazał wpływ grubości warstw funkcjonalnych na dynamikę nagrzewania oraz końcowy rozkład temperatury, co ma istotne znaczenie dla syntezy materiałów i urządzeń wykorzystujących nagrzewanie indukcyjne.

Za istotne osiągnięcie należy również uznać opracowanie metodyki projektowania układów wzbudników dla złożonych geometrii materiałów wielowarstwowych. Doktorant przeprowadził wielowariantowe analizy numeryczne umożliwiające dobór geometrii cewek zapewniających korzystny rozkład strat wiropądowych oraz ograniczenie lokalnych przegrzań materiału. Opracowane rozwiązania zostały następnie zweryfikowane praktycznie i wdrożone w rzeczywistych aplikacjach przemysłowych.

Na podkreślenie zasługuje także wysoki poziom aplikacyjności uzyskanych rezultatów. Wyniki badań zostały wykorzystane przy projektowaniu i wykonaniu przemysłowych urządzeń wykorzystujących nagrzewanie indukcyjne, takich jak topielniki wosku, naczynia typu WOK, czy

elementy aparatury destylacyjnej. Potwierdza to nie tylko poprawność opracowanych modeli i metod badawczych, ale również ich dużą wartość praktyczną i potencjał wdrożeniowy.

Podsumowując, do najważniejszych osiągnięć Autora zaliczam:

- a) opracowanie i eksperymentalną weryfikację sprzężonych modeli numerycznych nagrzewania indukcyjnego materiałów wielowarstwowych łączonych wybuchowo, uwzględniających zjawiska elektromagnetyczne i cieplne,
- b) wykazanie kluczowego wpływu zmian właściwości materiałowych pod wpływem temperatury, w szczególności zmian krzywej magnesowania oraz temperatury Curie na poprawność modeli numerycznych,
- c) opracowanie autorskiej metody wyznaczania temperatury Curie oraz zmian charakterystyki magnetycznej badanych materiałów ferromagnetycznych,
- d) identyfikację i analizę zjawisk charakterystycznych dla materiałów wielowarstwowych, takich jak lokalne koncentracje prądów wirowych, zmiany głębokości wnikania pola elektromagnetycznego oraz rozkładu strat mocy na granicach warstw,
- e) wykazanie wpływu grubości warstw funkcjonalnych rozpraszających ciepło na jednorodność rozkładu temperatury oraz dynamikę procesu nagrzewania indukcyjnego,
- f) opracowanie metodyki projektowania wzbudników dla materiałów wielowarstwowych i złożonych geometrii wsadu z wykorzystaniem wielowariantowych analiz numerycznych,
- g) zaprojektowanie oraz wykonanie stanowisk badawczych umożliwiających pomiarową weryfikację opracowanych modeli numerycznych,
- h) potwierdzenie wysokiej zgodności wyników symulacji z wynikami badań eksperymentalnych,
- i) praktyczne wdrożenie wyników badań w rzeczywistych rozwiązaniach przemysłowych, obejmujących między innymi indukcyjny topielnik wosku, naczynia typu WOK oraz elementy aparatury destylacyjnej,
- j) wykazanie wysokiego potencjału aplikacyjnego materiałów wielowarstwowych łączonych wybuchowo w technologiach wykorzystujących nagrzewanie indukcyjne.

Na uwagę zasługuje także dobrze opanowana przez Doktoranta umiejętność formułowania wniosków na podstawie uzyskanych wyników symulacji i rezultatów badań eksperymentalnych oraz umiejętność posługiwania się profesjonalnymi narzędziami komercyjnymi do analizy sprzężonych zagadnień polowych.

Recenzowana praca wnosi duży wkład w pogłębienie wiedzy w zakresie badania i analizy sprzężonych zjawisk elektromagnetyczno-cieplnych w układach nagrzewania indukcyjnego.

5. Uwagi do rozprawy

5.1. Uwagi merytoryczne

W trakcie zapoznawania się z treścią rozprawy nasunęło mi się kilka pytań i uwag o charakterze dyskusyjnym.

1. W pracy szeroko omówiono zagadnienia związane z modelowaniem numerycznym sprzężonych zjawisk elektromagnetyczno-cieplnych, jednak w ograniczonym stopniu przedstawiono analizę niepewności pomiarowych oraz analizę wpływu dokładności przyjętych parametrów materiałowych na końcowe wyniki symulacji.
2. Przedstawione modele zostały zweryfikowane dla ograniczonej liczby konfiguracji materiałowych. Powstaje pytanie, na ile opracowana metodyka zachowuje poprawność w przypadku materiałów o znacznie większych różnicach przewodności elektrycznej oraz przenikalności magnetycznej.
3. W części dotyczącej projektowania wzbudników zabrakło bardziej szczegółowej analizy obejmującej wpływ sprawności energetycznej układu oraz strat własnych wzbudników na parametry procesu nagrzewania.
4. W części wdrożeniowej rozprawy przedstawiono przykłady praktycznego wykorzystania uzyskanych rezultatów. Dodatkowym atutem byłoby przedstawienie ilościowego porównania efektywności energetycznej opracowanych rozwiązań z rozwiązaniami konwencjonalnymi oraz krótkiej analizy korzyści wynikających z ich zastosowania.
5. Jakie ograniczenia opracowanego modelu Autor uważa obecnie za najistotniejsze i które elementy wymagają dalszego rozwoju przed wykorzystaniem metody jako uniwersalnego narzędzia projektowego dla przemysłowych systemów nagrzewania indukcyjnego?
6. Rozpatrywane zjawiska z uwagi na wzajemne sprzężenia oraz zmianę parametrów materiałowych mają silny charakter nieliniowy wymagający iteracyjnego procesu rozwiązywania równań modelu dyskretnego. W pracy brakuje informacji dotyczącej analizy zbieżności procesu rozwiązywania równań modelu, w szczególności porównania czasów obliczeń z uwzględnieniem i pominięciem wpływu temperatury na właściwości magnetyczne i elektryczne materiałów.

5.2. Uwagi redakcyjne

Praca nie jest pozbawiona niedociągnięć edytorsko-stylistycznych. Występują dość liczne błędy językowe, stylistyczne oraz interpunkcyjne, które jednak nie wpływają na odbiór merytoryczny rozprawy.

Poniżej przedstawiłem wykaz uwag dotyczących zauważonych uchybień i niejasności o charakterze redakcyjnym:

- a) część rysunków oraz wykresów zawiera bardzo dużą ilość szczegółów, co miejscami utrudnia ich czytelność i interpretację, pojawiają się też błędy w opisach osi (np. na wykresie z rysunku 7.7 mnożnik krzywej magnesowania na osi opisany jest jako częstotliwość w kHz),
- b) w kilku fragmentach pracy pojawiają się powtórzenia informacji dotyczących podstawowych zjawisk elektromagnetycznych oraz właściwości materiałowych,
- c) w kilku fragmentach pracy Autor nieprecyzyjnie posługuje się pojęciami, np. na stronie 18, w zdaniu „Jak wspomniano wcześniej przenikalność magnetyczna zmienia się wraz z temperaturą. Z zasady wraz z jej wzrostem maleje, aż do osiągnięcia wartości równej 1 w tak zwanym punkcie Curie.” Powinno być „przenikalność magnetyczna względna”,
- d) w niektórych tabelach i opisach symboli można zauważyć niekonsekwencję w oznaczeniach jednostek i zapisach parametrów fizycznych (np. jednostki m_0 i m wzór 1.7 na stronie 21, niekonsekwencja oznaczenia przenikalności magnetycznej próżni na stronie 16, wyr. 1.3, strona 85: „indukcja magnetyczna nie maleje o czynniki $e=2,72$ ”, Tabela 6.9 ze strony 80, wyniki dla próbki Lp.2, 895 W +202 W równa się 1097W, a nie 1087 W),
- e) struktura pracy jest logiczna i przejrzysta, jednak część opisów dotyczących konfiguracji modeli numerycznych mogłaby zostać skrócona lub przeniesiona do załączników, co poprawiłoby płynność głównego wywodu,
- f) w tekście pracy występuje dużo błędów gramatycznych (np. na stronie 80 „w materiale wielowarstwowych”, „z wykresu na rys. 6.25 przedstawiający ...”).

Wszystkie dostrzeżone błędy redakcyjne zaznaczyłem bezpośrednio w dysertacji, przy czym wskazane uchybienia nie wpływają na ostateczną pozytywną ocenę pracy.

6. Wniosek końcowy

W przedłożonej rozprawie mgr inż. Michał Żużalek przedstawił oryginalne i wartościowe osiągnięcie naukowe. Autor wykazał się odpowiednią wiedzą teoretyczną oraz umiejętnościami w zakresie prowadzenia badań naukowych. Praca ta ma wymiar interdyscyplinarny, łącząc zagadnienia z zakresu elektrotechniki, termodynamiki i modelowania numerycznego. Wyniki badań przyczyniły się do głębszego zrozumienia złożonych zjawisk występujących w układach nagrzewania indukcyjnego do weryfikacji modeli numerycznych. Doktorant udowodnił, że potrafi samodzielnie i efektywnie rozwiązywać trudne problemy naukowe oraz logicznie i przejrzysto przedstawiać wyniki swoich badań.

Uważam, że opiniowana rozprawa przedstawiona w dyscyplinie naukowej automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (tj. Dz.U. 2018 poz. 1668 z późniejszymi zmianami).

W związku z powyższym wnioskuję o przyjęcie przez Radę Naukową dyscypliny automatyka, robotyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne, Politechniki Opolskiej rozprawy pt. „Grzanie indukcyjne materiałów warstwowych łączonych wybuchowo” jako pracy doktorskiej i dopuszczenie jej Autora mgr. inż. Michała Żużalka do publicznej obrony pracy.