

Anna PIASKOWY, Artur SKÓRKOWSKIPOLITECHNIKA ŚLĄSKA, INSTYTUT METROLOGII, ELEKTRONIKI I AUTOMATYKI
ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice**Układ mostkowy do badania właściwości magnetycznych rdzeni stosowanych w transformatorach pomiarowych**

Dr inż. Anna PIASKOWY

Ukończyła studia na Wydziale Elektrycznym Politechniki Śląskiej w 2006 roku. W 2012 roku obroniła z wyróżnieniem pracę doktorską uzyskując stopień doktora nauk technicznych z dyscypliny elektrotechnika. Obecnie pracuje jako adiunkt w Instytucie Metrologii, Elektroniki i Automatyki Politechniki Śląskiej. Jej zainteresowania naukowe dotyczą precyzyjnych pomiarów wielkości fizycznych, systemów pomiarowych oraz sieci Smart Grid.

e-mail: anna.piaskowy@polsl.pl

Dr inż. Artur SKÓRKOWSKI

Studia ukończył na Wydziale Elektrycznym Politechniki Częstochowskiej w 1995 roku. W 2004 roku obronił pracę doktorską uzyskując stopień doktora nauk technicznych w dyscyplinie elektrotechnika. Obecnie pracuje na stanowisku adiunkta w Instytucie Metrologii, Elektroniki i Automatyki na Wydziale Elektrycznym Politechniki Śląskiej. Główne kierunki działalności naukowo-badawczej to: obróbka danych pomiarowych, systemy pomiarowe, interfejsy bezprzewodowe, przyrządy wirtualne (oprogramowanie w środowisku LabVIEW).

e-mail: artur.skorkowski@polsl.pl**Streszczenie**

Artykuł przedstawia metodę i układ do badania właściwości magnetycznych materiałów charakteryzujących się dużą podatnością magnetyczną. Przedstawiono charakterystyki wiążące parametry magnetyczne z wymiarami geometrycznymi badanych rdzeni, które wykorzystuje się w procesie projektowania precyzyjnych transformatorów pomiarowych.

Słowa kluczowe: ferromagnetyki, przenikalność magnetyczna, transformator pomiarowy.

Bridge circuit for magnetic properties testing of cores used in measuring transformers**Abstract**

Measurement method and circuit for research of magnetic properties of materials of large magnetic susceptibility is presented. Charts binding magnetic parameters with the geometric dimensions of investigated cores, which are used in the design process of precise measuring transformer can be formed basing on the measuring results. On stage of determining possible error limits of measuring transformer, necessary is the knowledge of parameters of equivalent circuit, which can be obtained based on the material magnetic properties. Measurement of the transverse branch parameters of transformer equivalent circuit was realized in Hay bridge circuit. Summarized diagrams of the transverse branch parameters of equivalent transformer circuit obtained from research of toroidal core made of "Finemet" material are presented.

Keywords: soft ferromagnetic material, permeability, measuring transformer.

1. Wstęp

W obwodzie magnetycznym transformatora występuje sprzężenie magnetyczne przynajmniej dwóch uzwojeń. Sprzężenie magnetyczne w transformatorach mocy umożliwia transfer energii elektrycznej pomiędzy obwodami elektrycznymi uzwojeń przy określonej częstotliwości napięcia zasilającego. Przedmiotem zainteresowania projektanta jest przede wszystkim sprawność. W transformatorach pomiarowych przedmiotem szczególnego zainteresowania jest wpływ sprzężenia magnetycznego na dokładność przekładni. Rdzenie w transformatorach pomiarowych mają najczęściej kształt toroidalny i wykonuje się je z materiału ferromagnetycznego o dużej przenikalności magnetycznej, dużej indukcji magnetycznej oraz możliwie małych stratach [1]. Do wykonania rdzeni transformatorów pomiarowych najczęściej stosuje się stopy żelaza z niklem i kobaltem, ferryty magnetycznie miękkie, stopy amorficzne (na bazie Fe, Ni lub Co) oraz stopy nanokrystaliczne, które z uwagi na swoje właściwości oraz ciągle obniżające się ceny wypierają stopy permalajowe [2].

Specyfika transformatorów pomiarowych przeznaczonych do stosowania w precyzyjnych układach pomiarowych uwzględnia m.in.:

- szeroki zakres zmian indukcji magnetycznej rdzenia, $0...B_m$ (tj. szerszy niż dla przekładników napięciowych, określony w normie [3]),
- zależność parametrów rdzenia (μ , R_{Fe} , X_m , B_m) od częstotliwości,
- małą powtarzalność parametrów nominalnie jednakowych rdzeni (parametry μ , R_{Fe} , X_m , B_m mogą się znacznie różnić dla jednakowych rdzeni, nawet do 100%).

Aby wykonać precyzyjny transformator pomiarowy o określonych małych błędach przekładni napięciowej, ze względu na znaczne różnice parametrów materiałowych rdzeni należy przeprowadzić proces jego projektowania w dwu etapach.

Etap I

Wybiera się typ materiału na rdzeń według parametrów określonych przez producenta. Zwykle są to tylko graniczne wartości indukcji nasycenia, przenikalności magnetycznej, stratności i częstotliwości pracy. Wartości te, nie są wystarczające do dokładnego zaprojektowania transformatora pomiarowego. (Koniczna jest znajomość wzajemnych zależności: indukcji magnetycznej, stratności, przenikalności magnetycznej i częstotliwości.) Trzeba poznać całe charakterystyki zależności wzajemnych indukcji magnetycznej, stratności, przenikalności magnetycznej i częstotliwości. Trzeba dysponować rdzeniem z wybranego materiału, o dowolnych wymiarach i wykonać pomiary potrzebnych charakterystyk materiałowych, np. w układzie przedstawionym w p.2. Następnie projektuje się transformator, zakładając że rdzeń transformatora docelowego będzie wykonany z materiału o parametrach wynikających z otrzymanych charakterystyk. Oblicza się wymiary rdzenia i sprawdza się obliczeniowo warunki, czy wartości błędów nie będą przekroczone. Wartości parametrów wynikające z charakterystyk pozwalają na obliczenie przewidywanych wartości błędów w każdym punkcie pracy rdzenia.

Efektom prac tego etapu jest zamówienie/zakup rdzenia docelowego, z badanego materiału, o obliczonych wymiarach.

Etap II

Rdzeń docelowy powinien mieć parametry materiałowe zbliżone do tych poznanych w I etapie pracy. Jednakże wiadomo, że parametry materiałów magnetycznych wykazują bardzo duży rozrzut, nawet dla rdzeni wykonanych przez tego samego producenta i w tym samym procesie technologicznym. Niezbędne jest zatem zmierzenie parametrów materiałowych charakterystyk rdzenia docelowego i ponowne sprawdzenie projektu dla otrzymanych charakterystyk wartości parametrów. W tym etapie projekt może być jeszcze skorygowany a następnie sprawdza się warunki nieprzekroczenia błędów. Dopiero po pozytywnym wyniku sprawdzenia można przystąpić do pracochłonnego wykonania transformatora. Jest bardzo duże prawdopodobieństwo, że wykonany transformator będzie miał błędy ograniczone do zakładanych wartości [4].

Wiarygodny pomiar parametrów magnetycznych rdzenia jest bardzo ważny w procesie projektowania precyzyjnych transformatorów pomiarowych. Każdy materiał ferromagnetyczny charakteryzuje się odmiennymi właściwościami. Właściwości te opisują charakterystyki magnesowania $B = f(H)$, pętle histerezy – główne oraz cząstkowe, bądź charakterystyki konkretnych parametrów (względnych przenikalności magnetycznych – statycznych lub dynamicznych, stratności, itp.) w funkcji natężenia pola lub indukcji magnetycznej. Niektóre z właściwości materiałów magnetycznych można opisać również za pomocą dyskretnych parametrów, np. koercji, remanencji, indukcji nasycenia, itp.

2. Pomiar parametrów magnetycznych materiałów ferromagnetycznych

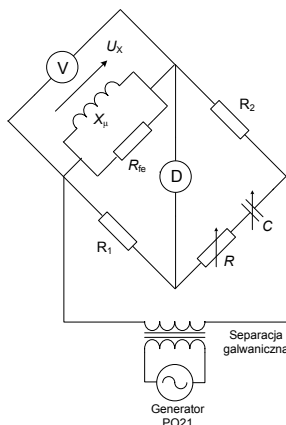
Rdzenie transformatorów pomiarowych wykonuje się z materiałów ferromagnetycznych, o zamkniętej drodze strumienia magnetycznego, najczęściej o kształcie toroidalnym.

Każdy materiał ferromagnetyczny charakteryzuje się odmiennymi właściwościami, wykazującymi bardzo duże rozrzuty. Faktycznie każdy rdzeń musi być traktowany jako indywidualny, niepowtarzalny wyrób.

Minimalny błąd transformacji napięcia osiąga się w punkcie charakterystyki magnesowania, dla którego względna amplitudowa przenikalność magnetyczna jest największa (czyli dla maksymalnej wartości impedancji gałęzi poprzecznej schematu zastępczego transformatora). Podczas projektowania punkt ten optymalnie dobiera się dla wartości znamionowych pracy transformatora. Natomiast w procesie projektowania oraz obliczania parametrów metrologicznych dokładnych transformatorów pomiarowych w szerokim zakresie zmian punktu pracy konieczna staje się znajomość właściwości materiałów ferromagnetycznych danych w postaci ich charakterystyk [5].

3. Układ pomiarowy i wyniki badań

Parametry gałęzi poprzecznej obwodu zastępczego transformatora wyznacza się na podstawie parametrów magnetycznych materiału. Pomiar tych parametrów zrealizowano wykorzystując układ mostkowy przedstawiony na rysunku 1, który umożliwia wyznaczenie rezystancji strat R_{Fe} i reaktancji magnesowania X_{μ} przy różnych wartościach indukcji magnetycznej oraz częstotliwości. Rezystancja strat R_{Fe} odzwierciedla straty czynne w rdzeniu natomiast reaktancja magnesowania X_{μ} właściwości magnetyczne materiału. Parametry te można wstępnie zmierzyć w układzie pomiaru prądu i napięcia (tzw. metodą techniczną) i na podstawie otrzymanych wyników dobrać wartości elementów mostka tak, aby uzyskać potrzebną rozdzielczość pomiaru.



Rys. 1. Układ do pomiaru parametrów gałęzi poprzecznej schematu zastępczego transformatora

Fig. 1. Circuit for the transverse branch parameters measurement of the transformer equivalent circuit

W oparciu o wartości parametrów gałęzi poprzecznej schematu zastępczego transformatora w poszczególnych punktach charakterystyki magnesowania, liczbę zwojów uzwojenia nawiniętego na rdzeń podczas wykonywania pomiarów, oraz wartości parametrów konstrukcyjnych rdzenia, można wyznaczyć właściwości magnetyczne materiału rdzenia [6].

Parametry gałęzi poprzecznej schematu zastępczego transformatora określają wzory (1) i (2), wiążące wartości R_{Fe} i X_{μ} m.in z indukcją magnetyczną, częstotliwością, stratnością i in.:

$$R_{Fe} = \frac{(B_m 4,44 f S z)^2}{V \Delta p_{Fe}}, \quad (1)$$

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

gdzie: V jest objętością danej próbki, a Δp_{Fe} jest jej stratnością.

Pomiar sumy parametrów poprzecznych i podłużnych strony pierwotnej transformatora przeprowadzono w mostkowym układzie pomiarowym przedstawionym na rysunku 1. W analizie pominięto parametry podłużne ze względu na ich niewielkie wartości w odniesieniu do wartości parametrów poprzecznych, tak więc wyznaczone pomiarowo wartości odpowiadają parametrom gałęzi poprzecznej schematu zastępczego transformatora. Z powodu nieliniowości tych parametrów prąd płynący w gałęzi obiektu pomiarowego (magnetówód z nawiniętym uzwojeniem) jest odkształcony. Z analizy układu mostka wynika, że kształt napięcia na rezystancji R_2 mostka nie jest sinusoidalny, pomimo faktu, że mostek zasilany jest napięciem sinusoidalnie zmiennym. Odkształcone napięcie prowadzi do odkształcenia indukcji magnetycznej w rdzeniu w związku z tym konieczne jest zastosowanie detektora selektywnego, który pozwala wyznaczyć stany zrównoważenia mostka dla pierwszej harmonicznej napięcia na obiekcie pomiarowym. W celu wyznaczenia wartości parametrów R_{Fe} i X_{μ} musi zachodzić stan równowagi mostka dla pierwszej harmonicznej napięcia na jego przekątnej. Jeśli zachodzi stan równowagi mostka, wtedy parametry gałęzi poprzecznej schematu zastępczego są wyznaczane w oparciu o przebieg sinusoidalny zgodnie z następującymi wzorami:

$$R_{Fe} = \frac{R_1 R_2}{R}, \quad (3)$$

$$X_{\mu} = \omega R_1 R_2 C, \quad (4)$$

Tab. 1. Przykładowe wyniki pomiaru parametrów gałęzi poprzecznej dla rdzenia z materiału „Finemet” i częstotliwości $f = 1$ kHz

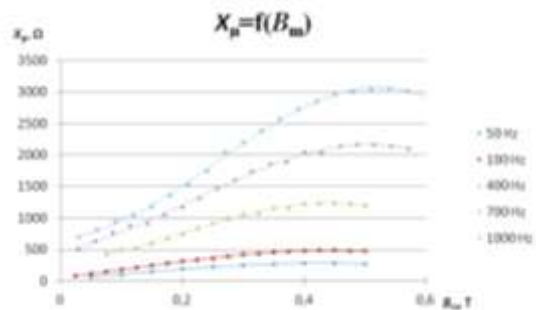
Tab. 1. Exemplary measuring results of transverse branch parameters of the core of "Finemet" material at the frequency $f = 1$ kHz

Lp.	U, V	R, Ω	C, nF	R_{Fe}, Ω	X_{μ}, Ω	B_m, T
1	0,60	455	112	2197,80	700,58	0,030
2	1,21	575	131	1739,13	823,10	0,061
3	1,80	615	149	1626,02	936,19	0,090
4	2,40	630	167	1587,30	1046,15	0,120
5	3,00	635	188	1574,80	1178,10	0,150
6	3,60	620	216	1612,90	1357,17	0,180
7	4,20	615	245	1626,02	1536,24	0,210
8	4,80	605	278	1652,89	1746,73	0,240
9	5,40	600	326	1666,67	2048,32	0,270
10	6,00	577	350	1733,10	2199,11	0,300
11	6,60	558	380	1792,11	2387,61	0,330
12	7,20	542	410	1845,02	2576,11	0,360
13	7,80	527	434	1897,53	2726,90	0,390
14	8,40	514	453	1945,53	2846,28	0,420
15	9,00	505	470	1980,20	2953,10	0,450
16	9,60	491	478	2036,66	3003,36	0,480
17	10,20	481	483	2079,00	3034,78	0,511
18	10,80	475	486	2105,26	3053,63	0,541
19	11,40	469	479	2132,20	3009,65	0,571
20	12,00	465	470	2150,54	2953,10	0,601

Pomiary przeprowadzono dla różnych wartości częstotliwości oraz indukcji magnetycznej. Przykładowe wyniki pomiarów parametrów gałęzi poprzecznej dla rdzenia wykonanego z materiału „Finemet” przedstawiono w tabeli 1. Prezentowane wyniki pomiarów otrzymano dla częstotliwości $f = 1$ kHz.

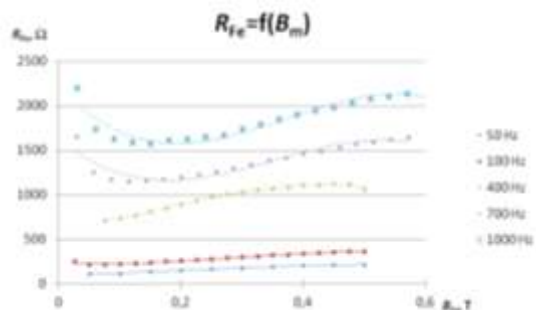
Na rysunkach 2 - 5 przedstawiono zależności parametrów poprzecznych schematu zastępczego transformatora od indukcji magnetycznej otrzymane dla różnych częstotliwości.

Na rysunkach 2 i 3 znajdują się wyznaczone charakterystyki parametrów poprzecznych schematu zastępczego transformatora dla rdzenia toroidalnego wykonanego z materiału „Finemet”, którego średnica zewnętrzna to 60 mm, średnica wewnętrzna 40 mm i wysokość 10 mm.



Rys. 2. Charakterystyki reakcji magnetycznej $X_{\mu}=f(B_m)$ wykonane na podstawie badań rdzenia „Finemet” dla różnych częstotliwości

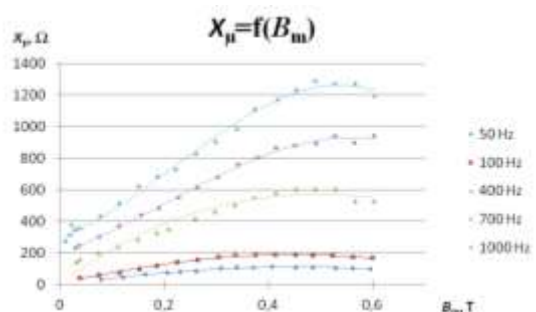
Fig. 2. Magnetizing reactance curves $X_{\mu}=f(B_m)$ for the core made of "Finemet" material in a wide frequency range



Rys. 3. Charakterystyki rezystancji strat $R_{Fe}=f(B_m)$ wykonane na podstawie badań rdzenia z materiału „Finemet” dla różnych częstotliwości

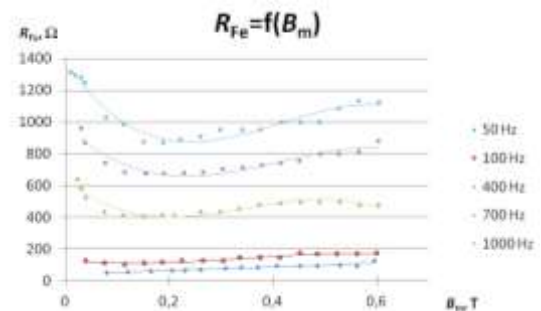
Fig. 3. Resistance losses curves $R_{Fe}=f(B_m)$ for the core made of "Finemet" material in a wide frequency range

Na rysunkach 4 i 5 znajdują się charakterystyki parametrów poprzecznych schematu zastępczego transformatora dla rdzenia toroidalnego wykonanego z materiału „Metglas”, którego średnica zewnętrzna to 70 mm, średnica wewnętrzna 40 mm i wysokość 10 mm.



Rys. 4. Charakterystyki reakcji magnetycznej $X_{\mu}=f(B_m)$ wykonane na podstawie badań rdzenia „Metglas” dla różnych częstotliwości

Fig. 4. Magnetizing reactance curves $X_{\mu}=f(B_m)$ for the core made of "Metglas" material in a wide frequency range



Rys. 5. Charakterystyki rezystancji strat $R_{Fe}=f(B_m)$ wykonane na podstawie badań rdzenia z materiału „Metglas” dla różnych częstotliwości

Fig. 5. Resistance losses curves $R_{Fe}=f(B_m)$ for the core made of "Metglas" material in a wide frequency range

4. Podsumowanie i wnioski

Przedstawiony układ mostkowy wykorzystuje się głównie przy pomiarach dużych indukcji. Przeprowadzone badania potwierdziły możliwość stosowania takiego układu mostkowego również do badania parametrów magnetycznych materiałów rdzeni o nieliniowych charakterystykach, stosowanych w transformatorach pomiarowych.

Zmiany wartości parametrów gałęzi poprzecznej schematu zastępczego transformatora w funkcji indukcji magnetycznej są nieliniowe i dodatkowo są zależne od częstotliwości jego pracy, dlatego w procesie projektowania napięciowych transformatorów pomiarowych punkt pracy powinno się ustalić dla zadanej częstotliwości znamionowej i zadanego napięcia znamionowego (indukcji magnetycznej).

Przebadano rdzenie wykonane z materiałów „Permalloy”, „Metglas” i „Finemet”. Najlepsze właściwości magnetyczne posiada rdzeń z materiału „Finemet”, dlatego w projektowaniu precyzyjnych transformatorów pomiarowych jest bardzo często wykorzystywany, zwłaszcza gdy znaczenie ma również aspekt ekonomiczny.

Na podstawie wartości parametrów magnetycznych danego materiału oraz wymiarów badanego rdzenia można oszacować wymiary rdzenia projektowanego transformatora. Można również na podstawie tych danych dobrać układ warstw uzwojenia tak, aby spełnione zostały założenia projektowe. Ponieważ wartości parametrów poprzecznych dla dwóch różnych rdzeni o takich samych wymiarach będą się różnić, dlatego należy powtórnie przeprowadzić badania tych parametrów w prezentowanym układzie mostkowym dla każdego rdzenia docelowego. Wyniki takich badań umożliwiają ostateczne skorygowanie parametrów uzwojeń i ustalenie ich przestrzennej konfiguracji oraz ułatwiają zaprojektowanie transformatora pomiarowego dedykowanego do układów pomiarowych wysokiej precyzji.

5. Literatura

- [1] Skubis T.: Opracowanie konstrukcji i technologii wzorcowych wielodekadowych indukcyjnych dzielników napięcia. Praca doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice, 1975.
- [2] Soński M.: Materiały magnetyczne w technice, Wydawnictwo SEP 2001 r.
- [3] Norma EN 60044-2:1999, Przekładniki – Arkusz 2: Przekładniki napięciowe indukcyjne (IEC 60044-2:1997, zmodyfikowana).
- [4] Skubis T., Piaskowy A. Metoda i układ do pomiarów błędów przekładni napięciowej transformatorów precyzyjnych PPM 2012, s. 34-37.
- [5] Szkurnikow E.: The software module conversion parameters ferromagnets in a specialized computer system, Radioelectronic and computer systems nr 3 pp. 101-105 2012 r.
- [6] Milek M.: Interpretacja i pomiar zespolonej przenikalności magnetycznej stopów Fe-Ni, Zeszyty naukowe Politechniki Śląskiej nr 431 seria Elektryka z. 48, 1974.

otrzymano / received: 09.09.2014

przyjęto do druku / accepted: 03.11.2014

artykuł recenzowany / revised paper