

Anna PIASKOWY, Artur SKÓRKOWSKI
Politechnika Śląska
Katedra Metrologii, Elektroniki i Automatyki

INTERPRETACJA I POMIAR PARAMETRÓW MATERIAŁÓW FERROMAGNETYCZNYCH STOSOWANYCH W TRANSFORMATORACH POMIAROWYCH

W artykule wyszczególniono parametry magnetyczne, które mają największe znaczenie w procesie projektowania transformatorów pomiarowych. Przedstawiono metodę i wyniki pomiaru podstawowych parametrów magnetycznych rdzeni wykonanych tą samą metodą i z tego samego materiału ferromagnetycznego.

Słowa kluczowe: transformator pomiarowy, przenikalność magnetyczna, rezystancja strat, reaktancja magnesowania

INTERPRETATION AND MEASUREMENT OF FERROMAGNETIC MATERIAL PARAMETERS USED IN MEASURING TRANSFORMERS

In this paper the magnetic parameters that are important in the design process of measuring transformers are specified. The measurement method and the results of the basic magnetic parameters are presented. Measurement carried out on the same cores from the same ferromagnetic material.

Keywords: measuring transformer, magnetic permeability, core loss resistance, magnetizing reactance

1. WSTĘP

Materiały ferromagnetyczne, które charakteryzują się dużą przenikalnością magnetyczną znajdują szerokie zastosowanie w transformatorach pomiarowych. Stanowią one zasadniczy element ich konstrukcji, ponieważ tworzy się z nich rdzenie toroidalne o zamkniętej drodze strumienia magnetycznego, na które nawijane są uzwojenia. Najczęściej są to dwa uzwojenia: pierwotne - magnesujące i wtórne - pomiarowe. Każdy materiał ferromagnetyczny charakteryzuje się odmiennymi właściwościami, które opisuje się przez pętle histerezy magnetycznej $B = f(H)$ (główne oraz cząstkowe), bądź charakterystyki konkretnych parametrów (względnych przenikalności magnetycznych – statycznych lub dynamicznych, stratności, itp.) w funkcji natężenia pola lub indukcji magnetycznej. Tylko w zakresie niskich częstotliwości i w szczególnych warunkach magnesowania wektory \vec{H} i \vec{B} są równoległe i można wtedy stosować rachunek wektorowy i wyznaczać parametry takie jak zespolona przenikalność magnetyczna, rezystancja strat oraz reaktancja magnesowania. Parametry te uwzględnia się w modelu zastępczym transformatora, który umożliwia przeprowadzenie wstępnych kalkulacji i oszacowań niezbędnych w procesie projektowania i dobierania parametrów konstrukcyjnych transformatora. Rezystancja strat i reaktancja magnesowania tworzą gałąź poprzeczną schematu zastępczego transformatora i dla transformatorów pomiarowych znacznie przewyższają wartości parametrów gałęzi podłużnych reprezentujących straty mocy w uzwojeniach.

2. PARAMETRY MATERIAŁU FERROMAGNETYCZNEGO

Dla projektanta obwodu elektromagnetycznego transformatora pomiarowego szczególnie ważne są tzw. poprzeczne parametry magnetyczne, czyli rezystancja strat R_s i reaktancja magnesowania X_{μ} ,

które charakteryzują konkretny egzemplarz rdzenia, a nie próbkę materiału magnetycznego z którego rdzeń został wykonany. Materiały magnetycznie miękkie są bardzo wrażliwe na proces obróbki i formowania kształtu, dlatego bardzo trudno jest zachować stałość ich parametrów magnetycznych w procesie wytwarzania rdzeni. Dwa nominalnie jednakowe rdzenie wykonane tą samą metodą i z tego samego materiału mogą mieć parametry magnetyczne różniące się nawet o kilkadziesiąt procent (rys. 2, 3). Parametry te mają duży wpływ na właściwości transformatora pomiarowego, oraz docelowo wpływają na wartość błędu przekładni [1], dlatego ich pomiar i właściwa interpretacja są niezwykle istotne.

Znajomość wartości rezystancji strat i reaktancji magnesowania pozwala na uproszczoną analizę obwodu elektromagnetycznego transformatora i stworzenie jego schematu zastępczego oraz szybkie oszacowanie parametrów konstrukcyjnych, obszaru zmian punktu pracy transformatora oraz oszacowanie błędu przekładni napięciowej, który jest przedmiotem szczególnego zainteresowania w projektowaniu transformatorów pomiarowych. Transformator napięciowy zgodnie z Normą [2] może pracować przy obciążeniu zmieniającym się w zakresie od 25% do 100% obciążenia znamionowego i przy napięciu strony pierwotnej zmieniającym się w zakresie od 80% do 120% napięcia znamionowego, dla błędu przekładni napięciowej, który powinien mieścić się w zadanych przez projektanta granicach dopuszczalnego odchylenia. Dlatego badanie wpływu sprzężenia magnetycznego na dokładność przekładni napięciowej ma tak duże znaczenie.

Aby wyznaczyć parametry poprzeczne zgodnie z definicją musi być zachowany sinusoidalny kształt sygnału magnesującego [3, 4] wtedy można zdefiniować wielkości R_s i X_μ , które mogą być wyznaczone w sposób analityczny, tzn.:

$$R_s = \frac{U_m^2}{P_s} = \frac{(4,44fSzB_m)^2}{Vp_s}, \quad (1)$$

$$X_\mu = 2\pi f \frac{z^2 S \mu_r \mu_0}{l_m}, \quad (2)$$

gdzie: P_s [W] – całkowita moc strat, U_m [V] – napięcie magnesujące, B_m [T] – indukcja maksymalna, f [Hz] - częstotliwość, S [m²] – pole przekroju poprzecznego rdzenia, z – liczba zwojów uzwojenia magnesującego, V [m³] – objętość rdzenia, p_s [W/m³] - stratność magnetyczna, μ_r - względna przenikalność magnetyczna próbki μ_0 [H/m] – stała magnetyczna ($4\pi \cdot 10^{-7}$), l_m [m] – średnia długość drogi magnetycznej.

Rezystancja R_s reprezentuje w sposób ilościowy wydzielanie się ciepła w rdzeniu i jest proporcjonalna do kwadratu strumienia magnetycznego w rdzeniu oraz liczby zwojów uzwojenia magnesującego. Określenie strat energii w materiale magnetycznym należy do głównych zadań w procesie projektowania i dobierania parametrów konstrukcyjnych rdzeni i uzwojeń. Znajomość rezystancji strat pozwala wyznaczyć stratność p_s , przypadającą na jednostkę masy, bądź objętości.

Współczesne materiały ferromagnetyczne (amorficzne, nanokrystaliczne) charakteryzują się niską stratnością w porównaniu do materiałów żelazowo-krzemowych, więc wyznaczana stratność może być nawet o kilka rzędów niższa.

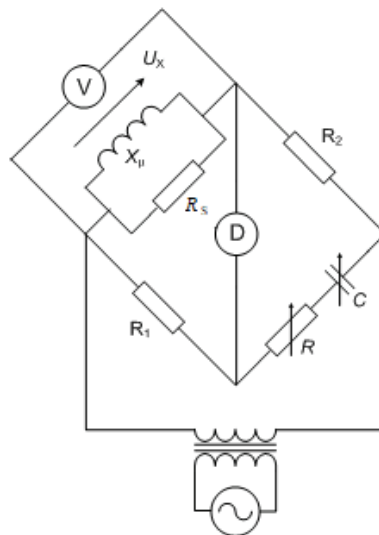
Reaktancja magnesowania X_μ jest parametrem charakteryzującym właściwości magnetyczne materiału konkretnego egzemplarza rdzenia i jest proporcjonalna do względnej przenikalności magnetycznej, która może różnić się od przenikalności magnetycznej badanej próbki materiału przed uformowaniem rdzenia.

3. POMIAR PARAMETRÓW MAGNETYCZNYCH

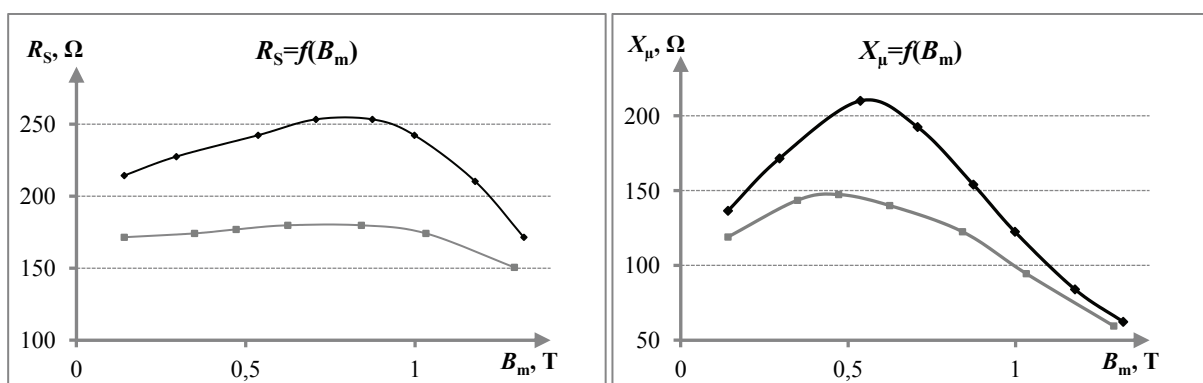
Parametry magnetyczne materiałów mierzone są wg zaleceń Normy [3], która precyzuje wielkości magnetyczne i warunki, w jakich powinny być mierzone. Bardzo ważny jest sinusoidalny kształt

sygnału magnesującego, ponieważ w innym przypadku wyznaczone wartości parametrów są niepoprawne. Aby spełnić wymagania wspomnianej Normy stosuje się dedykowane systemy pomiarowe, które bazują na cyfrowym sterowaniu sinusoidalnym kształtem przebiegu indukcji, bądź optymalizuje się liczbę zwojów uzwojenia magnesującego tak, aby dopasować jego impedancję do impedancji wyjściowej źródła zasilania [3].

Pomiar sumy parametrów poprzecznych i podłużnych strony pierwotnej transformatora przeprowadzono w mostkowym układzie pomiarowym, wykorzystano do tego celu mostek Haya ze względu na duże wartości mierzonej indukcyjności magnesowania. Układ pomiarowy przedstawiono na rysunku 1. Badania przeprowadzono przy sinusoidalnym wymuszeniu indukcji magnetycznej B , w związku z czym prąd płynący w gałęzi obiektu pomiarowego (magnetowód z nawiniętym uzwojeniem) był odkształcony, podobnie jak natężenie pola H . Aby spełnić wymagania Normy i móc stosować rachunek zespolony w analizie obwodu równoważenie mostka odbywało się z wykorzystaniem detektora selektywnego, który pozwalał na zrównoważenie układu tylko dla harmonicznej podstawowej.



Rys. 1. Układ do pomiaru parametrów gałęzi poprzecznej modelu zastępczego transformatora dla niskich częstotliwości

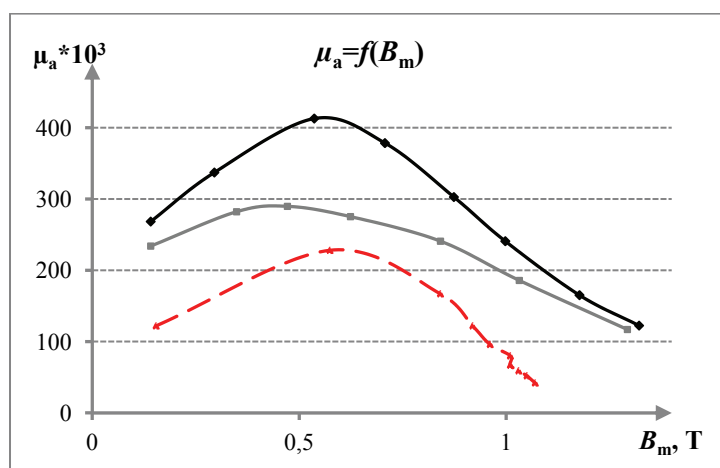


Rys. 2. Porównanie parametrów magnetycznych dwóch nominalnie jednakowych rdzeni.

Badania przeprowadzono dla różnych rdzeni toroidalnych wykonanych z tej samej próbki materiału nanokrystalicznego Finemet (Fe-Nb-Cu-Si-B). Rdzenie wykorzystane w badaniach posiadały te same wymiary geometryczne (60/40/10mm) i tą samą liczbę zwojów uzwojenia

magnesującego (45 zwojów). Elementy składowe układu mostkowego zostały dobrane tak, aby zapewnić dużą rozdzielczość pomiarów.

Na podstawie równania (1) wyznaczono analitycznie amplitudową przenikalność magnetyczną materiału badanych rdzeni. Wyniki porównano ze zmierzoną przenikalnością magnetyczną próbki materiału, z którego oba rdzenie zostały wykonane. Amplitudowa przenikalność magnetyczna próbki została wyznaczona przy wykorzystaniu systemu pomiarowego Remacomp C-1200.



Rys. 3. Porównanie wartości przenikalności magnetycznej rdzeni wyznaczonej analitycznie z równania (1) i próbki materiału magnetycznego rdzeni (linia przerywana)

4. WNIOSKI

Ze względu na rozbieżność parametrów magnetycznych rdzeni wykonanych w tym samym czasie i z tego samego materiału wynika konieczność traktowania w sposób indywidualny każdego rdzenia. Zaleca się ponowne badania właściwości magnetycznych zanim dobierze się parametry uzwojeń ze względu na to, że parametry magnetyczne rdzenia mogą znacznie odbiegać od przyjętych w obliczeniach wstępnych i błąd przekładni napięciowej może wykraczać poza dopuszczalne granice. Postuluje się zatem, aby w procesie projektowania transformatorów pomiarowych posługiwać się charakterystykami zmian impedancji materiału zastosowanego w danym egzemplarzu rdzenia, gdyż takie podejście zapewni zminimalizowanie błędu przekładni napięciowej.

LITERATURA

1. Piaskowy A., Skórkowski A.: Relation between ratio error and leakage impedance, Materiały Konferencji Problems and progress in metrology PPM'16, s. 56-59, 2016.
2. Norma EN 60044-2:1999, Przekładniki – Arkusze 2: Przekładniki napięciowe indukcyjne (IEC 60044-2:1997, zmodyfikowana).
3. 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.
4. Kwiczala J., Kolano-Burian A.: Pomiar parametrów materiałów magnetycznych przy alternatywnych wariantach wymuszenia sygnału magnesującego, PAK 12/2009.