

Dariusz Koterak, Bronisław Tomczuk
Politechnika Opolska, Opole

POMIARY DYNAMICZNYCH PĘTLI HISTEREZY KONSTRUKCYJNEJ STALI PROTOTYPOWEJ

MEASUREMENT TESTS OF THE DYNAMIC HYSTERESIS LOOP FOR PROTOTYPING CASTING STEEL

Streszczenie: W niniejszej pracy przedstawiono sposób pomiaru dynamicznych pętli histerezy dla stali o nowatorskim składzie przeznaczonej na nabiegunniki maszyn elektrycznych, a szczególnie generatorów wiatrowych. Pomiaru wykonano dla dwóch częstotliwości zasilania, a mianowicie $f_1=10$ Hz oraz $f_2=50$ Hz. Porównano wartości strat mocy w rdzeniu otrzymane z całkowania pola powierzchni pętli histerezy oraz metodą bezpośredniego pomiaru poboru mocy ze źródła zasilającego uzwojenie próbki stalowej.

Abstract: The measurement tests of the dynamic hysteresis loops for the innovative composition casting steel. In measurements designed for poles of the electrical machines, especially wind generators, were presented in this paper. The measurements were performed for two frequencies of power supplying $f_1=10$ Hz and $f_2=50$ Hz. The power core losses obtained by integration of the dynamic hysteresis loop surfaces have been compared with those obtained by direct measurements of the source power supplying the steel probe winding.

Słowa kluczowe: materiały magnetyczne, histereza, dynamiczne pętli histerezy, pomiary, innowacyjna stal konstrukcyjna.

Keywords: magnetic materials, hysteresis, dynamic hysteresis loops, measurements, innovative casting steel.

1. Wprowadzenie

Obecnie w technice stosuje się wiele urządzeń, w których występują materiały ferromagnetycznie miękkie. Ich właściwości zależą (w znacznym stopniu) od składu stopu, który ma wpływ na wewnętrzną strukturę atomową, oraz od zewnętrznego pola wzbudzającego. W wyniku nieodwracalnych procesów zachodzących w strukturze ferromagnetyka podczas magnesowania pierwotnego, kolejne zmiany wartości namagnesowania związane są z tzw. pętlą histerezy [1].

Występowanie histerezy magnetycznej wiąże się ze stratnością materiału ferromagnetycznego. Stratność materiałów ferromagnetycznych definiuje się, jako sumę takich składowych strat jak: straty histerezowe P_h , wiroprowadowe P_w oraz anomalne P_a . Wartości tych strat dotyczą jednostkowej objętości P_V lub jednostki masy P_M . Równoczesne występowanie tych strat powoduje trudności w skutecznym określeniu poszczególnych składników. Dotyczy to szczególnie strat anomalnych, które zdefiniowane są, jako różnica pomiędzy stratami obliczonymi za pomocą równań elektrodynamiki (wiroprowadowych, histerezowych), a stratami zmierzonymi [2].

W wyniku, występowania strat obniża się sprawność działania układu elektromagnetycznego. Obecnie dąży się do podwyższania sprawności a więc minimalizowania zjawisk niepożądanych w materiałach czynnych urządzeń elektrycznych. Dlatego też prace w dziedzinie inżynierii materiałowej mają na celu poszukiwanie nowych materiałów o coraz lepszych właściwościach [3], [4]. Wielkość pola powierzchni ograniczonego pętlą histerezy odpowiada gęstości objętościowej strat w obwodzie magnetycznym danego urządzenia. Dlatego też w materiałach ferromagnetycznych miękkich dąży się do takiego składu stopu aby pętla histerezy była możliwie wąska [5], [6]. Precyzyjne określenie tej pętli wymaga utrzymania reżimu pomiarów, które nie należą do łatwych. Stal przeznaczona na nabiegunniki maszyn elektrycznych, a szczególnie generatorów wiatrowych powinna się charakteryzować stosunkowo dużą indukcją nasycenia, a ponadto niezbyt dużymi stratami z magnesowania obrotowego [7].

Pomiar statycznej pętli histerezy wymaga tak małej szybkości zmian pola, aby wyeliminować wpływ dodatkowego zmiennego pola na wyniki pomiarów [1], [8]. W przypadku określenia pętli histerezy przy zasilaniu sinusoidalnym otrzymuje się tzw. dynamiczną pętlę

histerezy. W przypadku odpowiednio niskiej częstotliwości taka pętla jest zbliżona do statycznej pętli histerezy [8]. W pozostałych przypadkach dynamiczna pętla histerezy jest szersza. Spowodowane jest to dodatkowymi stratami związanymi z prądami wirowymi [5]. Do wyznaczenia dynamicznej pętli histerezy stosuje się dwie metody: ferrometryczną oraz oscylograficzną. Polegają one na pomiarach odpowiadających sobie wartości chwilowych prądu magnesującego oraz napięcia indukowanego w cewce obejmującej próbkę. Specyfika wyznaczania natężenia pola oraz indukcji powoduje, że metody te są dokładniejsze dla próbek pierścieniowych niż w przypadku próbek ramowych [1].

2. Opis badanej próbki oraz układu pomiarowego

W niniejszej pracy badano toroidalną, zamkniętą magnetycznie, próbkę wykonaną z prototypowej stali konstrukcyjnej o niskiej zawartości węgla. Podstawowe wymiary tej próbki wynosiły odpowiednio: średnica zewnętrzna $D_z=100$ mm, średnica wewnętrzna $D_w=80$ mm oraz grubość (wysokość) próbki $h=10$ mm. Masa badanej próbki wynosiła $m=0,207$ kg. Nawinięte uzwojenia miały różne liczby zwojów: dla uzwojenia zasilanego ($N_1=318$) o rezystancji $R_1=0,882 \Omega$, oraz pomiarowego ($N_2=109$) o rezystancji $R_2=13,2 \Omega$. Układ pomiarowy składał się z wielofunkcyjnego generatora sygnału sinusoidalnego NDN typu DF 1410 DDS, wzmacniaczy sygnałowych serii PLX 3200 firmy ADS oraz oscyloskopu TDS firmy Tektronix. Rozdzielczość oscyloskopu wynosi 0,4 % (8 bitów). Układ umożliwia pomiary dla stosunkowo dużych indukcji do $B_m=1,5$ T, w zakresie częstotliwości od 10 Hz do 20 kHz. Widok oraz schemat układu pomiarowego przedstawiono na rysunkach 2.1a i 2.1b.

Wartości maksymalne natężenia pola H_m oraz indukcji magnetycznej B_m wyznaczono z dobrze znanych poniższych zależności

$$H_m = \frac{N_1 \cdot I_{1m}}{l_{sr}} \quad (2.1)$$

$$B_m = \frac{U_{2sr}}{4 \cdot f \cdot N_2 \cdot S_{Fe}} \quad (2.2)$$

Następnie wyznaczono straty na podstawie obliczenia pola powierzchni dynamicznej pętli

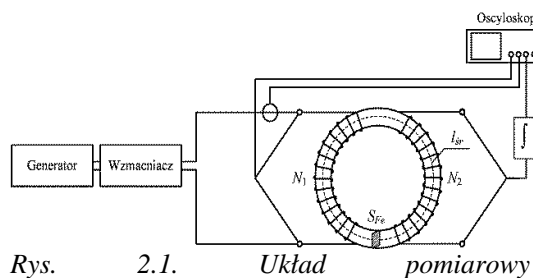
histerezy z wykorzystaniem poniższej zależności

$$P_{Feh} = V_{Fe} \cdot \frac{1}{T} \cdot \oint B dH \quad (2.3)$$

a)



b)



Rys. 2.1. Układ pomiarowy
a) Zdjęcie b) Schemat

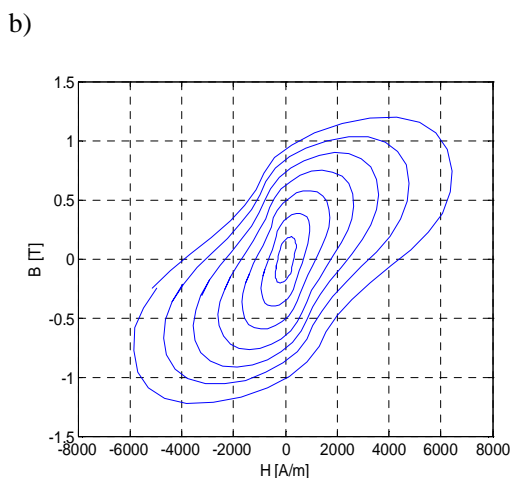
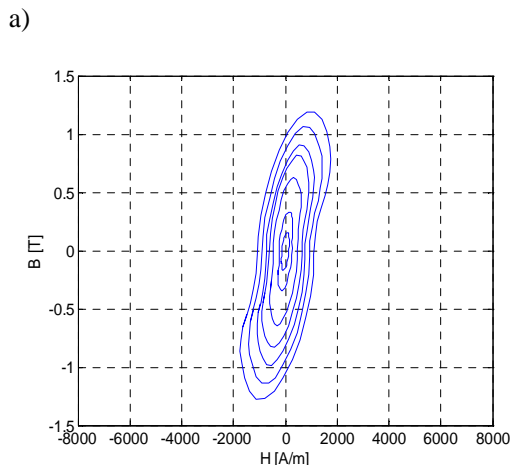
Pole to wyznaczono poprzez całkowanie dwóch krzywych $B(H)$ pętli histerezy. W celu porównania otrzymanych wartości strat z dynamicznej pętli histerezy wykonano także obliczenia strat mocy w rdzeniu na podstawie pobieranej mocy czynnej ze źródła przez badaną próbkę.

$$P_{Fe} = \frac{1}{T} \int_0^T u_1(t) \cdot i_1(t) dt - P_{R1} \quad (2.4)$$

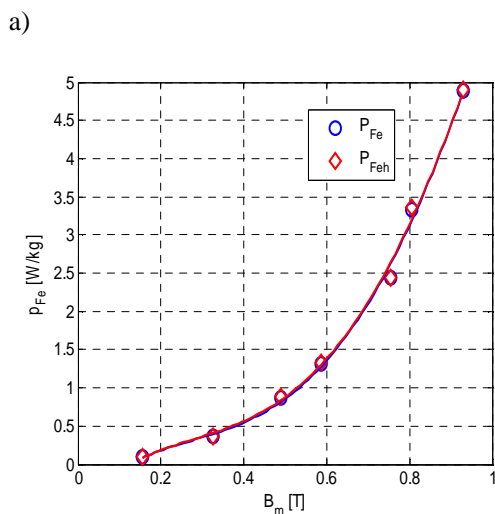
W powyższym wzorze oznaczenie P_{R1} dotyczy strat w uzwojeniu zasilającym.

3. Wyniki pomiarów

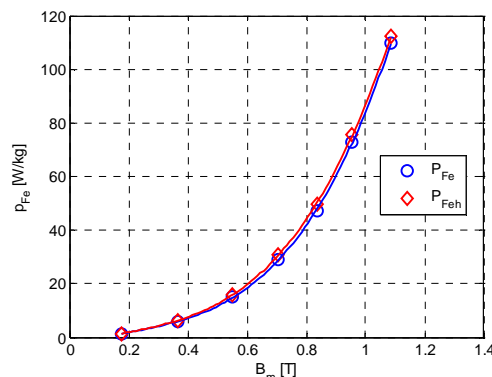
W niniejszej pracy wykonano pomiary dynamicznych pętli histerezy metodą oscylograficzną. Ze względu na dedykowane zastosowanie badanego materiału, wykonano pomiary dla dwóch częstotliwości $f_1=10$ Hz oraz $f_2=50$ Hz. Przeprowadzono je w zakresie wartości indukcji B_m od 0,15 T do 1 T.



Rys.3.1. Zmierzone dynamiczne pętle histerezy a) dla $f_1=10$ Hz b) dla $f_2=50$ Hz



b)



Rys.3.2. Porównanie zmierzonych strat w badanej próbce a) dla $f_1=10$ Hz b) dla $f_2=50$ Hz

Otrzymane wyniki pomiarów przedstawiono odpowiednio dla f_1 w tabeli 3.1, oraz dla f_2 w tabeli 3.2. Ze względu na litą budowę próbki, pomimo niewielkich częstotliwości zasilania, indukują się w niej znaczne prądy wirowe, co skutkuje wzrostem strat badanej próbki. Na podstawie przedstawionych pomiarów można stwierdzić, że wraz z 5-cio krotnym wzrostem częstotliwości straty wzrosły ok. 14 razy. Tak więc, dodatkowo, indukujące się prądy wirowe powodują zmniejszenie wartości indukcji w rdzeniu.

Tabela 3.1. Wyniki pomiarów dla $f_1=10$ Hz

B_m [T]	H_m [A/m]	P_{Fe} [W]	P_{Feh} [W]
0,155	171,0	0,019	0,020
0,325	292,4	0,075	0,077
0,586	629,8	0,273	0,279
0,756	944,7	0,510	0,512
0,805	1124,7	0,697	0,703
0,930	1462,1	1,024	1,025
1,038	1799,5	1,398	1,397

Tabela 3.2. Wyniki pomiarów dla $f_2=50$ Hz

B_m [T]	H_m [A/m]	P_{Fe} [W]	P_{Feh} [W]
0,175	427,4	0,271	0,290
0,367	967,2	1,216	1,303
0,550	1754,5	3,133	3,338
0,706	2654,3	6,072	6,455
0,837	3644,0	9,871	10,389
0,953	4858,7	15,23	15,808
1,087	6478,2	22,992	23,537

W tabelach 3.1 i 3.2 podano wartości strat obliczonych z pomiaru mocy (P_{Fe}) oraz z pomiaru pola powierzchni pętli histerezy (P_{Feh}).

Wraz ze wzrostem strat, znacząco zwiększają się pola powierzchni ograniczone odpowiednimi pętlami histerezy. Otrzymane wartości strat w rdzeniu obliczane z pola powierzchni pętli histerezy P_{Feh} oraz obliczone na podstawie pobieranej mocy ze źródła zasilania P_{Fe} mają zbliżone wartości. Względne różnice pomiędzy odpowiadającymi sobie wartościami strat nie przekraczają 7 % dla obu analizowanych częstotliwości. Dodatkowo na rysunkach 3.2a oraz 3.2b przedstawiono wykresy $p_{Feh}=f(B_m)$ oraz $p_{Fe}=f(B_m)$. Przedstawione krzywe mają bardzo podobny przebieg. Tak więc zmierzone dynamiczne pętle histerezy obejmują straty powstałe w próbce toroidalnej zarówno straty z histerezy jak i z prądów wirowych.

5. Podsumowanie i wnioski

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki pomiarów dynamicznych pętli histerezy dla toroidalnej próbki z prototypowej stali stopowej o niskiej zawartości węgla. Obliczono straty wynikające z pola powierzchni pętli histerezy oraz z poboru mocy z źródła zasilania. Względne różnice pomiędzy odpowiadającymi sobie wartościami strat nie przekraczały 7 %. Badany materiał prototypowy charakteryzował się stosunkowo dużą indukcją nasycenia, jednakże indukowały się w nim znaczne prądy wirowe. Jednakże, materiał ten może być stosowany na obwoły magnetyczne maszyn o małej częstotliwości przemagnesowania obrotowego (Rys. 3.2). W zakresie pracy urządzeń o częstotliwości technicznej indukcja $B_m \leq 0,8$ T nie wywołuje również zbyt wielkich strat w prototypowym „żelazie”, a więc może być ono stosowane tam, gdzie oblauchowanie obwołu magnetycznego jest zbyt trudne technicznie.

6. Literatura

- [1] M. Nałęcz i J. Jaworski, Miernictwo magnetyczne, Warszawa: WNT, 1968.
- [2] K. Zakrzewski, „Method of calculation of unit power losses in magnetic laminations taking into account sinusoidal and PWM supply voltage,” w *ICEM'04, 5-8 IX 2004, no. 802 (na płycie CD)*., Cracow, Poland, 2004.
- [3] B. Tomczuk i D. Koterak, „Transformatory z rdzeniami amorficznymi doświadczenia technologiczne i obliczeniowe,” w *IV Forum Transformatorowe*, Łódź, str. 15-47, 2009.
- [4] D. Koterak, Transformatory z rdzeniami o małej stratności - analiza polowa i jej weryfikacja pomiarowa, Opole: Oficyna wydawnicza Politechniki Opolskiej, 2015.
- [5] J. Turowski, Elektrodynamika techniczna, Warszawa: WNT, 1993.
- [6] B. Tomczuk, D. Koterak, A. Waindok i D. Wajnert, „ Polowa analiza siłowników elektromagnetycznych i transformatorów,” *Tomczuk B., Koterak D., Waindok A., Zimon J.: Polowa analiza siłowników Pomiar Automatyka Kontrola*, pp. 264-268., III 2011.
- [7] J. W. Anuszczyk i W. A. Pluta, Ferromagnetyki miękkie w polach obrotowych. Badania i właściwości, Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2009.
- [8] R. Gozdur, *Opracowanie i analiza metrologiczna systemu pomiarowego do wyznaczania quasi-statycznych pętli histerezy magnetycznej*, praca doktorska, Politechnika Łódzka, 2004.

Autorzy

Dariusz Koterak, Bronisław Tomczuk, Politechnika Opolska, Katedra Elektrotechniki Przemysłowej, ul. Prószkowska 76, 45-758 Opole, d.koterak@po.opole.pl, b.tomczuk@po.opole.pl