



A. Roman, A. Gil
Akademia im. Jana Długosza w Częstochowie

STRATY WYWOŁANE PRZEZ PRĄDY WIROWE W MIĘKKICH ANIZOTROPOWYCH MATERIAŁACH MAGNETYCZNYCH

Streszczenie

Praca przedstawia metody określania strat spowodowanych w miękkich anizotropowych materiałach magnetycznych. Do obliczeń zastosowano model wielodomenowy, w którym domeny są przedzielone 180° ścianami Blocha i który jest zbliżony do rzeczywistej struktury domenowej w rozpatrywanych materiałach. Wyliczenie strat spowodowanych przez prądy wirowe w uporządkowanych strukturach domenowych zawierających 180° ściany Blocha, wykonano dla:

- klasycznego modelu,
- modelu Pry'ego i Beana,
- analizy pojedynczego skoku Barkhausena.

Słowa kluczowe: materiały magnetyczne miękkie, ściany Blocha, straty z prądów wirowych, model wielodomenowy

Wstęp

Materiały magnetycznie miękkie znajdują w technice szerokie zastosowanie do budowy obwodów magnetycznych maszyn i urządzeń elektrycznych. Materiałami najczęściej stosowanymi są blachy elektrotechniczne anizotropowe (transformatorowe) i izotropowe (prądnicowe). Obecnie, ze względu na swoje bardzo dobre właściwości (niską stratność) coraz szersze zastosowanie znajdują metaliczne materiały amorficzne i mikrokrystaliczne. Produkowane są one w postaci bardzo cienkich (10–50 μm .) taśm otrzymywanych w wyniku szybkiego studzenia ze stanu ciekłego. Sprawność maszyn i urządzeń elektrycznych zależy od właściwości materiałów użytych do budowy ich obwodów magne-

tycznych. Szczególnie dobre właściwości magnetyczne (małą stratność i dużą indukcję) powinny wykazywać blachy anizotropowe przeznaczone do budowy transformatorów ze względu na ich powszechne stosowanie przy przesyłaniu energii oraz dużą moc [7]. Materiały anizotropowe najlepsze właściwości magnetyczne mają wzdłuż kierunku walcowania i dlatego są stosowane do budowy transformatorów. Duże perspektywy zastosowań mają materiały amorficzne [6]. Straty w transformatorze z rdzeniem z magnetyka amorficznego są około czterokrotnie mniejsze niż w transformatorze z rdzeniem wykonanym z anizotropowych blach elektrotechnicznych.

Straty wywołane przez prądy wirowe

Straty w materiałach magnetycznych całkowite albo stratność określa energia wydzielona w postaci ciepła podczas przemagnesowania materiału. Straty są podstawowym parametrem określającym przydatność materiału do konkretnych zastosowań. W praktyce materiały magnetyczne stosuje się przede wszystkim w urządzeniach elektrycznych prądu zmiennego. Przy okresowej zmianie natężenia pola magnetycznego otrzymuje się dynamiczną pętlę histerezy. Jej powierzchnia jest proporcjonalna nie tylko do strat z histerezy ale też do strat wywołanych przez prądy wirowe. Straty całkowite składają się z dwóch składników: strat z histerezy oraz strat wywołanych przez prądy wirowe [6].

Straty od prądów wirowych określone na podstawie klasycznego rozkładu prądów wirowych w blaszce dane są wyrażeniem [4]:

$$P_{wk} = \frac{1}{24} B_m^2 \omega^2 d^2 \gamma \quad (1)$$

gdzie:

- B_m – amplituda indukcji,
- ω – pulsacja,
- d – grubość blachy,
- γ – przewodność blachy.

Wyrażenie (1) określające straty od prądów wirowych otrzymano przy założeniu, że materiał magnetyczny jest jednorodny zarówno pod względem elektrycznym, jak i magnetycznym. Rozpatrywane materiały z reguły nie są jednak jednorodne pod względem magnetycznym, bowiem występuje w nich struktura domenowa, charakterystyczna dla ferromagnetyków. Teorię strat wywołanych przez prądy wirowe, w której uwzględniono fakt występowania struktury domenowej (choć bardzo wyidealizowanej) przedstawiono w pracach [1, 2, 3]. Williams, Shockley i Kittel [1] zaproponowali, aby straty te analizować na podstawie ruchu pojedynczej ściany domenowej. Najczęściej omawianym i stosowanym

wanym modelem domenowym w przypadku anizotropowej blachy elektrotechnicznej jest model Pry'ego i Beana [3].



Rys. 1. Przekrój modelu domenowego anizotropowej blachy

W modelu tym domeny przedzielone są 180° ścianami Blocha, równoległymi do kierunku walcowania i przechodzącymi przez całą grubość blachy. Straty wywołane przez prądy wirowe określone są wzorem:

$$P_w = \frac{16B_s^2 \omega^2 a d \gamma}{\pi^3} \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{1}{n^3} \left\{ 0,5ctgh \frac{n\pi a}{d} + \frac{I_1\left(\frac{n\pi a}{d}\right)}{\frac{n\pi a}{d} \sinh \frac{n\pi a}{d}} \right\} \quad (2)$$

gdzie:

$2a$ – szerokość domeny,

I_1 – zmodyfikowana funkcja Bessela pierwszego rzędu.

Chociaż model Pry'ego i Beana jest szeroko stosowany, to w wyniku zbyt-niej idealizacji rzeczywistej struktury domenowej, jaka ma miejsce w tym przypadku, straty od prądów wirowych obliczone na jego podstawie dają jedynie jakościową zgodność z eksperymentem. Wynik taki uzyskuje się nawet w przypadku rozpatrywania pojedynczej ściany 180° w prostej strukturze domenowej. Należy zwrócić uwagę na to, że chociaż rzeczywista konfiguracja domen w materiale anizotropowym jest bliska przyjętej przez Pry'ego i Beana, to jednak dokładna obserwacja wskazuje na istotne odchylenia rzeczywistej struktury od zakładanej w modelu. Poruszające się ściany Blocha nie są płaskie, są natomiast mniej lub więcej ugięte. W pracy [1], w której dokonano udoskonalenia modelu Pry'ego i Beana, efekt ten został uwzględniony (efekt ten jest silniejszy, im wyższa jest częstotliwość).

Całkowicie odmienne podejście do zagadnienia strat przedstawiono w serii prac, zainicjowanej w końcu lat 70. przez Mazzettiego [5]. W podejściu tym zaproponowano ogólną statystyczną teorię strat, którą uzasadniono faktem, iż zarówno problem fizycznej natury strat, jak i próby określenia strat za pomocą

wykorzystania konwencjonalnych modeli w danych warunkach eksperymentalnych, stanowi zagadnienie, które w praktyce jest niezmiernie trudne do rozwiązania. Wynika to z tego, że dla określenia zależności czasowo-przestrzennych gęstości prądów wirowych, którą można by wyznaczyć posługując się równaniami Maxwella, niezbędna jest dokładna znajomość zmian namagnesowania zachodzących w całej objętości próbki badanego materiału w czasie jej przemagnesowania. Jest oczywiste, że sformułowanie takiej zależności, oddającej rzeczywiste zachowanie się materiału, jest praktycznie niemożliwe. W sformułowanej teorii statystycznej strat założono, że zmiany namagnesowania w poprzecznym przekroju próbki mogą być przedstawione jako proces stochastyczny, wyrażony w postaci przypadkowej sekwencji elementarnych zmian namagnesowania odpowiadających elementarnym skokom Barkhausena. W konsekwencji wyznaczenie strat sprowadza się w tej teorii do typowo statystycznego zagadnienia, w którym funkcję zmian namagnesowania wyraża się przez czasowo-przestrzenną transformatę Fouriera, oddającą przypadkowy charakter tej zależności. W założeniu braku korelacji między poszczególnymi skokami sekwencji, teoria daje wynik zgodny z tym, który uzyskuje się w przypadku klasycznym. Założenie istnienia korelacji czasowo-przestrzennej, odzwierciedlającej rzeczywistą dynamikę struktury domenowej, prowadzi do pojawienia się, oprócz członu odpowiadającego stratom klasycznym, również dodatkowego członu, który można identyfikować ze stratami anomalnymi. Wynik ten, który otrzymano przyjmując, że elementarne zmiany (skoki) namagnesowania są wyrażone w postaci skorelowanego ciągu zdarzeń w procesie Markowa, ma rzeczywiste istotne implikacje fizyczne, bowiem daje bezpośrednie powiązanie strat z dynamiką procesów magnesowania w skali makroskopowej. Teoria ta stanowi dobry punkt wyjściowy dla bardziej ogólnych i rygorystycznych modeli. Straty wywołane przez prądy wirowe określone na podstawie analizy pojedynczego skoku Barkhausena określone są wzorem:

$$P = \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{32B_s^2 a^2 d y m^2}{n^2} \left[\frac{\cosh \rho_n x_0 \cosh \rho_n (x_0 - 2a)}{\rho_n \sinh 2\rho_n a} + \frac{\cosh \rho_n^* x_0 \cosh \rho_n^* (x_0 - 2a)}{\rho_n^* \sinh 2\rho_n^* a} \right] \cdot \left[\frac{\sin \frac{\pi m}{\omega_0} (\omega - \omega_0)}{\frac{\pi m}{\omega_0} (\omega - \omega_0)} - \frac{\sin \frac{\pi m}{\omega_0} (\omega + \omega_0)}{\frac{\pi m}{\omega_0} (\omega + \omega_0)} \right]^2 d\omega \quad (3)$$

gdzie:

$$\rho_n^* = \sqrt{\lambda_n^2 - j\omega\mu_0\mu_r\gamma},$$

$$\lambda = n\pi/d,$$

x_0 – chwilowe położenie ściany Blocha,

m – liczba pełnych wychyleń ściany domenowej.

Jeżeli weźmiemy dostatecznie duże m ($m > 30$) i podzielimy przez nie straty, to otrzymamy straty na jeden okres takie, jak przy ruchu sinusoidalnym. Przez kilka pierwszych okresów i dla $t > \tau$ pole będzie miało składową zaburzeniową, ale po większej liczbie okresów wpływ stanu nieustalonego zaniknie i straty na okres będą takie jak przy ruchu sinusoidalnym.

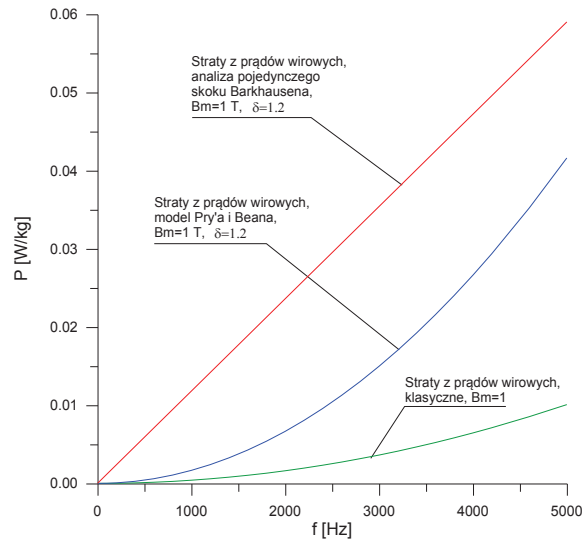
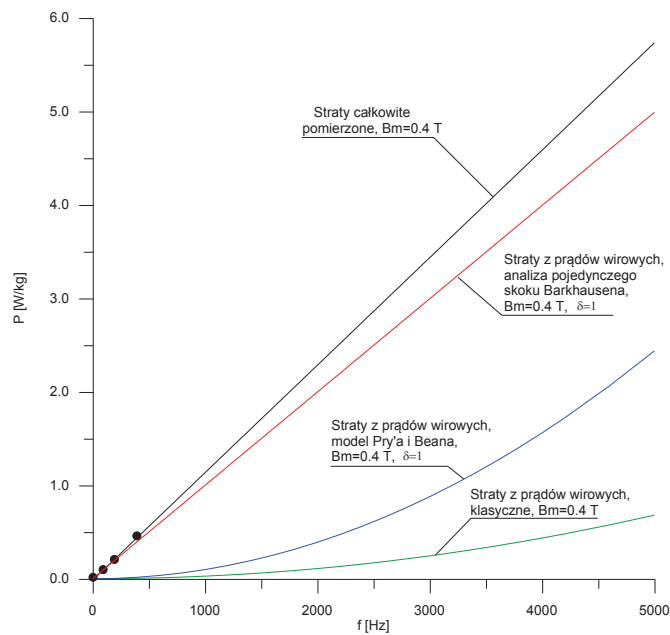
Obliczenia

Do obliczeń zostały wykorzystane następujące materiały, których dane zostały zamieszczone w tabeli 1.

Tabela 1. Zestawienie materiałów magnetycznych użytych do obliczeń

L.p.	Materiał	B_s [T]	μ_p	μ_{max}	ρ [$\mu\Omega m$]	d [mm]	gęstość [kg/m^3]
1.	Taśmy anizotropowe	2,03	1000	$48 \cdot 10^3$	48000	0,3	7650
2.	Materiał amorficzny AMM2	0,8	$140 \cdot 10^3$	$500 \cdot 10^3$	1,1	0,03	7920

Straty wywołane przez prądy wirowe określono dla anizotropowej blachy elektrotechnicznej i taśmy amorficznej typu AMM (dane tych materiałów zamieszczono w tabeli 1) wykorzystując klasyczny wzór, zależność Pry'ego i Beana oraz wzór wynikający z analizy pojedynczego skoku Barkhausena. Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunku 2 (dla anizotropowej blachy elektrotechnicznej) i rysunku 3 (dla taśmy amorficznej typu AMM).

Rys. 2. Zależność $P=f(f)$ dla anizotropowej blachy elektrotechnicznejRys. 3. Zależność $P=f(f)$ dla taśmy amorficznej typu AMM

Wnioski

W pracy określono straty wywołane przez prądy wirowe w anizotropowych miękkich materiałach magnetycznych. Straty określono przyjmując do obliczeń model Pry'ego i Beana. Obliczono straty wywołane przez prądy wirowe, stosując wzór klasyczny, zależność Pry'ego i Beana oraz zależność określoną na podstawie analizy pojedynczego skoku Barkahausena. Straty obliczono dla anizotropowej blachy elektrotechnicznej i taśmy amorficznej typu AMM. Straty histerezowe w blachach anizotropowych przy częstotliwościach technicznych, stanowią 20–25% strat całkowitych, natomiast w materiałach amorficznych wynoszą około 50% tych strat. Z tego względu straty wywołane przez prądy wirowe są dokładnie określone w anizotropowych blachach elektrotechnicznych.

Literatura

- [1] Williams H.J., Shockley W., Kittel C.: *Studies of the propagation velocity of a ferromagnetic domain boundary*. „Physical Review” 1950, vol. 80, nr 6, s. 1090–1094.
- [2] Poliwanow K.M.: *Dinamiczeskie charakteristiki fierromagnetikow*. „Izwestia Akademii Nauk” 1952, Fizika XVI, nr 4, s. 449–464.
- [3] Pry R.H., Bean C.P.: *Calculation of the energy loss in magnetic sheet materials using a domain model*, „Journal of Applied Physics” 1958, vol. 29, s. 532–533.
- [4] Dąbrowski M.: *Analiza obwodów magnetycznych, straty mocy w obwodach*, PWN, Warszawa – Poznań 1981.
- [5] Mazzetti P.: *Bloch walls correlation and magnetic loss in ferromagnets*, „IEEE Transaction on Magnetics” 1978, vol. MAG – 14, nr 5, s. 758–763.
- [6] Lachowicz H.K.: *Metaliczne taśmy w przyrządach i urządzeniach elektro-nicznych*, „Elektronika” 1984, nr 4, s. 3–8.
- [7] Szafrńska-Miller B., Szymura S., Wysocki B.: *Straty energii przy przemagnesowaniu blach transformatorowych*, „Elektronika” 1986, nr 4, s. 8–13.

Andrzej Roman, Alina Gil
Akademia im. Jana Długosza w Częstochowie

EDDY CURRENT LOSSES IN THE SOFT ANISOTROPIC MAGNETIC MATERIALS

Summary

This paper provides methods for the determination of losses caused in the soft anisotropic magnetic materials and their graphical interpretation. For calculations, a multi-domain model was adopted, where domains are separated by 180° Bloch walls (which approximates the real domain structure in materials under consideration). The calculations of losses caused by eddy currents in ordered domain structures containing 180° domain walls only, were carried out for:

- the classic model,
- the Pry and Bean model,
- the analysis of a single Barkhausen jump.

Keywords: soft magnetic materials, Bloch walls, eddy current, multi-domain model