

Zbigniew Gmyrek
Wydział Informatyki i Zarządzania
Wyższa Szkoła Informatyki w Łodzi

PORÓWNANIE INŻYNIERSKICH METOD ESTYMACJI STRAT W CIENKICH BLACHACH FERROMAGNETYCZNYCH

Streszczenie – W pracy przedstawiono i omówiono dwie, najczęściej stosowane metody wyznaczania strat mocy w cienkich blachach ferromagnetycznych. Zaprezentowano wyniki uzyskane dla dwóch przykładowych blach, wskazując obszar zastosowania każdej z metod.

1 Wprowadzenie

Ważnym praktycznym zadaniem w modelowaniu maszyny i urządzenia elektrycznych jest opracowanie metod obliczania strat mocy występujących w ferromagnetykach miękkich, poddanych przemagnesowaniu strumieniem magnetycznym o określonym przebiegu i częstotliwości. Chociaż straty te można całkiem dokładnie przewidywać, z wykorzystaniem metody elementów skończonych lub metody różnic skończonych, rozwiązując odpowiednie równania Maxwella, to uproszczone inżynierskie metody mające zastosowanie do materiałów litych, ciągle mają duże znaczenie, zaś nowe techniki predykcji strat ciągle opisywane są w literaturze. Termin „metoda inżynierska” oznacza, że metoda ta może być implementowana bezpośrednio w programach i algorytmach komputerowych lub też za pomocą procedur umieszczonych w bibliotekach najbardziej znanych obliczeniowych pakietów matematycznych.

Musimy pamiętać, że dane wejściowe, niezbędne do wykonania obliczeń dla wszystkich istniejących metod są mierzone dla sinusoidalnego przebiegu strumienia magnetycznego. Zasadniczo, metody te można podzielić na dwu- i trójskładnikowe, zgodnie ze sposobem w jaki dane eksperymentalne są wykorzystane. W metodach dwuskładnikowych zmierzone straty są podzielone na straty histerezy (statyczne) i straty wiropądowe zwane też eddy current (dynamiczne) [2]. Metoda trójskładnikowa polega na podzieleniu strat całkowitych na straty histerezy (statyczne) i dynamiczne, które to straty dynamiczne możemy podzielić na straty klasyczne wiropądowe i straty excess [5,6].

Te ostatnie składniki wymagają formuł matematycznych które wykorzystują rezystywność materiału a także jego grubość. Możliwości i ograniczenia zastosowania powyższych metod omówione są w niniejszym artykule. W celu uniknięcia nieściśłości spowodowanej występowaniem cząstkowych pętli histerezy, ten sam model statycznej histerezy [1] jest używany do oceny podczas testowania obu metod.

2 Straty wiroprowadowe

Niezależnie od zastosowanej metody pierwszym punktem, który należy rozwiązać jest obliczenie strat eddy current występujących w warunkach określonego przebiegu strumienia magnetycznego, rozpoczynając obliczenia od wyznaczenia wartości strat powodowanych występowaniem sinusoidalnego strumienia magnetycznego. Jeśli oba tryby pracy są scharakteryzowane przez tę samą indukcji maksymalną B_m , to zgodnie z [2], niezależnie od częstotliwości przemagnesowania możemy napisać

$$W_{ec}(B_m) = \left(\frac{B_1}{B_m} \right)^2 \sum_{i=1}^n \left(\frac{iB_i}{B_1} \right)^2 W_{ec}^{\sin}(B_m) \quad (1)$$

gdzie:

W_{ec} – straty eddy current dla zadanego przebiegu indukcji,

W_{ec}^{\sin} – straty eddy current dla sinusoidalnego przebiegu indukcji,

B_1 – wartość maksymalna podstawowej harmonicznej indukcji,

B_m – wartość maksymalna indukcji,

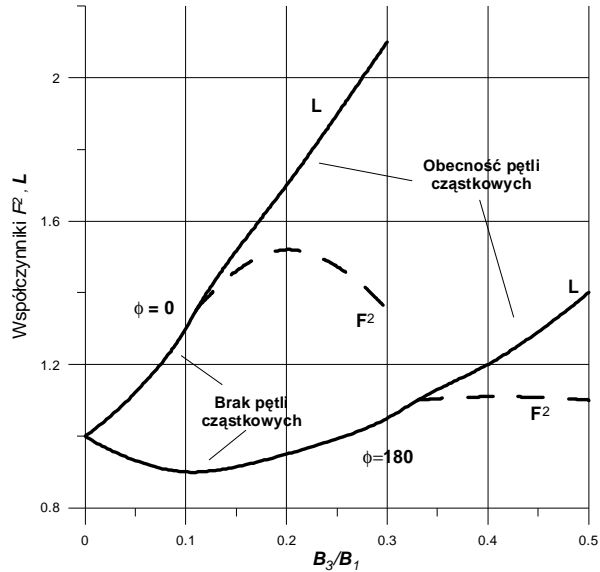
Amplitudę tych strat oznaczmy współczynnikiem L .

Innym sposobem na oszacowanie strat eddy current jest użycie współczynnika F , reprezentującego napięcie zasilające. Współczynnik ten jest stosunkiem współczynnika kształtu napięcia niesinusoidalnego do współczynnika kształtu napięcia sinusoidalnego [6]. Możemy więc napisać następującą zależność

$$W_{ec}(B_m) = F^2 W_{ec}^{\sin}(B_m) \quad (2)$$

Jak widać z porównania zależności (1) i (2), formuły te różnią się tylko co do amplitudy. W tych amplitudach wystąpią różnice wtedy, gdy krzywa przebiegu indukcji magnetycznej będzie posiadała więcej niż dwie wartości maksymalne w okresie przebiegu, co oznacza, że pojawią się cząstkowe pętle histerezy. Może się tak zdarzyć gdy przebieg indukcji zawiera trzecią harmoniczną o amplitudzie B_3 i kącie przesunięcia φ_3 w stosunku do podstawowej harmonicznej o amplitudzie B_1 [2,5]. W tym przypadku cząstkowe pętle histerezy pojawią się gdy

stosunek B_3/B_1 przekroczy pewną graniczną wartość, która jest zależna od kąta przesunięcia φ_3 . Obliczone wartości amplitud, występujących we wzorach (1) i (2) w funkcji stosunku B_3/B_1 pokazano na rys.1. Wyraźnie widoczne są miejsca określone przez stosunek B_3/B_1 , po przekroczeniu których pojawiają się pętle cząstkowe (amplitudy ze wzorów (1) i (2) zaczynają się różnić).



Rys. 1. Krzywe współczynników F oraz L oraz miejsca pojawienia się pętli cząstkowych vs. B_3/B_1 , wyznaczone dla dwóch początkowych przebiegu trzeciej harmonicznej

Należy podkreślić, że w metodzie dwuskładnikowej można wyznaczyć straty W_{ec}^{sin} , odejmując od strat całkowitych straty histerezy. Zaś w metodzie trójskładnikowej straty te możemy wyznaczyć według klasycznej zależności

$$W_{clas}^{sin} = \frac{d^2 \Pi^2 B_m^2}{6 \rho} f \quad (3)$$

gdzie

ρ - rezystywność materiału,
 f – częstotliwość przebiegu,
 d – grubość materiału.

Choć równanie (3) jest słuszne wyłącznie dla niskich częstotliwości to jest ono często stosowane dla zakresu średnich częstotliwości [5-7]. Wtedy metoda trójskładnikowa jest mniej dokładna niż metoda dwuskładnikowa.

3 Straty excess

Właściwym narzędziem do oszacowania strat excess jest model cienkiej blachy [8], który wykorzystuje model trójskładnikowy. Możemy wtedy napisać

$$W = \oint H(B)dB + \oint \frac{d^2}{12\rho} \frac{dB}{dt} dB + \oint \delta \left| g(B) \frac{dB}{dt} \right|^{1/\alpha} dB \quad (4)$$

gdzie pierwsza całka reprezentuje straty histerezy, druga straty eddy current zaś trzecia straty excess. Współczynnik δ przyjmuje wartość ± 1 i nazywany jest parametrem kierunkowym. Funkcja $g(B)$ zależna jest od kształtu dynamicznej pętli histerezy zaś współczynnik α określa zależność strat excess od częstotliwości. W innych pracach badawczych wykazano, że $W_{exc} \approx f^{1.5}$ dla przypadku gdy funkcja $g(B)=const.$ Można więc równanie (4) napisać w nieco innej postaci

$$W = W_h + \frac{d^2}{12\rho} \int_0^T \left(\frac{dB}{dt} \right)^2 dt + c \int_0^T \left| \frac{dB}{dt} \right|^{1.5} dt \quad (5)$$

W warunkach sinusoidalnie zmiennego strumienia magnetycznego powyższa zależność przyjmuje następującą formę

$$W = W_h(B_{max}) + \frac{d^2 \Pi^2 B_{max}^2}{6\rho} f + c B_{max}^{1.5} f^{0.5} \quad (6)$$

Parametr c w powyższym równaniu musi być wyznaczony dla każdej wartości maksymalnej indukcji B_{max} .

4 Porównanie metody dwu- i trójskładnikowej

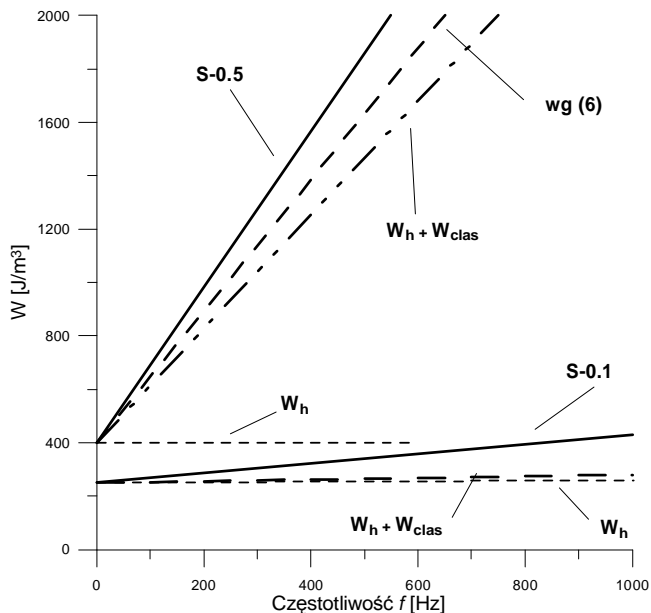
Metoda trójskładnikowa została zaproponowana do estymacji strat z uwzględnieniem zależności od częstotliwości składnika reprezentującego straty eddy current oraz straty excess. W artykułach które możemy znaleźć w dostępnej literaturze np. [5], sugeruje się, że w pewnych przypadkach metoda trójskładnikowa, opisana zależnością (6), będzie bardziej dokładna niż metoda dwuskładnikowa opisana równaniem

$$W = W_h + k \frac{d^2 \Pi^2 B_m^2}{6 \rho} f \quad (7)$$

lub

$$W = W_h + k \frac{d^2}{12 \rho} \int_0^T \left(\frac{dB}{dt} \right)^2 dt \quad (8)$$

Wprowadzenie współczynnika k w równaniach (7) i (8) podyktowane jest koniecznością kompensacji ubytku strat excess, które w sposób jawny w tych równaniach nie występują. Różnice występująca pomiędzy dwoma analizowanymi metodami możemy pokazać na przykładzie dwóch materiałów ferromagnetycznych, izotropowych, posiadających różny udział strat dynamicznych [1]. Pierwszy badany materiał – nazwijmy go S-0.1, o danych: grubość 0.1 mm, zawiera 5.5% Si, rezystywność $\rho=0.735\mu\Omega\text{m}$. Drugi materiał, nazwijmy go S-0.5: grubość 0.5 mm, zawiera 1.8% Si, rezystywność $\rho=0.432\mu\Omega\text{m}$. Zmierzone i wyznaczone krzywe, reprezentujące składniki strat w obu materiałach, przedstawiono na rys.2.



Rys. 2. Zależność strat od częstotliwości. Linie ciągłe reprezentują wyniki pomiarów. Linie przerywane reprezentują wyniki poszczególnych metod

Na przykład, dla indukcji $B_m = 1.5$ T i częstotliwości 400 Hz widoczne jest (materiał S-0.5), że wynik obliczeń metodą trójskładnikową (wg. (6)) jest dokładniejszy od obliczeń wykonanych metodą dwuskładnikową. Innym przykładem obliczeniowym może być porównanie, wykonane dla przypadku, gdy w przebiegu indukcji oprócz podstawowej harmonicznej, występuje również trzecia harmoniczna o amplitudzie równej 30% amplitudy podstawowej harmonicznej. W tym przypadku również metoda trójskładnikowa wykazała lepszą dokładność. Pewną ciekawostką jest fakt, że metoda trójskładnikowa, zastosowana w odniesieniu do materiału S-0.1 (czyli o mniejszej grubości) dała porównywalne wyniki w stosunku do metody dwuskładnikowej. Powodem takiego wyniku może być uproszczenie bardzo złożonej zależności strat eddy current do prostszej postaci a także wykorzystanie zależności (3), słusznej dla małych częstotliwości, w stosunku do częstotliwości średnich [7,9]. Należy podkreślić, że w praktyce powszechnie stosuje się zależność (3), dopuszczając błąd wynikający z powyższego komentarza. W przypadku analizy strat podczas zasilania odkształconym strumieniem magnetycznym, zawierającym trzecią harmoniczną, drugi i trzeci składnik równania (6) powinien zostać odpowiednio pomorzony przez współczynnik F^2 oraz F . Otrzymamy więc nową postać równania

$$W = W_h + W_{clas}^{\sin} F^2 + W_{exc}^{\sin} F \quad (9)$$

5 Podsumowanie

W artykule przedstawiono dwie powszechnie stosowane metody wyznaczania strat mocy w cienkich blachach. Omówiono różnice w podejściu do reprezentacji poszczególnych składników strat i wskazano przypadki w których wyniki metod różnią się między sobą. Dalsze badania nad obszarami zastosowania powyższych metod będą kontynuowane.

Literatura

- [1] Zirka S.E., Moroz Y.I., Marketos P., Moses A.J., *Viscosity-based magnetodynamic model of soft magnetic materials*, IEEE Trans. Magn. vol. 42, no 9, (2006) str. 2121-2132.
- [2] Lavers J.D., Biringer P.P., Hollitscher H., *A simple method of estimating the minor loop hysteresis loss in thin laminations*, IEEE Trans. Magn. vol. 14, no 5, (1978) str. 386-388.

- [3] Boglietti A., Cavagnino A., Lazzari M., Pastorelli M., *Predicting iron losses in soft magnetic materials with arbitrary voltage supply: an engineering approach*, IEEE Trans. Magn., vol. 39, no 2, (2003) str.981-989.
- [4] Yanase S., Kimata H., Okazaki, Y. Hashi S., *A simple predicting method for magnetic losses of electrical steel sheets under arbitrary induction waveform*, IEEE Trans. Magn. vol.41, no 11, (2005) str.4365-4367.
- [5] Fiorillo F., Novikov A., *An improved approach to power losses in magnetic laminations under nonsinusoidal induction waveform*, IEEE Trans. Magn. vol. 26, no 5, (1990) str. 2904-2910.
- [6] Amar M., Kaszmarek R., *A general formula for prediction of iron losses under nonsinusoidal voltage waveform*, IEEE Trans. Magn. vol. 31, no 5, (1995) str. 2504-2509.
- [7] Barbisio E., Fiorillo F., Ragusa C., *Predicting loss in magnetic steels under arbitrary induction waveform and with minor hysteresis loops*, IEEE Trans. Magn. vol. 40, no 4, (2004) str. 1810-1819.
- [8] Zirka S.E., Moroz Y.I., Marketos P., Moses A.J., Jiles D.C., *Measurement and Modeling of B - H Loops and Losses of High Silicon Nonoriented Steels*, IEEE Trans. Magn. vol. 42, no 10, (2006) str. 3177-3179.
- [9] Bertotti G., *Hysteresis in Magnetism*, Academic Press, San Diego, 1998.
- [10] Zirka S.E., Moroz Y.I., Marketos P., Moses A.J., *A viscous-type dynamic hysteresis model as a tool for loss separation in conducting ferromagnetic laminations*, IEEE Trans. Magn. vol. 41, no 3, (2005) str. 1109-1111.

COMPARISON OF ENGINEERING METHODS OF LOSS PREDICTION IN THIN FERROMAGNETIC LAMINATIONS

Summary – The paper presents and discusses two commonly used methods for determining losses in the thin ferromagnetic sheets. Moreover, it shows the results for the two sample sheet, indicating the area of application of each method.