

dr hab. inż. Wojciech Pluta, prof. PCz
Politechnika Częstochowska
Wydział Elektryczny
Al. Armii Krajowej 17,
42-200 Częstochowa
wojciech.pluta. @pcz.pl

Częstochowa, 09.09.2023 r.

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Pana mgr inż. Dawida Webera na temat:

„Obliczanie pola i regulacja prądu w transformatorze rozproszeniowym”

Podstawa wykonania recenzji

Podstawą wykonania recenzji rozprawy doktorskiej mgr inż. Dawida Webera jest pismo Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Pana dr hab. inż. Andrzeja Waindoka prof. uczelni z dnia 10 lipca 2023 roku, powołujące się na uchwałę Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Opolskiej, z dnia 28czerwca 2023 r.

Opiniowana rozprawa doktorska powstała na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej, w Katedrze Elektrotechniki i Mechatroniki, pod kierunkiem promotora Pana prof. dr hab. inż. Bronisława Tomczuka oraz promotora pomocniczego dr hab. inż. Dawida Wajnerta. Przewód doktorski prowadzony był w dyscyplinie Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne.

1. Zasadność tematyki badań

W obecnym czasie projektowanie elektrycznych maszyn wirujących i transformatorów za pomocą metod numerycznych staje się praktycznie niezbędne. Zwiększenie mocy obliczeniowej komputerów pozwala na coraz dokładniejszą analizę rozkładu natężenia pola i indukcji magnetycznej w rdzeniu magnetycznym. Pozwala to uniknąć kosztownych błędów konstrukcyjnych przy projektowaniu na przykład transformatorów dużych mocy lub transformatorów specjalnych. Własne magnetyczne pole rozproszone w maszynach wirujących i transformatorach jest przedmiotem badań w wielu ośrodkach naukowo-badawczych. Pole rozproszone maszyn wirujących i transformatorów wpływa na właściwości eksploatacyjne i diagnostyczne tych urządzeń. Rozwiązanie problemu 2D do analizy strumienia rozproszenia umożliwiło jego badanie tylko w ograniczonym zakresie.

W rozprawie doktorskiej mgr inż. Dawida Webera podjęto rozwiązanie problemu 3D badania pola rozproszonego w transformatorach z ruchomym bocznikiem magnetycznym. Jest to istotne zagadnienie badawcze o dużym znaczeniu zarówno naukowym, jak i praktycznym. Rozważania zostały ukierunkowane na wzbogacenie dotychczasowej wiedzy w zakresie wpływu różnych czynników na rozkład przestrzenny magnetycznego pola rozproszonego w obiekcie. Warto podkreślić, że temat podjęty w pracy jest interesujący i ze względu na trudności obliczeniowe w niewystarczającym stopniu rozpracowany. Doktorant w rozprawie twórczo rozwija ważki problem badawczy, który jak dotąd nie doczekał się wyczerpującego opracowania. Jak z powyższego wynika, Autor podjął się rozwiązania problemu, który skalą trudności, znaczeniem naukowym i aplikacyjnym spełnia oczekiwania, jakie wiążą się z rozprawą doktorską.

2. Ogólna charakterystyka rozprawy doktorskiej

Recenzowana rozprawa doktorska mgr inż. Dawida Webera obejmuje 155 stron i składa się z wykazu oznaczeń, dziesięciu rozdziałów, spisu literatury zawierającego 99 pozycji w tym trzy odwołania internetowe, 9 załączników oraz streszczenia w języku polskim i angielskim. Przedstawiona bibliografia zawiera dwie pozycje autorskie i jedną współautorską.

Pracę skonstruowano poprawnie, zawiera wstęp wraz z analizą stanu wiedzy (rozdział 1), wyraźnie sformułowane cele oraz precyzyjnie postawioną tezę główną i dwie tezy dodatkowe rozprawy (rozdział 2). Na uwagę zasługuje precyzyjnie i krytycznie przeprowadzona analiza wiedzy zawartej w literaturze. Rozdział pierwszy zawiera również uzasadnienie zaproponowanej tematyki badań przedstawionej w niniejszej rozprawie. Nie ulega

wątpliwości, że Autor osiągnął wysoki stopień opanowania teorii i techniki obliczeń pól magnetycznych trójwymiarowych, wiedzę praktyczną z zakresu konstrukcji transformatorów o strumieniu rozproszonym oraz naukowej walidacji wyników badań.

Rozdział trzeci „Opis modeli fizycznych badanych transformatorów rozproszeniowych” zawiera dane techniczne dwóch różnych transformatorów rozproszeniowych. Do badań Autor wybrał jeden model transformatora tzw. rdzeniowy z uzwojeniami pierwotnym i wtórnym umieszczonymi na osobnych kolumnach i przekładni równej 1. Taki typ transformatora z zamkniętym obwodem magnetycznym, o rozproszeniu osiowym (jarzmowym), charakteryzuje się największym strumieniem rozproszenia. Biorąc pod uwagę konstrukcję transformatora Autor mógł przeprowadzić analizę połową tego transformatora z uwzględnieniem warunków symetrii i antysymetrii. Rdzeń transformatora pakietowano z pasków blachy o ziarnach zorientowanych gatunku ET 130-35S. Bocznik magnetyczny wsuwany jest pośrodku w jarzmo transformatora. Drugi wybrany transformator, o rozproszeniu radialnym, wykonano jako płaszczywy z uzwojeniami pierwotnym i wtórnym umieszczonymi na środkowej kolumnie. Wykorzystano transformator spawalniczy o przekładni 5,3:1. Rdzeń pakietowano z blachy o ziarnach niezorientowanych M530-50A. W przypadku tego transformatora bocznik magnetyczny składa się z dwóch części wsuwanych pomiędzy uzwojenie pierwotne i wtórne.

Rozdział czwarty poświęcono opisowi matematycznemu 3-wymiarowego pola magnetycznego w transformatorach. Sformułowano warunki brzegowe pierwszego i drugiego rodzaju. Zdefiniowano parametry całkowite umożliwiające określenie indukcyjności statycznej i dynamicznej wykorzystanej w obliczeniach obwodowych.

Analizę połową przeprowadzono MES za pomocą komercyjnego programu Maxwell 3D i modułu Magnetostatic. Szczelinę powietrzną zdefiniowano jako dwuwarstwową złożoną z czworościanów. Analizę połową poprzedzono obliczeniami strumienia rozproszenia dla całego obszaru transformatora i $\frac{1}{4}$ części. Określono cały obszar obliczeniowy optymalizując zmiany energii w powietrzu i czas potrzeby do wykonania obliczeń. Na tej podstawie określono poprawność warunków symetrii i antysymetrii, a dalsze obliczeniu przeprowadzono dla $\frac{1}{4}$ obszaru całego transformatora. Biorąc pod uwagę rozwiązanie problemu 3D i mnogość wariantów położeń i parametrów bocznika magnetycznego takie podejście należy uznać za całkowicie uzasadnione i świadczy o opanowanym warsztacie badawczym Autora.

Dla wybranych modeli transformatorów o dużym rozproszeniu przeprowadzono symulacje. W rozdziale 5 dotyczącym transformatora o rozproszeniu osiowym oraz w 6

dotyczącym transformatora o rozproszeniu radialnym przedstawiono analizę rozkładu pola magnetycznego w rdzeniach przedmiotowych transformatorów. W rozdziale przedstawiono obliczenia 3-wymiarowego rozkładu pola magnetycznego dla dwóch typów transformatorów z ruchomym bocznikiem magnetycznym dla 20 położenia tego bocznika. Wyniki analizy numerycznej strumienia rozproszenia porównano z wynikami pomiarów indukcji magnetycznej sondą w odległości 0,5 mm od fizycznie wykonanych rdzeni transformatorów. Zarówno wyniki obliczeń symulacyjnych jak i praktycznych wykonano dla 20 różnych położenia bocznika magnetycznego. Uzyskano zadawalającą zgodność wyników analizy polowej z pomiarami na poziomie średniej ok. 3% i 5,5% odpowiednio dla transformatora o rozproszeniu jarzmowym i radialnym.

Autor zaproponował model polowo-obwodowy opracowany na podstawie metody Lagrang'a w rozdziale siódmym. Wykonał pomiary rezystancji zastępczej strat w rdzeniach badanych transformatorów w funkcji napięcia zasilania. Następnie przeprowadził analizę stanów nieustalonych badanych transformatorów. Wyniki analizy wyznaczania prądów strony pierwotnej i wtórnej porównano z wynikami pomiarów. Do analizy ilościowej wybrano wartości skuteczne prądów strony pierwotnej i wtórnej. Średnia wartość błędu wynosiła 8% natomiast, w 87% symulacji (dla różnych zestawów parametrów) nie przekroczyła 10%. Potwierdza to prawidłową koncepcję zaproponowanego modelu polowo-obwodowego.

Taki wybór umożliwił Autorowi wdrożenie uzyskanych wyników badań polowo-obwodowych. Jedyną z konstrukcji badanego transformatora był transformator spawalniczy. W rozdziale ósmym Autor zaproponował „Układ obniżający napięcie strony wtórnej w stanie jałowym transformatora”. Układ wyposażono w detekcję przejścia napięcia przez zero i poprawnie wykorzystano go do załączania napięcia w fazie po przejściu napięcia przez zero. Oprócz wymienionych przez Autora zalet układu obniżającego napięcie strony wtórnej jak przykładowo ograniczenie strat energii, niepodważalną zaletą takiego rozwiązania jest komfort użytkowania. Narażenie na napięcie ok. 60 V strony wtórnej takiego transformatora stanowi bardzo nieprzyjemne doświadczenie. Cały układ został wyposażony w możliwość ustawiania czasu przełączania z trybu obniżonego napięcia w tryb spawania. Autor wykonał także szereg badań (cykli załącz/wyłącz) określających przydatność zaproponowanego rozwiązania.

W rozdziale dziewiątym Autor zaproponował wdrożenie wyników badań do układu automatycznej regulacji (UAR) prądu, przez zmianę pozycji bocznika. Zbudował

odpowiednią konstrukcję mechaniczną i układ elektryczny do sterowania bocznikiem transformatora z rozproszeniem radialnym. Do budowy układu elektrycznego Autor wykorzystał silnik krokowy regulowany sterownikiem przemysłowym PLC S7-1200 zregulatorem PID. Na podkreślenie zasługuje fakt uzyskania bardzo precyzyjnego pozycjonowania bocznika magnetycznego, pomiędzy wartościami zadaną i zmierzoną, nie przekraczały 1 mm. Autor na podstawie wyników obliczeń polowo-obwodowych wyznaczył zależność prądu strony wtórnej od pozycji bocznika i napięcia zasilania. Wyznaczoną zależność wykorzystał praktycznie w układzie automatycznej regulacji prądu weryfikując tym samym postawione w pracy tezy.

3. Podsumowanie

Do oryginalnych osiągnięć w pracy doktorskiej można zaliczyć:

1. wykonanie analizy polowej strumienia rozproszenia dla dwóch różniących się konstrukcyjnie transformatorów z uwzględnieniem różnych położeń i wykonania (szerokości i ukosowania) bocznika magnetycznego,
2. weryfikacja wyników analizy polowej i ich dokładności na modelach fizycznych transformatorów,
3. opracowanie modeli polowo-obwodowych w pakiecie w środowisku Matlab/Simulink,
4. weryfikacja modeli polowo-obwodowych na modelach fizycznych transformatorów,
5. opracowanie i wdrożenie autorskiego układu obniżania napięcia strony wtórnej transformatora w stanie jałowym,
6. opracowanie i wdrożenie autorskiego układu dokładnej regulacji prądu poprzez zmianę pozycji bocznika magnetycznego,
7. opracowanie i wdrożenie metody, która może być konkurencyjnym narzędziem do analizy quasi-stacjonarnego pola magnetycznego przekładnika prądowego i wspomaganie procesu projektowania,

4. Uwagi i pytania

strona tytułowa - nazwa dyscypliny – jest Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika powinno być: Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne,

str. 3 – Wykaz użytych symboli i oznaczeń - drobne Wykaz użytych oznaczeń i symboli – niektóre z dużej litery,

str. 102 – jest „znacznie” powinno być znaczenie

str. 108 – błąd odnośnika do równania,

drobne usterki edytorskie: błędy tak zwane literówki np. str. 53 – jest „magnesowani” powinno być magnesowania oraz np. opis oznaczeń czasami z dużej a czasami z małej litery.

w Spis literatury - Strony internetowe [X1] i [X2] – podany sam link – brak opisu.

Moim zdaniem brak poważniejszych błędów i uchybień, które należałoby podnieść. W trakcie zapoznawania się z treścią pracy nasuwa się kilka pytań i uwag dyskusyjnych, do których proszę o komentarz ze strony Autora:

1. W jaki sposób, jakim urządzeniem wykonano pomiary rozkładu pola rozproszenia transformatorów i jak opracowano wyniki?
2. Na jakiej podstawie Autor stwierdził, że indukcję remanentu można obniżyć stosując materiały magnetyczne o węższej charakterystyce magnesowania?
3. Jak Autor widzi możliwość zastosowania uzyskanych wyników pomiarów do zamodelowania transformatora z rozproszeniem jarzmowym o nierównych przepływach w uzwojeniu pierwotnym i wtórnym?
4. Jak Autor widzi możliwość zastosowania w modelu polowym transformatorów modułu Transient zamiast Static?
5. Dlaczego Autor wykonywał pomiary transformatorów w zakresie napięć niższych niż ich napięcia znamionowe?
6. W pracy nie przedstawiono rozkładu strumienia rozproszenia w otoczeniu rdzenia. Czy możliwym jest zaprezentowanie rozkładu strumienia rozproszenia?

5. Wniosek końcowy

Autor przedstawianej rozprawy doktorskiej wykazał się bardzo dobrą znajomością nowoczesnej metodyki modelowania złożonych obiektów fizycznych, metod numerycznych i praktycznego zastosowania uzyskanych wyników symulacji. Uważam, że praca stanowi samodzielne rozwiązanie przez Autora szeregu zagadnień naukowych przy użyciu nowoczesnych metod badawczych.

Zamieszczone powyżej uwagi w niniejszej recenzji nie mają żadnego wpływu na moją ostateczną pozytywną ocenę. Zatem stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana mgr inż. Dawida Webera pt. „Obliczanie pola i regulacja prądu w transformatorze rozproszeniowym”,

stanowi oryginalne rozwiązanie zagadnienia naukowego, a spójnie przedstawiony sposób rozwiązania problemów dowodzi umiejętności prowadzenia prac naukowych. Moim zdaniem niniejsza rozprawa doktorska spełnia wszelkie wymagania stawiane przez ustawę z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U.2023.742 z póź. zm.) i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony w dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne.

A handwritten signature in black ink, consisting of several vertical strokes and a long horizontal stroke extending to the right.