

Józef KWICZALA¹, Aleksandra KOLANO-BURIAN²

¹ POLTECHNIKA ŚLĄSKA, INSTYTUT METROLOGII, ELEKTRONIKI I AUTOMATYKI

² INSTYTUT METALI NIEŻELAZNYCH W GLIWICACH

Pomiary parametrów materiałów magnetycznych przy alternatywnych wariantach wymuszenia sygnału magnesującego

Dr inż. Józef KWICZALA

Absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Śląskiej. Pracuje w Instytucie Metrologii, Elektroniki i Automatyki. Zajmuje się problematyką komputerowych systemów pomiarowych. Jest współtwórcą mikroprocesorowych stanowisk do wyznaczania błędów wzorcowych przekładników prądowych. Opracował system pomiarowy do wyznaczania dynamicznych parametrów materiałów magnetycznie miękkich. Jest rzeczoznawcą i weryfikatorem SEP oraz członkiem Komisji Metrologii PAN - Oddziału w Katowicach.



e-mail: jozef.kwiczala@polsl.pl

Dr inż. Aleksandra KOLANO-BURIAN

Studia magisterskie na Wydziale Matematyki, Fizyki i Chemii Uniwersytetu Śląskiego. Ukończone studia podyplomowe na Akademii Ekonomicznej w zakresie „Zarządzania Firmą”. Staż w Instytucie Fizyki Ciała Stałego i Optyki Węgierskiej Akademii Nauk w Budapeszcie. Praca doktorska w dziedzinie nanokrystalicznych stopów magnetycznie miękkich do pracy przy wysokich częstotliwościach. Pracuje w Zakładzie Inżynierii Materiałowej i Metalurgii Proszków Instytutu Metali Nieżelaznych w Gliwicach.



e-mail: olak@imn.gliwice.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki pomiarów parametrów próbek materiałów magnetycznych przy zastosowaniu różnych wariantów wymuszenia sygnału magnesującego. Sinusoidalne wymuszenie napięciowe sygnału powoduje sinusoidalne wymuszenie indukcji magnetycznej, co powoduje odkształcenie natężenia pola, natomiast sinusoidalne wymuszenie prądowe sygnału magnesowania powoduje sinusoidalne wymuszenie natężenia pola, co skutkuje odkształceniem indukcji (strumienia magnetycznego). Porównano parametry podstawowych parametrów opisujących właściwości materiałów magnetycznych badanych próbek otrzymane dla dwóch wariantów wymuszeń pola.

Słowa kluczowe: materiał magnetyczny, sygnał magnesujący, pomiary magnetyczne.

Measurements of magnetic material parameters at alternative variants of magnetizing signal excitation

Abstract

The parameters of magnetic materials are determined by both the autonomic measuring stands, i.e. the volt-ammeter method and the impedances bridges or the computer measuring systems. The sources of signal in measuring system to investigation of magnetic material parameters are alternating current power supplies. However, in automated measuring systems, the final unit of track feeding is power amplifier. It permits to extorting both the proper value of voltage and to supply the tested sample appropriate large current. The Polish Standard allows two variants of sinusoidal signal extortion to investigation of magnetic materials. First of them is sinusoidal extortion of magnetic flux density B while the second variant admits to sinusoidal signal extortion of field intensity H into the tested sample. Extortion from theoretically ideal voltage source signal corresponds to the first option, while in the second variant is necessary ideal current source. In practice, to comply with requirement of the Standard, it is necessary to assure the condition of a much smaller or a much larger internal source impedance in relation to impedance of magnetizing winding of the test sample, respectively to condition of voltage or current extortion. Disposing of either the power supply with well-known internal impedance or the amplifier with well-known output impedance this condition be comply with properly selection of magnetizing winding number of turns. The investigation of magnetic materials of different samples in which was executed either the force of sinusoidal magnetic flux density, which effects the deformation of intensity of the field strength or sinusoidal force of the field strength which causes the deformation of magnetic flux is presented. The essential parameters of the magnetic materials of the test samples to obtain by means of two variants input signal force were compared. The investigations showed distinctness of measurements results of parameters of the same samples by applying the different variants of signal extortions admitted by the Standard.

Keywords: magnetic material, magnetizing signal, magnetic measurements.

1. Wstęp

Do pomiarów właściwości oraz wyznaczania parametrów materiałów magnetycznych przy prądzie przemiennym stosuje się zarówno autonomiczne stanowiska pomiarowe, np. metoda woltomierz-ampieromierz, jak i mostki impedancji czy komputerowe systemy pomiarowe. Źródłami sygnału zasilania próbek w układach pomiarowych do badania właściwości materiałów magnetycznych w większości przypadków są indywidualne zasilacze napięciowe lub prądowe, natomiast w zautomatyzowanych systemach pomiarowych w końcowym stopniu toru zasilającego stosowany jest wzmacniacz mocy. Pozwala on wymusić zarówno właściwą wartość napięcia jak również zasilić badaną próbkę odpowiednio dużym prądem.

Polska Norma [1] dopuszcza dwa warianty wymuszania sygnałów sinusoidalnych do badania materiałów magnetycznych.

Pierwszym z nich jest sinusoidalne wymuszenie indukcji magnetycznej B (gęstości strumienia magnetycznego) natomiast drugi wariant dopuszcza możliwość wymuszenia sinusoidalnego kształtu natężenia pola H w próbce. Pierwszej opcji odpowiada wymuszenie sygnału z teoretycznie idealnego źródła napięciowego, natomiast w drugim wariantcie konieczne jest idealne źródło prądowe. W praktyce, aby spełnić wymagania Normy, należy zapewnić warunek dużo mniejszej lub dużo większej impedancji wewnętrznej źródła, w stosunku do impedancji uzwojenia magnesującego badanej próbki, odpowiednio dla warunku wymuszenia napięciowego lub prądowego.

Dysponując zasilaczami o znanych wartościach impedancji wewnętrznej lub wzmacniaczem o znanej impedancji wyjściowej warunek ten jest spełniony poprzez odpowiedni dobór liczby zwojów uzwojenia magnesującego.

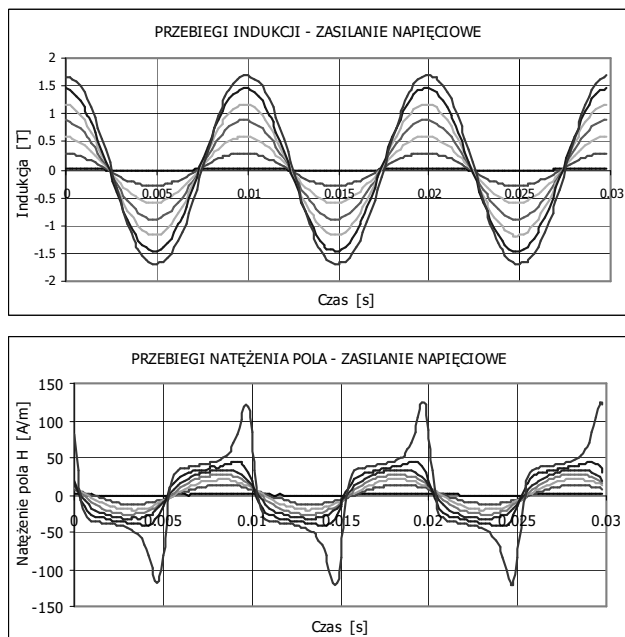
W pracy wykonano badania materiałów magnetycznych próbek stosując zarówno sinusoidalne wymuszenie indukcji magnetycznej, co powoduje odkształcenie natężenia pola w próbce jak również sinusoidalne wymuszenie natężenia pola, co z kolei skutkuje odkształceniem strumienia magnetycznego [2]. Porównano parametry opisujące właściwości materiałów magnetycznych badanych próbek otrzymane dla opisanych wyżej dwóch wariantów wymuszeń sygnału magnesującego.

Przeprowadzone badania wykazały odmiennosc wyników pomiarów parametrów tych samych próbek przy stosowaniu różnych wariantów wymuszeń dopuszczonych przez Normę [1].

2. Warianty wymuszenia sygnału magnesującego

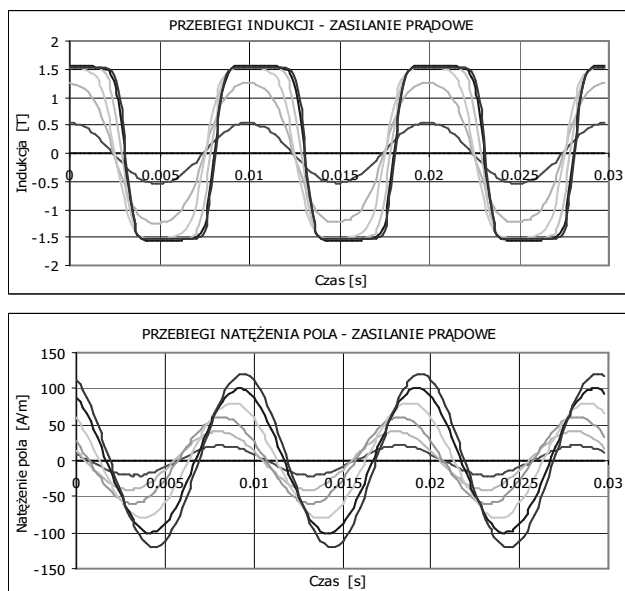
Sinusoidalny sygnał magnesujący do zasilania obiektu badań został wygenerowany w systemie pomiarowym, którego końcowym stopniem jest wzmacniacz mocy. Właściwości wzmacniacza pozwalają na jego pracę w charakterze źródła napięciowego

o impedancji wyjściowej rzędu $\mu\Omega$ bądź źródła prądowego o impedancji wyjściowej rzędu $k\Omega$. Pomiaru wykonano zostały na pierścieniowej próbce (zamknięty obwód magnetyczny), wykonanej z materiału magnetycznie miękkiego (089-27-N5) [3, 4, 5], na której nawinięto dwa uzwojenia: pierwotne (magnesujące - N_1) oraz wtórne (pomiarowe - N_2).



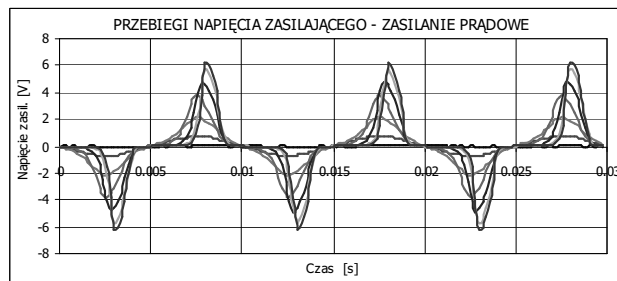
Rys. 1. Przebiegi indukcji oraz natężenia pola przy zasilaniu napięciowym próbki
Fig. 1. The forms of flux density and field strength at voltage signal forcing

Na rysunku 1 przedstawiono przebiegi czasowe indukcji oraz natężenia pola przy wymuszeniu napięciowym, natomiast na rysunku 2, przebiegi tych samych wielkości, lecz przy wymuszeniu prądowym sygnału magnesującego.



Rys. 2. Przebiegi indukcji oraz natężenia pola przy zasilaniu prądowym próbki
Fig. 2. The forms of flux density and field strength at current signal forcing

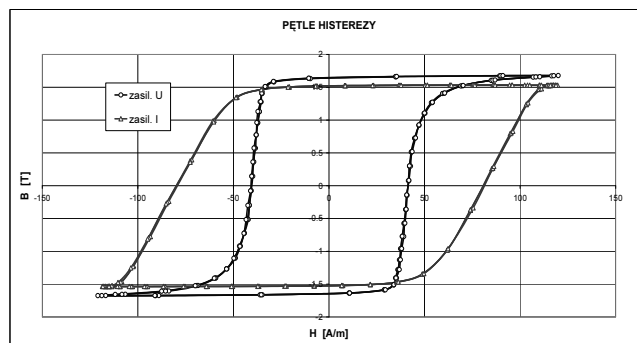
Z powodu nieliniowości charakterystyki magnesowania, przy wymuszeniu napięciowym pojawiają się odkształcenia przebiegu natężenia pola, natomiast przy wymuszeniu prądowym – odkształcenia indukcji magnetycznej. Niestety drugi wariant zasilania powoduje również znaczne zniekształcenia napięcia na zaciskach uzwojeń próbki (rys. 3).



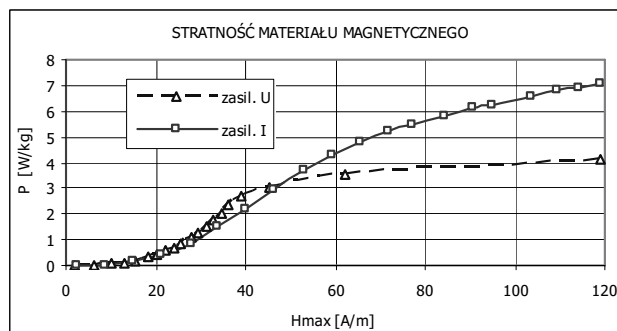
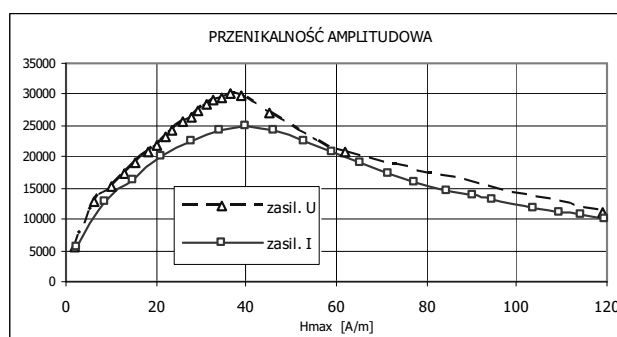
Rys. 3. Wykresy czasowe napięcia na uzwojeniach przy prądowym zasilaniu próbki
Fig. 3. Voltage on the winding terminals at current signal forcing

3. Wyniki badań

Pętla histerezy pozwala na orientacyjne określenie wartości podstawowych parametrów materiałów magnetycznych. Wstępną weryfikację rozbieżności wyników pomiarów przeprowadzono zatem w oparciu o pętle histerezy, otrzymane dla dwóch opcji zasilania uzwojeń badanej próbki.



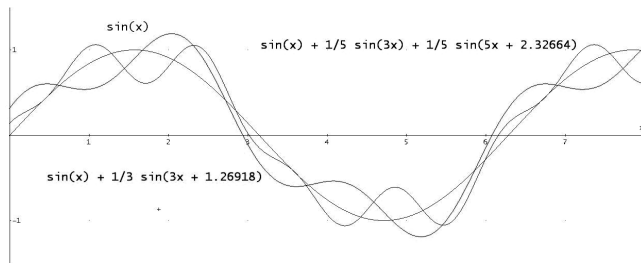
Rys. 4. Porównanie kształtów pętli histerezy przy różnych wariantach zasilania
Fig. 4. Comparison of hysteresis loops measured at different power supplies



Rys. 5. Przenikalność amplitudowa oraz stratność materiału badanej próbki dla różnych wariantów zasilania
Fig. 5. Permeability and watt-loss of tested sample magnetic materials in different force of power supply

Z porównania przebiegów (rys. 4) jednoznacznie wynika znaczna rozbieżność wartości tych samych parametrów materiału magnetycznego otrzymanych dla różnych rodzajów wymuszeń sygnału magnesującego, np. różnice w wartościach indukcji B_{max} i B_r , koercji H_c oraz strat mocy P_c . Szczegółowo potwierdzają to charakterystyki przedstawione na rys. 5. Aby móc zatem porównywać wyniki pomiarów, raport z badań powinien jednoznacznie określać rodzaj zasilania, tzn. czy podczas pomiaru wymuszony był sinusoidalny kształt przebiegu napięcia zasilania (sinusoidalna indukcja) czy sinusoidalny kształt prądu magnesującego (sinusoidalne natężenie pola).

Norma [1] określa, że sinusoidalny kształt przebiegu powinno się sprawdzać mierząc wartość skuteczną oraz wartość średnią wyprostowaną napięcia na zaciskach uzwojenia wtórnego, wyznaczając z ilorazu tych wielkości współczynnik kształtu. Wartość tego współczynnika powinna wynosić 1,111 z tolerancją $\pm 1\%$. Zapewnienie współczynnika kształtu zalecane przez Normę nie gwarantuje, niestety, poprawności kształtu sygnału magnesującego. Istnieje bowiem nieskończenie wiele sygnałów o współczynniku kształtu dokładnie równym 1.111, nie będących sinusoidą. Na rysunku 6 zilustrowano np. dwa takie sygnały. Stąd zaleca się weryfikację poprawności kształtu przebiegu np. za pomocą oscyloskopu wyposażonego w FFT i dokładne sprawdzenie zawartości harmoniczných [6].



Rys. 6. Przebiegi niesinusoidalne o współczynniku kształtu równym 1.111
Fig. 6. Nonsinusoidal signal with shape factor equal 1.111

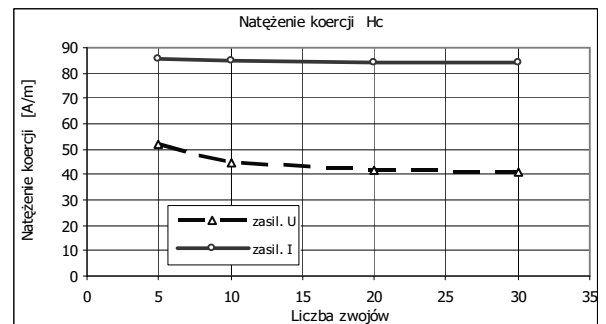
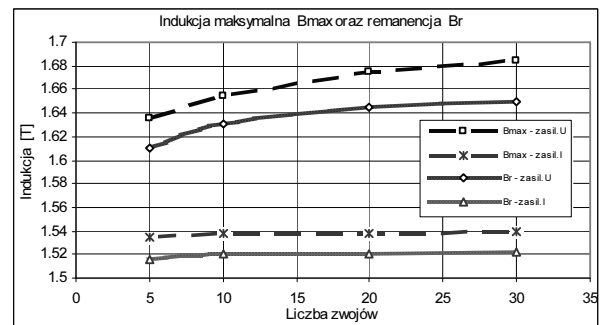
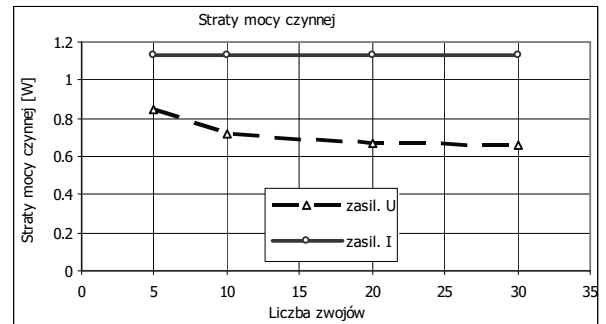
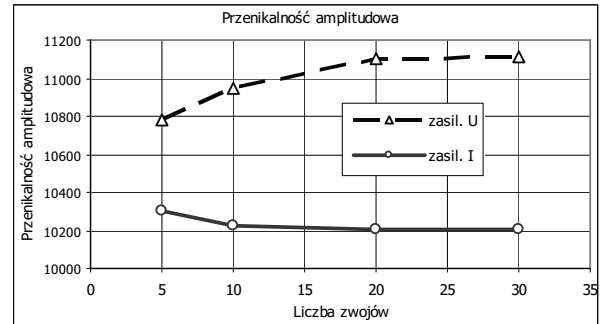
Konsekwencją odkształcenia sygnału magnesującego jest niepoprawne wyznaczenie wartości parametrów badanego obiektu. Współczesne systemy pomiarowe bazują na cyfrowym sterowaniu sinusoidalnym kształtem przebiegu indukcji. Dopuszczalna odchyłka współczynnika kształtu pochodnej indukcji od sinusoidy w obszarze znormalizowanym nie przekracza 0,1% [7].

Możliwe jest również wykonywanie pomiarów bez wymuszenia kształtu przebiegu indukcji. W celu uzyskania właściwego kształtu przebiegu indukcji w rdzeniu (napięcia na zaciskach uzwojeń) lub natężenia pola (prądu magnetyzacji) koniecznym staje się optymalizacja liczby zwojów uzwojenia magnesującego, aby dopasować jego impedancję do impedancji wyjściowej źródła zasilania [1, 8].

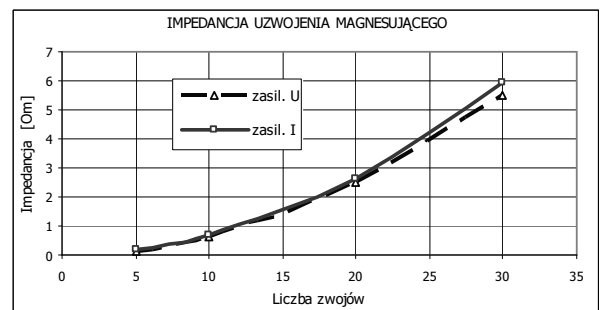
Zbadano wpływ liczby zwojów uzwojenia magnesującego na wartości podstawowych parametrów materiału magnetycznego, tj. przenikalności amplitudowej, strat mocy czynnej, indukcji maksymalnej, remanencji oraz koercji. Wpływ ten zbadano zarówno dla zasilania napięciowego jak i prądowego uzwojeń badanej próbki. Charakterystyki tych parametrów w funkcji liczby zwojów przedstawiono na rysunku 7.

Z wykresów przedstawionych na rys. 7 wynika, że w przypadku badanej próbki liczba zwojów uzwojenia magnesującego powinna być nie mniejsza niż 20. Większa liczba zwojów nie wpływa już istotnie na zmiany wartości wyznaczanych parametrów.

Dla wyznaczonej liczby zwojów minimalna impedancja uzwojenia magnesującego (rys. 8) powinna wynosić co najmniej 2,5 Ω . Ponieważ rezystancja precyzyjnego opornika służącego do pomiaru prądu wejściowego, połączona szeregowo z uzwojeniem magnesującym, była równa 0,1 Ω , to krotność impedancji obciążenia w stosunku do impedancji widzianej z zacisków wyjściowych źródła zasilania powinna być nie mniejsza niż 25. W analizie nie uwzględniono impedancji wyjściowej wzmacniacza, która dla trybu wymuszenia napięciowego wynosi (40 $\mu\Omega$ + 50 μH).



Rys. 7. Wpływ liczby zwojów uzwojenia magnesującego na wartości niektórych parametrów materiału magnetycznego
Fig. 7. Variation of essential parameters of magnetic materials with different number of turns of the tested sample



Rys. 8. Zależność impedancji od liczby zwojów uzwojenia magnesującego
Fig. 8. The impedance vs. number of turns of the excitation winding

Analitycznie impedancję uzwojenia magnesującego Z można wyznaczyć z zależności:

$$Z = \frac{\omega N_1^2 S \mu_0 \mu_r}{l_{sr}} \quad [\Omega] \quad (1)$$

gdzie: ω – pulsacja sygnału wymuszającego, w [rad/s]; N_1 – liczba zwojów uzwojenia magnesującego; S – przekrój poprzeczny próbki, w [m²]; μ_0 – stała magnetyczna ($4 \pi \cdot 10^{-7}$); μ_r – względna przenikalność magnetyczna próbki; l_{sr} – średnia długość drogi magnetycznej, w [m].

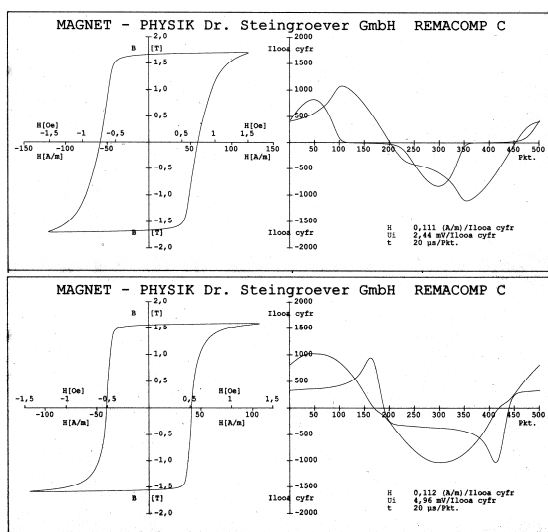
Jeżeli przyjąć, że krotność impedancji obciążenia w stosunku do impedancji widzianej z zacisków wyjściowych źródła zasilania powinna być nie mniejsza niż 25 oraz pomijając nieistotną wartość impedancji wyjściowej wzmacniacza, minimalną liczbę zwojów uzwojenia magnesującego można obliczyć korzystając z zależności (1):

$$N_1 \approx 1,8 * 10^3 \sqrt{\frac{R l_{sr}}{f \mu_r S}} \quad (2)$$

gdzie: R – rezystancja opornika szeregowego do pomiaru prądu magnesującego; μ_r – minimalna wartość względnej przenikalności magnetycznej próbki w zakresie amplitudy sygnału wymuszającego.

Dla próbki użytej w badaniach oraz rezystancji opornika szeregowego $R = 0,1 \Omega$, obliczona minimalna liczba zwojów uzwojenia magnesującego powinna wynosić $N_1 = 25$. Analitycznie obliczona liczba zwojów jest równa liczbie otrzymanej w wyniku pomiarów doświadczalnych.

Warunek dopasowania impedancji zweryfikowano również za pomocą systemu pomiarowego REMACOMP firmy MAGNET – PHYSIK [9]. Wartość rezystancji bocznika wynosi w tym systemie $R = 1000 \text{ m}\Omega$. Badaniom poddano próbkę o różnych liczbach zwojów. Jak wynika z charakterystyk przedstawionych na rys. 9, dla maksymalnej liczby zwojów $N_1 = 60$ mogących zmieścić się w oknie próbki, krzywa sygnału magnesowania „Ui” jest już znacznie mniej odkształcona niż dla $N_1 = 20$, lecz nadal obserwuje się jej odkształcenie. Konieczna liczba zwojów uzwojenia magnesującego, wyznaczona z zależności (2), wynosi dla tej próbki i dla tego systemu pomiarowego $N_1 \approx 80$.



Rys. 9. Pętle histerezy oraz sygnały zasilające ferrometru REMACOMP firmy MAGNET – PHYSIK dla liczby zwojów uzwojenia magnesującego:

a) – 20, oraz b) – 60

Fig. 9. Hysteresis loop and power supply signals curves of system REMACOMP (MAGNET – PHYSIK) for number of turns of excitation winding equal 20 (a) and 60 (b), respectively

Warunek dopasowania impedancji zweryfikowano również za pomocą systemu pomiarowego REMACOMP firmy MAGNET – PHYSIK [9]. Wartość rezystancji bocznika wynosi w tym syste-

mie $R = 1000 \text{ m}\Omega$. Badaniom poddano próbkę o różnych liczbach zwojów. Jak wynika z charakterystyk przedstawionych na rys. 9, dla maksymalnej liczby zwojów $N_1 = 60$ mogących zmieścić się w oknie próbki, krzywa sygnału magnesowania „Ui” jest już znacznie mniej odkształcona niż dla $N_1 = 20$, lecz nadal obserwuje się jej odkształcenie. Konieczna liczba zwojów uzwojenia magnesującego, wyznaczona z zależności (2), wynosi dla tej próbki i dla tego systemu pomiarowego $N_1 \approx 80$.

4. Wnioski

Z przeprowadzonych badań próbek materiału magnetycznego, zarówno dla sinusoidalnego wymuszenia indukcji jak i sinusoidalnego wymuszenia natężenia pola, wynikają następujące wnioski:

- wartości parametrów materiałów magnetycznych, wyznaczone w opcji wymuszenia napięciowego, w odniesieniu do wartości tych parametrów uzyskanych w pomiarach z wymuszeniem prądowym, różnią się od kilku do kilkunastu procent dla takich wielkości jak indukcja maksymalna B_{max} , remanencja B_r , przenikalność amplitudowa μ_a , do wartości kilkudziesięciu procent dla stratności całkowitej P_c czy ponad sto procent dla koercji H_c ,
- przy zasilaniu prądowym uzyskuje się praktycznie niezależność wyników pomiarów parametrów materiałów magnetycznych od liczby zwojów uzwojenia magnesującego. Liczbę zwojów determinuje jednak dopuszczalny zakres napięcia wyjściowego źródła sygnału, względnie maksymalny zakres napięć wejściowych przetworników A/C, w przypadku pomiaru właściwości magnetycznych z użyciem metod cyfrowych,
- przy zasilaniu napięciowym impedancja uzwojenia magnesującego powinna być co najmniej 25-krotnie większa od impedancji wyjściowej źródła sygnału, z uwzględnieniem szeregowego opornika do pomiaru wartości prądu magnesującego; minimalną liczbę zwojów uzwojenia magnesującego należy obliczyć z wyznaczonej zależności (2),
- sprawdzanie warunku sinusoidalnego kształtu sygnału źródła wymuszającego, poprzez wyznaczenie jego współczynnika kształtu (pomiar wartości skutecznej i wartości średniej wyprostowanej) jest niewystarczające. Autorzy zalecają wykorzystanie w tym celu na przykład oscyloskopów wyposażonych w FFT i dokładne sprawdzenie zawartości harmonicznych.

5. Literatura

- [1] Polska Norma PN-EN 60404-6: Materiały magnetyczne; Część 6: Metody pomiaru własności magnetycznych materiałów magnetycznie miękkich metalicznych i proszkowych przy częstotliwościach w zakresie od 20 Hz do 200 kHz z użyciem próbek pierścieniowych.
- [2] Kuryłowicz J.: Badanie materiałów magnetycznych, WNT, Warszawa, 1962.
- [3] Bertotti G., Fiorillo F.: Magnetic Properties of Metals - Magnetic Alloys for Technical Applications, Springer-Verlag, Vol. 191i, 1994.
- [4] Sołiński M.: Materiały magnetyczne w technice, COSiW SEP, Warszawa 2001.
- [5] Moses, A.J., Tutkun, N.: Investigation of power loss in wound toroidal cores under PWM excitation, IEEE Transactions on Magnetics, Volume 33, Issue 5, September 1997.
- [6] Application Notes – Power Measurement Application Software, Tektronix Oscilloscopes – TPS2000 Series Oscilloscopes.
- [7] R&J Measurement: Komputerowy system pomiarowy do badania dynamicznych właściwości magnetycznych materiałów magnetycznie miękkich w polach przemiennych MAG-RJJ-6.0, www.rjmeasurement.com.pl/pages/oferta_1.html
- [8] Kwiczala J.: System pomiarowy do wyznaczania parametrów materiałów magnetycznych, Pomiary, Automatyka, Kontrola Nr 6, 2004.
- [9] Steingroever E., Ross G.: Magnetic Measuring Techniques, Magnet-Physik, Köln 1997.