

*pomiary magnetyczne próbek otwartych,
pomiary magnetyczne magnetowodów zamkniętych*

Dariusz KOTERAS*

ANALIZA POLA MAGNETYCZNEGO W PRÓBKACH OTWARTYCH I ZAMKNIĘTYCH MAGNETYCZNIE

W pracy przedstawiono wyniki pomiarów krzywej B/H dla próbki z taśmy amorficznej magnesywanej w kierunku prostopadłym do kierunku jej odlewania. Pomiarów dokonano zarówno w układzie zamkniętym jak i otwartym magnetycznie. W przypadku układu zamkniętego magnetycznie analizę wykonano w układzie transformatora w stanie jałowym. Natomiast w drugim przypadku do pomiarów wykorzystano układ permeametry z bezpośrednim pomiarem indukcji magnetycznej B oraz natężenia pola magnetycznego H. Dodatkowo wykonano obliczenia numeryczne rozkładów pola w transformatorze, z wykorzystaniem Metody Elementów Skończonych (MES).

1. WPROWADZENIE

Obecnie w wyniku szerokiego zastosowania w przemyśle magnetycznie miękkich materiałów ferromagnetycznych wykształciło się kilka ich typów różniących się znacznie właściwościami [7, 8]. Materiały te są stosowane w dwóch postaciach, jako lite odlewy (np. materiały kompozytowe) lub jako pakiety blach (np. z blachy elektrotechnicznej, amorficznej itp.).

W ramach technologicznych prac badawczych właściwości ferromagnetyków ulegają ciągłemu ulepszaniu bądź zostają wytworzone nowe. Dlatego też ważne jest stosunkowo precyzyjne określanie ich właściwości, szczególnie w skali makro. Pozwala to na przyjęcie odpowiednich charakterystyk nieliniowych tychże materiałów w celu wykonania obliczeń elektromagnetycznych dla danych urządzeń. Pomiar właściwości magnetycznych wykonuje się w próbkach otwartych jak i zamkniętych magnetycznie [2]. Dla układów zamkniętych pakietowanych stosuje się aparat Epsteina bądź rdzenie toroidalne. Natomiast dla próbek otwartych stosuje się permeametry bądź próbki umieszcza się we wzorcowym polu magnetycznym [3].

* Katedra Elektrotechniki Przemysłowej, Politechnika Opolska, ul. Prószkowska 76, 45-758 Opole.

2. OBLICZENIA W MAGNETOWODZIE ZAMKNIĘTYM

W pierwszym etapie wykonano obliczenia rozkładów pola magnetycznego dla obwodu magnetycznie zamkniętego. Do wykonania modelu matematycznego w/w układu wykorzystano komercyjny pakiet Opera 3D firmy Cobham [4] bazujący na Metodzie Elementów Skończonych (MES). Algorytm obliczeniowy, dla obliczeń statycznych, tego pakietu oparty jest na metodzie dwóch potencjałów skalarnych: całkowitego ψ oraz zredukowanego ϕ [1]. W ramach obliczeń numerycznych rozwiązywane były następujące równania różniczkowe.

$$\operatorname{div}[\mu \operatorname{grad}(\psi)] = 0 \quad (1)$$

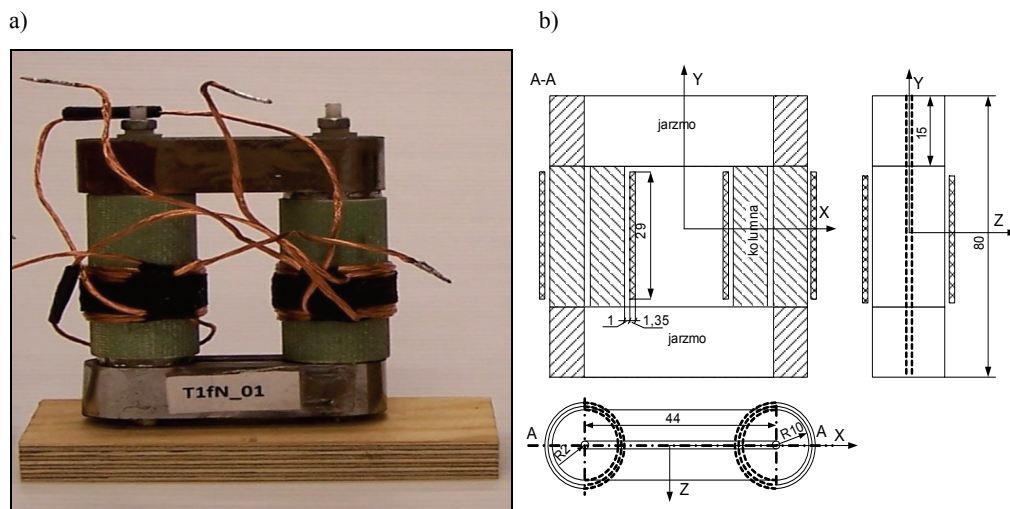
$$\operatorname{div}[\mu \operatorname{grad}(\phi)] - \operatorname{div}(\mu H_s) = 0 \quad (2)$$

Pierwsze równanie obowiązuje w podobszarach bezprądowych, natomiast drugie dotyczy podobszarów zawierających prądy wzbudzające pole magnetyczne. Wartości natężenia pola H_s pochodzące od wymuszeń pola oblicza się z prawa Biota–Savarta. Ponieważ badany transformator w trakcie pracy magnesowany jest zarówno w kierunku odlewania taśmy jak i do niego prostopadłym model matematyczny uwzględniał odmiennie właściwości taśmy amorficznej w obydwu tych kierunkach.

Analizowany transformator przedstawiono na rysunkach 1a i 1b. Dodatkowo na rysunku 1b przedstawiono główne wymiary obiektu wraz przyjętym do obliczeń układem współrzędnych kartezjańskich. Rdzeń tego transformatora wykonany jest z taśmy amorficznej, która charakteryzuje się znacznie mniejszymi stratami w odniesieniu do blachy elektrotechnicznej [5, 6]. Kolejną jego zaletą jest modułowa konstrukcja (osobne wykonanie poszczególnych fragmentów rdzenia), która umożliwia szybki montaż i demontaż obiektu. Uzwojenia strony pierwotnej (zasilające) i wtórnej (pomiarowe) miały taką samą liczbę zwojów wynoszącą $N_1 = N_2 = 42$ zwoje. W celu zapewnienia symetrycznego rozkładu pola oba uzwojenia zostały podzielone na dwie połowy i każdą nawinięto na osobnej kolumnie. Wartości prądów zasilających transformator zawierały się w granicach od $I = 0,32$ do $I = 3,26$ A.

Na rysunkach 2a i 2b przedstawiono rozkłady pola w płaszczyźnie XY_1 , będącej płaszczyzną równoległą do płaszczyzny XY (rys. 1b) i przesuniętą względem jej o 5 mm, dla dwóch wartości prądów wzbudzających pole magnetyczne $I = 1,92$ A oraz $I = 3,26$ A.

Widać, że największe wartości indukcji magnetycznej występują na styku kolumn z jarzmami w okolicy okna transformatora. Obliczenia te zweryfikowano pomiarowo poprzez pomiar strumieni magnetycznych w kolumnach. Porównane wyniki przedstawiono na rysunku 3. Otrzymano stosunkowo dobrą zgodność obliczeń z pomiarami. Większe różnice pomiędzy porównywanymi wartościami występują dla większych wartości prądów, jednakże nie przekraczają one 10%.

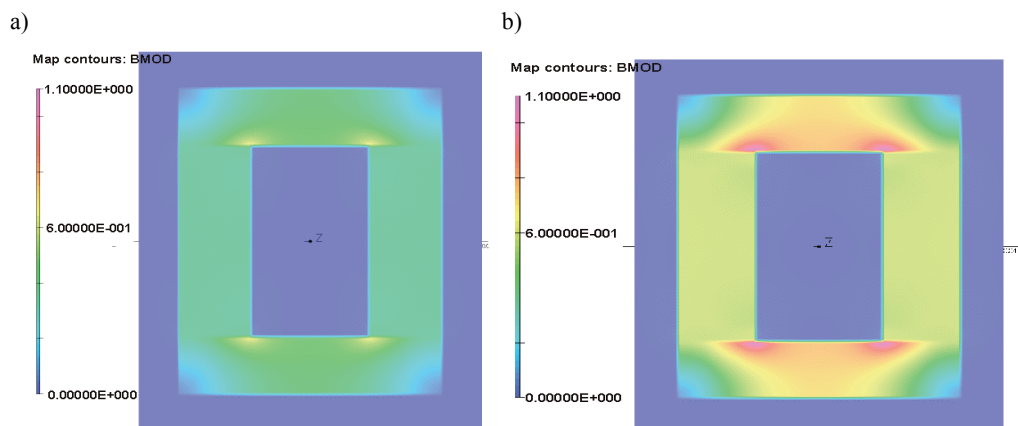


Rys. 1. Analizowany transformator

a) zdjęcie obiektu b) rzuty prostokątne z głównymi wymiarami

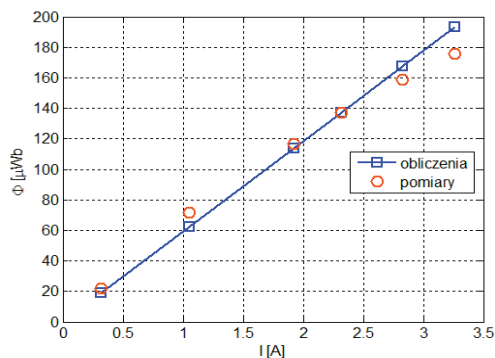
Fig. 1. Analysed transformer

a) picture of the object b) orthogonal views with main dimensions

Rys. 2. Rozkład pola magnetycznego w płaszczyźnie XY_1 a) dla prądu $I = 1,92$ A b) dla prądu $I = 3,26$ AFig. 2. Distribution of the magnetic field in XY_1 planea) for current intensity value $I = 1.92$ A b) for current intensity value $I = 3.26$ A

Widać, że największe wartości indukcji magnetycznej występują na styku kolumn z jarmami w okolicy okna transformatora. Obliczenia te zweryfikowano pomiarowo poprzez pomiar strumieni magnetycznych w kolumnach. Porównane wyniki przedstawiono na rysunku 3. Otrzymano stosunkowo dobrą zgodność obliczeń z pomiarami.

Większe różnice pomiędzy porównywanymi wartościami występują dla większych wartości prądów, jednakże nie przekraczają one 10%.



Rys. 3. Obliczone i zmierzone wartości strumieni w kolumnach
Fig. 3. Calculated and measured of the magnetic fluxes inside the transformer columns

3. OPIS STANOWISKA POMIAROWEGO

Do pomiarów parametrów statycznych elementów transformatora amorficznego wykorzystano układ permeamtru z bezpośrednim pomiarem indukcji oraz natężenia pola magnetycznego. Permeametr przedstawiono na rysunku 4.



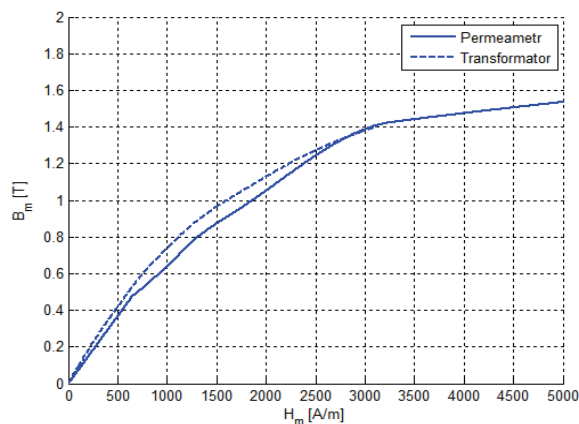
Rys. 4. Zdjęcie permeamtru
Fig. 4. Picture of the permeameter

Przedstawiony na zdjęciu permeametr składa się z 2-óch równoległe połączonych obwodów magnetycznych. Pozwala on na pomiary własności magnetycznych próbek otwartych w polu magnetycznym 30 kA/m. Do pomiarów ww. parametrów wykorzy-

stano dwa strumieniomierze cyfrowe typu RJP/S-201. Czujnik do pomiaru indukcji B był nawinięty bezpośrednio na badanej próbce. Natomiast czujnik do pomiaru H , który składał się z dwóch uzwojeń o jednakowej liczbie zwojów połączonych przeciwnie, umieszczono na czujniku B . W niniejszej pracy wykonano pomiary charakterystyk magnesowania kolumn transformatora amorficznego (rys. 1).

4. POMIARY WŁASNOŚCI MAGNETYCZNYCH TAŚMY AMORFICZNEJ

Producenci taśmy amorficznej podają własności jej jedynie w kierunku odlewania taśmy, który jest kierunkiem w którym osiąga ona najlepsze własności. Tak, więc materiał ten charakteryzuje się pewną anizotropią magnetyczną. W niniejszej pracy wyznaczono charakterystykę magnesowania próbki w kierunku prostopadłym do kierunku odlewania taśmy amorficznej. Badana próbka miała wymiary kolumny transformatora (Rys. 1b). Wykonano ją dwoma sposobami. Pierwszy sposób polegał na zasileniu zamkniętego magnetowodu w stanie jałowym. Pozwala on jedynie w sposób przybliżony określić w/w charakterystykę B/H . Krzywą tę wyznaczono z uwzględnieniem poszczególnych spadków napięć magnetycznych w jarzmach, kolumnach i szczelinach powietrznych wzdłuż średniej długości obwodu magnetycznego. Drugi sposób polegał na precyzyjnym pomiarze tej krzywej w układzie permeametrycznym jarzmowego opisanego w punkcie 3. Otrzymane krzywe przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Krzywe magnesowania

Fig. 5. B/H curves

Widać, że otrzymane wartości krzywych B/H nie różnią się znacząco między sobą. Wynika to z tego, że obliczanie z prawa przepływu krzywej nie uwzględnia

w pełni kilku zjawisk w występujących w rzeczywistym obiekcie. Są to między innymi zjawisko spęczenia linii pola magnetycznego w szczelinach powietrznych oraz zachowania pola w węzłach obwodu magnetycznego, gdzie występują szczeliny powietrzne oraz styk materiału amorficznego odmiennych własnościach magnetycznych. Znajomość krzywych magnesowania w kierunku prostopadłym do kierunku odlewania taśmy amorficznej pozwoliła na wykonanie obliczeń w celu symulacji rozkładów pól.

5. WNIOSKI

W pracy przedstawiono krzywe magnesowania wyznaczone dwiema metodami pomiarowymi. Przebiegi krzywych są zbliżone do siebie. Różnice mogą wynikać z tego, że przy obliczaniu spadków napięć magnetycznych wzdłuż długości rdzenia nie uwzględniono pewnych zjawisk występujących w węzłach magnetowodu zamkniętego. W drugim przypadku przy pomiarze permeametrem zjawiska te mają mniejszy wpływ na wyniki pomiarów. Wykonana analiza numeryczna, która została zweryfikowana pomiarowo, umożliwiła zobrazowanie pola magnetycznego w zamkniętym obwodzie magnetycznym. Znajomość krzywych magnesowania kierunku prostopadłym do kierunku odlewania taśmy amorficznej pozwoliła na wykonanie obliczeń w celu symulacji rozkładów pól.

Praca jest współfinansowana ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego w ramach grantu nr N N510 533739.

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] CZICHOS H., SAITO T., SMITH L.(eds), *Springer handbook of materials measurement methods*, Springer Science+Business Media Inc., Würzburg 2006, 485–528.
- [3] NAŁĘCZ M., JAWORSKI J., *Miernictwo magnetyczne*, WNT, Warszawa 1968, 210–232.
- [4] OPERA Manager User Guide Version 13, Cobham Technical Services, Oxford, England, 2009.
- [5] TOMCZUK B., *Metody numeryczne w analizie pola układów transformatorowych*, Studia i Monografie, Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole, Zeszyt nr 200, 2007.
- [6] TOMCZUK B., KOTERAS D., *Magnetic Flux Distribution in the Amorphous Modular Transformers*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Elsevier B. V., Amsterdam 2011, Vol. 323, No. 12, 1611–1615.
- [7] TOMCZUK B., WAINDOK A., KOTERAS D., WAJNERT D., *Determination of some parameters for the mechatronic systems containing the innovative magnetic materials*, Mechatronic Systems and Materials '10, Opole, Poland, 5–8 VII 2010, 205–206.
- [8] TUMANSKI S., *Modern magnetic materials-the review*, Electrical Review, Sigma-Not, 2010, nr 4, 1–15.

MAGNETIC FIELD ANALYSIS INSIDE OF THE MAGNETICALLY OPEN AND CLOSED SPECIMENS

In the paper a measured B/H curves for magnetic specimen made of the amorphous metal ribbon are presented. Measurements were made in magnetically open and closed magnetic circuits. As closed magnetic circuit transformer under no load state was used. In the case of open magnetic circuit the cylindrical specimen was measured with using the permeameter. Thus, the magnetic flux density B and magnetic flux intensity have been measured directly. Moreover, the magnetic field distributions for the transformer have been calculated by using the Finite Element Method (FEM).