

Sposób oceny wpływu odkształcenia prądu wtórnego na dokładność transformacji wyższych harmonicznych przez indukcyjne przekładniki prądowe

Streszczenie. Zastosowanie opracowanego systemu pomiarowego umożliwia sprawdzenie dokładności transformacji harmonicznych prądu odkształconego przez indukcyjny przekładnik prądowy 100 A \ 5 A. Na skutek zmiany przesunięcia fazowego wyższej harmonicznej względem podstawowej harmonicznej następuje zmiana wartości błędów prądowego i kąтового. Wyznaczenie granicznych wartości tych błędów wymaga zatem dostosowania tego przesunięcia fazowego do fazy harmonicznej generowanej przez nieliniowy przekładnik prądowy.

Abstract. Application of the developed measurement system enables evaluation of transformation accuracy of harmonics of distorted current by the 100 A \ 5 A inductive current transformer. As a result of the change in the phase shift of the higher harmonic in relation to the fundamental harmonic, the values of current errors and phase displacement are changed. Therefore, to determine the limiting values of these errors the adjustment of this phase shift to the phase of harmonic generated by the non-linear current transformer is required. (**Method of evaluation of the influence of secondary current distortion on transformation accuracy of higher harmonics by inductive current transformers**).

Słowa kluczowe: indukcyjny przekładnik prądowy, dokładność transformacji, prąd odkształcony, wyższe harmoniczne.

Keywords: inductive current transformer, wideband transformation accuracy, distorted current, higher harmonics.

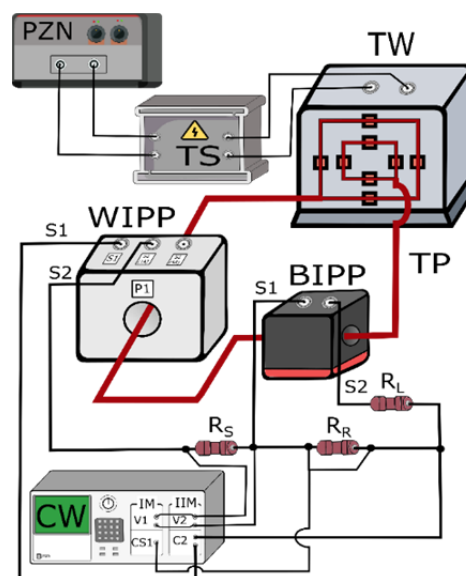
Wstęp

Z uwagi na odkształcenie prądów i napięć w sieci elektroenergetycznej w stosunku do przekładników stawiane są nowe wymagania dotyczące dokładnej transformacji odkształconych przebiegów prądowych i napięciowych. Zgodnie z normą PN-EN 61869-6 dotyczą one tylko przekładników małej mocy [1-2]. W przypadku indukcyjnych przekładników wymagania w zakresie dokładności transformacji harmonicznych nie zostały na razie zdefiniowane [3]. Jednakże w publikacjach naukowych zostały opisane propozycje normalizacyjne i stosowane układy pomiarowe [5-11]. Do zasilania układu pomiarowego stosowane są wzmacniacz wraz z generatorem arbitralnym lub kalibratory [8-10], [12]. W celu uzyskania wyższych wartości prądów niż około 30 A możliwe jest zastosowanie transformatora wieloprądowego, zasilanego wzmacniaczem sterowanym przez generator arbitralny [13]. Sposób wzorcowania przelotowych, indukcyjnych przekładników prądowych, w zakresie transformacji harmonicznych prądów odkształconych od 100 Hz do 5 kHz, w warunkach amperozwojów znamionowych, został opisany w publikacjach [5], [14]. W tym celu możliwe jest także zastosowanie aktywnych przekładników małej mocy [4], [15-18].

Układ pomiarowy

Układ pomiarowy do wyznaczania wartości błędów prądowego i kąтового transformacji harmonicznych prądów odkształconych przez przekładniki prądowe przedstawiono na rysunku 1. W tym systemie zastosowano cyfrowy watomierz do pomiaru wartości skutecznych i przesunięć fazowych harmonicznych napięć z rezystorów pomiarowych. Dokładność transformacji harmonicznych prądów odkształconych zastosowanego przekładnika wzorcowego została zweryfikowana w układzie amperozwojów znamionowych [5], [14]. Do pomiaru prądu wtórnego wzorcowego indukcyjnego przekładnika prądowego o znamionowej wartości skutecznej 5 A zastosowano rezystor 0,1 Ω , natomiast w przypadku prądu wtórnego 1 A zastosowano rezystor o wartości 1 Ω . Dodatkowo, w celu pomiaru prądu różnicowego zastosowano rezystor pomiarowy o wartości 10 Ω . Połączenie różnicowe dwóch indukcyjnych przekładników prądowych zostało przedstawione w normie [3], przy czym

wykorzystywane jest do określenia wartości błędu całkowitego indukcyjnych przekładników zabezpieczeniowych. Wartości rezystancji mają wpływ na obciążenie stron wtórnych badanego i wzorcowego przekładnika prądowego. Do generacji odkształconego prądu pierwotnego wykorzystano transformator wieloprądowy zasilany poprzez wzmacniacz sterowany przez generator arbitralny [12-13].



Rys. 1. Schemat układu pomiarowego do wyznaczania wartości błędów prądowego i kąтового przekładników prądowych względem wzorcowego indukcyjnego przekładnika prądowego

Na rysunku 1 zastosowano następujące oznaczenia: CW - cyfrowy watomierz, PZN - programowalne źródło napięcia zmiennego, TS - transformator separacyjny, TW - transformator wieloprądowy, TP - tor prądowy, WIPP - wzorcowy szerokopasmowy indukcyjny przekładnik prądowy, BIPP - badany indukcyjny przekładnik prądowy, R_L - rezystor stanowiący obciążenie strony wtórnej badanego indukcyjnego przekładnika prądowego, R_R - rezystor pomiarowy prądu różnicowego, R_S - rezystor pomiarowy prądu wtórnego szerokopasmowego wzorcowego indukcyjnego przekładnika prądowego,

stanowiący jednocześnie znamionowe obciążenie uzwojenia wtórnego.

Wartość skuteczną harmoniczną prądu wtórnego wzorcowego indukcyjnego przekładnika prądowego I_{2whk} można określić za pomocą wzoru:

$$(1) \quad I_{2whk} = \frac{U_{RShk}}{R_S}$$

U_{RShk} - wartość skuteczna hk harmonicznego napięcia na rezystorze pomiarowym R_S , R_S - wartość rezystancji rezystora pomiarowego R_S .

Wartość hk harmonicznego błędów całkowitego wyrażoną w procentach hk harmonicznego prądu pierwotnego $\varepsilon_{%lhk}$ oblicza się na podstawie zależności:

$$(2) \quad \varepsilon_{%lhk} = \frac{\frac{U_{RRhk}}{R_R}}{\frac{U_{RShk}}{R_S}} \cdot 100\%$$

U_{RRhk} - wartość skuteczna hk harmonicznego napięcia na rezystorze pomiarowym R_R , R_R - wartość rezystancji rezystora pomiarowego R_R .

Korzystając z twierdzenia Cosinusów i wykresu wskazowego określającego relację między błędami prądowym, kątowym i całkowitym, wartość skuteczną hk harmonicznego prądu wtórnego badanego indukcyjnego przekładnika prądowego I_{2bhk} wynosi [4-5]:

$$(3) \quad I_{2bhk} = \sqrt{\left(\frac{U_{RShk}}{R_S}\right)^2 + \left(\frac{U_{RRhk}}{R_R}\right)^2 - 2 \cdot \left(\frac{U_{RShk}}{R_S}\right) \cdot \frac{U_{RRhk}}{R_R} \cdot \cos \varphi_{hk}}$$

φ_{hk} - wartość przesunięcia fazowego między hk harmoniczną napięcia U_{RShk} na rezystorze pomiarowym R_S i hk harmoniczną napięcia U_{RRhk} na rezystorze pomiarowym R_R .

Procentowa wartość błędów prądowego transformacji hk harmonicznego prądu odkształconego przez badany indukcyjny przekładnik prądowy wynosi:

$$(4) \quad \Delta I_{hk} = \frac{I_{2bhk} - I_{2whk}}{I_{2whk}} \cdot 100\%$$

Wyznaczone wartości błędów całkowitego i prądowego transformacji hk harmonicznego pozwalają wyznaczyć błąd kątowy na podstawie zależności [4-6], [19]:

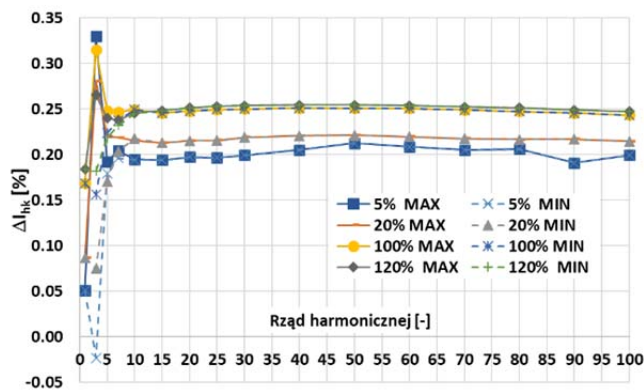
$$(5) \quad \delta_{Ihk} = \arcsin\left(\frac{\sqrt{\varepsilon_{%lhk}^2 - \Delta I_{hk}^2}}{100\%}\right)$$

Wartości maksymalne i minimalne błędów prądowego i kąowego transformacji harmonicznego

Badania dokładności w układzie pomiarowym z rysunku 1 przeprowadzono na seryjnie produkowanym indukcyjnym przekładniku prądowym. Znamionowa wartość skuteczna prądu pierwotnego wynosi 100 A, natomiast znamionowa wartość prądu wtórnego wynosi 5 A. Klasa dokładności transformacji prądu sinusoidalnego o częstotliwości 50 Hz wynosi 0,2, moc znamionowa wynosi 2, 5 W. Błędy prądowe i kątowe transformacji harmonicznego wyznaczono dla odkształconych prądów pierwotnych wynoszących 5%, 20%, 100% i 120% wartości znamionowej. Pomiary wykonano dla dwóch wartości rezystancyjnych obciążenia wtórnego badanego przekładnika. Odkształcony prąd zasilający badany indukcyjny przekładnik prądowy składa się z podstawowej harmonicznego o częstotliwości 50 Hz i pojedynczej wyższej harmonicznego, której częstotliwość wynosi od 100 Hz do 5 kHz. Dodatkowo procentowy udział wyższej harmonicznego w stosunku do składowej o podstawowej częstotliwości utrzymywany był na poziomie 10% w całym badanym zakresie prądów, obciążenia i częstotliwości. W przypadku harmonicznego od 2 do 13 badania dokładności

przeprowadzono, zmieniając wartość przesunięcia fazowego wyższej harmonicznego względem harmonicznego podstawowej z krokiem co 10° od 0° do 360° .

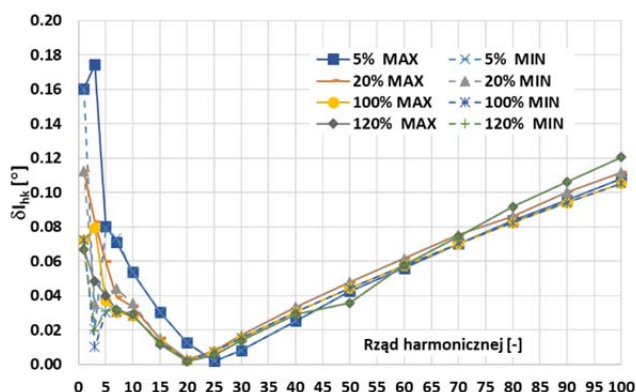
Na rysunkach 2, 3, 4 i 5 przedstawiono charakterystyki częstotliwościowe wartości maksymalnych i minimalnych błędów prądowego i kąowego transformacji harmonicznego przez badany indukcyjny przekładnik prądowy 100 A \ 5 A. Rysunek 2 zawiera wykresy błędów prądowego transformacji harmonicznego w zakresie częstotliwości od 50 Hz do 5 kHz przy obciążeniu uzwojenia wtórnego wynoszącym 0,625 W.



Rys. 2. Wartości maksymalne i minimalne błędów prądowego transformacji harmonicznego od 50 Hz do 5 kHz przez indukcyjny przekładnik prądowy o znamionowej przekładni 100 A \ 5 A, klasy 0,2 przy obciążeniu uzwojenia wtórnego wynoszącym 0,625 W

Dodatknie wartości błędów prądowego badanego indukcyjnego przekładnika prądowego wynikają z zastosowanej ułamkowej poprawki zwojowej i obniżonej wartości obciążenia uzwojenia wtórnego. Zmiana zadanego przesunięcia fazowego harmonicznego od rzędu 11 włącznie nie powoduje wykrywalnej zmiany wartości błędów prądowego. Wpływ przesunięcia fazowego zwiększa się wraz ze wzrostem wartości skutecznej wyższej harmonicznego i wraz z obniżeniem jej częstotliwości. Dlatego różnica między wartością maksymalną a minimalną błędów prądowego jest największa dla 3 harmonicznego i wynosi w przypadku 5% prądu znamionowego 0,35%.

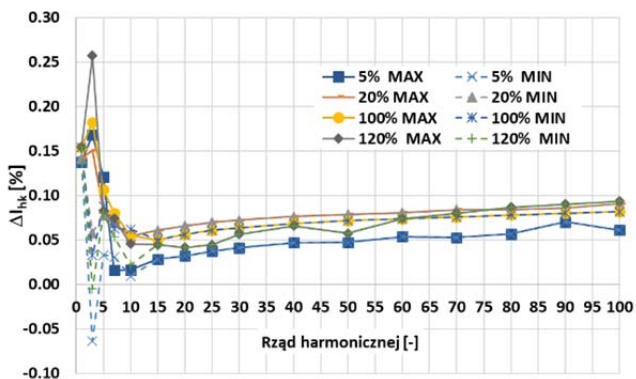
Na rysunku 3 przedstawiono wykresy błędów kąowego transformacji harmonicznego w zakresie częstotliwości od 50 Hz do 5 kHz przy obciążeniu uzwojenia wtórnego wynoszącym 0,625 W.



Rys. 3. Wartości maksymalne i minimalne błędów kąowego transformacji harmonicznego od 50 Hz do 5 kHz przez indukcyjny przekładnik prądowy o znamionowej przekładni 100 A \ 5 A klasy 0,2 przy obciążeniu uzwojenia wtórnego wynoszącym 0,625 W

W zakresie harmonicznym do 7 rzędu włącznie na przebieg charakterystyk częstotliwościowych błędu kąтового wykrywalny wpływ ma również przesunięcie fazowe wyższej harmonicznej w stosunku do podstawowej harmonicznej.

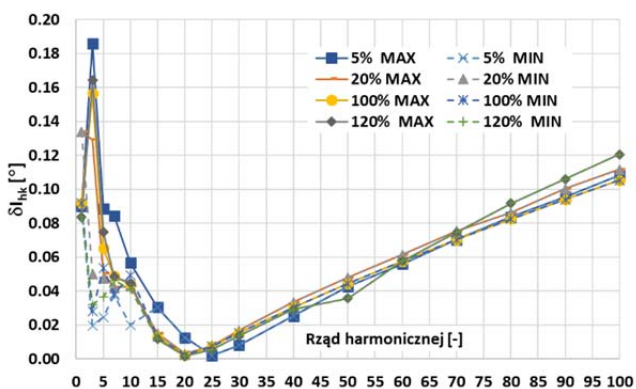
Rysunek 4 zawiera wykresy błędu prądowego transformacji harmonicznymi w zakresie częstotliwości od 50 Hz do 5 kHz przy obciążeniu uzwojenia wtórnego wynoszącym 2,5 W.



Rys. 4. Wartości maksymalne i minimalne błędu prądowego transformacji harmonicznymi od 50 Hz do 5 kHz przez indukcyjny przekładnik prądowy o znamionowej przekładni 100 A \ 5 A klasy 0,2 przy obciążeniu uzwojenia wtórnego wynoszącym 2,5 W

Zwiększenie obciążenia strony wtórnej badanego przekładnika prądowego spowodowało przesunięcie charakterystyk częstotliwościowych bliżej wartości ujemnych. Wynika to ze wzrostu wartości indukcji magnetycznej i natężenia pola magnetycznego w rdzeniu. W tym przypadku różnica między wartością maksymalną a minimalną błędu prądowego jest największa dla 3 harmonicznej i wynosi w przypadku 120% prądu znamionowego 0,27%.

Na rysunku 5 przedstawiono wykresy błędu kąowego transformacji harmonicznymi w zakresie częstotliwości od 50 Hz do 5 kHz przy obciążeniu uzwojenia wtórnego wynoszącym 2,5 W.



Rys. 5. Wartości maksymalne i minimalne błędu kąowego transformacji harmonicznymi od 50 Hz do 5 kHz przez indukcyjny przekładnik prądowy o znamionowej przekładni 100 A \ 5 A klasy 0,2 przy obciążeniu uzwojenia wtórnego wynoszącym 2,5 W

Dla zwiększonego obciążenia strony wtórnej badanego przekładnika prądowego nastąpił wzrost błędów kąowych transformacji podstawowej harmonicznej dla 20%, 100% i 120% prądu znamionowego. W przypadku 5% prądu znamionowego błąd ten pozostał na praktycznie niezmiennym poziomie. Bez względu na obciążenie błąd transformacji harmonicznymi o częstotliwości 5 kHz mieści się w zakresie od 0,10° do 0,12°.

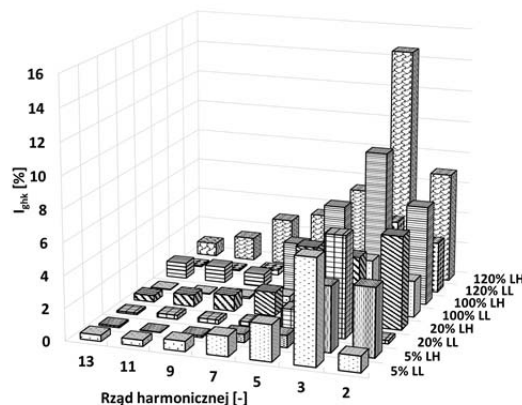
Generacja wyższych harmonicznymi prądu wtórnego

Na rysunku 6 przedstawiono procentowe wartości wyższych harmonicznymi w prądzie wtórnym badanego przekładnika prądowego wyznaczone podczas transformacji prądu sinusoidalnego o częstotliwości 50 Hz zgodnie ze wzorem:

$$(6) \quad I_{ghk} = \frac{I_{h1}}{I_{hk}} \cdot 100\%$$

I_{h1} - wartość skuteczna pierwszej harmonicznej prądu wtórnego badanego przekładnika prądowego, I_{hk} - wartość skuteczna hk harmonicznej prądu wtórnego badanego przekładnika prądowego.

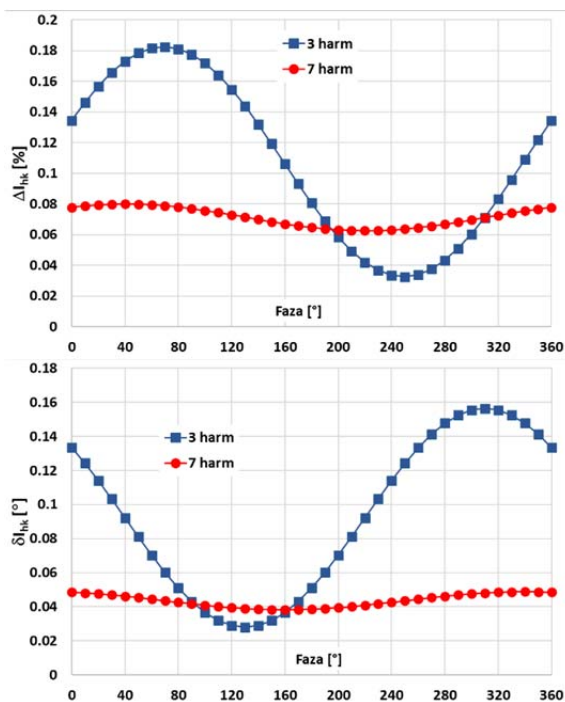
Udziały wyższych harmonicznymi wyznaczone dla dwóch obciążeń uzwojenia wtórnego badanego indukcyjnego przekładnika prądowego o przekładni 100 A \ 5 A.



Rys. 6. Procentowe wartości wyższych harmonicznymi w prądzie wtórnym badanego indukcyjnego przekładnika prądowego dla dwóch obciążeń uzwojenia wtórnego (LL – 0,625 W, LH – 2,5 W)

Zmiana wartości błędu kąowego i prądowego na skutek zmiany przesunięcia fazowego wyższej harmonicznej względem składowej o podstawowej częstotliwości wynika ze zjawiska generacji wyższych harmonicznymi w prądzie wtórnym indukcyjnych przekładników prądowych [20-21]. Poziom odkształcenia prądu wtórnego zależy w szczególności od rodzaju zastosowanego materiału magnetycznego rdzenia przekładnika, który to dla materiałów charakteryzujących się liniową charakterystyką magnesowania będzie najniższy. Ponadto, wartości i rzędy generowanych wyższych harmonicznymi przez indukcyjne przekładniki prądowe wynikają również z wartości prądu pierwotnego i obciążenia uzwojenia wtórnego. W przypadku niższych wartości prądów pierwotnych i jednocześnie obciążenia oraz w przypadku wyższych wartości prądów pierwotnych i jednocześnie obciążenia poziomy odkształcenia prądu wtórnego jest wysoki. Zjawisko to osiąga maksymalny poziom dla znamionowego obciążenia oraz 120% znamionowej wartości prądu pierwotnego przekładnika. Wynika to z przesunięcia punktu pracy tego przekładnika bliżej kolana charakterystyki magnesowania w obszar jej nieliniowości. Transformacja przez indukcyjne przekładniki prądowe wyższych harmonicznymi o tych samych częstotliwościach co generowane harmoniczne jest przyczyną zwiększania lub zmniejszania wartości uzyskiwanych błędów prądowego i kąowego. Wyznaczenie maksymalnych wartości tych błędów wymaga pełnej regulacji wartości przesunięcia fazowego zadawanej wyższej harmonicznej w prądzie odkształconym w stosunku do podstawowej harmonicznej. Umożliwia to dostosowanie kąta przesunięcia fazowego do harmonicznej generowanej przez przekładnik prądowy i uzyskanie dwóch granicznych wartości błędu prądowego i kąowego [21].

Na rysunkach 7 (a i b) przedstawiono dla znamionowych wartości prądu i obciążenia wykresy wpływu fazy zadanych wyższych harmonicznych rzędów 3 i 7 na wartości błędów prądowego i kąтового.



Rys. 7. Wpływ fazy harmonicznej na wartości błędu prądowego (a) i kąтового (b) dla znamionowych wartości prądu i obciążenia

Dla 7 harmonicznej różnice między wartościami maksymalnymi i minimalnymi błędów prądowego i kąтового w przypadku 3 harmonicznej wynosiły odpowiednio 0,15% i 0,13°, natomiast w przypadku 7 harmonicznej 0,02% i 0,01°.

Wnioski

Podczas sprawdzania dokładności transformacji harmonicznymi prądami odkształconymi przez indukcyjne przekładniki prądowe konieczne jest uwzględnienie wpływu odkształcenia prądu wtórnego. W tym celu w przypadku harmonicznymi od 2 do 13 pomiary błędów prądowego i kąтового należy wykonać, zmieniając wartość przesunięcia fazowego wyższej harmonicznej względem harmonicznej podstawowej z krokiem co najmniej 10° od 0° do 360°. Wpływ przesunięcia fazowego zwiększa się wraz ze wzrostem wartości skutecznej wyższej harmonicznej i obniżeniem jej częstotliwości. Zmiana wartości błędu kąтового i prądowego na skutek zmiany przesunięcia fazowego wyższej harmonicznej względem składowej o podstawowej częstotliwości wynika ze zjawiska generacji wyższych harmonicznych w prądzie wtórnym indukcyjnych przekładników prądowych. Poziom odkształcenia prądu wtórnego zależy w szczególności od rodzaju zastosowanego materiału magnetycznego rdzenia przekładnika, który to dla materiałów charakteryzujących się liniową charakterystyką magnesowania będzie najniższy. Ponadto, wartości i rzędy generowanych wyższych harmonicznych przez indukcyjne przekładniki prądowe wynikają również z wartości prądu pierwotnego i obciążenia uzwojenia wtórnego.

Autorzy: dr inż. Danuta Adamczewska, dr inż. Marek Orlikowski, mgr inż. Ernest Stano, Politechnika Łódzka, Instytut Mechatroniki Systemów Informatycznych, ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, E-mail: ernest.stano@p.lodz.pl.

LITERATURA

- [1] PN-EN 61869-6: Przekładniki -- Część 6: Dodatkowe wymagania ogólne dla przekładników małej mocy, PKN, 2017.
- [2] IEC 61869-103: Instrument transformers - The use of instrument transformers for power quality measurement. IEC, 2012
- [3] PN-EN 61869-2: Przekładniki -- Część 2: Wymagania szczegółowe dotyczące przekładników prądowych, PKN, 2013.
- [4] Kaczmarek M., Stano E., Proposal for extension of routine tests of the inductive current transformers to evaluation of transformation accuracy of higher harmonics, *Int. Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 113 (2019), 842-849.
- [5] Stano E., System pomiarowy do sprawdzania dokładności transformacji poszczególnych harmonicznymi prądu odkształconego przez indukcyjne przekładniki prądowe, *Przegląd Elektrotechniczny*, 96 (2020), nr 4, 187-190.
- [6] Kaczmarek M., Inductive current transformer accuracy of transformation for the PQ measurements, *Electric Power Systems Research*, 150 (2017), 169-176.
- [7] Kaczmarek M., Wide Frequency Operation of the Inductive Current Transformer with Ni80Fe20 Toroidal Core, *Electr. Power Compon. Syst.*, 10 (2014), nr 42, 1087-1094.
- [8] Crotti G., Femine D., Gallo D., Giordano D., Landi C., Letizia P., Luiso M., Calibration of current transformers in distorted conditions, *Proc. 22nd World Con. Int. Meas. Confederation*, Belfast, (2018), 36.
- [9] Cristaldi L., Faifer M., Laurano C., Ottoboni R., Toscani S., Zanoni M., A low-cost generator for testing and calibrating current transformers, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 68 (2019), nr 8, 2792-2799.
- [10] Crotti G., Calibration of Current Transformers in distorted conditions, *Journal of Physics: Conf. Series*, (2018) nr. 5, 1065
- [11] Ballal M. S., Wath M. G., Suryawanshi H. M., A novel approach for the error correction of CT in the presence of harmonic distortion, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 68 (2019), nr 10, 4015-4027.
- [12] Kaczmarek M., Kaczmarek P., Comparison of the Wideband Power Sources Used to Supply Step-Up Current Transformers for Generation of Distorted Currents, *Energies*, 13 (2020), nr 7, 1849.
- [13] Kaczmarek M., Stano E., Application of the inductive high current testing transformer for supplying of the measuring circuit with distorted current, *IET Electric Power Applications*, 13 (2019), nr 9, 1310-1317.
- [14] Stano E., Kaczmarek M., Wideband Self-Calibration Method of Inductive CTs and Verification of Determined Values of Current and Phase Errors at Harmonics for Transformation of Distorted Current, *Sensors*, 20 (2020), nr 8, 2167.
- [15] Crotti G., Gallo D., Giordano D., Landi C., Luiso M., Cherbauchich C., Mazza P., Low cost measurement equipment for the accurate calibration of voltage and current transducers, *Proc. IEEE Int. Instrum. Meas. Technol. Conf. (I2MTC)*, Montevideo, (2014), 202-206.
- [16] Yu J. C., Li D. Y., Li J., Li H., Li Z. C., Design and validation of broadband calibration system for fiber-optical current transformers, *Proc. Int. Conf. Clean Energy Elect. Syst.*, Nanjing, (2019), 2729.
- [17] Tong Y., Liu B., Abu-Siada A., Li Z., Li C., Zhu B., Research on calibration technology for electronic current transformers, *Proc. Condition Monitor. Diagnosis (CMD)*, Perth, (2018), 15.
- [18] Mingotti A., Peretto L., Tinarelli R., Angioni A., Monti A., Ponci F., A simple calibration procedure for an LPIT plus PMU system under off nominal conditions, *Energies*, 12 (2019), nr 24, 4645.
- [19] Kaczmarek M., A practical approach to evaluation of accuracy of inductive current transformer for transformation of distorted current higher harmonics. *Electric Power Systems Research*, 119 (2015), 258-265.
- [20] Kaczmarek M., The source of the inductive current transformers metrological properties deterioration for transformation of distorted currents. *Electric Power Systems Research*, 107 (2014), 45-50.
- [21] Kaczmarek M., Stano E., Nonlinearity of Magnetic Core in Evaluation of Current and Phase Errors of Transformation of Higher Harmonics of Distorted Current by Inductive Current Transformers, *IEEE Access*, 8 (2020), 118885-118898, 2020.