

System pomiarowy do sprawdzania dokładności transformacji poszczególnych harmoniczných prądu odkształconego przez indukcyjne przekładniki prądowe

Streszczenie. Z uwagi na nieliniowość rdzenia magnetycznego dokładność transformacji indukcyjnych przekładników prądowych zależy od wartości indukcji magnetycznej, a zatem wartości skutecznej i kształtu prądu pierwotnego oraz obciążenia uzwojenia wtórnego. W artykule przedstawiono zastosowanie opracowanego systemu pomiarowego do wyznaczenia dodatkowego wpływu częstotliwości wyższej harmoniczných odkształconego prądu pierwotnego na wartości błędów prądowego i kąowego jej transformacji.

Abstract. Due to the non-linearity of the magnetic core transformation accuracy of inductive current transformers depends on value of the magnetic flux density and therefore the rms value and shape of the primary current and load of the secondary winding. The article presents application of developed measuring system to determine additional influence of frequency of higher harmonic of distorted primary current on values of current and phase errors of its transformation. (Measuring system for testing wideband transformation accuracy of higher harmonics of distorted current by inductive current transformers).

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

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

Wstęp

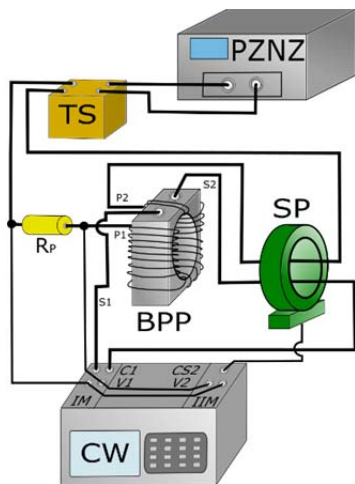
Indukcyjne przekładniki prądowe są powszechnie stosowane w sieci elektroenergetycznej do transformacji prądów o znacznych wartościach na prądy o wartościach dopasowanych do układów wejściowych aparatury pomiarowej lub zabezpieczeniowej. Urządzenia te zyskały swoją popularność z uwagi na niezawodność i wysoką dokładność transformacji prądów sinusoidalnych o częstotliwości 50 Hz (60 Hz). Jednakże w wyniku obniżenia jakości energii elektrycznej indukcyjne przekładniki prądowe coraz częściej transformują prądy odkształcone. Z tego względu konieczne stało się określenie wymagań dotyczących dokładności transformacji poszczególnych harmoniczných do częstotliwości co najmniej 2 kHz wg. IRiESD (Tauron, Enea, PGE). Aktualnie żadne normy nie określają także sposobu sprawdzania dokładności indukcyjnych przekładników w warunkach transformacji prądów odkształconych. Zawarte w PN-EN 61869-6:2017 wymagania normalizacyjne dla wyższych harmoniczných prądu dotyczą tylko i wyłącznie przekładników małej mocy [1]. Wyniki przeprowadzonych dotychczas badań umożliwiły opracowanie propozycji zaleceń normalizacyjnych rozszerzających wymagania zawarte w normie PN-EN 61869-2 dla indukcyjnych przekładników prądowych o sprawdzenie dokładności transformacji wyższych harmoniczných [2-5]. Typowy zakres znamionowych prądów pierwotnych seryjne produkowanych indukcyjnych przekładników prądowych wynosi od 50 A do 2,5 kA, a specjalnych konstrukcji nawet 10 kA. Jednakże metoda bezpośrednia wymaga zastosowania układu probierczego i przekładnika lub przetwornika wzorcowego zdolnego do wytworzenia prądów o wartości skutecznej wynikającej ze znamionowego prądu pierwotnego badanego indukcyjnego przekładnika prądowego [3], [6]. Tym samym konieczne było przeprowadzenie dodatkowych badań i analiz czynników warunkujących częstotliwościowy zakres pracy wielkoprądowych układów probierczych w warunkach transformacji prądów odkształconych [7]. Ponadto, w celu uzyskania wymaganych wartości prądów odkształconych konieczne jest zastosowanie dużej mocy źródła zasilania charakteryzującego się możliwością generacji przebiegów odkształconych o programowalnych poziomach poszczególnych harmoniczných i ich przesunięć fazowych.

Powoduje to znaczące zwiększenie kosztów budowy układu probierczego działającego w szerokim zakresie częstotliwości. Dodatkowy problem stanowi coraz wyższa wraz z częstotliwością wymagana wartość skuteczna harmoniczných napięcia zasilającego, która wynika ze wzrostu reakcji rozproszenia uzwojeń transformatora probierczego i toru prądowego dla wyższej harmoniczných prądu odkształconego. Alternatywą dla metody bezpośredniej sprawdzania dokładności transformacji prądów odkształconych z zastosowaniem opracowanego systemu może być w przypadku przekładników przelotowych metoda z zastosowaniem amperozwojów znamionowych [4], [8-9]. Wyniki przeprowadzonych badań wstępnych wskazują, że znaczna część produkowanych seryjne indukcyjnych przekładników prądowych działa w szerokim zakresie częstotliwości i błędy transformacji harmoniczných nawet do 100-ej włącznie nie przekraczają wartości granicznych błędów przekładni i błędów kąowych określonych dla przekładników małej mocy [1]. W związku z czym także zainstalowane w stacjach elektroenergetycznych indukcyjne przekładniki prądowe potencjalnie mogą być stosowane do transformacji prądów odkształconych. Wymaga to jednak sprawdzenia ich dokładności w tych warunkach pracy [10-12]. Głównym źródłem błędów transformacji indukcyjnych przekładników prądowych jest rdzeń magnetyczny, którego właściwości określone są przez charakterystyki magnesowania i strat mocy czynnej. Należy podkreślić, że ze względu na nieliniowość rdzenia magnetycznego dokładność transformacji indukcyjnych przekładników prądowych zależy od wartości indukcji magnetycznej, a zatem wartości skutecznej i kształtu prądu pierwotnego oraz obciążenia uzwojenia wtórnego [6], [9], [13]. Opracowana metodyka badań i system pomiarowy umożliwiają wyznaczenie błędów prądowych i kąowych transformacji harmoniczných prądów odkształconych przez indukcyjne przekładniki prądowe. Wysoka dokładność pomiaru uzyskana została poprzez bezpośredni pomiar wartości skutecznych poszczególnych harmoniczných prądu różnicowego, czyli błędu całkowitego [4-6], [9], [13].

Metodyka badań i układ pomiarowy

Badania wpływu częstotliwości harmoniczných na wartości błędów prądowego i kąowego jej transformacji

wykonano w układzie pomiarowym przedstawionym na rysunku 1.



Rys. 1. System pomiarowy przeznaczony do sprawdzania dokładności transformacji harmonicznych prądów odkształconych w warunkach amperozwojów znamionowych [6]

Na rysunku 1 zastosowano następujące oznaczenia: CW - cyfrowy watomierz, R_p - rezystor pomiarowy do prądu pierwotnego, SP - sonda prądowa, BPP - badany w warunkach amperozwojów znamionowych przelotowy indukcyjny przekładnik prądowy, PZMZ - programowalne źródło napięcia zmiennego, TS - transformator separacyjny.

Sonda prądowa wykorzystywana jest do pomiaru prądu różnicowego, który umożliwi wyznaczenie błędu całkowitego zgodnie z zależnością [3]:

$$(1) \quad \varepsilon_{\%lh} = \frac{k_S \cdot U_{Rkh}}{I_{1kh}} \cdot 100\%$$

gdzie: U_{Rkh} - wartość skuteczna kh-tej harmonicznej napięcia wyjściowego sondy prądowej, k_S - współczynnik transformacji prąd-napięcie sondy (1:1), I_{1kh} - wartość skuteczna kh-tej harmonicznej prądu pierwotnego.

Wartość skuteczna poszczególnych harmonicznych prądu wtórnego wyznaczana jest na podstawie zależności [3]:

$$(2) \quad I_{2kh} = \sqrt{I_{1kh}^2 + k_S \cdot U_{Rkh}^2 - 2 \cdot I_{1kh} \cdot k_S \cdot U_{Rkh} \cdot \cos \varphi_{1Rkh}}$$

gdzie: I_{2kh} - wartość skuteczna kh-tej harmonicznej prądu wtórnego, φ_{1Rkh} - kąt między kh-tą harmoniczną prądu pierwotnego i napięcia wyjściowego sondy prądowej. Znak błędny prądowy wyznaczany jest na podstawie bezpośredniego pomiaru harmonicznych prądu pierwotnego i wtórnego przez drugi moduł cyfrowego watomierza. Błąd prądowy w warunkach amperozwojów znamionowych obliczany jest na podstawie zależności [3]:

$$(3) \quad \Delta I_{kh} = \frac{k_{PP} I_{2kh} - I_{1kh}}{I_{1kh}} \cdot 100\%$$

Wyznaczone wartości błędów całkowitego i prądowego pozwalają wyznaczyć błąd kątowy na podstawie zależności [9]:

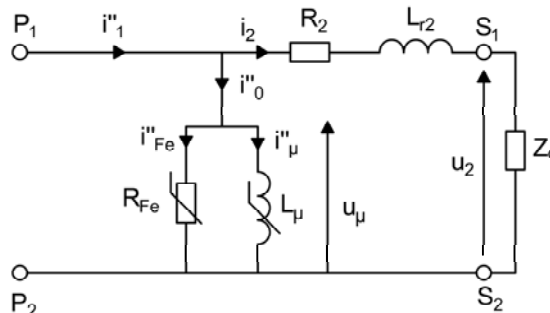
$$(4) \quad \delta_{Ikh} = \arcsin\left(\frac{\varepsilon_{\%lh}^2 - \Delta I_{kh}^2}{100\%}\right)$$

Znak błędny kątowy wyznaczany jest na podstawie bezpośredniego pomiaru harmonicznych prądu pierwotnego

i wtórnego przez drugi moduł cyfrowego watomierza. Programowalne źródło zapewnia generację przebiegu napięcia zasilającego pozwalającego uzyskać wymagane do badań udziały wyższych harmonicznych w odkształconym prądzie pierwotnym.

Obiekty badań i wyniki pomiarów

Na rysunku 2 przedstawiono schemat zastępczy indukcyjnego przekładnika prądowego.



Rys. 2. Schemat zastępczy indukcyjnego przekładnika prądowego

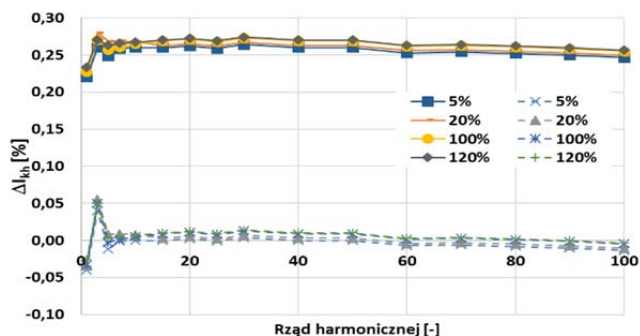
Na rysunku 2 zastosowano następujące oznaczenia (symbol " oznacza wielkości przeliczone na stronę wtórną): i''_1 - wartość chwilowa prądu pierwotnego, i_2 - wartość chwilowa prądu wtórnego, i''_0 - wartość chwilowa prądu jałowego, i''_{Fe} - wartość chwilowa prądu związana ze stratami mocy czynnej w rdzeniu, i''_{μ} - wartość chwilowa prądu magnesującego rdzeń, u_2 - wartość chwilowa napięcia wtórnego, R_{Fe} - rezystancja zastępcza rdzenia, L_{μ} - indukcyjność zastępcza rdzenia, L_{r2} - indukcyjność rozproszenia uzwojenia wtórnego, Z_0 - impedancja obciążenia uzwojenia wtórnego.

W schemacie zastępczym pominięte zostało uzwojenie pierwotne, ponieważ wartości jego parametrów nie wpływają na pracę przekładnika prądowego ze względu na fakt, że układ zasilany jest przez prąd pierwotny. Strumień główny w rdzeniu przekładnika jest niewielki i wynika z wartości prądu jałowego, czyli różnicy strumieni pochodzących od uzwojeń wtórnego i pierwotnego.

Podczas badań wpływu częstotliwości wyższej harmonicznej odkształconego prądu pierwotnego na dokładność jej transformacji sprawdzono 20 sztuk indukcyjnych przekładników prądowych różnych producentów dostępnych na rynku krajowym przeznaczonych do sieci niskiego napięcia. Pomiaru wykonano dla dwóch wartości rezystancyjnego obciążenia uzwojenia wtórnego badanego przekładnika i odkształconych prądów pierwotnych wynoszących 5%, 20%, 100% i 120% wartości skutecznej jego znamionowego prądu. Odkształcony prąd pierwotny składał się z harmonicznej podstawowej o częstotliwości 50 Hz i pojedynczej wyższej harmonicznej o częstotliwości od 100 Hz do 5 kHz i wartości wynoszącej 10% harmonicznej podstawowej. Z uwagi na zastosowanie metody amperozwojów znamionowych badania zostały ograniczone do przekładników typu przelotowego na szynę lub przewód o wartości znamionowego prądu pierwotnego od 100 A do 300 A (klas dokładności 0,2 i 0,5). W przypadku wyższych wartości prądów pierwotnych ze względu na wielkość okna przekładnika nie było możliwe wykonanie dodatkowego uzwojenia.

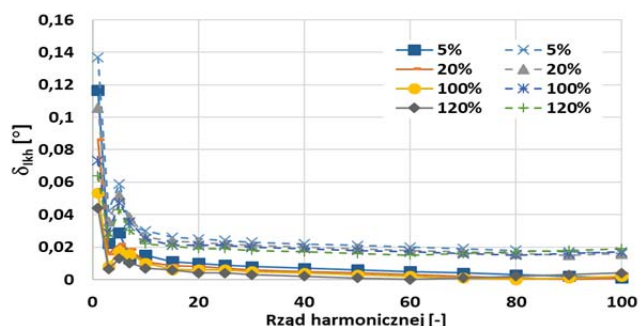
Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono wyznaczone wartości błędów prądowego i kątowego transformacji harmonicznych od 50 Hz do 5 kHz przez seryjnie produkowany indukcyjny przekładnik prądowy o znamionowej przekładni prądowej

100 A na 1 A, klasy 0,2 przy obciążeniach uzwojenia wtórnego mocą znamionową 2,5 W i 25% jej wartości.



Rys. 3. Błędy prądowe transformacji harmoniczných od 50 Hz do 5 kHz przez przekładnik prądowy o znamionowej przekładni 100 A \ 1 A klasy 0,2 przy obciążeniach uzwojenia wtórnego 2,5 W i 25% jej wartości

Dla zadanej wartości indukcji w rdzeniu przekładnika wynikającej z obciążenia uzwojenia wtórnego, wartości błędu prądowego zależą od wartości skutecznej prądu pierwotnego i wypadkowej przenikalności dynamicznej materiału rdzenia związanej z przebiegiem transformowanego prądu odkształconego. Zastosowana ułamekowa poprawka zwojowa powoduje otrzymanie dodatnich wartości błędu prądowego, przy czym nie wpływa na wartości błędu kąowego. Wzrost dodatniej wartości błędu prądowego wraz z częstotliwością transformowanej harmoniczných niższego rzędu wynika ze wzrostu reaktancji magnesującej i zmniejszenia wartości prądu magnesującego. (rys.2). Maksymalna wartość błędu prądowego +0,27% osiągną jest dla 40-ej harmoniczných dla minimalnej wartości składowej biernej prądu jałowego. Minimalna wartość tej składowej wynika ze wzrostu reaktancji magnesującej z częstotliwością nawet w przypadku ewentualnego obniżenia przenikalności dynamicznej. Wzrost obciążenia rezystancyjnego uzwojenia wtórnego powoduje proporcjonalne obniżenie dodatniej wartości błędu prądowego indukcyjnego przekładnika prądowego bez względu na częstotliwość transformowanej wyższej harmoniczných. Dalsze dociążenie uzwojenia wtórnego prowadzi do wzrostu błędu prądowego w kierunku wartości ujemnych. Charakterystyczną cechą seryjnie produkowanych indukcyjnych przekładników prądowych jest wzrost błędów transformacji harmoniczných niższego rzędu szczególnie 3-ej w wyniku odkształcenia prądu wtórnego.

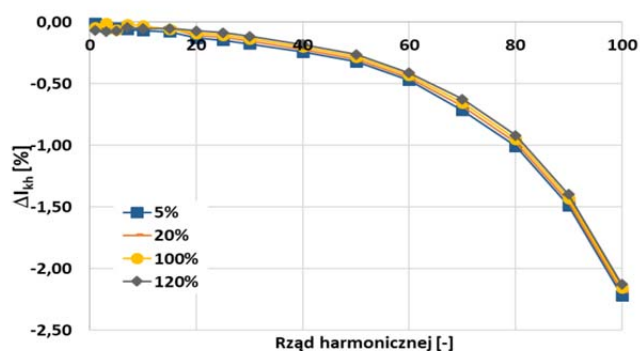


Rys. 4. Błędy kąowe transformacji harmoniczných od 50 Hz do 5 kHz przez przekładnik prądowy o znamionowej przekładni 100 A \ 1 A klasy 0,2 przy obciążeniach uzwojenia wtórnego 2,5 W i 25% jej wartości

Podobnie jak w przypadku błędu prądowego obniżenie dodatniej wartości błędu kąowego wraz z częstotliwością

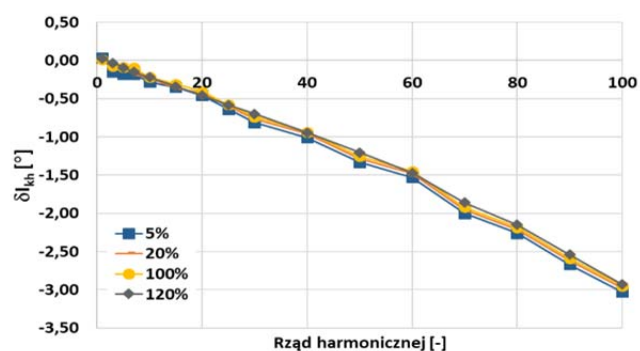
transformowanej harmoniczných niższego rzędu wynika ze wzrostu reaktancji magnesującej i zmniejszenia wartości prądu magnesującego (rys.2). Wzrost obciążenia rezystancyjnego uzwojenia wtórnego powoduje wzrost błędu kąowego transformacji dla wszystkich harmoniczných, jednakże przyjmuje najwyższą wartość dla harmoniczných podstawowej i ze wzrostem częstotliwości zanika. Ponadto, ze względu na wzrost odkształcenia prądu wtórnego wyraźnie wyższą wartość przyjmuje błąd transformacji harmoniczných 3-ego rzędu. Wyniki badań przekładników tego producenta o przekładniach 300 A na 5 A lub 1 A oraz 100 A na 5 A wykazały także na porównywalną dokładność transformacji harmoniczných.

Na rysunkach 5 i 6 przedstawiono wyznaczone wartości błędów prądowego i kąowego transformacji harmoniczných od 50 Hz do 5 kHz przez seryjnie produkowany indukcyjny przekładnik prądowy o znamionowej przekładni prądowej 300 A na 5 A i obciążeniu uzwojenia wtórnego 2,5 W.



Rys. 5. Błędy prądowe transformacji harmoniczných od 50 Hz do 5 kHz przez seryjnie produkowany indukcyjny przekładnik prądowy o znamionowej przekładni prądowej 300 A \ 5 A i obciążeniu uzwojenia wtórnego 2,5 W

Przedstawione wyniki na rysunkach 5 i 6 dotyczą badań przekładnika klasy 0,2. Ze względu na zastosowanie przez tego producenta innego materiału magnetycznego wyniki mają zupełnie inny przebieg, niż w przypadku badanego przekładnika 100 A \ 1 A. Wynika to ze wzrostu prądu jałowego wraz ze wzrostem częstotliwości poszczególnych wyższych harmoniczných.



Rys. 6. Błędy kąowe transformacji harmoniczných od 50 Hz do 5 kHz przez seryjnie produkowany indukcyjny przekładnik prądowy o znamionowej przekładni prądowej 300 A \ 5 A i obciążeniu uzwojenia wtórnego 2,5 W

Zastosowanie poprawki zwojowej w drugim badanym indukcyjnym przekładniku prądowym spowodowało uzyskanie praktycznie zerowego błędu prądowego przy znamionowym obciążeniu uzwojenia wtórnego dla podstawowej harmoniczných 50 Hz, nawet w przypadku

wysokich wartości prądów I_{Fe} oraz I_{μ} . Wzrost wartości błędu kąтового w kierunku ujemnym wskazuje na dominujący wpływ prądu I_{Fe} wynikającego ze wzrostu reaktancji magnesującej i zmniejszenia wartości prądu magnesującego z częstotliwością.

Podobnie jak w przypadku transformacji prądów sinusoidalnych o częstotliwości wyższej niż 50 Hz, dokładność transformacji wyższych harmonicznych prądu odkształconego przez indukcyjnego przekładnik prądowy jest wprost proporcjonalna do przenikalności rdzenia i ich częstotliwości [14]:

$$(5) \quad \Delta I_{kh}, \delta I_{kh} \sim \frac{S_{zn} \cdot I_{Fe}}{f_h \cdot \mu \cdot S_{Fe} \cdot (I_{1zn} \cdot z_1)^2}$$

gdzie: S_{zn} – moc znamionowa, I_{Fe} - średnia długość drogi strumienia magnetycznego w rdzeniu, f_h – częstotliwość wyższej harmonicznej prądu, μ – przenikalność magnetyczna rdzenia, S_{Fe} – pole powierzchni przekroju poprzecznego rdzenia, I_{1zn} – wartość skuteczna znamionowego prądu pierwotnego, z_1 – liczba zwojów uzwojenia pierwotnego.

Na podstawie analizy wzoru (5) można potwierdzić wcześniej przedstawione wnioski. Dla przekładnika 100 A na 5 A nie występuje spadek przenikalności magnetycznej rdzenia wraz z częstotliwością transformowanej harmonicznej, dlatego dokładność wzrasta dla harmonicznych wyższego rzędu. Dla badanego przekładnika 300 A na 5 A występuje spadek przenikalności magnetycznej rdzenia i dokładność maleje wraz z częstotliwością transformowanych wyższych harmonicznych.

Wnioski

Dokładność transformacji harmonicznych prądów odkształconych przez indukcyjne przekładniki prądowe niskiego napięcia jest uwarunkowana głównie przez właściwości magnetyczne rdzenia. Właściwości te wynikają z charakterystyk częstotliwościowych przenikalności magnetycznej i strat mocy czynnej w rdzeniu. Zastosowanie materiałów magnetycznych zapewniających utrzymanie lub wzrost wartości reaktancji magnesującej wraz z częstotliwością transformowanej harmonicznej prowadzi do uzyskania w szerokim zakresie częstotliwości wysokiej dokładności indukcyjnych przekładników prądowych. Dlatego też przekładniki prądowe pierwotnie zaprojektowane do transformacji prądów sinusoidalnych o częstotliwości 50 Hz mogą zapewnić dokładność transformacji harmonicznych prądów odkształconych zgodną z wymaganiami normy PN-EN 61869-6: 2016, a nawet zapewnić wyższą dokładność niż dla harmonicznej podstawowej. Z uwagi na wzrost jakości materiałów magnetycznych stosowanych w indukcyjnych przekładnikach prądowych, wymagany jest stosunkowo niewielki wzrost częstotliwościowego zakresu ich pracy (100 krotny w przypadku pomiarów jakości energii lub 13

krotny w przypadku jej rozliczeń), możliwy bez wzrostu nakładów wynikających z kosztów produkcji. W konsekwencji już zainstalowane w sieci elektroenergetycznej indukcyjne przekładniki prądowe mogą zapewnić wysoką dokładność transformacji harmonicznych, jednak wymagają odpowiedniej weryfikacji.

Autor: Ernest Stano, Politechnika Łódzka, Wydział Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki, Instytut Mechatroniki i Systemów Informatycznych, ul. Stefanowskiego 18/22, 90 - 924 Łódź, ernest.stano@p.lodz.pl.

LITERATURA

- [1] PN-EN 61869-6: Przekładniki -- Część 6: Dodatkowe wymagania ogólne dla przekładników małej mocy, PKN, 2017.
- [2] PN-EN 61869-2: Przekładniki -- Część 2: Wymagania szczegółowe dotyczące przekładników prądowych, PKN, 2013.
- [3] Kaczmarek M., Stano E., Proposal for extension of routine tests of the inductive current transformers to evaluation of transformation accuracy of higher harmonics, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 113 (2019), 842-849.
- [4] 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.
- [5] Nowicz R., Kaczmarek M., Propozycje zaleceń normalizacyjnych do badań dokładności przekładników prądowych dla przebiegów odkształconych, *Przegląd Elektrotechniczny*, (2013) nr 2a, 72-74.
- [6] Kaczmarek M., Inductive current transformer accuracy of transformation for the PQ measurements, *Electric Power Systems Research*, 150 (2017), 169-176.
- [7] 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.
- [8] Cataliotti A., Cosentino V., Crotti G., Delle Femine A., Di Cara D., Gallo D., Giordano D., Landi C., Luiso M., Modarres M., Tine G., Compensation of Nonlinearity of Voltage and Current Instrument Transformers, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 68 (2019), nr 5, 1322-1332.
- [9] 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.
- [10] Brandolini A., Faifer M., Ottoboni R., A simple method for the calibration of traditional and electronic measurement current and voltage transformers, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 58 (2009), nr 5, 1345-1353.
- [11] Ripka P., Draxler K., Styblíková R., DC-Compensated Current Transformer, *Sensors*, 114 (2016), nr 16.
- [12] Kaczmarek M., Measurement error of non-sinusoidal electrical power and energy caused by instrument transformers, *IET Generation, Transmission & Distribution*, 10 (2016), nr 14, 3492-3498.
- [13] Kaczmarek M., Estimation of the inductive current transformer derating for operation with distorted currents, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, 2 (2014), nr 2, 363-366.
- [14] Starczakow W., Przekładniki, PWT, Warszawa 1959.