

Rzeszów, 02.11.2024 r.

dr hab. inż. Damian Mazur, prof. PRz.  
Wydział Elektrotechniki i Informatyki  
Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza  
Al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów

### **Recenzja rozprawy doktorskiej**

Doktoranta mgr. inż. Michała Sierzęgi

Tytuł rozprawy doktorskiej:

#### **„Wyznaczanie rozkładu pola magnetycznego w blachach transformatorowych z uwzględnieniem histerezy magnetycznej”**

Recenzja została wykonana w odpowiedzi na pismo z dnia 19.09.2024r., które skierował do mnie Pan Dziekan Wydziału Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej Politechniki Krakowskiej dr hab. inż. Maciej Sułowicz, prof.. PK.

#### **1. Ocena aktualności tematyki rozprawy**

Wyznaczanie strat mocy w transformatorach jest zagadnieniem ciągle aktualnym, zwłaszcza w odniesieniu do transformatorów średniej i dużej mocy. Wyznaczanie strat histerezowych w kolumnach i jarzmie transformatora nie jest zagadnieniem skomplikowanym, gdyż pole magnetyczne w tych częściach rdzenia transformatora może być traktowane jako jednowymiarowe. Jednak problem pojawia się przy określaniu tych strat w narożach rdzenia transformatora oraz w obszarach połączeń kolumny środkowej z jarzmem transformatora trójfazowego. Zasadnicza trudność przy wyznaczaniu strat histerezowych w tych przypadkach wynika z faktu, że wektory natężenia pola magnetycznego i indukcji magnetycznej nie są współliniowe, a charakterystyki magnesowania dla kierunku walcowania i kierunku do niego poprzecznego znacznie różnią się między sobą.

#### **2. Cel i charakterystyka rozprawy**

Głównym celem pracy jest przedstawienie propozycji modelowania procesu magnesowania blach transformatorowych w dowolnym kierunku na płaszczyźnie blachy.

Rozprawa zawiera 80 stron i składa się z siedmiu rozdziałów głównych, streszczenia w języku polskim i angielskim, wykazu ważniejszych oznaczeń oraz bibliografii. W pierwszym rozdziale „Wprowadzenie” zawarte jest m.in. omówienie aktualnego stanu wiedzy, sformułowany jest cel i teza rozprawy oraz przedstawiony jest zakres zagadnień prezentowanych w poszczególnych rozdziałach. Pan mgr inż. Michał Sierżęga postawił następującą tezę: „zmiany indukcji magnetycznej w blachach transformatorowych dla dowolnego kierunku magnesowania mogą być wyznaczone z uwzględnieniem histerezy magnetycznej i tekstury Gossa tylko na podstawie dwóch odpowiednio modyfikowanych charakterystyk magnesowania wyznaczonych dla kierunku walcowania blachy transformatorowej i kierunku prostopadłego do kierunku walcowania”. Udowodnieniu tej tezy poświęcone są kolejne rozdziały rozprawy. Wyjściowym zagadnieniem było przyjęcie sposobu modelowania pętli histerezy o dowolnym kształcie począwszy od „klasycznego” kształtu pętli histerezy wyznaczonej na przykład wzdłuż kierunku walcowania blachy transformatorowej a skończywszy na kształcie pętli histerezy wyznaczonej dla kierunku poprzecznego tej blachy. W drugim rozdziale rozprawy przedstawiono krótką charakterystykę typowych blach transformatorowych stosowanych w transformatorach średniej i dużej mocy, ich strukturę krystalograficzną a także właściwości magnetyczne wybranych blach elektrotechnicznych, ze szczególnym uwzględnieniem blach transformatorowych. W kolejnym rozdziale przedstawiono sposób modelowania pętli histerezy magnetycznej blach elektrotechnicznych z wykorzystaniem funkcji eksponencjalnej. Porównano pętle histerezy obliczone za pomocą zaproponowanego sposobu modelowania z pętlami histerezy wyznaczonymi pomiarowo wybranej blachy transformatorowej. W rozdziale czwartym przedstawiono sposób modelowania procesu magnesowania blach transformatorowych dla dowolnego kierunku zmian natężenia pola magnetycznego na płaszczyźnie blachy. Uwzględniono przy tym zjawisko nasycenia w poszczególnych elementarnych segmentach podziału blachy transformatorowej. Weryfikacji zaproponowanych sposobów modelowania dokonano przez porównanie wyznaczonych numerycznie pętli histerezy z pętlami zmierzonymi dla kilku wybranych kierunków magnesowania. Piąty rozdział poświęcony jest zagadnieniu wprowadzenia modelu magnesowania blach transformatorowych do równań rozkładu pola magnetycznego. Wykorzystano równania sformułowane w metodzie podobnej do metody sieci reluktancyjnych. Obliczenia rozkładu pola magnetycznego dokonano z wykorzystaniem jednego, wypadkowego układu nieliniowych równań algebraicznych, w którym wielkością szukaną jest wektor składowych natężenia pola magnetycznego w elementarnych segmentach. W celu weryfikacji poprawności



zaproponowanej metody wyznaczania zmian indukcji w blachach transformatorowych porównano wyniki obliczeń numerycznych z wynikami pomiarów indukcji magnetycznej wykonanych z wykorzystaniem laboratoryjnego pakietu blach transformatorowych. W szóstym, przedostatnim rozdziale przedstawiono wyniki przykładowych obliczeń numerycznych zmian indukcji magnetycznej w próbce blachy transformatorowej, jaka była wykorzystana do pomiarów weryfikacyjnych. Obliczenia zostały wykonane dla kilku zadanych prądów wymuszających zmiany pola magnetycznego. Ostatni, siódmy rozdział zawiera wnioski wynikające z badań dotyczących modelowania procesów magnesowania w blachach transformatorowych. W tym rozdziale zaproponowano również zagadnienia dalszych prac badawczych dotyczących przede wszystkim analizy zmian indukcji magnetycznej w narożach i obszarach T rdzeni transformatorów trójfazowych.

### **3. Najważniejsze osiągnięcia rozprawy**

Najważniejszym osiągnięciem rozprawy jest opracowanie modelu magnesowania blach transformatorowych, zgodnego z postawioną tezą, że zmiany indukcji magnetycznej w blachach transformatorowych dla dowolnego kierunku magnesowania mogą być wyznaczone z uwzględnieniem histerezy magnetycznej i tekstury Gossa tylko na podstawie dwóch odpowiednio modyfikowanych charakterystyk magnesowania wyznaczonych dla kierunku walcowania blachy transformatorowej i kierunku prostopadłego do kierunku walcowania.

Należy podkreślić nową propozycję aproksymacji histerezowych zmian indukcji przy wykorzystaniu sumy dwóch funkcji  $\arctg$  z odpowiednio dobranymi współczynnikami. Jest to relatywnie proste, wystarczające dla celów inżynierskich, narzędzie do modelowania zmian indukcji dla dowolnego kierunku magnesowania na płaszczyźnie blachy.

Również propozycja uwzględnienia nasycenia magnetycznego w poszczególnych punktach (elementarnych segmentach) i wpływu tego nasycenia na przebieg zmian indukcji magnetycznej jest warta podkreślenia, zwłaszcza że literatura światowa w niewielkim stopniu zawiera sugestie dotyczące wpływu nasycenia magnetycznego przy rozpatrywaniu dwuwymiarowych pól magnetycznych.

Ważnym osiągnięciem Doktoranta jest także zaimplementowanie sposobu aproksymacji histerezowych zmian indukcji w blachach transformatorowych do istniejących równań rozkładu pola magnetycznego, sformułowanych na bazie zmodyfikowanej metody zastępczych sieci reluktancyjnych. W celu weryfikacji poprawności równań rozkładu z uwzględnieniem histerezowych zmian indukcji

Doktorant zbudował samodzielnie stanowisko pomiarowe i sam przeprowadził szereg pomiarów weryfikacyjnych.

#### 4. Uwagi merytoryczne

Nie podważając wartości i znaczenia naukowego rozprawy należy jednak zwrócić uwagę na kilka kwestii merytorycznych, wymagających m.in. dalszych prac badawczych:

- Doktorant powinien zwrócić uwagę jak będą liczone straty histerezy przy częstotliwości 50 Hz,
- warto byłoby dokonać porównania zmian indukcji magnetycznej wyznaczonej w sposób uproszczony ze zmianami indukcji, które powinny być wyznaczone na bazie rozwiązywania nieliniowych równań algebraicznych z bezpośrednim uwzględnieniem histerezy magnetycznej, a w konsekwencji określenie wielkości błędu,
- pełna walidacja zaproponowanej metody wyznaczania rozkładu pola magnetycznego w blachach transformatorowych wymagałaby obliczeń zmian indukcji dla rdzeni kilku transformatorów trójfazowych i porównania wyników obliczeń z wynikami odpowiednich pomiarów; należy jednak zaznaczyć, że bezpośredni pomiar natężenia pola magnetycznego w rdzeniu transformatora nie jest nadal możliwy i pozostają pośrednie metody weryfikacji,
- wskazane jest również zaproponowanie wyznaczania zmian indukcji z uwzględnieniem obszaru powietrza dookoła rdzenia, co będzie mieć znaczenie w obliczeniach strumieni rozproszenia, zwłaszcza w stanach zwarciovych,
- niewątpliwie konieczne będzie uwzględnienie wpływu prądów wirowych na zmiany indukcji magnetycznej.

#### 5. Uwagi redakcyjne

Jak to dość często bywa, Autor rozprawy nie ustrzegł się pewnych błędów czy niedociągnięć o charakterze redakcyjnym. Dostrzeżone przeze mnie przedstawiam poniżej w kolejności ich wystąpienia:

- a) Str. 31, rys. 3.14 w opisie pod rysunkiem 3.14 jest „ $w_{TD}$ ”, powinno być „ $w$ ”.
- b) w opisie pod rysunkiem 4.9 oraz 4.10 jest  $B_{nas}$ , powinno być  $B_{wyp}$

#### 6. Ocena osiągnięć naukowych Autora rozprawy

Pan mgr inż. Michał Sierżęga jest współautorem dziesięciu artykułów, w tym sześciu artykułów opublikowanych w takich czasopismach jak: Archives of Electrical Engineering, Acta Physica Polonica A, Energies oraz czterech artykułów wygłoszonych



i ujętych w materiałach konferencyjny. Doktorant jest również współautorem podręcznika pt. „Rozwiązywanie zagadnień pola elektromagnetycznego”. Do osiągnięć Doktoranta należy m.in. zaliczyć:

- dokonanie przeglądu i analizy literatury światowej związanej z obliczeniami zmian indukcji w blachach transformatorowych,
- zaproponowanie kilku sposobów aproksymacji zmian indukcji z uwzględnieniem histerezy w odniesieniu do blach transformatorowych,
- uwzględnienie warunku nasycenia przy wyznaczaniu zmian indukcji dla dowolnego punktu testowanej próbki blachy transformatorowej,
- samodzielne wykonanie stanowiska laboratoryjnego i przeprowadzenie badań.

Opiniowana rozprawa doktorska może być traktowana jako podstawowy materiał bazowy w dalszych pracach badawczych dotyczących zagadnienia analizy zmian indukcji w blachach transformatorowych a w szczególności opracowania algorytmów automatycznego generowania siatki podziału obszaru występowania pola magnetycznego i macierzy wymiarów geometrycznych, właściwego skalowania macierzy w celu uzyskiwaniu stabilnych rozwiązań w metodzie Newtona-Raphsona, powiązania siatki pola magnetycznego z osobną siatką pola prądów wirowych oraz przeprowadzenia pomiarów weryfikacyjnych na rzeczywistych rdzeniach transformatorów, zwłaszcza trójfazowych.

Dorobek publikacyjny Autora związany z tematyką pracy jest wystarczający i potwierdza bardzo dobrą znajomość tematyki poruszanej w pracy.

**Uważam, że cele założone w pracy zostały spełnione a hipoteza potwierdzona.**

Sformułowane w recenzji uwagi mają w większości charakter dyskusyjny i nie umniejszają w żaden sposób wartości opracowanej metody ani wysokiemu poziomowi badawczemu rozprawy.

W związku z powyższym, rozprawa ta spełnia wszelkie wymagania określone w art. 13 ust. 1 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, z późniejszymi zmianami), a więc wnioskuję do Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne o dopuszczenie Pana mgr. inż. Michała Sierzęgi do dalszych etapów przewodu doktorskiego, w tym publicznej obrony.

*Damian Gamin*