

Właściwości metrologiczne przekładnika prądowego wyższych częstotliwości

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki analiz właściwości metrologicznych pomiarowego indukcyjnego przekładnika prądowego wyższych częstotliwości i klasycznego przekładnika prądowego o częstotliwości znamionowej 50 Hz podczas transformacji sinusoidalnych prądów o częstotliwościach od 50 Hz do 20 kHz przeprowadzone w oparciu o częstotliwościowe charakterystyki błędów prądowego i kąтового wyznaczone w opracowanym układzie pomiarowym.

Abstract. In the paper the results of analysis of the metrological characteristics of the measuring wide band inductive current transformer and typical inductive current transformer designed for accurate transformation of the 50 Hz frequency sinusoidal currents during the transformation of sinusoidal currents at frequencies from 50 Hz to 20 kHz are presented. Conclusions are based on the frequency characteristics of current errors and phase displacement designated in developed measuring system. (**Frequency characteristics of the inductive CT metrological properties**)

Słowa kluczowe: błąd prądowy, błąd kątowy, przekładnik prądowy, częstotliwościowe charakterystyki metrologiczne.

Keywords: current error, phase displacement, current transformer, frequency characteristics of metrological properties.

doi:10.12915/pe.2014.03.28

Wstęp

W układach podwyższonych częstotliwości (przeznaczonych do regulacji prędkości obrotowej silników asynchronicznych, w elektrotermii oraz w systemach zasilania reaktorów plazmy nietermicznej wykorzystywanych do oczyszczania powietrza, wody, gleby i utylizacji odpadów) mogą być stosowane seryjnie produkowane indukcyjne przekładniki prądowe wyższych częstotliwości ale także typowe przekładniki. Klasyczne układy mostkowe stosowane do wyznaczania błędów przekładników nie umożliwiają badania właściwości metrologicznych pomiarowych indukcyjnych przekładników prądowych podczas transformacji sinusoidalnych prądów o częstotliwościach wyższych niż 50 Hz (60 Hz) [1-6]. Do wyznaczania błędów prądowego i kąтового przekładników prądowych dla przebiegów sinusoidalnych o częstotliwościach z zakresu od 50 Hz do 20 kHz zastosowano, opracowany w Zakładzie Przekładników i Kompatybilności Elektromagnetycznej Instytutu Elektroenergetyki Politechniki Łódzkiej, układ pomiarowy [4-6]. Pozwala on na wyznaczenie pasma częstotliwości, w którym błędy transformacji badanego przekładnika prądowego nie przekraczają przyjętych granic, które w tym przypadku wynikają z klasy dokładności przekładników prądowych dla częstotliwości 50 Hz [4-6].

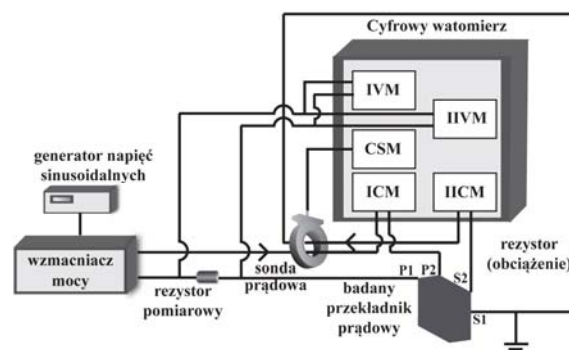
Badania laboratoryjne

Zalecenia normalizacyjne dotyczące indukcyjnych przekładników prądowych i napięciowych nie określają wymagań dotyczących sposobu oceny ich dokładności podczas transformacji sygnałów sinusoidalnych o częstotliwościach wyższych niż 100 Hz [6-8]. Analiza właściwości metrologicznych indukcyjnych przekładników podczas transformacji przebiegów sinusoidalnych o podwyższonych częstotliwościach, dla przyjętych wartości granicznych, może zostać przeprowadzona w oparciu o wyznaczone częstotliwościowe charakterystyki błędów przekładnika [4-6]. Dla określonego zakresu częstotliwości sinusoidalnego przebiegu pierwotnego przy ustalonych procentowych wartościach skutecznych odpowiednio prądu lub napięcia znamionowego i obciążeniach obwodu wtórnego krzywe te w jednoznaczny sposób wyznaczają pasmo pracy przekładnika dla określonej klasy dokładności.

Badania laboratoryjne przeprowadzono dla seryjnie produkowanego pomiarowego indukcyjnego przekładnika prądowego wyższych częstotliwości model ELA 1f i typowego przekładnika prądowego o częstotliwości

znamionowej 50 Hz model ELA1 obu wyprodukowanych przez Polcontact-Warszawa. Znamionowa przekładnia tych przekładników wynosiła 5 A / 5 A, klasa dokładności 0,5 (wyznaczona dla prądu sinusoidalnego o częstotliwości 50 Hz), moc znamionowa uzwojenia wtórnego 10 VA. Przekładnik wyższych częstotliwości według deklaracji producenta przeznaczony jest do transformacji sinusoidalnych prądów o częstotliwościach od 50 Hz do 300 kHz w klasie dokładności 1, przy czym obciążenie wtórne przekładnika dla częstotliwości wyższych niż 50 Hz jest ograniczone do 1 VA. Rdzeń tego typu przekładników wykonany jest ze specjalnych materiałów magnetycznych charakteryzujących się wysoką i niezmienną w jak największym zakresie częstotliwości przenikalnością magnetyczną oraz liniową charakterystyką magnesowania w całym zakresie stosowanych obciążeń uzwojenia wtórnego i prądów pierwotnych. Należy jednak podkreślić, że precyzyjne określenie charakterystyki magnesowania oraz strat rdzenia przekładnika na podstawie danych dostarczonych od producenta materiału magnetycznego jest niezwykle trudne nawet dla jednej częstotliwości [9]. Często uzyskanie odpowiednich szerokopasmowych właściwości przekładnika może wymagać zastosowania rdzeni składanych z różnych materiałów magnetycznych. W tego typu konstrukcjach niezbędne okazuje się zastosowanie komputerowych metod obliczeniowych [10].

Częstotliwościowe charakterystyki błędów prądowego i kąтового badanych przekładników prądowych wyznaczono w układzie pomiarowym, którego uproszczony schemat przedstawiono na rysunku 1 [4-5].



Rys.1. Uproszczony schemat opracowanego układu pomiarowego do wyznaczania częstotliwościowych charakterystyk błędów przekładników prądowych

Na rysunku 1 zastosowano następujące oznaczenia:
 IVM – wejście napięciowe pierwszego modułu watomierza,
 ICM – wejście prądowe pierwszego modułu watomierza,
 CSM – wejście napięciowe pierwszego modułu watomierza przeznaczone do podłączenia sondy prądowej,
 IIVM – wejście napięciowe drugiego modułu watomierza,
 IICM – wejście prądowe drugiego modułu watomierza.
 Do pomiarów wartości skutecznej różnicy prądów pierwotnego i wtórnego badanych przekładników prądowych zastosowano pasywną sondę prądową pomiarową Pearson Current Monitor model 8122 o deklarowanej przez producenta dokładności $\pm 1\%$ w zakresie transformacji prądów o wartościach skutecznych od 1 mA do 40 A. Przewody z prądem pierwotnym i wtórnym poprowadzono przez sondę w taki sposób, aby strumień w jej rdzeniu magnetycznym był proporcjonalny do różnicy wartości chwilowych prądów pierwotnego i wtórnego [4-5], czyli do błędu całkowitego badanego przekładnika prądowego [7]. Na podstawie twierdzenia cosinusów (uogólnionego twierdzenie Pitagorasa) wartość maksymalna różnicy prądów opisanych zależnościami:

$$(1) \quad i_1 = I_{m1} \sin \omega t$$

$$(2) \quad i_2 = I_{m2} \sin(\omega t + \varphi)$$

określona jest równaniem (3):

$$(3) \quad I_{mr}^2 = I_{m1}^2 + I_{m2}^2 - 2I_{m1}I_{m2} \cos \varphi$$

gdzie: I_{mr} - wartość maksymalna różnicy prądów [A],
 I_{m1} - wartość maksymalna prądu pierwotnego [A],
 I_{m2} - wartość maksymalna prądu wtórnego [A],
 φ - przesunięcie fazowe między prądami [°].

W przypadku, gdy oba prądy są w fazie równanie (3) przyjmuje postać:

$$(4) \quad I_{mr0}^2 = I_{m1}^2 + I_{m2}^2 - 2I_{m1}I_{m2}$$

Zatem, wartość skuteczna różnicy prądów wynikająca tylko z ich wzajemnego przesunięcia fazowego wynosi:

$$(5) \quad I_d = \sqrt{2I_1I_2(1 - \cos \varphi)}$$

gdzie: I_1 – wartość skuteczna prądu pierwotnego [A],
 I_2 – wartość skuteczna prądu wtórnego [A].
 Odpowiadającą temu prądowi wartość napięcia dodatkowego sondy prądowej U_d określa zależność (6):

$$(6) \quad U_d = kI_d$$

gdzie: U_d – część wartości skutecznej napięcia wyjściowego sondy prądowej wynikająca tylko z przesunięcia fazowego prądów [V], k – współczynnik przetwarzania prąd - napięcie sondy prądowej [A/V].

Ponieważ napięcia U_d i U_r są dwiema częściami tego samego napięcia wyjściowego sondy prądowej wartość skuteczna napięcia sondy proporcjonalna do wartości skutecznej różnicy prądów pierwotnego i wtórnego może być obliczona na podstawie zależności:

$$(7) \quad U_r = U_s - U_d$$

gdzie: U_r – część wartości skutecznej napięcia wyjściowego sondy prądowej wynikająca tylko z różnicy wartości skutecznych prądów [V], U_s – wartość skuteczna napięcia wyjściowego sondy prądowej [V].

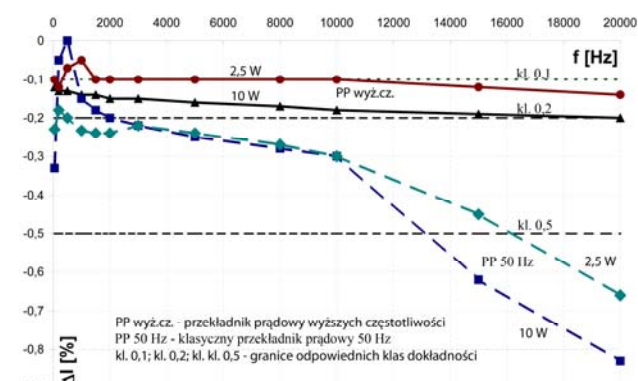
Wartości błędu prądowego dla zadanej wartości skutecznej prądu pierwotnego obliczono na podstawie zależności określającej błąd prądowy dla prądów sinusoidalnych o częstotliwości 50 Hz zgodnie z normą [7]. Błędy kątowe obliczono zgodnie z zależnością (8) na podstawie wyznaczonej różnicy przesunięć fazowych prądów pierwotnego i wtórnego zmierzonych odpowiednio w pierwszym i drugim module cyfrowego watomierza (względem napięcia na rezystorze pomiarowym umieszczonym w torze pierwotnym).

$$(8) \quad \varphi_i = \pm \varphi_1 \pm \varphi_2$$

gdzie: φ_1 – błąd kątowy przekładnika [min], φ_2 – wyznaczona wartość przesunięcia fazowego między spadkiem napięcia na rezystorze pomiarowym w torze pierwotnym a prądem pierwotnym badanego przekładnika [min], φ_2 – wyznaczona wartość przesunięcia fazowego między spadkiem napięcia na rezystorze pomiarowym a prądem wtórnym [min].
 Ponieważ stosowane powszechnie skrzynki sztucznego obciążenia przekładników o wartości impedancji ustawianej odpowiednio dla zapewnienia znamionowej mocy pozornej w obwodzie wtórnym badanego przekładnika wykonywane są jedynie dla częstotliwości 50 Hz, przy której utrzymują zadaną wartość znormalizowanego współczynnika mocy $\cos \varphi = 0,8$ oraz ze względu na fakt, że obciążenia przekładników w obwodach wyższych częstotliwości są najczęściej praktycznie rezystancyjne, podczas badań dokładności transformacji przekładników dla przebiegów o częstotliwościach wyższych niż 50 Hz do ich obciążenia stosowane są rezystory ($\cos \varphi = 1$). Pierwszym etapem badań laboratoryjnych było sprawdzenie właściwości metrologicznych obu przekładników podczas transformacji sinusoidalnych prądów o częstotliwości 50 Hz także przy obciążeniu rezystancyjnym uzwojenia wtórnego. Ponadto, wyniki pomiarów błędów prądowego i kąтового zostały zweryfikowane za pomocą układu mostkowego do badania dokładności przekładników. Nie stwierdzono znaczących rozbieżności. Zarówno przy obciążeniu uzwojenia wtórnego mocą 10 VA i 2,5 VA oraz 10 W i 2,5 W wyznaczone błędy dla 120%, 100%, 20% i 5% prądu znamionowego nie przekraczały wartości granicznych dla klasy 0,5 [7].

Częstotliwościowe charakterystyki błędów prądowego i kąтового badanych przekładników prądowych

Na rysunku 2 przedstawiono wyznaczone charakterystyki częstotliwościowe błędu prądowego badanych przekładników dla prądu o znamionowej wartości 5 A i częstotliwości od 50 Hz do 20 kHz wyznaczone przy obciążeniach uzwojenia wtórnego mocą 10 W i 2,5 W.



Rys.2. Charakterystyki częstotliwościowe błędu prądowego badanych przekładników prądowych dla prądu o znamionowej wartości 5 A i częstotliwości od 50 Hz do 20 kHz wyznaczone przy obciążeniu uzwojenia wtórnego mocą 10 W i 2,5 W

Analiza wyników z rysunku 2 pozwala stwierdzić, że dla prądu znamionowego o wartości skutecznej 5 A badany przekładnik prądowy wyższych częstotliwości przy obciążeniu uzwojenia wtórnego mocą 10 W i 2,5 W charakteryzuje się wartościami błędów prądowego nie przekraczającymi praktycznie granic klasy 0,2 dla całego zakresu badanych częstotliwości prądów pierwotnych. Należy przy tym zaznaczyć, że nie jest konieczne zmniejszenie obciążenia przekładnika do 1 VA dla częstotliwości prądu pierwotnego do 20 kHz. Jednak, także przy tym obciążeniu uzwojenia wtórnego, przekładnik wyższych częstotliwości w badanym zakresie, charakteryzuje się wartościami błędów prądowego nie przekraczającymi granic klasy 0,2. Pewien widoczny wzrost wartości błędów prądowego (o około 0,05%) w początkowej części charakterystyki częstotliwościowej dla obciążenia uzwojenia wtórnego mocą 10 W jest wynikiem niedokładności pomiaru. Wartość błędów granicznego pomiaru błędów prądowego $\Delta\varphi_i$ określona jest na poziomie $\pm 0,05\%$. Wynika to z błędów pomiaru przesunięcia fazowego (wzór(9)) dla prądu o wartości skutecznej 5 A (równego $\pm 1,5$ min) oraz obliczonej na podstawie zależności (6) części wartości skutecznej napięcia wyjściowego sondy prądowej (odpowiadającej przesunięciu fazowemu prądów o wartości 1,5 min).

$$(9) \quad \Delta\varphi_i = \pm \sin^{-1} [S \cdot (0,15 + 0,3 \cdot f \cdot 10^{-3})\% / 100]^\circ$$

gdzie: S – mierzona moc pozorna w obwodzie watomierza, f – częstotliwość.

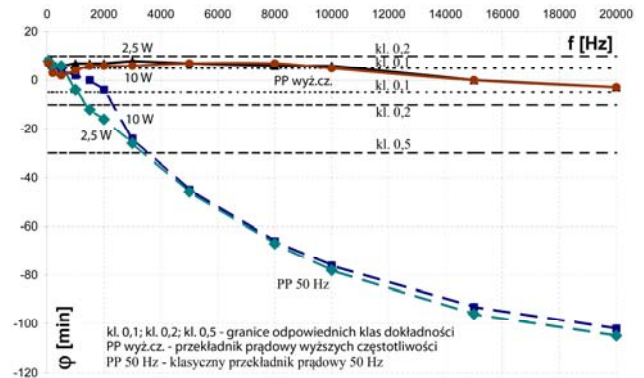
W przypadku klasycznego przekładnika prądowego, przy obciążeniu uzwojenia wtórnego mocą 10 W, granica klasy dokładności 0,5 jest przekroczona przy częstotliwości prądu pierwotnego o wartości 13 kHz natomiast przy obciążeniu uzwojenia wtórnego mocą 2,5 W przekroczenie to występuje przy częstotliwości prądu pierwotnego o wartości około 16 kHz. Wyraźne zmniejszenie wartości błędów prądowego tego przekładnika przy obciążeniu uzwojenia wtórnego mocą 10 W dla zakresu częstotliwości od 50 Hz do ok. 500 Hz jest wynikiem zastosowanej poprawki zwojowej. W takim przypadku, każdy zwój zastosowany do korekcji błędów prądowego przekładnika, ze wzrostem częstotliwości prądu pierwotnego powyżej znamionowej 50 Hz, powoduje powstawanie dodatkowej siły elektromotorycznej E_z zgodnie z zależnością:

$$(10) \quad E_z = 4,44 f z_z \Phi_m$$

gdzie: z_z - liczby dodatkowych zwojów, Φ_m - amplituda strumienia magnetycznego.

Wzrost z częstotliwością dodatkowej siły elektromotorycznej powoduje proporcjonalny wzrost wartości prądu wtórnego i zmniejszenie błędów prądowego dla podwyższonych częstotliwości. Następnie powyżej 500 Hz ze względu na pogorszenie się właściwości magnetycznych rdzenia ze wzrostem częstotliwości, następuje wzrost prądu magnesującego i błąd prądowy zaczyna wzrastać. Celem pełnego scharakteryzowania właściwości metrologicznych przekładnika należy także, dla określonego pasma pracy i danej procentowej wartości prądu znamionowego oraz obciążenia uzwojenia wtórnego, wyznaczyć częstotliwościowe charakterystyki błędów kątowych.

Na rysunku 3 przedstawiono charakterystyki częstotliwościowe błędów kątowych badanych przekładników prądowych dla prądu o znamionowej wartości 5 A i częstotliwości od 50 Hz do 20 kHz wyznaczone przy obciążeniach uzwojenia wtórnego mocą 10 W i 2,5 W.



Rys.3. Charakterystyki częstotliwościowe błędów kątowych badanych przekładników prądowych dla prądu o znamionowej wartości 5 A i częstotliwości od 50 Hz do 20 kHz wyznaczone przy obciążeniu uzwojenia wtórnego mocą 10 W i 2,5 W

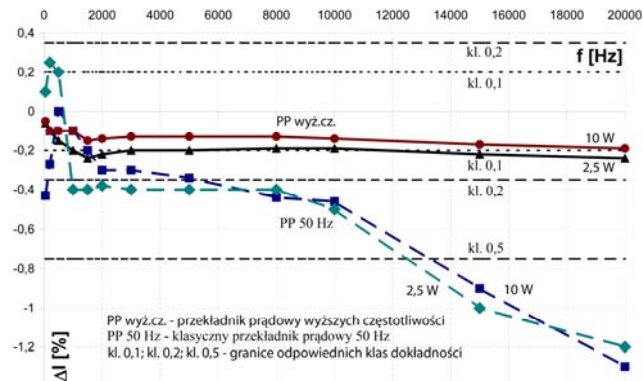
Analiza wyników z rysunku 3 pozwala zauważyć, że przekładnik prądowy wyższych częstotliwości dla obu badanych mocy obciążenia uzwojenia wtórnego charakteryzuje się błędem kątowym o wartości nie przekraczającej granic klasy 0,2 w całym zakresie badanych częstotliwości prądu pierwotnego. Klasyczny pomiarowy przekładnik prądowy przeznaczony do transformacji prądów o częstotliwości 50 Hz charakteryzuje się błędem kątowym o wartości nie przekraczającej granic klasy 0,5 w zakresie częstotliwości prądu pierwotnego od 50 Hz do około 3 kHz. Obliczona zgodnie z zależnością (9) niepewność pomiaru przesunięcia fazowego prądów za pomocą cyfrowego watomierza dla częstotliwości 20 kHz wynosi ± 30 min. Ze względu na fakt, że wartość zmierzonego błędów całkowitego przekładnika wyższych częstotliwości w zakresie częstotliwości od 2 kHz do 20 kHz nie przekracza $\pm 0,2\%$ można przyjąć, że niepewność pomiaru przesunięcia fazowego prądów nie przekracza ± 7 min. Wynika to z faktu, że w najgorszym przypadku błąd całkowity przekładnika może jedynie wynikać z przesunięcia fazowego prądów pierwotnego i wtórnego ($I_d = 10$ mA) i po przeliczeniu zgodnie z zależnością (5), przyjmując $I_1 = I_2$ nie może to być wartość większa niż 7 min.

Dla obu przekładników błąd kątowy praktycznie nie zależy od wartości obciążenia uzwojenia wtórnego (rezystancyjnego), gdyż przy wzroście częstotliwości indukcyjność w rdzeniu jest praktycznie stała. Decydujący wpływ na właściwości metrologiczne przekładnika w przypadku obciążeń rezystancyjnych mają przenikalność magnetyczna rdzenia i straty w rdzeniu. W przypadku, gdy stosowane byłoby obciążenie o współczynniku mocy $\cos\varphi = 0,8$, główny wpływ na wartość błędów kątowych ma wzrost reaktancji obciążenia ze wzrostem częstotliwości powodujący znaczny wzrost błędów kątowych i prądowego. Przy obciążeniu znamionowym, przekroczenie granicy klasy dokładności 0,5 wystąpiłoby przy częstotliwości ok. 500 Hz.

Na rysunku 4 przedstawiono wyznaczone charakterystyki częstotliwościowe błędów prądowego badanych przekładników prądowych dla prądu o wartości 1 A (20% I_{zn}) i częstotliwości od 50 Hz do 20 kHz przy tych samych obciążeniach uzwojenia wtórnego.

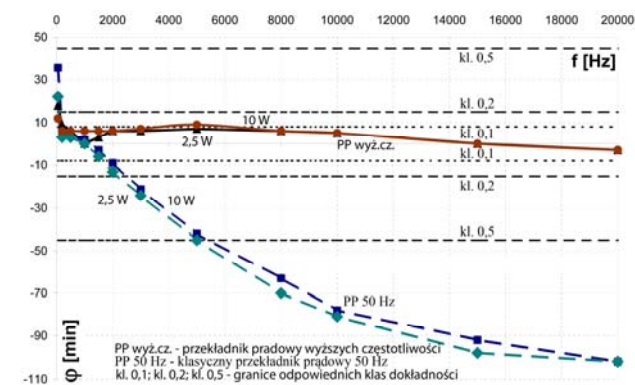
Analiza wyników z rysunku 4 pozwala zauważyć, że dla prądu o wartości skutecznej 1 A badany przekładnik prądowy wyższych częstotliwości przy obu obciążeniach uzwojenia wtórnego charakteryzuje się wartościami błędów prądowego nie przekraczającą granic klasy 0,2 dla całego zakresu badanych częstotliwości prądów pierwotnych. W przypadku klasycznego przekładnika prądowego, przy obciążeniach uzwojenia wtórnego mocą 10 W i 2,5 W, granica klasy dokładności 0,5 jest przekroczona przy częstotliwości prądu

pierwotnego o wartości ponad 12 kHz. Także, w tym przypadku występuje wyraźne zmniejszenie wartości błędu prądowego tego przekładnika przy obciążeniu uzwojenia wtórnego mocą znamionową dla częstotliwości od 50 Hz do ok. 1000 Hz. Przy obciążeniu uzwojenia wtórnego mocą o wartości 25% mocy znamionowej badanego przekładnika w wyniku poprawki zwójowej następuje wzrost dodatkowego błędu prądowego spowodowany wzrostem prądu wtórnego ze wzrostem częstotliwości.



Rys.4. Charakterystyki częstotliwościowe błędu prądowego badanych przekładników dla prądu o wartości 1 A i częstotliwości od 50 Hz do 20 kHz wyznaczone dla obciążeń 10 W i 2,5 W

Na rysunku 5 przedstawiono charakterystyki częstotliwościowe błędu kąтового badanych przekładników prądowych dla prądu o wartości 1 A i badanych częstotliwości wyznaczone przy obciążeniach uzwojenia wtórnego mocą 10 W i 2,5 W.



Rys.5. Charakterystyki częstotliwościowe błędu kąтового badanych przekładników dla prądu o wartości 1 A i częstotliwości od 50 Hz do 20 kHz wyznaczone dla obciążeń 10 W i 2,5 W

Analiza wyników z rysunku 5 pozwala zauważyć, że przekładnik prądowy wyższych częstotliwości dla obu badanych mocy obciążenia uzwojenia wtórnego charakteryzuje się błędem kątowym o wartości nie przekraczającej granic klasy 0,2 w całym zakresie badanych częstotliwości prądu pierwotnego. Klasyczny przekładnik prądowy charakteryzuje się błędem kątowym o wartości nie przekraczającej granic klasy 0,5 w zakresie częstotliwości prądu pierwotnego od 50 Hz do około 5 kHz.

Analizując łącznie wyniki pomiarów z rysunków od 2 do 5 dla zakresu częstotliwości od 50 Hz do 20 kHz można stwierdzić, że dla prądów pierwotnych o wartościach od 5 A do 1 A (były wykonywane takie pomiary, wyniki nie zostały przedstawione w artykule), przy obciążeniach uzwojenia wtórnego o wartościach od 2,5 W do 10 W przekładnik prądowy wyższych częstotliwości o przekładni 5 A / 5 A pracuje w klasie 0,5. Natomiast klasyczny przekładnik

prądowy o przekładni 5 A / 5 A projektowany do transformacji prądów o częstotliwości 50 Hz w badanych warunkach zachowuje klasę dokładności 0,5 tylko dla prądów pierwotnych o częstotliwościach do 3 kHz. Należy przy tym podkreślić, że wzrost prądu pierwotnego przekładnika powoduje proporcjonalne ograniczenie pasma częstotliwości, w którym błędy transformacji nie przekraczają wartości granicznych wynikających z klasy dokładności określonej dla częstotliwości 50 Hz.

Wnioski końcowe

- Przekładnik prądowy wyższych częstotliwości badany w zakresie częstotliwości prądów pierwotnych od 50 Hz do 20 kHz dla prądów o wartościach skutecznych od 1 A do 5 A charakteryzuje się praktycznie stałą wartością błędów prądowego i kąтового, które nie przekraczają granic klasy 0,5, przyjętych jak dla indukcyjnych przekładników przy częstotliwości 50 Hz. Szerokopasmowe właściwości przekładnika świadczą o tym, że może on być z powodzeniem stosowany w układach pomiarowych wyższych częstotliwości.

- Opracowana i przedstawiona w artykule metoda pomiarowa umożliwia, z zadowalającą dokładnością, wyznaczenie właściwości metrologicznych przekładników klas 0,2 i 0,5 dla prądów sinusoidalnych o częstotliwościach z zakresu 50 Hz ÷ 20 kHz.

LITERATURA

- G. Gallo, C. Landi, M. Luiso, Real-time digital compensation of current transformers over a wide frequency range, *IEEE Trans. Inst. and Meas.*, 59(2010), no. 5, 1119–1126.
- T. Sounders, Wide-band two-stage current transformers of high accuracy, *IEEE Trans. Inst. and Meas.*, 21(1972), no.4, 340–345.
- E. So, D. Bennett, Compact wideband high-current multistage current transformers for precise measurements of current harm., *IEEE Trans. Inst. and Meas.*, 56(2007), no.2, 584–587.
- M. Kaczmarek, Badanie charakterystyk transformacji indukcyjnego przekładnika prądowego z rdzeniem toroidalnym Ni80Fe20 dla sinusoidalnych prądów o częstotliwościach 50 Hz÷20kHz, *Przegląd Elektrotechniczny*, 87(2011), nr.11, 1-4
- M. Kaczmarek, R. Nowicz, Sposób wyznaczania błędów prądowego i kąтового indukcyjnych przekładników prądowych dla prądów sinusoidalnych o częstotliwościach 50 Hz (60 Hz) i wyższych, bez przekładnika wzorcowego, *zgłoszenie wynalazku wniesione do Urzędu Patentowego RP nr P-393923*, 14.02.2011.
- M. Kaczmarek, R. Nowicz, Propozycje normalizacyjne w zakresie badań dokładności przekładników przeznaczonych do transformacji przebiegów sinusoidalnych o podwyższonych cz., *Przegląd Elektrotechniczny*, 87 (2011), nr.11, 17-19
- PN-EN 61869-2: 2013, Przekładniki -- Część 2: Wymagania szczegółowe dotyczące przekładników prądowych, *PKN*
- PN-EN 61869-3: 2011, Wymagania szczegółowe dotyczące przekładników napięciowych indukcyjnych, *PKN*
- W. Jałmużny, D. Adamczewska, I. Borowska-Banaś, Ocena zgodności charakterystyk magnesowania i stratności toroidalnych obwodów magnetycznych o różnych wymiarach, *Przegląd Elektrotechniczny*, 87(2011), nr.11, 13-16
- E. Lesniewska, R. Rajchert, Application of the field-circuit method for the computation of measurement properties of current transformers with cores consisting of different magnetic materials, *IEEE Trans. Mag.*, 46(2010), no. 10, 3778–3782.

Autor: dr inż. Michał Kaczmarek, Politechnika Łódzka, WEELiA, Instytut Elektroenergetyki, Zakład Przekładników i Kompatybilności Elektromagnetycznej, ul. Stefanowskiego 18 / 22, 90 - 924 Łódź, michal.kaczmarek@p.lodz.pl