

Bronisław Tomczuk, Dariusz Koterka, Jan Zimon, Dawid Wajnert
Politechnika Opolska

WYKORZYSTANIE POTENCJAŁÓW MAGNETYCZNYCH A-V I T-Ω DO 3-WYMIAROWEJ ANALIZY POŁA W UKŁADACH TRANSFORMATOROWYCH Z UWZGLĘDNIENIEM PRĄDÓW WIROWYCH

MAGNETIC POTENTIALS A-V AND T-Ω USING FOR 3D FIELD ANALYSIS IN TRANSFORMERS INCLUDING EDDY CURRENTS

Abstract: Eddy current distributions in solid ferromagnetic bulk placed in transformer circuit, were calculated. The tested solid piece have been settled in the 1-phase amorphous magnetic circuit. Two packages (Opera 3D and Maxwell 3D) were used to create mathematical models for the magnetic field analyses. Eddy current losses have been measured and compared with the calculated ones. The verification yields good agreement and correctness of the mathematical modelling.

1. Wstęp

Urządzenia elektrotechniczne zawierające obwody magnetyczne są szeroko stosowane zarówno w przemyśle jak i gospodarstwach domowych. W większości przypadków zawierają one elementy z materiałów ferromagnetycznie miękkich. Elementy te wykonuje się jako jednorodne np. ferrytowe, bądź pakietowane np. z taśm amorficznych lub blach elektrotechnicznych. Szerokie zastosowanie materiałów ferromagnetycznych spowodowało ich klasyfikację ze względu na różniące się własności magnetyczne [7]. Podstawowymi parametrami decydującymi o ich zastosowaniu jest indukcja nasycenia oraz stratność. W tabeli 1 podano wyżej wymienione parametry w odniesieniu do wybranych ferromagnetyków miękkich.

Tabela 1. Porównanie strat i indukcji magnetycznej nasycenia przykładowych ferromagnetyków miękkich

Materiał	$P_w(0,2\text{ T},$ $f=25\text{ kHz})$	B_N
	W/kg	T
Permaloy	14	0,7÷1,5
Ferryt	17	0,6
Taśma Amorficzna Grubość taśmy- 30 do 50 μm	5	0,57÷0,77
Taśma nanokrystaliczna Grubość taśmy- 20 μm	3	1,25

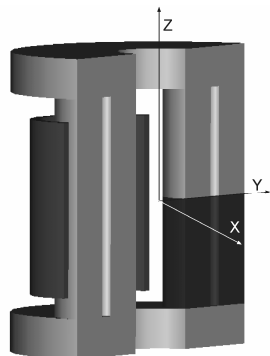
Na podstawie przedstawionych danych (tab. 1) widać, że rdzenie spakietowane z taśm charakteryzują się mniejszą stratnością. Straty mocy w rdzeniach obwodów magnetycznych wpływają znacząco na sprawność i warunki pracy całych urządzeń. Precyzyjne obliczenie strat w rdzeniach magnetycznych jest zagadnieniem skomplikowanym. Dlatego też, do ich wyznaczenia konieczne jest zastosowanie trójwymiarowej analizy polowej. Pomimo coraz większej mocy obliczeniowej komputerów analiza pola 3-D z uwzględnieniem szczelin powietrznych między warstwami blach pakietowanych rdzeni jest skomplikowana. W rdzeniach pakietowanych, np. z warstw amorficznych o grubości taśmy od 30 do 50 μm , jest bezpośrednie obliczanie strat z uwzględnieniem prądów wirowych w pojedynczych blachach. Dlatego też wyniki tych obliczeń (z uwzględnieniem w/w warstw) są ciągle przedmiotem analiz mających na celu poprawę własności fizycznych obwodów magnetycznych [2, 3].

2. Przedmiot badań

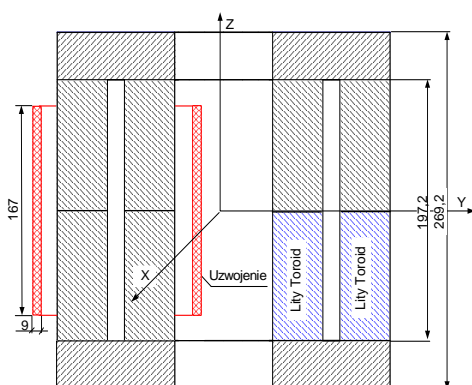
W celu uwzględnienia prądów wirowych w trójwymiarowej analizie pola układów transformatorowych badano 1-fazowy rdzeń amorficzny budowy modułowej, którego przekrój w płaszczyźnie YZ przedstawiono na rysunku 1b na którym pokazano główne elementy układu magnetycznego i elektrycznego. Jeden z tych elementów wykonano w postaci litego toroidu ze stali konstrukcyjnej. Rdzeń takiej budowy składa się

z elementów w kształcie toroidów, wykonywanych osobno i skręcanych śrubami. Konstrukcja ta charakteryzuje szybkością i łatwością montażu i demontażu. Dlatego też w miejsce jednego elementu kolumny rdzenia można umieszczać dowolne elementy z materiałów o różnych parametrach. Uzwojenie wzbudzące o liczbie zwojów $N=116$ zwojów zasilano prądami zmieniającymi się w przedziale od 2 do 13,4 A.

a)



b)



Rys. 1. Widok i przekrój rdzenia amorficznego 1-fazowego budowy modułowej wraz analizowanym litym elementem.

3. Modele obliczeniowe

Do analizy pola magnetycznego wykorzystano Metodę Elementów Skończonych (MES). Zastosowano dwie metody obliczeniowe. Pierwsza z nich, zaimplementowana została w komercyjnym pakiecie obliczeniowym Opera 3d firmy Vector Fields. Jest to metoda oparta na kombinacji potencjału wektorowego \vec{A} z potencjałem skalarnym V [1], [5]. Natomiast druga metoda analizy pola, wykorzystana w komercyjnym pakiecie Maxwell firmy Ansoft, to metoda analizy pola oparta na kombinacji wektorowego potencjału elektrycznego \vec{T} oraz skalarnego potencjału magnetycznego Ω [4, 6].

Z pakietu Opera wykorzystano moduł obliczeniowy Elektra SS [8]. W obszarze gdzie występują prądy wirowe rozwiązywane są równania dla magnetycznego potencjału wektorowego \vec{A} i elektrycznego potencjału skalarnego V :

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} - \nabla \frac{1}{\mu} \nabla \cdot \vec{A} + \gamma \left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \nabla V \right) = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \gamma \nabla V + \nabla \cdot \gamma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

gdzie μ – przenikalność magnetyczna, γ – przewodność.

W pakiecie Maxwell, w obszarach bezprądowych, obowiązuje równanie dla skalarnego potencjału magnetycznego Ω

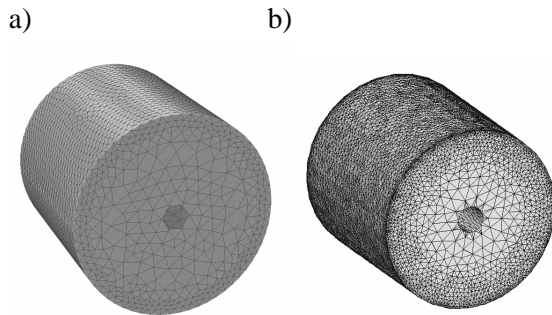
$$\nabla \cdot (\nabla \Omega) = 0 \quad (3)$$

W pozostałych podobszarach obowiązuje eliptyczne równanie różniczkowe. Uwzględniając bezźródłowość pola opisanego elektrycznym potencjałem wektorowym \vec{T} , rozwiązano zagadnienie brzegowe dla równania

$$\nabla^2 \vec{T} = j\omega\mu\gamma(\vec{H}_s + \vec{T} - \nabla \Omega) \quad (4)$$

W powyższym wzorze natężenie pola magnetycznego \vec{H}_s pochodzi od przepływów cewek wzbudzających pole magnetyczne.

W każdym pakiecie obliczeniowym wygenerowano dwa warianty siatek (W1, W2). Pierwszy charakteryzował się jednakową długością krawędzi elementów wzdłuż promienia litego toroidu. Natomiast w drugim wariantcie zwiększano liczbę elementów w okolicy bocznej powierzchni toroidów (Rys. 2a i 2b). Zagęszczenie wykonano celowo ponieważ głównie w pobliżu powierzchni bocznej występują prądy wirowe. W zastosowanych pakietach wykorzystuje się różne algorytmy automatycznej generacji siatek. Dlatego też użytkownik ma ograniczony wpływ na ich kształt. Wykorzystane w obliczeniach siatki mają jedynie zbliżone liczby elementów. W pakiecie Opera wykorzystano 610203 elementów dla siatki W1 i 970562 dla siatki W2. W pakiecie Maxwell liczba elementów dla siatki W1 wynosiła 615890, a dla siatki W2-850725. Wygenerowane siatki w obszarze litego toroidu przedstawiono na rysunkach 2a i 2b



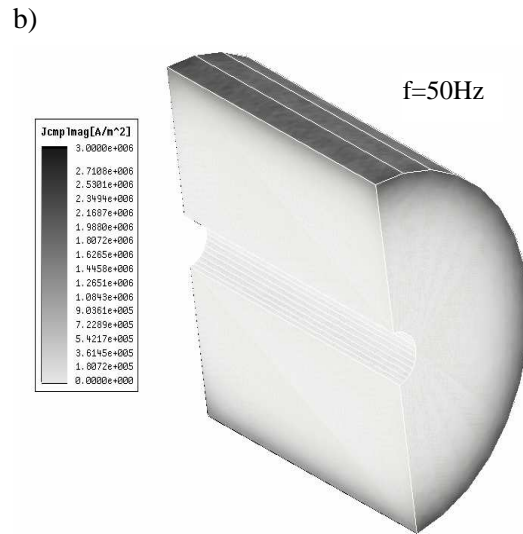
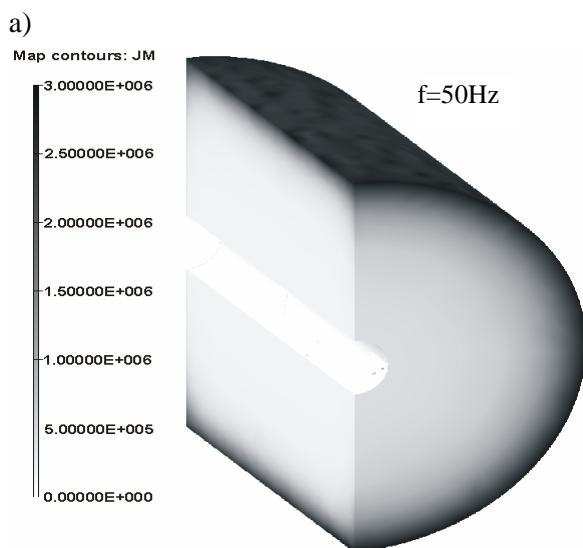
Rys. 2. Widok wariantów W2 siatek MES
a) w pakiecie Opera b) w pakiecie Maxwell

Obliczenia wykonano na stacji roboczej opartej na dwóch czterordzeniowych procesorach Intel(R), Xeon(R) 2GHz, 32 GB RAM.

4. Wyniki obliczeń

W obliczeniach zamodelowano lity fragment rdzenia, wykonany ze stali konstrukcyjnej ST3, o następujących parametrach: względna przenikalność magnetyczna $\mu_r=150$ oraz konduktywność $\gamma=2,5 \cdot 10^6$ S/m. Częstotliwość prądu wzbudzającego pole magnetyczne wynosiła $f=50$ Hz. Ze względu na niską przenikalność w obliczeniach założono liniowość obwodu magnetycznego.

Poniższe rozkłady gęstości prądów wirowych i indukcji dotyczą modeli opartych na wariacie W2 siatek. Odpowiednie mapy indukcji magnetycznej wykreślono w jednakowych skalach. Na rysunkach 3a i 3b przedstawiono rozkłady gęstości prądów wirowych w litym toroidzie, które otrzymano dla wartości maksymalnej prądu zasilającego równego $I=7,4$ A



Rys. 3. Rozkład wartości maksymalnej gęstości prądów wirowych J_M w litym fragmencie rdzenia dla prądu wzbudzenia $I=7,4$ A
a) w pakiecie Opera b) w pakiecie Maxwell

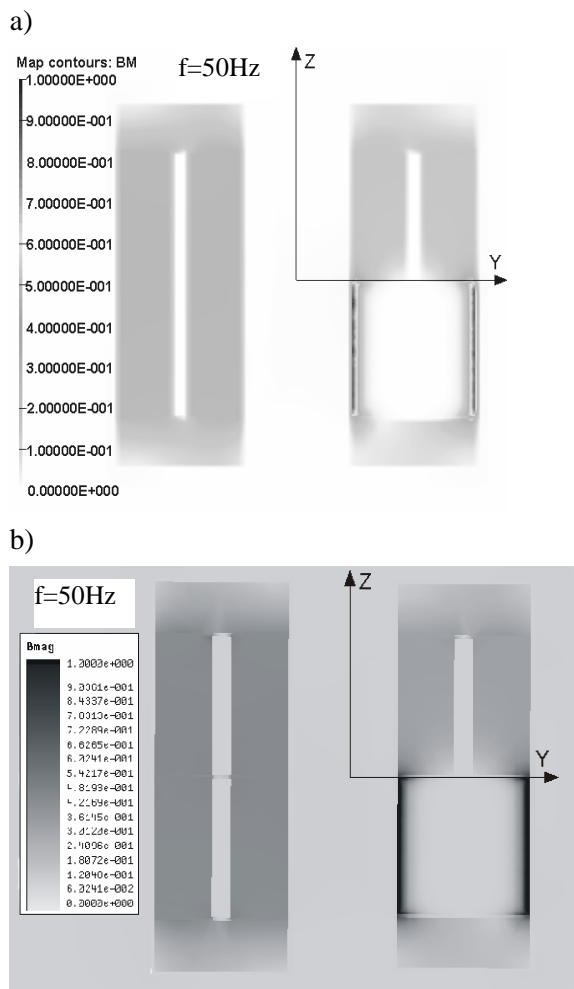
Otrzymane rozkłady gęstości prądów wirowych są podobne. Jednakże, wartości maksymalne wynikające z obliczeń w pakiecie Opera 3D są nieco większe. Ponadto, wyniki otrzymane z wykorzystaniem tego pakietu dają prądy wirowe, które występują w nieco szerszym podobszarze litego toroidu.

Na rysunkach 4a i 4b przedstawiono rozkłady modułów indukcji magnetycznej w płaszczyźnie YZ. W prawej części rysunku widać osłabienie indukcji w obszarze litego toroidu. Wynika to z wypierania pola wzbudzenia przez pole pochodzące od prądów wirowych.

Podobnie jak w przypadku rozkładu gęstości prądów wirowych, rozkłady indukcji otrzymane z obu pakietów są zbliżone. W pakiecie Maxwell 3D wartości indukcji w zewnętrznym podobszarze litego toroidu są nieco większe niż w pakiecie Opera 3D.

Naturalnie, indukujące się prądy wirowe w litych przewodzących elementach powodują powstawanie strat mocy. Na podstawie otrzymanych rozkładów pola wyznaczono je dla poszczególnych wariantów siatek wykorzystując poniższą zależność

$$P = \int_V \frac{|\vec{J}|^2}{\gamma} dV \quad (5)$$



Rys. 4. Rozkład modułu indukcji B_M w przekroju pionowym rdzenia dla prądu $I=7,4$ A
a) w pakiecie Opera b) w pakiecie Maxwell

Ze względu na niską indukcję zaniedbano straty z histerezy. Otrzymane wartości zestawiono w tabeli 2.

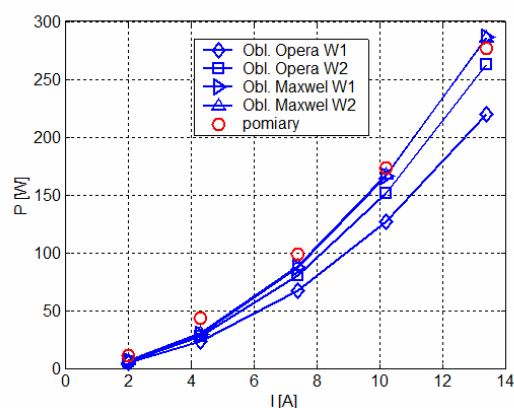
Tabela 2. Wartości strat z prądów wirowych dla częstotliwości prądów wzbudzenia $f=50$ Hz

	I	Opera		Maxwell	
		[A]	W1	W2	W1
Straty	2,00	5,07	5,85	6,39	6,40
	4,32	22,83	27,29	29,79	29,94
	7,40	67,00	80,07	87,42	87,84
	10,20	126,92	151,70	166,55	167,00
	13,40	219,68	262,56	286,70	285,23

Wartości strat symulowane z wykorzystaniem pakietu Maxwell są większe w niż w pakiecie Opera 3D. Jednakże nie odbiegają one od siebie znacząco. W pakiecie Opera 3D, obliczone straty (dla wariantu siatki W2) są większe o

około 17 % niż straty otrzymane w wyniku dyskretyzacji obszaru z użyciem siatki W1. Natomiast w pakiecie Maxwell wartości strat są niemal identyczne dla obu wariantów siatek. Czasy obliczeń dla pakietu Opera 3D wahają się od 11 min. (dla wariantu siatki W1) do 24 min (dla wariantu siatki W2). Analogicznie, dla pakietu Maxwell czasy obliczeń wynoszą odpowiednio 10 min (dla wariantu W1) oraz ok. 16 min (dla wariantu W2).

Obliczenia strat zweryfikowano, poprzez pomiar strat z prądów wirowych na obiekcie fizycznym. Porównanie otrzymanych wartości strat przedstawiono na rysunku 5



Rys. 5. Porównanie obliczonych i zmierzonych wartości strat w litym toroidzie

Otrzymano dobrą zgodność obliczeń i pomiarów. Jedynie dla niezagęszczanej siatki (wariant W1) wartości strat odbiegają bardziej od wartości zmierzonych.

5. Wnioski

Precyzyjne określenie wartości strat z prądów wirowych jest zagadnieniem stosunkowo skomplikowanym. Wiele pakietów obliczeniowych zawiera opcję ich obliczania. Jednakże w przypadku niewłaściwej dyskretyzacji wyniki są obciążone dużymi błędami. W celu uniknięcia błędów i wykonywania niewłaściwych badań prototypowych należy przeprowadzić wielowariantową trójwymiarową analizę polową, której wybrane wyniki przedstawiono w niniejszej pracy. Dla prawidłowo wykonanych modeli obliczeniowych otrzymano zbliżone rozkłady pola w przypadku wykorzystania obydwu pakietów. Pomimo tego, że nie uwzględniono nieliniowości obwodu magnetycznego, wartości zmierzone strat wirowych są zbliżone do obliczonych.

Jest to spowodowane głównie małą wartością indukcji magnetycznej w litym toroidzie, gdzie występują znaczne gęstości prądów wirowych.

Literatura

- [1] Binns K. J., Lawrenson P. J., Trowbridge C. W.: *The analytical and numerical solution of electric and magnetic fields*, J. Wiley and Sons, Chichester, New York, 1992.
- [2] Dolinšek J., Jeglič P., Mcguinness P., Jagličić Z., Smontara A., Tabachnikova E., Bengus V.: *Magnetic and electrical investigations of $Fe_{85-x}Co_xB_{15}$ metallic glasses*, Applied Physics A: Materials Science & Processing, vol. 79, no. 8, Springer Berlin / Heidelberg, XII, 2004, pp. 1947–1953.
- [3] Kim H.-Y.: *Effect of transition metal (TM) on the crystallization and the magnetic properties of $Fe_{62}Co_{10}Si_{10}B_{13}Nb_4TM_1$ melt-spun ribbons*, Journal of Materials Science, vol. 42, no. 8, Springer Netherlands, IV, 2007, pp. 2675-2677.
- [4] Maxwell 3-D *User Guide*, Ansoft Corporation, Pittsburgh, USA, 2008.
- [5] OPERA 3-D *User Guide*, Vector Fields Limited, Oxford, England, 2008.
- [6] Tanaka Y., *Three-Dimensional Eddy Current Analysis by the Finite Element Method with Integral Equations Using T- Ω* , IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 28/2, 1992, pp.1150-1153.
- [7] Tomczuk B., Koterak D.: *Transformatory z rdzeniami amorficznymi doświadczenia technologiczne i obliczeniowe*, IV Forum Transformatorowe 2009, Łódź, ABB Polska, 25-26 XI 2009, s. 15-47.
- [8] Xu E.X., Simkin J.: *Total/Reduced magnetic vector potential and electrical scalar potential for eddy current calculation*, Compumag'03, Saratoga Springs, 13-17 VII 2003, pp. I / 8 – 9.

Autorzy

Prof. dr hab. inż. Bronisław Tomczuk, Katedra Elektrotechniki Przemysłowej, Politechnika Opolska, ul. Luboszycka 7, 45-036 Opole.
 Dr. inż. Dariusz Koterak, jw.
 Dr. inż. Jan Zimon, jw.
 Mgr inż. Dawid Wajnert, jw.

Recenzent

Prof. dr hab. Tadeusz Glinka