

Gliwice, 14.10.22. r.

Dr hab. inż. Grzegorz Działkiewicz, prof. Pol. Śl.

Katedra Mechaniki i Inżynierii Obliczeniowej

Wydział Mechaniczny Technologiczny

Politechnika Śląska

### Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Bruna Bošnjaka

pt.: "Siły i naprężenia w transformatorach mocy w warunkach  
zwarcia elektrycznego"

(„Short Circuit Forces and Stresses in Power Transformers”)

Promotor: dr hab. inż. Dariusz Nowak

Podstawa opracowania: pismo nr R-WIMiI-510-15/19

Dziekan Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Informatyki Politechniki  
Częstochowskiej

prof. dr hab. inż. Małgorzaty Klimek

#### 1. Ogólna charakterystyka pracy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska liczy 176 stronic, składając się z: siedmiu rozdziałów głównych, trzech dodatków, bibliografii oraz streszczeń i spisu rysunków i tabel. Praca została napisana w języku angielskim. Poniżej przedstawiono zakres tematyki poruszanej w poszczególnych rozdziałach pracy.

Praca rozpoczyna się podziękowaniami Autora, streszczeniami w językach polskim i angielskim wraz ze słowami kluczowymi, oraz spisem treści. Spisy rysunków i tabel poprzedzają rozdział 1.

Rozdział 1 pokazuje naukowy i inżynierski problem badań transformatorów mocy z uwzględnieniem stanu zwarcia elektrycznego, przedstawiając aktualny stan wiedzy na podstawie przeglądu literatury; szczegółowo omówiono cel rozprawy, oraz pokazano propozycję nowej metody obliczeniowej sił mechanicznych w stanie zwarcia, problem interakcji pól sił elektromagnetycznych i mechanicznych, a także implikacje rozważanego problemu dla procesu projektowania transformatorów mocy.

Rozdział 2 omawia skrótowo proces projektowania transformatorów mocy, ze szczególnym uwzględnieniem dwóch podsystemów tych urządzeń: rdzenia oraz uzwojeń. W przypadku uzwojeń bardziej szczegółowo omówiono przewody, izolację oraz mocowanie.

Rozdział 3 zawiera podstawowe informacje na temat pracy transformatorów mocy w stanie zwarcia, a także umiejscawia je w systemie przesyłu energii za pomocą sieci elektroenergetycznych.

Rozdział 4 pokazuje efekt powstawania sił mechanicznych w stanie zwarcia transformatorów mocy. Pokazano podstawowe metody obliczeń naprężeń mechanicznych, towarzyszących stanowi zwarcia. Przedstawione metody obliczeń są stosunkowo proste, mają charakter inżynierski i są bardzo ważne z praktycznego punktu widzenia, bowiem pozwalają na klasyfikację typów uszkodzeń transformatorów mocy. Omówiono metody obliczeń naprężeń osiowych i promieniowych oraz obwodowych, a następnie stany: zginania osiowego i promieniowego, awarię podpory, przechylenie, teleskopowanie, spiralizowanie i młotkowanie. Pokazano również metody obliczeń dla sił krytycznych w przypadkach tzw. wyboczenia swobodnego i wymuszonego. Rozdział kończy się analizą efektu interakcji różnych typów uszkodzeń.

Rozdział 5 pokazuje wielopolowy sprzężony model transformatora mocy w stanie zwarcia w konwencji metody elementów skończonych. Pokazano podstawowe informacje na temat metody elementów skończonych, model geometrii transformatora mocy, z detalami dotyczącymi projektowania i modelowania rdzenia oraz uzwojenia; pokazano także zastosowany wariant sformułowania, który pozwala na określenie sił Lorentza. Informacje uzupełniono o warunki brzegowe oraz zestaw parametrów symulacji. Na zakończenie rozdziału pokazano zastosowanie i wyniki symulacji komputerowych w systemie ANSYS dla omawianego problemu magnetomechaniki w stanie ustalonym oraz nieustalonym.

Rozdział 6 omawia doświadczalną weryfikację wyników uzyskanych za pomocą symulacji komputerowych. Pokazuje eksperyment umożliwiający analizę stanu zwarcia, również z uwzględnieniem badań niszczących, ukazując charakter awarii w sensie stanu mechanicznego urządzenia. Rozdział kończy wnioski wynikające z porównania wyników eksperymentu oraz symulacji.

Rozdział 7 podsumowuje wyniki badań, podkreślając wkład własny oraz przedstawiając możliwe dalsze kierunki rozwoju.

Dodatek A przedstawia podstawy modelowania pól elektromagnetycznych i mechanicznych w konwencji fizyki ośrodków ciągłych; przy czym dla pól elektromagnetycznych pokazano sformułowanie kwazistatyczne równań Maxwella za pomocą potencjału wektorowego pola magnetycznego; w przypadku pól mechanicznych rozważano klasyczny problem liniowej elastodynamiki.

Dodatek B opisuje metodę wyznaczania zastępczych własności fizycznych dla rdzenia transformatora; przy czym ograniczono się do własności mechanicznych rozważając moduł Younga i Kirchhoffa oraz liczbę Poissona wraz z gęstością. Dodatek kończy kod w języku programowania Python, jako implementacja opracowanego modelu własności zastępczych.

Dodatek C opisuje metodę wyznaczania zastępczych własności fizycznych dla uzwojenia transformatora; przy czym ponownie ograniczono się do własności mechanicznych rozważając moduły Younga i Kirchhoffa oraz liczbę Poissona wraz z gęstością. Dodatek również kończy kod w języku programowania Python, jako implementacja opracowanego modelu własności zastępczych.

Bibliografia zawiera 91 źródeł, w większości aktualnych pozycji naukowych.

Podsumowując analizę treści rozprawy stwierdzam, że zarówno temat, jak i kompozycja rozprawy w prawidłowy sposób opisują rozważany problem naukowy, który można sklasyfikować jako złożone zagadnienie teorii sprzężonych pól mechanicznych i elektromagnetycznych o doniosłych implikacjach praktycznych. Recenzowana rozprawa ma charakter wielo- i interdyscyplinarny, ale można ją zaliczyć do dyscypliny naukowej Inżynieria Mechaniczna. Treść pracy odpowiada tytułowi, jej struktura jest poprawna i właściwa dla tekstów naukowo-technicznych. Strona redakcyjna nie budzi większych zastrzeżeń, styl dobry, szata graficzna doskonale oddaje treść, zastosowano prawidłowe metody wizualizacji modeli oraz wyników, zastosowano prawidłowe odwołania do źródeł bibliograficznych. Liczba źródeł mogłaby zostać powiększona o najnowsze pozycje literatury światowej, ale jest wystarczająca. Stwierdzam, że Autor przedstawił do oceny

dzieło o oryginalnym charakterze naukowym, spełniające wszystkie wymogi stawiane tego rodzaju dokumentom.

## 2. Ocena tematu, zakresu i celu rozprawy

Temat recenzowanej rozprawy wpisuje się w aktualną tematykę wielo- i interdyscyplinarnych badań naukowych, prowadzonych we wiodących ośrodkach naukowych. Zakres rozprawy mógłby być rozszerzony, ale dotyczy bardzo złożonego i trudnego zagadnienia, więc uważam że przedstawione wyniki badań są wystarczające w kontekście pracy doktorskiej. Cel rozprawy sformułowano prawidłowo, a treść pracy pokazuje, że został osiągnięty. Należy również podkreślić aplikacyjny charakter wyników badań uzyskanych w pracy. Praca może stanowić interesujące źródło informacji dla inżynierów-praktyków zajmujących się projektowaniem, konstruowaniem i eksploatacją transformatorów mocy.

## 3. Ocena rozprawy

Przedstawiona do recenzji praca jest interesującym i istotnym wkładem w rozwój dyscypliny Inżynieria Mechaniczna. Pokazuje wartościowy opis rezultatów procesu badawczego wraz z przedstawionym podejściem metodycznym obejmującym całość współczesnego paradygmatu naukowego stosowanego w naukach technicznych, tj. teorii, empirii oraz modelowania i symulacji komputerowych.

W pracy widoczne są wszystkie elementy procesu badawczego, prowadzonego zgodnie z metodą naukową, realizowanego w sposób dojrzały, samodzielny i twórczy. Ponadto, jak wspomiano wcześniej, praca ma charakter użyteczny i wynikające z niej wnioski mogą zostać wykorzystane do dalszego rozwoju technik obliczeniowych i symulacyjnych w zakresie modelowania pól sprzężonych, w szczególności elektromagnetycznych i mechanicznych.

Do podstawowych zalet rozprawy zaliczam:

- a) ciekawą, istotną złożoną oraz trudną tematykę rozprawy odnoszącą się do modelowania sprzężonych pól elektromagnetycznych i mechanicznych w transformatorach mocy za pomocą metod obliczeniowych, w szczególności metody elementów skończonych,

b) połączenie procesu modelowania oraz symulacji z aspektami projektowania i konstruowania oraz eksploatacji urządzeń elektroenergetycznych,

c) włączenie procesu planowania i prowadzenia badań doświadczalnych w proces weryfikacji i weryfikacji badań symulacyjnych,

d) dobre uzasadnienie wyboru tematu z inżynierskiego i naukowego punktu widzenia.

Poniżej przedstawiam pewne uwagi krytyczne, które nie mają na celu umniejszenie ogólnej oceny pracy. Mają one charakter dyskusyjny, wyjaśniający, porządkujący lub być może umożliwiłyby podniesienie jej jakości, a także mogą wskazać dalsze kierunki badań.

Jak wspomniano wyżej, praca ma charakter inter- i wielodyscyplinarny, ale ze względu na własne przygotowanie oceniam ją z punktu widzenia dyscypliny „Inżynieria Mechaniczna”. W trakcie analizy tekstu pracy moją uwagę zwróciły pewne sformułowania zastosowane przez Autora, dlatego poniżej przedstawiam uwagi związane z terminologią naukową stosowaną w pracy:

1. W pracy pojawia się sformułowanie „quasistatic transient analysis”, które moim zdaniem może prowadzić do pewnych nieporozumień, choć jest ono z inżynierskiego punktu widzenia zrozumiałe. Mając na uwadze model matematyczny rozważanych zjawisk, można wyróżnić 3 warianty modeli, z których każdy może być opisany jako kwazistatyczna analiza stanu nieustalonego. Są to:
  - a) magnetostatyka + elastodynamika, gdzie modelowanie statycznego pola magnetycznego zostaje powiązane z modelem dynamiki pól odkształceń i naprężeń, co prowadzi do opisu kwazistatycznego, ze względu na aproksymację pola magnetycznego,
  - b) magnetodynamika w aproksymacji niskoczęstotliwościowej (z pominięciem prądu przesunięcia) + elastostatyka, gdzie modelowanie kwazistatycznego pola magnetycznego zostaje powiązane z modelem statyki pól odkształceń i naprężeń,
  - c) magnetodynamika w aproksymacji niskoczęstotliwościowej (z pominięciem prądu przesunięcia) + elastodynamika, gdzie modelowanie kwazistatycznego pola magnetycznego zostaje powiązane z modelem dynamiki pól odkształceń i naprężeń.

Wydaje się, że jest celowe, już we wstępie do pracy, zdefiniowanie wybranych i zastosowanych wariantów modeli pól sprzężonych dla rozpatrywanego zagadnienia, aby określenie odnoszące się do typu

analizy było jednoznaczne. Będę jeszcze o tym pisać w dalszej części recenzji.

2. Podrozdział 4.3.4 ma tytuł „Axial Bending” i choć to sformułowanie może być intuicyjnie zrozumiałe lub używane w żargonie inżynierskim lub literaturze przedmiotu dot. elektroenergetyki, to z punktu widzenia wytrzymałości materiałów jest ono nieprecyzyjne. W wytrzymałości materiałów określa się charakter zginania ze względu na orientację wektora momentu zginającego, jako uogólnionej siły wewnętrznej, a nie sił obciążających. W rozważanym podrozdziale mówi się o siłach osiowych, które to wywołują momenty zginające, na przekrojach przewodów uzwojenia, działające w kierunku promieniowym, dlatego być może bardziej adekwatne byłoby sformułowanie „bending with axial deformation” lub „bending under axial forces”. Z kolei, podrozdział 4.3.11 ma tytuł „Radial Bending”. Podobnie jak w przypadku rozdziału 4.3.4, w rozważanym podrozdziale mówi się o siłach promieniowych, które to wywołują momenty zginające, w przekrojach przewodów uzwojenia, działające w kierunku osiowym, dlatego być może bardziej adekwatne byłoby sformułowanie „bending with radial deformation” lub „bending under radial forces”.
3. Określenia „free buckling” i „forced buckling” wydają się być potoczne, ze względu na fakt występowania efektów obciążenia mechanicznego w obu przypadkach. Dodatkowo, należy mieć na uwadze fakt, iż oprócz wyboczenia sprężystego rozważa się również wyboczenia sprężysto-plastyczne, a wystąpienie danych odkształceń (trwałych lub sprężystych) jest zależne od parametrów geometrycznych, materiałowych i warunków brzegowych danego układu. Być może są to pojęcia znane w literaturze przedmiotu, ale z punktu widzenia wytrzymałości materiałów, mogą one być nieprecyzyjne. Należy zwrócić również uwagę, że utrata stateczności podczas zwarcia elektrycznego ma charakter dynamiczny, co dodatkowo utrudnia klasyfikację przypadków oraz ich analizę.
4. Na str. 60 pod równaniem (4.25) zastosowano sformułowanie „tangential Young’s modulus”, czy chodzi o moduł styczny? Nazwa własna „moduł Younga” jest niejako zarezerwowana dla zakresu odkształceń liniowo-sprężystych. Poniżej granicy proporcjonalności moduł styczny jest równoważny modułowi Younga. Powyżej granicy proporcjonalności moduł styczny zmienia się wraz z odkształceniem i wymaga danych doświadczalnych.
5. Na str. 79 znajduje się stwierdzenie „The geometry of the core is assumed to be isotropic”, należy zakładać że chodzi o izotropię własności magnetycznych rdzenia, a nie o jego geometrię.

6. Rys. 5.14, 5.17, 5.20, 5.23, 5.24 podpisano jako przedstawiające naprężenia mechaniczne. Wydaje się, że jest to nieadekwatne uproszczenie. Pola naprężeń to pola tensorowe i można je reprezentować na wiele sposobów. Z punktu widzenia analizy wytrzymałości konstrukcji, można je przedstawić za pomocą skalarne go pola naprężeń redukowanych, przyjmując stosowną hipotezę wyciężeniową. Można też zastosować naprężenia główne, co sprowadza się do reprezentacji za pomocą 3 składowych, możliwości jest więcej, bo np. można wyznaczyć wartość wypadkowej wektorów (nie tensorów, korzystając ze wzoru Cauchy'ego) naprężeń w wybranych kierunkach. Jaka wielkość kryje się pod nazwą „mechStress Magnitude” w legendzie wymienionych rysunków?
7. Na str. 121 pada stwierdzenie, że przewodność elektryczna jest izotropowa, a chyba chodziło o fakt, że wiele materiałów wykazuje izotropię własności fizycznych, w tym przewodności elektrycznej.
8. Rys. 5.13, 5.15 i 5.16 pokazują, tak mi się wydaje, skalarne pole wartości wypadkowej wektorowego pola gęstości objętościowej sił Lorentza, a nie gęstość sił Lorentza. Podobnie Rys. 5.18 przedstawia, chyba, pole wartości wypadkowej wektorowego pola przemieszczeń.

Poniżej przedstawiam uwagi merytoryczne, które również mogą prowadzić do dyskusji naukowej:

1. Przedstawiony w pracy model sygnału prądu zwarciovego wskazuje na jego udarowy charakter, w szczególności w kontekście powstawania sił mechanicznych. Proszę o dyskusję nad możliwością zastosowania innego typu analizy statycznej, niż tylko uwzględniającej pik prądu zwarciovego, np. korzystając z wartości zastępczej wymuszenia prądowego o wielkości odpowiadającej energii sygnału prądu zwarciovego w rozważanym przedziale czasu.
2. W pracy pokazano zastępczy model własności mechanicznych materiału rdzenia transformatora w zakresie odkształceń liniowo-sprężystych w postaci modelu ośrodka ortotropowego, jako szczególnego przypadku anizotropii. Proszę o wyjaśnienie dlaczego nie zastosowano modelu ortotropowych własności elektromagnetycznych (przenikalność magnetyczna i przewodność elektryczna) dla materiału rdzenia. Tym bardziej, że w celu skrócenia czasu obliczeń, zastosowano również liniowe równania konstytutywne, co umożliwia wprowadzenie modelu własności zastępczych analogicznie jak dla własności mechanicznych, tj. korzystając z prostego modelu teorii obwodów magnetycznych o stałych skupionych.

3. Jak modelowano krzywą magnesowania przedstawioną na Rys. 5.5? Uprzejmie proszę o podanie typu i formy aproksymacji danych przedstawiających zależność  $B-H$ . Dodatkowo, na tym rysunku widnieje błędna (A) jednostka natężenia pola magnetycznego  $H$  (A/m).
4. W rozważanym systemie występują elementy izolacyjne, które wykazują własności dielektryczne, dlatego uprzejmie proszę o pełniejsze uzasadnienie pominięcia prądów przesunięcia podczas modelowania. Jakie Autor widzi możliwości przejścia na sprzężony model elektromagnetyczno-mechaniczny z uwzględnieniem zjawisk propagacji fal elektromagnetycznych? Czy taka rozbudowa modelu byłaby w ogóle uzasadniona z inżynierskiego punktu widzenia?
5. Omawiając budowę rdzenia i uzwojeń Autor zwraca uwagę na warstwowy charakter ich konstrukcji, który stwarza trudności w modelowaniu, ze względu na niewielkie grubości warstw w porównaniu do wymiarów reszty modelu. Jak ocenia się możliwości wykonania analizy wieloskalowej, np. w związku z chęcią uwzględnienia w modelowaniu niebezpieczeństwa wystąpienia zjawiska rozwarstwienia pakietów blach rdzenia transformatora? Na styku warstw występują lokalne spiętrzenia naprężeń, które mogą prowadzić do tego typu uszkodzeń, czy zdarzają się one podczas eksploatacji omawianych transformatorów mocy? Analiza wieloskalowa może wykorzystywać rozwiązania np. pól przemieszczeń i naprężeń w skali makro, jaki warunki brzegowe w skali mezo lub mikro.
6. Wprowadzony w pracy model uwzględniający sprzężone pola magnetyczne i mechaniczne umożliwia, po rozwiązaniu rozważanego problemu brzegowo-początkowego, analizę rozkładu natężenia pola elektrycznego, które w omawianym sformułowaniu jest rozprężone względem pola magnetycznego. Czy wyznaczano rozkłady natężenia pola elektrycznego i czy można je wykorzystać do oceny niebezpieczeństwa wystąpienia zjawiska przebiccia, w kontekście wytrzymałości elektrycznej urządzenia?
7. Proszę o ocenę wpływu braku uwzględnienia tłumienia mechanicznego w modelu układu. W jaki sposób można uwzględnić ten efekt? Pytam o to tym bardziej, że zakłada się istnienie w podukładzie magnetycznym oleju transformatorowego, a pewne elementy konstrukcji uzwojeń wykazują cechy ośrodków reologicznych, ponieważ zawierają w swojej konstrukcji materiały typu żywica. Wydaje się, że efekt tłumienia mógłby mieć istotny wpływ na stan wyężenia konstrukcji.
8. Czy w ramach oprogramowania wykorzystywanego w obliczeniach przeprowadzonych w pracy jest możliwa sprzężona analiza magnetomechaniczno-termiczna oraz akustyczno-



magnetomechaniczna? Pierwsza dotyczy modelowania zjawisk termicznych towarzyszących zjawisku zwarcia, które to, zgodnie z przedstawionymi w pracy normatywami, są istotne dla zapewnienia bezpieczeństwa konstrukcji. Druga może dotyczyć np. wykorzystania pomiarów charakterystyk akustycznych transformatora w warunkach zwarcia do identyfikacji uszkodzeń.

9. Dla wyników przedstawionych na Rys. 4.3, 4.4 i 4.5 nie opisano szczegółowo warunków brzegowych dla przeprowadzonej analizy magnetostatycznej.
10. Na Rys. 4.13 (str. 52) przedstawiono wyniki analizy MES i pokazano efekt „tiltingu” (pochylania) przewodów uzwojenia, przy czym opisano ten efekt jako przypadek utraty stateczności. Moje pytanie dotyczy faktu, czy przedstawiona analiza MES miała charakter analizy stateczności, czy jedynie rozwiązano problem brzegowy? Taka analiza jest bardzo trudna, tym bardziej w przypadku problemów dla pól sprzężonych. Efekt przedstawiony na Rys. 4.13 można również otrzymać jako wynik analizy magnetostatycznej (nie analizy stateczności), gdzie objawia się on jako skutek istnienia złożonego stanu naprężenia w układzie, prowadzącego do przedstawionej deformacji, ale bez formalnej utraty stateczności. Nie jest uprawnione traktowanie postaci deformacji jako skutku utraty stateczności, bez przeprowadzenia analizy stateczności. Należy podkreślić, że z opisu pracy wynika, że analiza stateczności w konwencji MES nie została przeprowadzona, nie uwzględniano również analizy stanów pokrytycznych i modelu zniszczenia, stąd wypowiedzi odnośnie uszkodzeń mechanicznych i utraty stateczności, formułowane na podstawie wyników przeprowadzonej analizy MES muszą być ostrożne.
11. Na Rys. 4.12b pokazano efekt „tiltingu” w zakresie sprężystym (elastic tilting), jednak charakter deformacji wskazuje na duże deformacje, być może o charakterze trwałym, które zapewne wystąpiły w stanie pokrytycznym konstrukcji, już po zajściu zjawiska utraty stateczności. Równania (4.18) i (4.19) pokazują wyrażenia na siły krytyczne w zakresie odkształceń liniowo-sprężystych, wskazuje na to występowanie modułu Younga i liczby Poissona, jednak Rys. 4.12b pokazuje efekt działania sił o wartościach 300% siły krytycznej, co wskazuje na możliwość uzyskania stanów odkształceń trwałych w stanie pokrytycznym.
12. Rozwiązywane problemy są niezwykle złożone, a wymagana jakość dyskretyzacji prowadzi do dużych modeli, w sensie liczby stopni swobody. Czy i jak Autor widzi możliwość zastosowanie metod redukcji

rzędu modelu, np. w odniesieniu do pól mechanicznych, zarówno w zagadnieniach statycznych jak i dynamicznych?

13. Czy wykonując analizy MES sprawdzano wpływ gęstości i jakości siatki elementów skończonych na uzyskiwane wyniki?
14. Uprzejmie proszę o dyskusję na temat oceny zasadności porównania wyników obliczeń analitycznych i MES w zakresie rozważanych problemów pól sprzężonych? W szczególności proszę rozważyć założenia stosowanych modeli.
15. W podrozdziale 5.4.1 są wyniki analiz MES, ale nie omówiono szczegółowo warunków brzegowych.
16. Na str. 84 Autor informuje, że w pracy zastosowano podejście skończonych elementów krawędziowych w modelowaniu pól magnetycznych oraz uaktualnione sformułowanie Lagrange'a. Uprzejmie proszę o dyskusję, czy w istocie zastosowane elementy krawędziowe Nedeleca dla siatek pola magnetycznego, ponieważ z tekstu pracy zrozumiałem, że były to klasyczne elementy skończone typu Lagrange'a.
17. Na str. 84 Autor stwierdza, że względna przenikalność magnetyczna dla stali transformatorowej wynosi 10000-20000, a podczas badania modelu konstytutywnego magnetyka przyjęto  $\mu_r = 1000$ . Uprzejmie proszę o wyjaśnienie rozbieżności.
18. Jakie wartości parametrów ( $\Delta t$ ,  $\beta_H$ ,  $\gamma_H$ ) algorytmu Newmarka zastosowano w obliczeniach? A jaki algorytm zastosowano w przypadku dyskretyzacji po czasie pola magnetycznego?
19. W podrozdziale 5.5.1 można zauważyć brak równań pola elektromagnetycznego, pokazano jedynie równania dynamiki po dyskretyzacji przestrzennej. W równaniach dynamiki dla pól przemieszczeń wprowadzono tłumienie, które nie było modelowane (tak mi się wydaje). Opis zastosowanego sformułowania MES jest niewystarczający, mimo zamieszczenia dodatku A. Również w kontekście pierwszej uwagi dot. terminologii to wyjaśnienie byłoby cenne.
20. Opis warunków brzegowo-początkowych dla rozważanych modeli MES zawiera zbyt mało szczegółów, nie podano również rozmiaru modeli w sensie liczby stopni swobody odpowiadających wektorowemu potencjałowi magnetycznemu i przemieszczeniom mechanicznym.
21. Opis przeprowadzonych symulacji nie zawiera również zbyt wielu szczegółów. Podaje się krok czasowy dla analizy statycznej, a nie podano schematu całkowania dla równań pola magnetycznego w aproksymacji kwazistatycznej, przedstawiając jedynie metodę Newmarka dla równań dynamiki pól mechanicznych po

półdyskretyzacji. Nie wyjaśniono precyzyjnie, co kryje się pod terminem analizy nieustalanej (transient), bo można zakładać, że dotyczy ona tylko pól mechanicznych (str. 96), natomiast dla pól magnetycznych założono model magnetostatyki, choć aproksymacja kwazistatyczna prowadzi do problemu nieustalonego również dla tych pól (uwaga nr 1 dot. terminologii).

22. Na str. 92 pada stwierdzenie, że rozkład naprężeń mechanicznych dla modelu nie podąża za rozkładem gęstości sił Lorentza. Jest to stwierdzenie oczywiste, ponieważ rozkład naprężeń opisany jest układem równań Naviera-Lamego wraz z warunkami brzegowo-początkowymi, a nie jest „proporcjonalny” do rozkładu gęstości sił Lorentza, które to stanowią składnik źródłowy.
23. Na str. 93 pada stwierdzenie, że „maksymalna deformacja wynosi 1.649 mm, co jest w zakresie sprężystym krzywej Hooke’a dla miedzi”, o ile miarą deformacji może być pole przemieszczeń, to zazwyczaj zakres odkształceń sprężystych, wyznaczany podczas statycznej próby rozciągania, odnosi się do miary względnej jaką jest inżynierskie odkształcenie normalne, wyrażane względnym wydłużeniem. Dla materiałów metalowych przyjmuje się, że graniczne naprężenia, odpowiadające zakresowi odkształceń sprężystych, nazywane umowną granicą sprężystości, powodują trwałe odkształcenia wzdłużne próbki równe 0.005% jej długości pomiarowej. Na tej podstawie można określić odpowiadające temu odkształceniu przemieszczenia lub wydłużenia. Proszę o komentarz do uwagi.
24. Na str. 100 stwierdzono, że cyt.: „Ten asymetryczny rozkład sił na średnicy prowadzi do nietypowej deformacji wybożenia w płaszczyźnie xy przekroju poprzecznego.”. Wydaje się, że takie stwierdzenie jest absolutnie nieuzasadnione, ponieważ jeśli przeprowadzono analizę stanu nieustalonego, przynajmniej dla pól mechanicznych, to otrzymana postać deformacji odnosi się do konfiguracji bieżącej układu, w fazie ruchu odpowiadającej rozważanej chwili czasu, wyrażonej odpowiednim krokiem procedury całkowania. Z opisu w pracy wynika, że nie przeprowadzono formalnej analizy stateczności, stąd obserwowana deformacja nie ma charakteru deformacji wybożeniowej, ponieważ przedstawia jedynie złożoną deformację układu pod wpływem sił Lorentza, sił bezwładności i sił sprężystości w rozważanej chwili czasu. Istotne byłoby przedstawienie przebiegów czasowych wielkości mechanicznych, takich jak przemieszczenia i naprężenia, na tle sygnału prądu zwarciovego, co jest naturalne w przypadku analizy typu „transient”.

25. Proszę o porównanie założeń i typów modeli MES oraz warunków prowadzenia eksperymentu w rozdz.6. Wydaje się, że zastosowane modele MES nie odzwierciedlają warunków tłumienia, warunków trybologicznych, jak również nie dotyczą analizy stateczności, nie można również stwierdzić, czy większe naprężenia oznaczają efekt utraty stateczności lub zniszczenie konstrukcji lub tylko wystąpienie odkształceń trwałych. Czy jest zasadne porównywanie wyników przeprowadzonych symulacji MES i przeprowadzonych eksperymentów?
26. Opis w Dodatku A jest zgodny z poz. 83 spisu literatury, jednak nie podano wyraźnej informacji w tym zakresie, ograniczając się do lokalnych powołań, np. na str. 119. Nie przedstawiono również dyskusji nad możliwością zastosowania innych sformułowań MES dla problemu rozważanych pól sprzężonych.
27. Wydaje się, że zamieszczony w Dodatku A opis deformacji za pomocą tensora Greena-Lagrange'a nie jest potrzebny, ponieważ rozważano sformułowanie równań elastodynamiki w zakresie tzw. małych odkształceń, tj. w zakresie liniowej teorii sprężystości.
28. W Dodatku A pokazano równania konstytutywne dla przypadków płaskiego stanu naprężenia i odkształcenia oraz w przypadku osiowosymetrycznym dla modelu ciała izotropowego. Dlaczego nie pokazano modelu ciała ortotropowego? Wydaje się, że opis powinien być skrócony do pełnego modelu stanu naprężenia w przypadku trójwymiarowym, bo taki był rozważany w pracy.
29. W Dodatkach B i C nie pokazano jak z uzyskanych zastępczych stałych inżynierskich ( $E$ ,  $\nu$ ,  $G$ ) przejść na składowe tensora sprężystości w skróconej notacji Voigta dla modelu materiału ortotropowego.
30. Uprzejmie proszę o dyskusję nad jakością modelu (9.3) w kierunkach  $x$  i  $y$ . Czy jest ona tak samo dobra jak w kierunku  $z$ ? Proszę również o uzasadnienie modelu (9.10), który stosuje średnią geometryczną modułów Younga dla zastępczego modułu Kirchhoffa.

Poniżej przedstawiono również uwagi o charakterze redakcyjnym:

1. Opis pod Rys. 3.4 mówi, na podstawie schematu modelu obwodowego transformatora, o indukcyjnościach ( $L$ ), a na schemacie pokazano reaktancje indukcyjne ( $X$ ). Dodatkowo, w stanie jałowym pracy transformatora parametry obwodu wynoszą  $R_m$  i  $X_m$  (zgodnie ze schematem obwodu), a nie  $R_m$  i  $L_2$ .
2. Równanie (4.11) opisujące gęstość objętościową sił Lorentza nie powinno zawierać różniczek objętości  $dV$  po prawej stronie.

3. Równanie (4.9) wynikające z kwadratu prądu zwarciovego ma błędny znak przy czynniku z 2 i w wykładniku tego czynnika.
4. Na str. 39 błędnie dokonano podziału na siły osiowe i radialne z punktu widzenia ich przyczyny – odpowiednich składowych wektora indukcji magnetycznej - dwa razy występuje określenie sił osiowych.
5. W równaniach (4.12) i (4.14) nie wyjaśniono znaczenia wielkości wektorowych  $\alpha_z$  i  $\alpha_y$ .
6. Rys. 20 pokazuje zniszczenie ze względu na hammering, a nie tilting, jak napisano na str. 56.
7. Nad równaniem (4.21) napisano, że oblicza się siły osiowe, a w rzeczywistości chodzi o siły promieniowe.
8. Dla potrzeb analizy wyników przedstawionych na Rys. 5.7 może pola różnic rozwiązań dla symulacji S1 i S2 oraz S1 i S3 mogłyby pokazać więcej detali.
9. W równaniu (5.4) pominięto wektor gęstości prądu.
10. Ocenę wpływu typu analizy (statyczna lub dla stanu nieustalonego) lepiej byłoby przeprowadzić pokazując rozkłady różnic wyników.
11. Rys. 5.25 dotyczy, chyba analizy stanu nieustalonego, a nie analizy statycznej.
12. Podpis Rys. 5.27 mówi o cyt.: „maksymalnym wymuszeniu”, co to jest za wielkość? Wymuszeniem, w przypadku sprzężonej analizy stanu nieustalonego był przebieg czasowy prądu zwarciovego w uzwojeniach transformatora, czy tak?
13. Proszę o wyjaśnienie dla jakiej chwili czasu porównano rozkłady na Rys. 30.
14. Na str. 103 przedstawiono analizę Rys. 5.32 która nie jest zrozumiała, tym bardziej że rysunek przedstawia zależność naprężenie – wysokość, a nie naprężenie – siły Lorentza.
15. Tab. 6.1 jest podpisana pod, a pozostałe tabele są podpisywane nad.

Myślę, że rozważania nad przedstawionymi uwagami mogą przyczynić się do podniesienia, i tak wysokiej, jakości recenzowanej pracy.

#### 4. Wniosek końcowy

Praca doktorska autorstwa mgr inż. Bruna Bošnjaka, jej zawartość i forma wskazuje na wiedzę i umiejętności Autora w zakresie modelowania sprzężonych pól elektromagnetycznych i mechanicznych i prowadzenia złożonych symulacji komputerowych dla potrzeb projektowania złożonych

współczesnych obiektów technicznych, jakimi są transformatory mocy. Sposób realizacji pracy wskazuje na dużą wiedzę ogólną, co podkreśla inter- i wielodyscyplinarność tematu rozprawy, a także umiejętności praktyczne w dyscyplinie naukowej „Inżynieria mechaniczna”. Autor rozprawy doktorskiej podjął się bardzo trudnego i ambitnego zadania, które dostarcza ważnych i przydatnych wniosków w zakresie projektowania, konstruowania oraz eksploatacji transformatorów mocy w warunkach zwarcia, co może prowadzić do zwiększenia bezpieczeństwa systemu elektroenergetycznego oraz niezawodności tego typu urządzeń.

Należy podkreślić, że z tak trudnego zadania Doktorant wywiązał się w sposób co najmniej dobry. Wykazał się umiejętnością prowadzenia złożonych symulacji w oparciu o współczesne metody obliczeniowe fizyki ośrodków ciągłych oraz adekwatnym formułowaniem problemów naukowych i inżynierskich. Metodę formułowania modeli oraz realizację obliczeń i symulacji, uważam za właściwą, a uzyskane wyniki za wartościowe. Wnioski wynikające z realizacji przyjętego zakresu badań mają dużą wartość poznawczą i utylitarną. Z przekonaniem stwierdzam, że zasadnicze cele pracy zostały osiągnięte. Podsumowując wyrażam opinię, że:

- a) Rozprawa doktorska mgra inż. Bruna Bošnjaka spełnia wymagania art. 13 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65, poz. 595, stan prawny na dzień 30 września 2011 r.) i w związku z art. 179 ust. 1 ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę — Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r. poz. 1669 z późn. zm.) i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.
- b) Zakres rozważań rozprawy kwalifikuje ją do dziedziny nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna według aktualnej klasyfikacji dziedzin i dyscyplin określonej w rozporządzeniu z dnia 20 września 2018 r. (Dz. U. z 2018 r. poz. 1818).

