

Radom, 1 grudnia 2025r.

dr hab. inż. Jerzy Wojciechowski, prof. URad.
Uniwersytet Radomski im. Kazimierza Pułaskiego
Wydział Transportu, Elektrotechniki i Informatyki
26-600 Radom, ul. Malczewskiego 29
email: j.wojciechowski@urad.edu.pl

RECENZJA
rozprawy doktorskiej pt.:

Wpływ naprężeń mechanicznych na tensor przenikalności magnetycznej anizotropowych rdzeni komponentów indukcyjnych

Autor: mgr inż. Paweł Rękas
Promotor: prof. dr hab. inż. Roman Szewczyk
Promotor pomocniczy: dr inż. Michał Nowicki

Podstawą wykonania recenzji jest Uchwała nr 149/III/2025r. Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej, z dnia 30 września 2025r.

1. Charakterystyka oraz ocena strukturalna i merytoryczna rozprawy doktorskiej

Przedmiotem recenzowanej rozprawy doktorskiej jest cykl publikacji naukowych, zawartych w dziele „Rozprawa doktorska — *Wpływ naprężeń mechanicznych na tensor przenikalności magnetycznej anizotropowych rdzeni komponentów indukcyjnych*”, którego autorem jest mgr inż. Paweł Rękas. Praca została przygotowana i złożona na Politechnice Warszawskiej w roku 2025.

Recenzowana rozprawa doktorska ma formę cyklu publikacji naukowych. Składa się z pięciu prac (oznaczonych w „Rozprawie doktorskiej” jako P1–P5), opublikowanych w latach 2023–2024. Ukazały się one w czasopismach zagranicznych i krajowych, wszystkie w języku angielskim. Artykuły zostały opublikowane w czasopismach ujętych w *Wykazie czasopism naukowych*, ogłoszonym w Komunikacie Ministra Nauki z dnia 5 stycznia 2024 r. w sprawie wykazu czasopism naukowych i recenzowanych materiałów z konferencji międzynarodowych. Są to następujące czasopisma, wymienione w kolejności P1–P5 zgodnie z „Rozprawą doktorską”:

- P1 – Journal of Magnetism and Magnetic Materials, ISSN: 0304-8853, 100 pkt.
- P2 – Materials, ISSN: 1996-1944, 140 pkt.
- P3 – IEEE Transactions on Magnetics, ISSN: 0018-9464, 70 pkt.
- P4 – Archives of Electrical Engineering, ISSN: 1427-4221, 100 pkt.
- P5 – Journal of Automation, Mobile Robotics and Intelligent Systems, ISSN: 1897-8649, 70 pkt.

Uwzględniając ministerialny *Wykaz czasopism naukowych*, wszystkie wymienione periodyki należy zaliczyć do grupy czasopism wysokopunktowanych, a łączna liczba punktów uzyskanych za publikacje Doktoranta wynosi 480. Należy ocenić, że Doktorant zaprezentował wyniki swoich badań w renomowanych i rozpoznawalnych w skali międzynarodowej czasopismach naukowych, co świadczy o wysokim poziomie merytorycznym przedstawionych prac.

Artykuły wchodzące w skład cyklu mają charakter zespołowy, przy czym w każdej z nich Doktorant wykazuje dominujący udział merytoryczny. W jednej publikacji (P2) udział Doktoranta wynosi 40%, jednak zgodnie z informacją zawartą na stronie 65 „Rozprawy doktorskiej”, jest to wkład o największym znaczeniu merytorycznym w zespole autorskim.

Centralnym zagadnieniem badawczym rozprawy doktorskiej jest ilościowy opis wpływu naprężeń mechanicznych na właściwości magnetyczne anizotropowych stali elektrotechnicznych, ze szczególnym uwzględnieniem tensora przenikalności magnetycznej oraz wynikających z tego zmian parametrów eksploatacyjnych transformatorów mocy. Doktorant łączy w swojej pracy modelowanie teoretyczne z opracowaniem nowej metody i konstrukcją aparatury pomiarowej, umożliwiając badanie zjawisk magnetosprężystych w warunkach zbliżonych do rzeczywistych.

Zagadnienie badawcze zostało przez Doktoranta precyzyjnie sformułowane. Rozprawa dotyczy zjawisk magnetosprężystych w stalach elektrotechnicznych poddanych kontrolowanym naprężeniom rozciągającym, z uwzględnieniem anizotropii kierunkowej wynikającej z kierunku walcowania. Doktorant badał proces magnesowania blach w pełnym zakresie kierunków względem kierunku walcowania, wywołując naprężenia poprzez przykładanie zewnętrznego obciążenia pod kilkoma różnymi kątami względem kierunku walcowania.

Rozważane są zarówno aspekty modelowe, takie jak analiza energii swobodnej oraz kinetyki ruchu ścian domen magnetycznych, jak i praktyczne, obejmujące pomiary oraz analizę zmian charakterystyk magnesowania. Znaczna część rozprawy została poświęcona opracowaniu, kalibracji i walidacji nowego stanowiska pomiarowego, umożliwiającego badania magnetomechaniczne blach elektrotechnicznych.

Opublikowane prace tworzą logiczny i spójny ciąg zagadnień, obejmujący: wprowadzenie teoretyczne do zjawisk magnetosprężystych i ich znaczenia aplikacyjnego, identyfikację luki badawczej w zakresie pomiarów właściwości magnetosprężystych pod kontrolowanym naprężeniem i kątem magnesowania, projekt mechaniczny oraz optymalizację kształtu próbek z wykorzystaniem metod MES, budowę modułu mechanicznego do przykładania naprężeń rozciągających i ściskających, zaprojektowanie i weryfikację innowacyjnego zautomatyzowanego jarzma z mechanizmem Cardana, implementację systemu sterowania i akwizycji danych wraz z analizą niepewności pomiarowej, a także prezentację wyników eksperymentalnych dla stali M120-27s wraz z analizą anizotropii magnetomechanicznej.

Cel rozprawy („Rozprawa doktorska”, strona 35) Doktorant sformułował jasno i jednoznacznie: *opracowanie ilościowego modelu zależności właściwości magnetycznych od naprężeń mechanicznych oraz stworzenie stanowiska badawczego umożliwiającego pomiary tych zależności w warunkach odpowiadających eksploatacji transformatorów mocy*. Cel ten jest spójny z motywacją naukową oraz wyraźnie zakorzeniony w aktualnych potrzebach i wyzwaniach współczesnej elektrotechniki i elektroenergetyki.

Doktorant stawia również klarowną i falsyfikowalną tezę badawczą („Rozprawa doktorska”, strona 35): *„Możliwe jest modelowy opis wpływu naprężeń mechanicznych od sił zewnętrznych na charakterystykę transformatora pracującego pod obciążeniem.”* Teza ta podlega bezpośredniej weryfikacji zarówno poprzez opracowany model teoretyczny, jak i przedstawione wyniki eksperymentalne.

Układ i struktura całego cyklu publikacji są konsekwentne: od prezentacji problemu badawczego, poprzez rozwój aparatury i metod pomiarowych, aż po walidację eksperymentalną i analizę wyników. Rozprawa w pełni spełnia wymagania stawiane pracom w formie zbioru publikacji, ponieważ

poszczególne artykuły wykazują spójność merytoryczną, dążą do realizacji wspólnego celu badawczego i tworzą logiczną całość pod względem metodologicznym i aplikacyjnym.

Przy tej ogólnej spójności cyklu artykułów oraz „Rozprawy doktorskiej” należy jednak zaznaczyć, że brakuje w rozprawie wyraźnego podsumowania wzajemnych zależności między publikacjami P1–P5. Recenzent dostrzega, że mimo informacji zawartych w rozdziale 2 „Rozprawy doktorskiej” (*Przewodnik po publikacjach*), w obecnej formie należy samodzielnie odtwarzać powiązania między poszczególnymi elementami cyklu na podstawie pełnej treści prac. Z tego względu w rozprawie brakuje mapy logicznej publikacji, która jednoznacznie wskazywałaby połączenie poszczególnych elementów rozprawy.

Dodatkowo, w rozdziałach „Rozprawy doktorskiej” opisujących założenia pracy można zauważyć, że zagadnienia teoretyczne są rozwinięte w bardzo dużym stopniu, podczas gdy zagadnienia praktyczne, dotyczące transformatora rzeczywistego, zostały przedstawione w nieco bardziej ograniczonym zakresie. Nie stanowi to błędu, jednak powoduje pewną dysproporcję między teorią a aplikacją.

Na podstawie treści rozprawy oraz analizy publikacji można jednoznacznie stwierdzić, że przedstawione zagadnienie badawcze zostało opisane w sposób jasny, spójny i wyczerpujący.

Zgodnie z art. 187 ust. 3 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2022.574 z późn. zm.) złożona praca spełnia warunki formalne: stanowi zbiór opublikowanych i powiązanych tematycznie artykułów naukowych, które mogą zostać uznane za rozprawę doktorską.

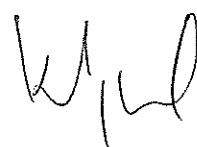
2. Źródła bibliograficzne recenzowanej rozprawy doktorskiej

Recenzowana rozprawa doktorska ma formę cyklu publikacji naukowych, z których każda oparta jest na odrębnie dobranych źródłach bibliograficznych. W poszczególnych artykułach uwzględniono zróżnicowaną liczbę pozycji literaturowych, a sama „Rozprawa doktorska” zawiera zbiorczą bibliografię obejmującą cały cykl. Zestawy źródeł bibliograficznych dla każdej z publikacji stanowią adekwatną i wystarczającą podstawę teoretyczną do przeprowadzonych analiz oraz badań.

Bibliografię cyklu należy ocenić jako bogatą, aktualną i reprezentującą dorobek naukowy zarówno o znaczeniu fundamentalnym, jak i aplikacyjnym. Obejmuje ona literaturę światową dotyczącą zjawisk magnetosprężystych, magnetostrykcji, właściwości stali elektrotechnicznych oraz współczesnych metod metrologii magnetycznej. Widoczne jest także odniesienie do prac dotyczących nowoczesnych modeli opisujących zależności właściwości magnetycznych od naprężeń oraz do rozwijanych obecnie metod diagnostycznych i pomiarowych.

Istotnym elementem jest powiązanie literatury z praktycznymi zastosowaniami przemysłowymi. W bibliografii przywołano liczne publikacje dotyczące transformatorów mocy, aparatury pomiarowej wykorzystywanej w metrologii materiałów magnetycznych oraz zastosowań magnetosprężystych w różnych sektorach technologicznych. Świadczy to o tym, że Doktorant umiejętnie osadził swoją pracę w kontekście aktualnych problemów naukowych, inżynierskich oraz potrzeb przemysłu.

Z powyższych względów bibliografię cyklu publikacji należy uznać za odpowiednią i kompletną. Obejmuje ona zarówno podstawowe aspekty fizyczne, jak i nowoczesne zastosowania techniczne, a jednocześnie pozwala na jednoznaczne zidentyfikowanie luki badawczej stanowiącej podstawę podjętej tematyki. Zakres i jakość wykorzystanej literatury spełniają wymagania stawiane rozprawom doktorskim, zapewniając solidne umocowanie teoretyczne oraz aplikacyjne prowadzonych badań.



3. Osiągnięcie celu pracy, dowód tezy, poprawności metod i założeń

Cel rozprawy doktorskiej oraz jej tezę przedstawiono w rozdziale 1.3 „Rozprawy doktorskiej”. Założenia pracy opisano zarówno w poszczególnych publikacjach cyklu, jak i w rozdziale 2.2 rozprawy. Obejmują one założenia eksperymentalne, materiałowe, mikromodelowe oraz dotyczące modelowania transformatora. Cel pracy należy uznać za w pełni osiągnięty, ponieważ opracowano ilościowy model opisujący wpływ naprężeń mechanicznych na anizotropię materiałów magnetycznych, zwalidowano go eksperymentalnie na przygotowanych próbkach, a następnie zaimplementowano w środowisku MES i wykorzystano do obliczeń transformatora. Istotnym uzupełnieniem jest również opracowanie oryginalnego stanowiska pomiarowego umożliwiającego prowadzenie badań magnetosprężystych w kontrolowanych warunkach. W efekcie cel rozprawy został zrealizowany w sposób jednoznaczny i kompletny.

Teza rozprawy została udowodniona, gdyż Doktorant opracował i przedstawił modele matematyczne opisujące zależność przenikalności magnetycznej od naprężeń, zweryfikował je eksperymentalnie, a następnie zastosował do analizy rzeczywistego transformatora. Wykazano wpływ naprężeń na kluczowe parametry eksploatacyjne, takie jak indukcyjność uzwojeń, prąd magnesujący i moc bierna, zgodnie z przewidywaniami wynikającymi z modelu. Modele i wyniki eksperymentalne jednoznacznie potwierdzają, że wpływ naprężeń na charakterystykę transformatora jest istotny i możliwy do ujęcia modelowego.

Wszystkie założenia przyjęte w pracy są fizycznie uzasadnione, zgodne z metodologią badań magnetosprężystych, odpowiadają własnościom materiałów GOES oraz są konieczne dla stabilnego modelowania numerycznego. Zostały również zweryfikowane doświadczalnie lub literaturowo. Żadne z nich nie ogranicza zakresu ani jakości rozprawy, a przeciwnie, stanowią one racjonalną podstawę do osiągnięcia celu i potwierdzenia tezy.

Opracowane stanowisko pomiarowe cechuje się wysokim stopniem innowacyjności, choć posiada również naturalne ograniczenia konstrukcyjne: pomiary wykonywane są wyłącznie w zakresie odkształceń sprężystych, a stabilność pola magnetycznego przy dużych kątach magnesowania może być utrudniona ze względu na geometrię jarzma i mechanizmu obrotu. Kolejnym ograniczeniem jest fakt, że model transformatora został opracowany w wersji dwuwymiarowej, podczas gdy rzeczywiste transformatory mają złożoną strukturę trójwymiarową, w której prądy wirowe i rozkłady pola występują w pełnej geometrii przestrzennej. Nie wpływa to na poprawność obliczeń, lecz stanowi uproszczenie, którego konsekwencje warto podkreślić.

W rozprawie przedstawiono opis niepewności pomiarowych, jednak analiza propagacji błędów do modelu matematycznego, zwłaszcza w kontekście obliczeń transformatora, mogłaby być bardziej szczegółowa. Uzupełnienie tej części zwiększyłoby jakość ilościowej walidacji wyników.

Pomimo wskazanych ograniczeń należy podkreślić, że nie podważają one głównych wniosków rozprawy. Określają raczej kierunki dalszych prac badawczych, a sama rozprawa spełnia wszystkie wymagania stawiane pracom doktorskim zarówno pod względem merytorycznym, jak i metodologicznym.

4. Oryginalność rozprawy doktorskiej

Oryginalność rozprawy wynika z trzech kluczowych osiągnięć Doktoranta, które w takiej formie nie były dotychczas prezentowane w literaturze światowej. Po pierwsze, autor opracował innowacyjne stanowisko do pomiaru właściwości magnetoelastycznych stali elektrotechnicznych w pełnym zakresie kątów magnesowania oraz naprężeń mechanicznych. Rozwiązanie to znacząco wykracza poza możliwości wcześniejszych metod, które pozwalały jedynie na pomiary w wybranych kierunkach lub ograniczały się do materiałów izotropowych. Opracowane stanowisko umożliwiło precyzyjne i powtarzalne badanie anizotropii magnetoelastycznych materiałów GOES, co stanowi istotny postęp w metrologii magnetycznej.

Drugim elementem oryginalności jest opracowanie nowego modelu fizycznego opisującego zależność przenikalności magnetycznej od naprężenia i kąta magnesowania. Model ten opiera się na energii pinningu ścian domen i łączy efekty anizotropii krystalicznej oraz naprężeniowej. Stanowi to istotne rozszerzenie klasycznych modeli, takich jak Jiles–Atherton czy Sablik–Jiles, które nie obejmują pełnej zależności dwuwymiarowej. Zaproponowany model został zwalidowany eksperymentalnie i wykazał dobrą zgodność z wynikami pomiarów, potwierdzając swoją przydatność do ilościowego opisu zjawisk magnetoelastycznych.

Trzecim znaczącym wkładem jest zastosowanie nowego modelu materiałowego do analizy transformatora mocy. Autor po raz pierwszy połączył opis magnetoelastyczności w postaci modelu 2D z analizą numeryczną MES oraz modelem obwodowym transformatora. Uzyskane wyniki wykazały istotny wpływ naprężeń montażowych i eksploatacyjnych na parametry transformatora, w tym m.in. na wzrost mocy biernej. Tak zintegrowanego podejścia nie odnotowano dotychczas w literaturze, co czyni tę część rozprawy szczególnie wartościową zarówno pod względem naukowym, jak i aplikacyjnym.

Samodzielny dorobek Doktoranta obejmuje konstrukcję stanowiska pomiarowego, opracowanie modelu energii pinningu, wykonanie i analizę pomiarów, implementację modelu w środowisku MES oraz przeprowadzenie obliczeń transformatora. Każdy z wymienionych elementów stanowi istotny i oryginalny wkład autora w rozwój wiedzy dotyczącej magnetoelastyczności materiałów GOES i jej wpływu na działanie urządzeń elektrotechnicznych.

Na tle światowego stanu wiedzy praca wypełnia istotną lukę w ilościowym opisie zależności właściwości magnetycznych od naprężeń oraz w analizie ich skutków dla transformatorów mocy. Rozwiązania przedstawione w rozprawie mają zatem wyraźny potencjał aplikacyjny oraz stanowią wartościowy wkład w rozwój metrologii magnetycznej i modelowania materiałów anizotropowych.

Należy jednak zauważyć, że chociaż model $\mu(\sigma, \varphi)$ jest nowatorski i interesujący, w literaturze istnieją prace opisujące tensorową zależność przenikalności magnetycznej od naprężeń w stalach anizotropowych. Warto byłoby zatem wyraźniej podkreślić, które elementy modelu Doktoranta stanowią rzeczywiste rozszerzenie dotychczasowych ujęć, zwłaszcza w kontekście zaproponowania nowej formy energii pinningu. Należy także zauważyć, że obliczenia transformatora wykonano dla jednego typu rdzenia i jednej konfiguracji obciążenia. Wyniki te są wartościowe, jednak empiryczny zakres ich uogólnienia jest ograniczony, co należy mieć na uwadze przy formułowaniu szerszych wniosków dotyczących możliwości modelowego przewidywania wpływu naprężeń na parametry transformatorów.



5. Przedstawienie uzyskanych wyników badań

Doktorant w pełni wykazał umiejętność poprawnego, jasnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych wyników badawczych. Zarówno w publikacjach, jak i w Rozprawie doktorskiej wyniki zostały przedstawione logicznie i konsekwentnie, z wyraźnym rozdzieleniem opisu metody, prezentacji danych oraz ich interpretacji. Taki układ zapewnia przejrzystość wyводу i pozwala odbiorcy łatwo śledzić przebieg analiz. Autor koncentruje się na kluczowych aspektach pracy, unikając dygresji i zachowując wysoki poziom zwięzłości, charakterystyczny dla dobrych publikacji naukowych.

Interpretacja wyników jest spójna i jednoznacznie powiązana z fizycznymi mechanizmami magnetosprężystymi, w tym z ruchem ścian domen oraz zmianami energii pinningu, co umożliwia przekonujące wyjaśnienie obserwowanych zjawisk. Wyniki eksperymentalne zostały zestawione z wynikami modelu w sposób czytelny, co pozwala jednoznacznie ocenić stopień zgodności teorii z pomiarem. Doktorant omawia zarówno wysoką zgodność uzyskanych danych, jak i zauważalne odchylenia, dzięki czemu interpretacja ma charakter w pełni naukowy, wyważony i pozbawiony nadinterpretacji.

Elementy graficzne (wykresy, diagramy i ilustracje) przygotowano starannie i zgodnie z zasadami redakcyjnymi publikacji naukowych: posiadają one poprawnie opisane osie, jednostki i legendy, a ich jakość graficzna sprzyja zrozumieniu prezentowanych treści. Stanowią integralną część analizy, wspierając, a nie zastępując narrację.

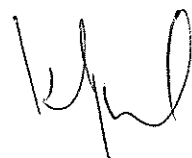
Pod względem językowym i redakcyjnym artykuły i rozprawa są przygotowane poprawnie i komunikatywnie. Doktorant posługuje się terminologią precyzyjnie i unika niejednoznacznych sformułowań. Tekst jest wolny od istotnych błędów technicznych czy kompozycyjnych, a drobne potknięcia typowe dla prac opartych na cyklu publikacji nie wpływają na ogólną jakość odbioru.

Całość prezentacji wyników świadczy o wysokiej dojrzałości naukowej Doktoranta oraz o jego zdolności do formułowania jasnych, przekonujących i merytorycznie osadzonych wniosków. Praca w pełni spełnia standardy stawiane rozprawom doktorskim w dyscyplinach inżynieryjno-technicznych.

6. Wartość aplikacyjna rozprawy doktorskiej

Rozprawa ma wysoką wartość aplikacyjną i naukową w obszarze nauk inżynieryjno-technicznych, w szczególności w elektrotechnice, inżynierii materiałowej, energetyce oraz modelowaniu urządzeń elektromagnetycznych. Doktorant dostarczył zarówno nowych narzędzi badawczych, jak i nowej wiedzy o zachowaniu materiałów magnetycznych pod wpływem naprężeń, co ma bezpośrednie znaczenie dla projektowania i diagnozowania urządzeń pracujących w warunkach zmiennych obciążeń mechanicznych.

Przydatność pracy wynika przede wszystkim z możliwości, jakie oferują opracowane metody pomiarowe i modele. Umożliwiają one precyzyjne określenie wpływu naprężeń montażowych i eksploatacyjnych na charakterystyki materiałów rdzeni transformatorów mocy. Zagadnienie to ma duże znaczenie praktyczne, ponieważ naprężenia wpływają na poziom strat, prąd magnesujący oraz moc bierną, a więc na efektywność i ekonomię pracy transformatora oraz na jego trwałość eksploatacyjną. Zaproponowany model pozwala uwzględniać te efekty zarówno na etapie projektowania, jak i w czasie pracy transformatora, co znacząco rozszerza dotychczasowe możliwości inżynierskie.



Wysoka przydatność rozprawy jest także wynikiem opracowania nowej, dwuwymiarowej metody pomiarowej właściwości magnetoelastycznych, umożliwiającej analizę anizotropii materiałów GOES w warunkach odpowiadających rzeczywistej pracy rdzeni. Dane tego typu są niezbędne do budowy dokładnych modeli numerycznych, a dotychczas nie były dostępne ani w literaturze, ani w praktyce przemysłowej. Opracowany model energii pinningu oraz jego implementacja w środowisku MES umożliwiają ponadto prowadzenie bardziej precyzyjnych analiz pola magnetycznego z uwzględnieniem oddziaływania naprężeń, co wcześniej nie było możliwe w takim zakresie.

Połączenie wyników eksperymentalnych, modelu fizycznego i obliczeń numerycznych sprawia, że rozprawa stanowi kompletny zestaw narzędzi inżynierskich, które mogą znaleźć zastosowanie w projektowaniu transformatorów mocy, ocenie jakości rdzeni magnetycznych, analizie wpływu montażu i eksploatacji na parametry urządzeń, diagnostyce materiałowej oraz w optymalizacji procesów produkcyjnych stali GOES. Praca ma zatem nie tylko wysoką wartość teoretyczną, lecz również znaczący potencjał wdrożeniowy i stanowi realny wkład w rozwój maszyn elektrycznych oraz elektroenergetyki.

7. Uwagi do rozprawy doktorskiej

Recenzowana rozprawa doktorska cechuje się wysokim poziomem merytorycznym, a jej wyniki stanowią wartościowy wkład w rozwój modelowania materiałów anizotropowych oraz metrologii magnetycznej. Pomimo niewątpliwych zalet pracy, zarówno w warstwie teoretycznej, jak i eksperymentalnej, recenzent ma kilka uwag merytorycznych, przedstawionych w postaci pytań. Uwagi nie podważają głównych wniosków rozprawy, lecz służą jej obiektywnej ocenie oraz wskazaniu potencjalnych kierunków dalszych badań. Poniższe komentarze mają charakter konstruktywny i dotyczą przede wszystkim zakresu walidacji, przyjętych uproszczeń modelowych oraz ograniczeń aparatury pomiarowej.

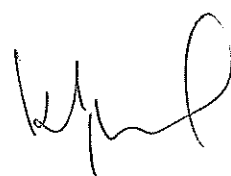
W artykule P1, punkt 3, str.5, Doktorant napisał, że „*niepewność typu A proponowanego układu nie przekracza 0,5%*” i że dominujący wpływ ma wartość natężenia pola H . Czy rozważano również niepewność typu B, wynikającą np. z kalibracji układów pomiarowych? Mogłoby to pełniej scharakteryzować dokładność badań.

W artykule P1, punkt 4, str.8, Doktorant napisał, że badania prowadzono do naprężeń 35 MPa, aby uniknąć odkształceń plastycznych. Czy Doktorant mógłby skomentować, czy planowane jest rozszerzenie badań o większe naprężenia, które mogą lokalnie występować w procesie montażu transformatorów?

Na stronie 46 „Rozprawy doktorskiej” Doktorant napisał, że postać funkcji $P(\varphi, \sigma)$ została dobrana fenomenologicznie na podstawie danych pomiarowych. Czy Doktorant mógłby doprecyzować, czy rozważano alternatywne formy funkcji, np. bardziej związane z modelami mikrostrukturalnymi, a jeśli tak, to co przemawiało za wyborem tej konkretnej postaci?

Na stronie 46 „Rozprawy doktorskiej” w opisie energii pinningu nie pojawia się odniesienie do temperatury. Czy Doktorant mógłby krótko wskazać, czy przewiduje się rozszerzenie modelu o zależność temperaturową, istotną z punktu widzenia pracy transformatorów mocy?

W artykule P3 oraz w „Rozprawie doktorskiej” (str. 50 i 51) Doktorant prezentuje wykresy 2D przenikalności magnetycznej dla różnych naprężeń. Czy Doktorant mógłby skomentować, czy



obserwowana asymetria względem osi walcowania może wynikać np. z technologii wycinania próbek lub nieidealności struktury?

Na stronie 53 („Rozprawa doktorska”) Doktorant stwierdza, że „*model dobrze odwzorowuje wyniki eksperymentalne*”. Czy Doktorant rozważał dodanie miar ilościowych dopasowania? Z pewnością wzmocniłoby to prezentację wiarygodności modelu.

Na stronie 62 („Rozprawa doktorska”) Doktorant wskazuje na wzrost prądu o 67% w warunkach maksymalnych naprężeń. Czy Doktorant mógłby doprecyzować, czy takie warunki naprężeniowe występują w realnych transformatorach, czy raczej stanowią scenariusz brzegowy przyjęty dla celów analitycznych?

W artykule P5 oraz w „Rozprawie doktorskiej” (str. 66) Doktorant pisze o zbieraniu danych z transformatora pod obciążeniem. Czy Doktorant może doprecyzować, czy pomiary obejmowały również przykładanie zewnętrznych naprężeń do rdzenia, czy jedynie rejestrowano reakcję transformatora w warunkach laboratoryjnych?

W części pomiarowej artykułu P1, w punkcie 4 nie opisano szczegółowo ewentualnych niejednorodności stanu naprężeń w próbce. Czy Doktorant mógłby wyjaśnić, czy przeprowadzono analizy MES próbki w celu potwierdzenia jednorodności naprężeń, co mogłoby dodatkowo wzmocnić wiarygodność pomiarów?

W „Rozprawie doktorskiej” Doktorant zaznacza, że badania obejmowały jedynie naprężenia rozciągające, aby uniknąć wyboczenia próbki. Czy Doktorant mógłby wskazać, czy planowane jest opracowanie metody umożliwiającej również badania dla naprężeń ściskających, które mogą mieć znaczenie w analizie rdzeni transformatorowych?

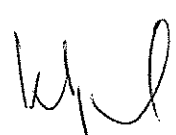
Czy zaproponowana w pracy metoda może służyć do diagnostyki transformatorów mocy, np. oceny jakości pakietowania rdzenia na podstawie zmian μ_r ?

Czy zaproponowany model dwudomenowy da się bezpośrednio zaimplementować do symulacji FEM rdzenia transformatora (np. w ANSYS Maxwell, COMSOL)? Jeśli tak, to w jakiej formie?

Recenzowany cykl artykułów oraz „Rozprawa doktorska” zostały przygotowane poprawnie pod względem językowym, redakcyjnym oraz kompozycyjnym. Styl Doktoranta jest spójny, przejrzysty i zgodny z konwencją pisarstwa naukowego w dyscyplinach inżynierjno-technicznych. Terminologia stosowana w pracy jest poprawna, a pojęcia używane są konsekwentnie i z właściwą precyzją. W pracy występują jedynie nieliczne drobne potknięcia redakcyjne, typowe dla tekstów opartych na cyklu publikacji. Najbardziej niefortunne jest uchybienie językowe w tezie pracy. Jednak niedociągnięcia edytorskie i językowe nie mają wpływu na odbiór treści ani na wartość merytoryczną rozprawy. Wszystkie one zostały przedstawione Doktorantowi.

8. Wniosek końcowy

Podsumowując ocenę przedstawionej rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Pawła Rękasa, stwierdzam, że praca ta stanowi wartościowy i oryginalny wkład w rozwój wiedzy z zakresu magnetoelastyczności materiałów anizotropowych oraz ich zastosowań w elektrotechnice. Rozprawa jest spójna, logicznie uporządkowana i cechuje się wysokim poziomem merytorycznym. Doktorant wykazał się dużą



samodzielnością badawczą, umiejętnością formułowania i weryfikacji modeli fizycznych oraz zdolnością do integrowania wyników eksperymentalnych z analizami numerycznymi i aplikacyjnymi. Zastrzeżenia mają charakter uzupełniający i nie wpływają na pozytywną ocenę rozprawy.

Stwierdzam, że rozprawa spełnia wymagania ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce – oraz kryteria stawiane pracom doktorskim w dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne.

Wnoszę o dopuszczenie Pana mgr inż. Pawła Rękasa do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

Wojciech Męchel.

