

Ryszard RYBSKI, Janusz KACZMAREK, Mirosław KOZIOL
 UNIwersytet ZIELONOGÓRSKI, INSTYTUT METROLOGII ELEKTRYCZNEJ,
 ul. Podgórna 50, 65-246 Zielona Góra

Aktywny transformator izolujący do zastosowań w pomiarach dokładnych w paśmie akustycznym

Dr hab. inż. Ryszard RYBSKI

Profesor nadzwyczajny na Wydziale Elektrotechniki, Informatyki i Telekomunikacji Uniwersytetu Zielonogórskiego. Dyrektor Instytutu Metrologii Elektrycznej. Autor ponad 70 publikacji naukowych, w tym 2 monografii. Główny obszar badawczy obejmuje zagadnienia związane z dokładnymi pomiarami wielkości elektrycznych, w szczególności z pomiarami impedancji.



e-mail: r.rybski@ime.uz.zgora.pl

Dr inż. Janusz KACZMAREK

Adiunkt na Wydziale Elektrotechniki, Informatyki i Telekomunikacji Uniwersytetu Zielonogórskiego. Aktualne zainteresowania: zagadnienia związane z precyzyjnymi pomiarami wielkości elektrycznych, systemy pomiarowe, bezprzewodowe sieci sensorowe, konstrukcja aparatury pomiarowej. Jest autorem wielu wdrożeń wyników badań dla przemysłu.



e-mail: j.kaczmarek@ime.uz.zgora.pl

Streszczenie

Scharakteryzowano dwurdzeniowy aktywny napięciowy transformator izolujący. Przedstawiono i porównano wyniki pomiarów impedancji wejściowej transformatorów o takiej samej konstrukcji z rdzeniami nanokrystalicznymi i permalojowymi. Przedstawiono charakterystyki częstotliwościowe błędów modułu fazy przekładni napięciowej transformatora.

Słowa kluczowe: transformator pomiarowy, transformator izolujący, impedancja wejściowa, błąd przekładni napięciowej.

Amplifier-aided isolation voltage transformer for use in accurate measurements in the audio frequency range

Abstract

In the paper the characteristic of an isolating instrument transformer is presented. The transformer is intended for use in a measurement system to calibrate low-value alternating-current standard resistors at audio frequencies. In the developed system a resistor R_x is directly compared with a standard resistor R_N (Fig. 1). The impedance ratio Z_x/Z_N of the resistors is determined from the measurement of the voltage ratio U_x/U_N . The measurement of floating voltages by a digitizer with grounded inputs requires isolating transformers (T1, T2). Due to the assumptions concerning the system being developed, transformers should be characterized by a relatively high input impedance and small errors of the transformer voltage ratio over a frequency bandwidth from 40 Hz to 10 kHz. The developed transformer has a two stage dual-core construction and an additional amplifier that increases the input impedance (Fig. 2). All the windings of the transformer have 100 turns each and are wound on a toroidal nanocrystalline core. The primary and secondary windings are placed in the electrostatic screens E1, E2. The frequency characteristics of the input impedance of two transformers of the same design made of nanocrystalline core and permalloy core operating without an amplifier W (Fig. 3) and with an amplifier (Fig. 4) are compared. In Figs. 5 and 6 the frequency characteristics of the module and phase error of the transformer voltage ratio are shown. They are determined by a digital system for measuring the complex voltage ratio, developed by the authors.

Dr inż. Mirosław KOZIOL

Studia magisterskie ukończył w 1998 r. na Politechnice Zielonogórskiej. Stopień doktora nauk technicznych uzyskał na Wydziale Elektroniki, Informatyki i Telekomunikacji Uniwersytetu Zielonogórskiego. Obecnie pracuje na stanowisku adiunkta w Instytucie Metrologii Elektrycznej Uniwersytetu Zielonogórskiego. Obszar zainteresowań naukowych obejmuje zagadnienia z zakresu dedykowanych systemów mikroprocesorowych oraz cyfrowego przetwarzania sygnałów.



e-mail: m.kozioł@ime.uz.zgora.pl

Keywords: instrument transformer, isolation voltage transformer, input impedance, voltage ratio error.

1. Wprowadzenie

W układach pomiarowych prądu przemiennego przeznaczonych do pomiarów o dużej dokładności często konieczny jest pomiar napięć nieuziemionych (tzw. napięć „plywających”) za pomocą przyrządów pomiarowych o wejściu uzziemionym. Jednym z możliwych i stosowanych w praktyce rozwiązań zapewniających poprawny pomiar napięcia w wyżej opisanej sytuacji jest zastosowanie pomiarowego transformatora izolującego. Transformator izolujący stosuje się również w złożonych układach i systemach pomiarowych, w których nie jest możliwe zapewnienie jednego potencjału odniesienia dla wszystkich mierzonych napięć.

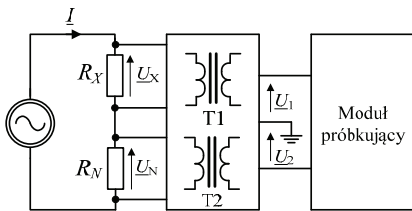
Problematyka projektowania, konstrukcji i badania właściwości metrologicznych transformatorów pomiarowych jest obecna w literaturze przedmiotu od wielu lat. Niemniej jednak wymagania stawiane transformatorom pomiarowym systematycznie rosną. Jest to zgodne z ogólną tendencją w dążeniu do wytwarzania aparatury pomiarowej o coraz lepszych właściwościach metrologicznych, w tym zwłaszcza zwiększaniu jej dokładności w coraz szerszym paśmie częstotliwościowy sygnałów pomiarowych, najczęściej w połączeniu z jej miniaturyzacją i koniecznością zachowania stosunkowo niskich kosztów produkcji.

Ważnym obszarem prac badawczych ściśle związanym z rozwojem transformatorów pomiarowych są układy pomiarowe przeznaczone do oceny dokładności transformatorów poprzez pomiar ich błędów przekładni. Eksperymentalne wyznaczenie wspomnianych błędów jest zagadnieniem stosunkowo złożonym ze względu na ich bardzo małą wartość i szerokie pasmo sięgające aktualnie setek kiloherców. Równoległe do klasycznych rozwiązań polegających na wyznaczaniu błędów przekładni transformatorów opartych na ich bezpośrednim porównaniu z wzorcem [1] rozwijane są metody i układy bazujące na pomiarze stosunku napięć (prądów) z zastosowaniem próbkowania i cyfrowego przetwarzania sygnałów pomiarowych [2]. Takie rozwiązania, poprzez swoją automatyzację, stwarzają szansę na uproszczenie czasochłonnych pomiarów błędów przekładni transformatorów i tym samym mogą stać się ważnym narzędziem ułatwiającym prace związane z rozwojem transformatorów pomiarowych.

W artykule przedstawiono wyniki badań związanych z opracowaniem pomiarowego transformatora izolującego przeznaczonego do budowanego w Instytucie Metrologii Elektrycznej Uniwersytetu Zielonogórskiego systemu pomiarowego do wzorcowania rezystorów wzorcowych o małych wartościach rezystancji w zakresie częstotliwości akustycznych. Scharakteryzowano również opracowany przez autorów system pomiarowy zastosowany do wyznaczania błędów przekładni napięciowej transformatora.

2. Transformator izolujący w systemie do wzorcowania rezystorów

Zasada pomiaru impedancji wzorcowanego rezystora R_X w wspomnianym wcześniej systemie do wzorcowania rezystorów wzorcowych o małych wartościach rezystancji polega na jego bezpośrednim porównaniu z rezystorem wzorcowym R_N (rys. 1). Stosunek impedancji porównywanych rezystorów Z_X/Z_N wyznaczony jest z pomiaru stosunku napięć U_X/U_N . Napięcia U_X i U_N są mierzone za pomocą dwukanałowego modułu próbkującego [3].



Rys. 1. Uproszczony schemat systemu do wzorcowania rezystorów
Fig. 1. Simplified diagram of the system for calibration of resistors

W celu zapewnienia poprawnych warunków pomiaru pływających napięć U_X i U_N za pomocą układu o wejściu niesymetrycznym (uziemiającym) należy zastosować stopień pośredni (bufor) pozwalający ustalić wspólny potencjał odniesienia dla mierzonych napięć U_1 , U_2 . Jednym z możliwych rozwiązań jest zastosowanie transformatorów izolujących, tzn. napięciowych transformatorów pomiarowych o przekładni nominalnej równej jeden. Rozwiązanie bufora składającego się z dwóch transformatorów T1, T2 przedstawiono na rys. 1. Dla przedstawionego układu zależność między zmierzonym stosunkiem napięć U_1/U_2 i stosunkiem spadków napięć na porównywanych rezystorach U_X/U_N jest dana wzorem

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{U_X}{U_N} \cdot \frac{k_{1n}(1 + \alpha_1 + j\beta_1)}{k_{2n}(1 + \alpha_2 + j\beta_2)}, \quad (1)$$

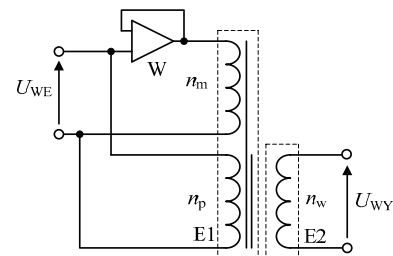
w którym k_{1n} , k_{2n} oznaczają nominalne przekładnie napięciowe, α_1 , α_2 i β_1 , β_2 , oznaczają odpowiednio część rzeczywistą (względny błąd modułu) i urojony błąd przekładni napięciowej transformatorów odpowiednio T1 i T2. Z zależności (1) wynika, że w celu zminimalizowania wpływu błędów przekładni napięciowej transformatorów izolujących na dokładność wyznaczenia stosunku napięć U_X/U_N należy zapewnić możliwie małe ich wartości. Dodatkowo, korzystne, lecz trudne w realizacji, byłoby zapewnienie jednakowych wartości błędów przekładni obydwu transformatorów. W zaproponowanym układzie istotne znaczenie ma również wartość impedancji wejściowej transformatorów. Chcąc uniezależnić się od wpływu impedancji wejściowej transformatorów na wynik porównania rezystorów o wartościach rezystancji rzędu 1Ω , przy zakładanej niepewności porównania na poziomie $10 \mu\Omega/\Omega$, impedancja ta powinna być nie mniejsza od $100 \text{ k}\Omega$. Ze względu na przyjęte założenia zakresu częstotliwościowego pracy systemu wzorcowania rezystorów przewidziane do zastosowania transformatory powinny spełniać podane wyżej wymagania w paśmie $40 \text{ Hz} - 10 \text{ kHz}$.

3. Konstrukcja transformatora

Opracowany transformator izolujący jest konstrukcją dwurdzeniową z dodatkowym wtórnikiem zwiększającym impedancję wejściową (rys. 2) [4]. Zbudowany został z toroidalnych rdzeni nanokrystalicznych o wymiarach $(60 \times 40 \times 15) \text{ mm}$. Liczby zwojów uzwojenia magnesującego (n_m), pierwotnego (n_p) i wtórnego (n_w) są jednakowe i równe 100.

Uzwojenia pierwotne i wtórne zostały zaekranowane elektrostatycznie ekranami (E1, E2) wykonanymi z folii miedzianej. Całość

została umieszczona w obudowie z materiału ferromagnetycznego, która pełni równocześnie rolę zewnętrznego ekranu magnetycznego (pominięty na rys. 2). Wyprowadzenia wszystkich uzwojeń umieszczone są na obudowie w postaci gniazd współosiowych typu BNC. Podobnie postąpiono z ekranami, co daje możliwość wyboru ich potencjałów w zależności od sposobu włączenia transformatora do układu pomiarowego. Pracujący w układzie wtórnika wzmacniacz operacyjny W jest zasilany bateryjnie i stanowi konstrukcyjnie oddzielny element transformatora izolującego.



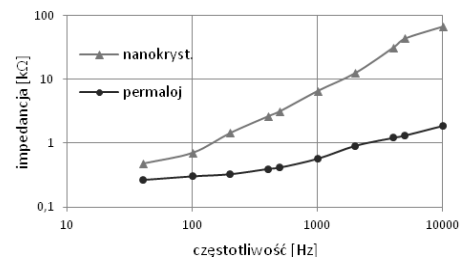
Rys. 2. Uproszczony schemat transformatora izolującego
Fig. 2. Simplified diagram of the isolation transformer

Należy zaznaczyć, że opracowanie przedstawione wyżej szczegółowego rozwiązania konstrukcyjnego zostało poprzedzone szeregiem eksperymentów doświadczalnych oraz obliczeń bazujących na schemacie zastępczym i modelu matematycznym błędów przekładni transformatora dwurdzeniowego i przebiegało zgodnie z zasadami dobrej praktyki projektowania pomiarowych transformatorów napięciowych.

4. Wyniki badań

Parametry opisujące właściwości metrologiczne transformatorów pomiarowych, w tym zwłaszcza konstrukcji prototypowych, wyznaczone są z zasady na drodze eksperymentalnej. Wyniki pomiarów z jednej strony mogą być potwierdzeniem poprawności przyjętych założeń projektowych, z drugiej strony – co jest istotniejsze – rozstrzygają o przydatności transformatora. Poniżej przedstawia się wyniki badań impedancji wejściowej oraz błędów przekładni napięciowej opracowanego transformatora w paśmie $40 \text{ Hz} - 10 \text{ kHz}$.

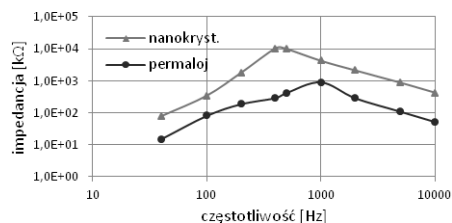
Celem pomiarów impedancji wejściowej było m.in. porównanie pod tym względem dwóch transformatorów o zbliżonej konstrukcji wykonanych z rdzeni nanokrystalicznych (Finemet) i permalojowych (P80). Wyniki pomiarów modułu impedancji obydwu transformatorów dwurdzeniowych (bez wtórnika napięcia) wykonane dla napięcia wejściowego 1 V , przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Porównanie impedancji wejściowej transformatorów dwurdzeniowych z rdzeniami nanokrystalicznymi i permalojowymi
Fig. 3. Comparison of the input impedance of two-stage transformers with permalloy and nanocrystalline cores

Zgodnie z oczekiwaniami impedancja wejściowa transformatora z rdzeniami nanokrystalicznymi jest znacząco większa od impedancji wejściowej transformatora z rdzeniami permalojowymi w całym paśmie. Równocześnie jej przebieg w funkcji częstotliwości wskazuje na konieczność zwiększenia wartości

impedancji, również w przypadku stosowania rdzeni nanokrystalicznych. Na rys. 4 przedstawiono charakterystyki częstotliwościowe impedancji wejściowej obydwu transformatorów z włączonym wtórnikiem napięcia (transformatorów aktywnych).

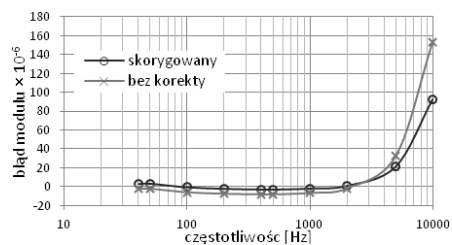


Rys. 4. Porównanie impedancji wejściowej aktywnych transformatorów z rdzeniami nanokrystalicznymi i permalajowymi

Fig. 4. Comparison of the input impedance of electronically assisted transformers with permalloy and nanocrystalline cores

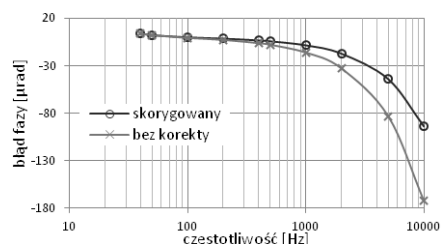
Z przebiegu charakterystyki częstotliwościowej impedancji wejściowej aktywnego transformatora z rdzeniami nanokrystalicznymi wynika, że wartość jej modułu niemal w całym paśmie przekracza wartość 100 kΩ.

Błędy przekładni napięciowej transformatora wyznaczono w opracowanym przez autorów cyfrowym systemie pomiarowym przeznaczonym do pomiaru zespolonego stosunku napięć [3]. Charakterystyki częstotliwościowe błędów modułu i fazy przekładni napięciowej transformatora przedstawiono odpowiednio na rys. 5 i 6.



Rys. 5. Błąd modułu przekładni napięciowej transformatora

Fig. 5. The magnitude error of the transformer voltage ratio



Rys. 6. Błąd fazy przekładni napięciowej transformatora

Fig. 6. The phase error of the transformer voltage ratio

Zamieszczone na rys. 5, 6 charakterystyki „skorygowane” przedstawiają przebieg błędów przekładni transformatora nieobciążonego. Ze względu na stosunkowo dużą wartość impedancji wyjściowej transformatora (5,4 Ω, 77,7 μH) należało podczas pomiarów wyeliminować wpływ błędów obciążenia transformatora przez impedancję wejściową digitizera (1 MΩ || 210 pF) zastosowanego we wspomnianym systemie pomiarowym do pomiaru zespolonego stosunku napięć. Poziom tych dodatkowych błędów przekładni można ocenić na podstawie zamieszczonych na rys. 5, 6 charakterystyk „bez korekty”. Ich wyeliminowanie wymagało przeprowadzenia dodatkowych pomiarów błędów trans-

formatora obciążonego impedancją o znanej wartości. Poprawność zastosowanej metody eliminacji błędów obciążenia transformatora zweryfikowano mierząc impedancję wyjściową transformatora i obliczając wartość błędów spowodowanych dołączeniem do zacisków wyjściowych transformatora impedancji o znanych wartościach. Uzyskano pełną zgodność wyników pomiarów i obliczeń. Przedstawione wyniki pomiarów błędów przekładni dodatkowo zweryfikowano w paśmie do 1 kHz stosując system pomiarowy z dwoma multimetrami HP3458A oraz metodę próbkowania integracyjnego [5, 6].

Odnosząc się do przebiegu charakterystyk częstotliwościowych błędów przekładni przedstawionych na rys. 5, 6 należy stwierdzić, że ich wartość w paśmie do ok. 2 kHz spełnia przyjęte wymagania: błąd modułu nie przekracza wartości około 3 μV/V, błąd fazy – wartości 20 μrad. W całym paśmie błędy nie przekraczają wartości odpowiednio 92 μV/V (moduł) i 94 μrad (faza). Przedstawione charakterystyki wyznaczono dla napięcia wejściowego o amplitudzie 1 V, ekrany E1 i E2 połączone były do zacisków niskiego potencjału odpowiednio uzwojenia pierwotnego i wtórnego. Wzrost wartości błędów przekładni wraz ze wzrostem częstotliwości wynika z wpływu pojemności resztkowych i pasozytnych transformatora.

5. Wnioski

W pracy przedstawiono konstrukcję napięciowego transformatora izolującego umożliwiającego pomiar stosunku napięć płynących w opracowywanym systemie do wzorcowania rezystorów wzorcowych prądu przemiennego. Przedstawione charakterystyki częstotliwościowe modułu impedancji wejściowej transformatora wskazują, że jego wartość w analizowanym paśmie jest na poziomie nie mniejszym od 100 kΩ. Błędy modułu i fazy przekładni napięciowej nie przekraczają wartości odpowiednio 100 μV/V i 100 μrad. Dalsze prace zmierzają do wyznaczenia charakterystyk częstotliwościowych współczynnika tłumienia napięcia wspólnego transformatora oraz do minimalizacji błędów przekładni w paśmie powyżej 2 kHz.

Praca finansowana ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju. Projekt rozwojowy nr NR01-0024-10.

6. Literatura

- [1] Skubis T., Piaskowy A.: Metoda i układ do pomiarów błędów przekładni napięciowej transformatorów precyzyjnych. Prace Komisji Metrologii Oddziału PAN w Katowicach. Seria: Monografie Nr 16, 2012, s. 34 - 37.
- [2] Bosco G. C., Garcocç M., Lind K., Pogliano U., Rietveld G., Tarasso V., Voljic B., Nováková Zachovalová V.: Phase comparison of high-current shunts up to 100 kHz. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, nr 7, 2011, s. 2359 - 2365.
- [3] Rybski R., Kaczmarek J., Koziół M.: Characterization of a digitizer for a low value resistor calibration system in the audio-frequency band. CPEM 2012 Conf. Digest, Washington, July 2012, s. 580 - 581.
- [4] Met A., Milek M.: Metoda zwiększania skuteczności działania układów aktywnych minimalizujących błędy transformatorów wzorcowych. Normalizacja, nr 12, 1988, s. 15 - 19.
- [5] Rybski R., Kaczmarek J., Krajewski M.: Accurate measurement of complex voltage ratio with a sampling voltmeter. Metrology and Measurement Systems, vol. XI, nr 2, 2004, s. 147 - 158.
- [6] Kampik M., Laiz H., Klonz M.: Comparison of three accurate methods to measure AC voltage at low frequencies. IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, nr. 2, 2000, s. 429 - 433.

otrzymano / received: 10.01.2013

przyjęto do druku / accepted: 01.03.2013

artykuł recenzowany / revised paper