

Bronisław Biel, ELPRO-7 Sp. z o.o., Zabrze  
Agnieszka Jakubowska, Politechnika Śląska, Gliwice

## KOREKCJA KSZTAŁTU PRĄDU WTÓRNEGO PRZEKŁADNIKA PRĄDOWEGO

### CORRECTION OF THE SECONDARY CURRENT SHAPE OF CURRENT TRANSFORMER

**Streszczenie:** Prądy mierzone w zastosowaniach przemysłowych osiągają bardzo duże wartości, a jednocześnie kształty przebiegów są coraz bardziej odkształcone. W przypadku pomiaru prądu zmiennego o dużym natężeniu musi być stosowany przekładnik prądowy. Stosowany przekładnik powinien tylko zmienić skalę przebiegu, zachowując jego kształt. Niestety przekładniki prądowe zniekształcają jego kształt. Zniekształcenia te zależą głównie od zawartości harmonicznnych w prądzie pierwotnym oraz zniekształceń wprowadzanych przez rdzeń ferromagnetyczny. Celem artykułu jest określenie metodyki zminimalizowania zniekształceń przebiegu prądu wtórnego wprowadzanych przez przekładnik, przy pozostawieniu zniekształceń przebiegu pierwotnego. Minimalizacja zniekształceń nie polega na idealizacji parametrów rdzenia, ale na opracowaniu algorytmu przetwarzania próbek, przy wykorzystaniu parametrów przekładnika. W metodzie tej parametry przekładnika określa się na podstawie danych z tabliczki znamionowej oraz pomiarów. Pomiary te wykonywane są bez ingerencji w jego wnętrze. Przedstawiona metoda umożliwi dokładniejsze odwzorowanie kształtu przebiegu prądu mierzonego i będzie mogła być stosowana w przemyśle. Może być ona stosowana do przekładników zarówno projektowanych jak i już będących w eksploatacji.

**Abstract:** The currents measured in industrial applications reach very high values and at the same time their courses are more and more distorted. In the case of the measurement of alternating current of very high intensity it is necessary to use a current transformer. Such a current transformer should only change the scale of the course but retain its shape. Unfortunately, current transformers distort the shape of the course. These distortions depend mainly on the harmonic content in the primary current and the distortions caused by the ferromagnetic core. The purpose of the article is to define the methodology to minimize the distortion of the secondary current caused by the current transformer, while leaving the distortion of the original course. Minimizing distortions does not consist in the idealization of core parameters but on the development of the algorithm for processing samples using the CT ratio parameters. In this method CT ratio parameters are determined on the basis of the data specified on the nameplate as well as on the basis of measurements. These measurements are carried out without intervention in its interior. The method presented enables more accurate reproduction of the shape of current being measured and can be applied in the industry. The method can be used both for transformers at the design stage and those already in operation.

**Słowa kluczowe:** przekładnik prądowy, uzwojenie wtórne, krzywa magnesowania, pętla histerezy, energia strat w rdzeniu, przebieg odkształcony, błąd prądowy, błąd całkowity, błąd kształtu.

**Keywords:** current transformer, secondary winding, the magnetization curve, hysteresis loop, the energy loss in the core, process deformed, current error, total error, shape error.

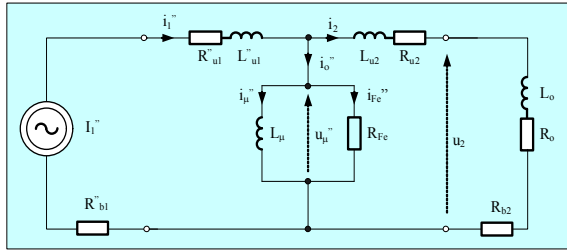
### 1. Wstęp

Przekładniki prądowe opatentowane zostały przez Sebastiana Ferrantiego ponad 130 lat temu i od tej pory prowadzone są nieprzerwalnie badania w celu zmniejszenia ich błędów. Zmniejszenie błędów przekładników prądowych uzyskano dzięki postępom w inżynierii materiałowej. W wyniku rozwoju powstały m.in. blachy transformatorowe anizotropowe, permaloje, taśmy amorficzne. Opracowano również różne układy połączeń przekładników prądowych pozwalające zmniejszyć błędy pomiarowe, takie jak przekładnik Brooksa i Holtza, przekładnik

dwurdzeniowy. Opracowano także rozwiązania pozwalające zmniejszyć błąd pomiarowy takie jak: korekcja uzwojeń, domagnesowanie rdzenia, zminimalizowanie błędów środkami zewnętrznymi, itd. [1].

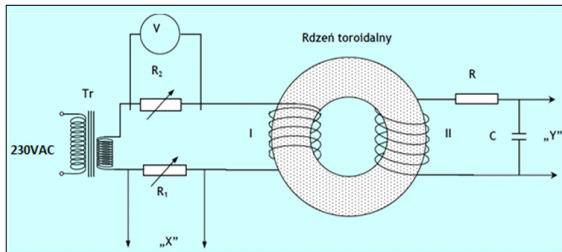
W niniejszej pracy przedstawiono nowatorskie podejście do wyznaczenia kształtu prądu pierwotnego oraz znacznego zmniejszenia błędu pomiarowego przekładnika prądowego w oparciu o przeprowadzony pomiar prądu wtórnego.

## 2. Wyznaczanie parametrów schematu zastępczego przekładnika prądowego



Rys. 1. Schemat zastępczy obwodu przekładnika prądowego

W celu wyznaczenia parametrów schematu zastępczego (rys. 1) konieczna jest znajomość charakterystyki magnesowania rdzenia przekładnika prądowego. Powszechny sposób jej wyznaczenia przedstawia rys. 2.



Rys. 2. Schemat układu pomiarowego [10]

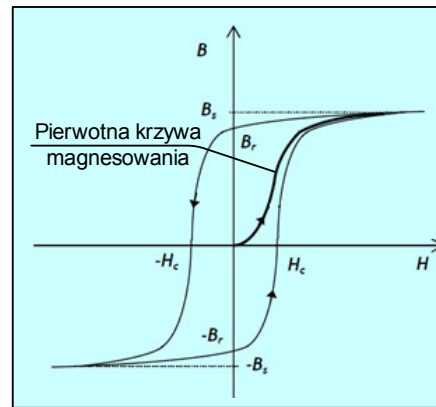
Spadek napięcia na rezystancji  $R_1$  jest proporcjonalny do prądu  $i_1$ . Iloczyn prądu i liczby zwojów strony pierwotnej  $N_1$  jest równy iloczynowi natężenia pola magnetycznego  $H$  i zastępczej długości obwodu magnetycznego  $l_{Fe}$ . Napięcie to jako  $U_{R1}$  jest podawane na kanał odchylenia poziomego „X” oscyloskopu pomiarowego. Natomiast spadek napięcia na pojemności  $C$  odwzorowuje wartość indukcji pola magnetycznego. Napięcie to jako  $U_C$  podawane jest na kanał odchylenia pionowego „Y” oscyloskopu. Stosując odpowiednie przeliczenia można otrzymać pętlę histerezy wykreśloną w rzeczywistych jednostkach, tj. natężenia pola magnetycznego  $H$  (A/m) oraz indukcji  $B$  (T, tj. Vs/m<sup>2</sup>).

Przez pomiar spadku napięcia na  $R_1$  (pomiar prądu  $i_1$ ) wyznacza się natężenie pola magnetycznego  $H$ .

$$H = \frac{\sqrt{2} \cdot I_1 \cdot N_1}{l_{Fe}} \quad (1)$$

Natomiast przez pomiar spadku napięcia na kondensatorze  $C$  wyznacza się indukcję  $B$ .

$$B = \frac{R \cdot C}{N_2 \cdot A_{Fe}} \sqrt{2} \cdot U_C \quad (2)$$



Rys. 3. Pętla histerezy z zaznaczonymi jej charakterystycznymi punktami [10]

Przedstawiona powyżej metoda dotyczy tylko pogładowego wyznaczenia charakterystyki  $B=f(H)$ , tzw. pętli histerezy.

Należy zwrócić uwagę na fakt, że aby wyznaczyć wartość indukcji  $B$  oraz natężenia pola magnetycznego  $H$ , konieczna jest znajomość przekroju poprzecznego rdzenia  $A_{Fe}$  oraz zastępczej jego długości  $l_{Fe}$ . Powyższe dane przekładników prądowych są trudno dostępne, m.in. dla użytkowników. Dane te najczęściej zawarte są w dokumentacjach konstrukcyjnych tych przekładników.

Idea niniejszego rozwiązania polega na tym, że korzystając z danych znamionowych podanych na tabliczce znamionowej danego przekładnika prądowego oraz przeprowadzonych pomiarów elektrycznych można dokonać wyliczenia parametrów schematu zastępczego przekładnika prądowego. Metoda ta nie wymaga ingerencji w jego wnętrze. Wyznaczenie parametrów takich jak impedancja obciążenia oraz rezystancja uzwojenia wtórnego można dokonać metodami tradycyjnymi, np. metodą techniczną. Natomiast reaktancję rozproszenia uzwojenia wtórnego  $X_{u2}$  można dokonać dwiema metodami, tj.:

- 1) przy znajomości (np. zmierzonej) rezystancji uzwojenia wtórnego  $R_{u2}$  w zależności od budowy przekładnika prądowego z tabeli wyznacza się  $\text{tg} \varphi_{u2}$  [1], a następnie wylicza się wartość reaktancji rozproszenia uzwojenia

$$X_{u2} = R_{u2} \cdot \text{tg} \varphi_{u2} \quad (3)$$

- 2) metoda cewki pomocniczej [1] polegająca na tym, że na rdzeniu przekładnika nawija się cewkę pomocniczą o  $N_p$  zwojach; cewka ta powinna być nawinięta w taki sposób, aby była ona skojarzona maksymalnie ze strumieniem roboczym; w czasie pomiarów uzwojenie wtórne powinno być zwarte lub obciążone impedancją o znanej wartości  $Z_0 = R_0 + jX_0$ ; badania wykonuje się przy zasilaniu przekładnika prądem sinusoidalnym; mierząc napięcie  $E_p$  na cewce pomocniczej oraz prąd wtórny  $I_2$  wyznacza się wartość napięcia na jeden zwój, stąd

$$E_p' = \frac{E_p}{N_p} \quad (4)$$

Na podstawie znajomości wartości rezystancji i reaktancji uzwojenia wtórnego oraz obciążenia, jak również wartości prądu wtórnego można wyznaczyć wartość napięcia magnesowania  $u_\mu$ . Na podstawie znajomości tego napięcia wyznacza się strumień skojarzony

$$\psi = \frac{1}{T} \int_0^T u_\mu \cdot dt \quad (5)$$

W celu wyznaczenia rzeczywistej pętli histerezy wymagana jest jeszcze znajomość prądu gałęzi poprzecznego (jałowego)  $i_0$ . Prąd ten wyznacza się jako różnicę prądu pierwotnego (przeniesionego na stronę wtórną) i prądu wtórnego

$$i_0'' = i_1'' - i_2 \quad (6)$$

W oparciu o pomiar wartości chwilowych prądu  $i_0$  oraz strumienia skojarzonego  $\psi$  wyznacza się rodzinę pętli histerezy. Wyznaczone pętli histerezy są podstawą do wyznaczenia parametrów gałęzi poprzecznych schematu zastępczego przekładnika prądowego. Należy zwrócić uwagę, że parametry te zmieniają się w zależności od nasycenia rdzenia. Reaktancja gałęzi poprzecznej zmienia się wraz z krzywą magnesowania rdzenia. Natomiast rezystancja zmienia swoją wartość w zależności od pola powierzchni wyznaczonego przez dynamiczną pętlę histerezy. Pole to jest proporcjonalne do energii  $W_{Fe}$  traconej w rdzeniu przekładnika prądowego. Na podstawie wyznaczonej energii oblicza się moc strat

$$\Delta P_{Fe} = W_{Fe} \cdot f \quad (7)$$

gdzie:  $f$  - częstotliwość napięcia

a następnie rezystancję odwzorowującą straty w rdzeniu

$$R_{Fe} = \frac{U_\mu^2}{\Delta P_{Fe}} \quad (8)$$

gdzie:  $U_\mu$  - wartość skuteczna napięcia

Na podstawie znajomości napięcia magnesowania  $u_\mu$  oraz rezystancji  $R_{Fe}$  wyznacza się prąd czynny gałęzi poprzecznej

$$i_{Fe} = \frac{u_\mu}{R_{Fe}} \quad (9)$$

W celu wyznaczenia prądu magnesującego należy wyznaczyć wartość średnią dynamicznej pętli histerezy

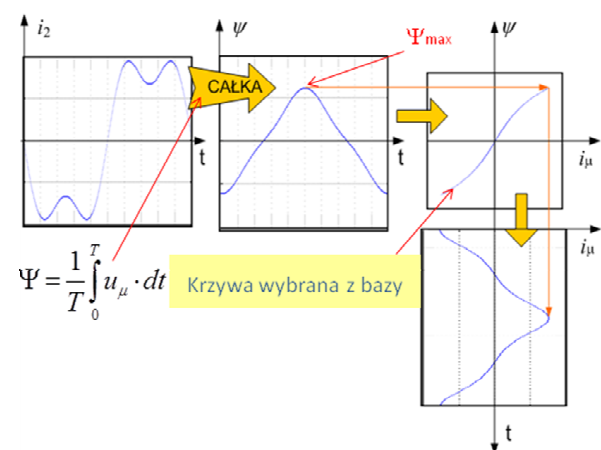
$$\psi = f(i_\mu) \quad (10)$$

a następnie charakterystykę odwrotną

$$i_\mu = f^{-1}(\psi) \quad (11)$$

Na podstawie tej charakterystyki wyznacza się przebieg właściwy prądu magnesującego.

Konstrukcję graficzną kształtu przebiegu prądu obrazuje rys. 4.

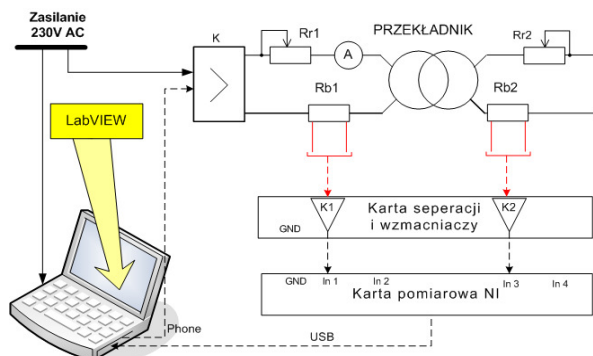


Rys. 4. Wyznaczenie prądu magnesowania

### 3. Wyniki badań przykładowego przekładnika prądowego

W celu potwierdzenia prezentowanej metody zbudowano układ pomiarowy dla rzeczywistego przekładnika prądowego.

Do badań użyto przekładnik prądowy typu ASK 41.4 o przekładni prądowej 50A/5A, mocy 1,5VA i klasie 1. Zbudowano układ pomiarowy według schematu na rys. 5.



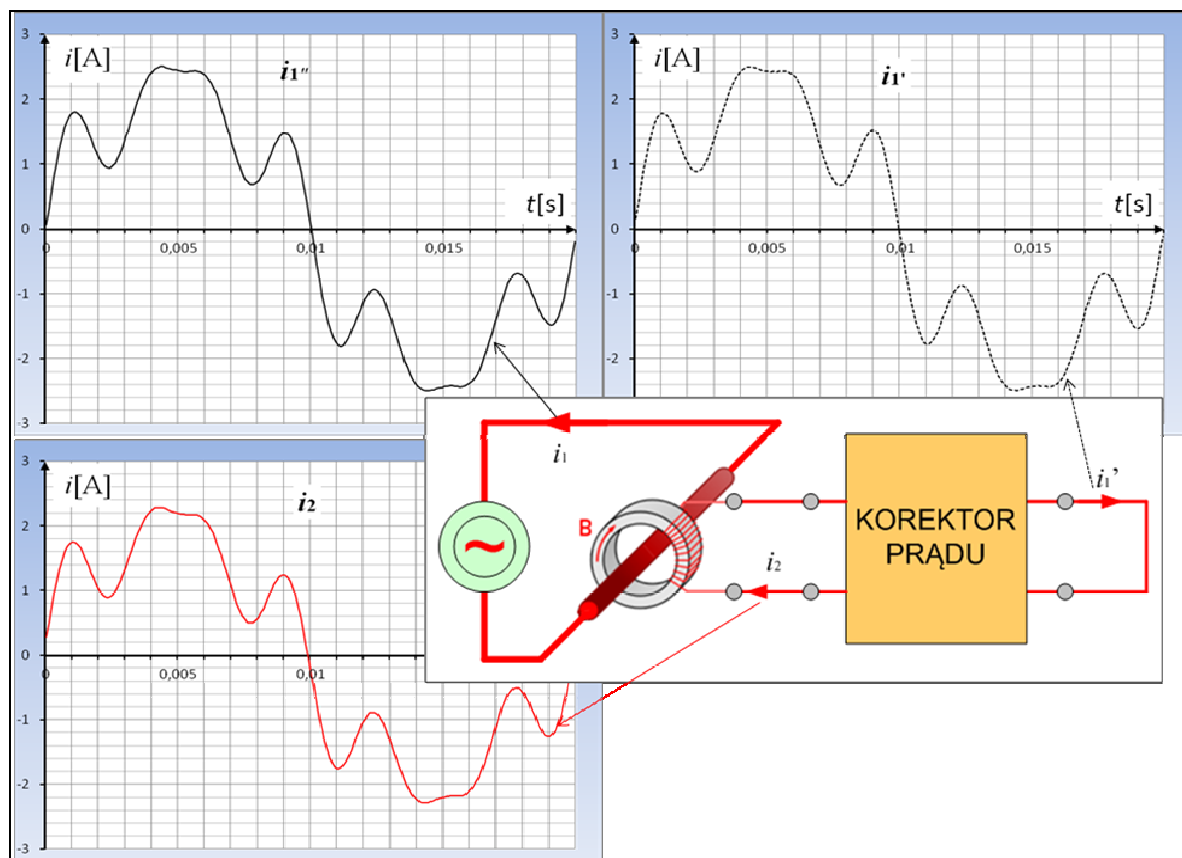
Rys. 5. Schemat połączenia układu pomiarowego do badania przekładnika prądowego

Należy zaznaczyć, że źródłem sygnału jest przebieg napięcia odkształconego podawany z komputera PC. Sygnał ten jest kształtowany przy użyciu programu LabView, który przez wzmacniacz podawany jest jako źródło prądu na uzwojenie pierwotne przekładnika prądowego. Oprogramowanie zaimplementowane w komputerze pełni wiele funkcji, m.in. funkcję

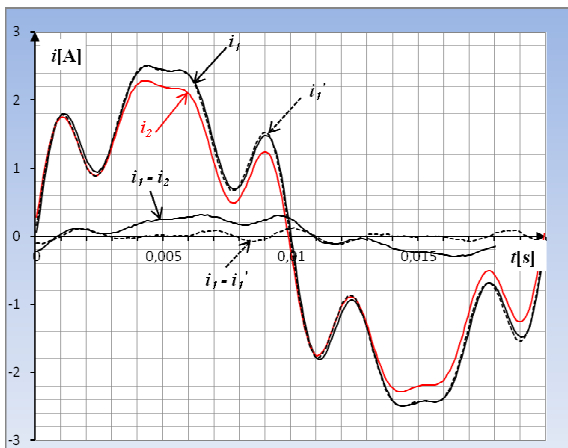
generatora przebiegów odkształconych, układu pomiarowego i rejestrującego.

Wyniki pomiarów przedstawiono na poniższych rysunkach. W celu lepszego zobrazowania zastosowanej metody, przekładnik prądowy został przeciążony przez włączenie w obwód wtórny rezystancji o większej wartości niż wynika to ze znamionowego obciążenia przekładnika.

Na przedstawionych wykresach poszczególne prądy wyróżniono w następujący sposób:  
 \* linia czarna ciągła - prąd pierwotny (przeniesiony na stronę wtórną przekładnika)  $i_1''$   
 \* linia czerwona (szara) ciągła - prąd wtórny  $i_2$   
 \* linia czarna przerywana - prąd pierwotny wynikowy (przeniesiony na stronę wtórną przekładnika)  $i_1'$ .



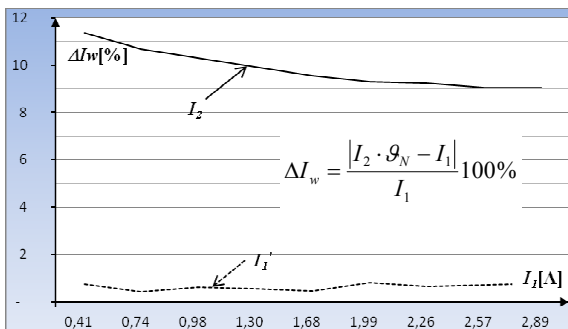
Rys. 6. Schemat ideowy układu pomiarowego do wyznaczenia kształtu przebiegu prądu pierwotnego na podstawie pomiaru prądu wtórnego oraz przebiegi czasowe prądów



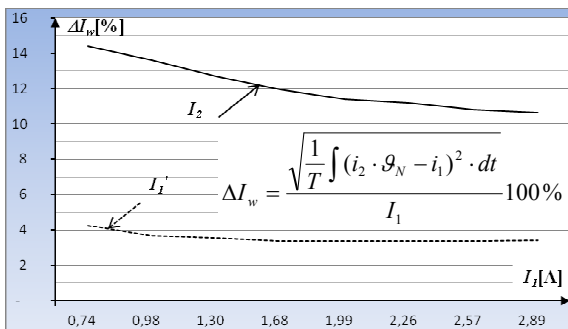
Rys. 7. Przebiegi czasowe prądów

### 3.1. Charakterystyki porównawcze błędów

Na przedstawionych rysunkach ograniczono się jedynie do pokazania błędów dla przebiegu składającego się z harmonicznym, m.in. 1-wszej, 5-tej i 7-mej. Badania wykazały, że dla innych przebiegów odkształconych, tj. z udziałem różnych wyższych harmonicznym różnice pomiędzy poszczególnymi błędami są na podobnym poziomie.



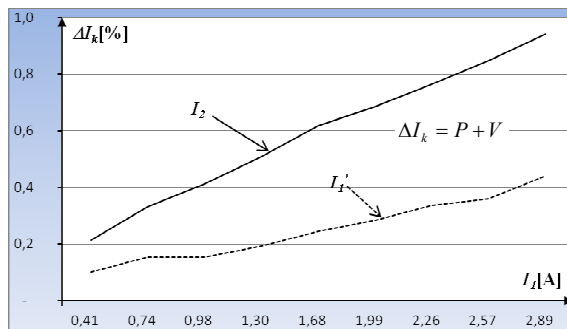
Rys. 8. Błąd prądowy



Rys. 9. Błąd całkowity

gdzie:

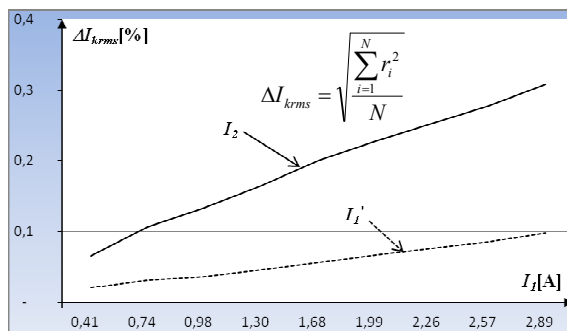
$g_N$  – przekładnia znamionowa przekładnika,  
 $T$  – okres przebiegu



Rys. 10. Błąd kształtu - maksymalnej odchyłki kształtu

gdzie:

$P$  – maksymalna wysokość wzniesienia obserwowanego zarysu (profilu), profile peak high,  
 $V$  – maks. głębokość wgłębienia obserwowanego zarysu (profilu), profile valley depth.



Rys. 11. Błąd kształtu - odchylenia średniokwadratowego

gdzie:

$r_i$  – odchylenie  $i$ -tego punktu zarysu,  
 $N$  – liczba punktów podziału odcinka pomiarowego

### 4. Wnioski i uwagi

Przedstawiona metoda bazuje tylko na obliczeniach z wykorzystaniem przebiegów czasowych i odpowiednio przekształceń różniczkowych i całkowych. Pozwala ona przede wszystkim przeprowadzać obliczenia dla przebiegów odkształconych w dziedzinie czasu bez konieczności przeprowadzania rozkładu w szereg Fouriera, tzn. w dziedzinie częstotliwości. Największą zaletą niniejszego rozwiązania jest to, że za pomocą pomiaru przebiegu prądu wtórnego można wyznaczyć przebieg prądu pierwotnego. Należy zwrócić uwagę na trudność pomiaru przebiegu prądu pierwotnego, m.in. ze względu na duże wartości prądu jak i napięcia. Podsumowując, można stwierdzić, że:

- odkształcenie prądu wtórnego wynika z budowy przekładnika prądowego,

- powszechnie stosowana aparatura pomiarowa przystosowana jest do pomiaru przebiegów sinusoidalnych, podczas gdy mamy do czynienia z przebiegami odkształconymi,
- wyznaczenie parametrów schematu zastępczego przekładnika prądowego przeprowadzane jest na podstawie danych technicznych podanych na tabliczce znamionowej oraz z pomiarów przekładnika możliwych do wykonania bez ingerencji w jego wnętrze,
- dokonując pomiaru wartości chwilowych przebiegu prądu wtórnego można wyznaczyć przebieg prądu pierwotnego z co najmniej o połowę mniejszym błędem pomiarowym,
- metoda może być stosowana do przekładników zarówno nowoprojektowanych, jak i już będących w eksploatacji.

## 5. Literatura

- [1]. Koszmider A. Olak J. Piotrowski Z.: Przekładniki prądowe. WNT, Warszawa 1985.
- [2]. Wiszniewski A.: Przekładniki w elektroenergetyce. WNT, Warszawa 1982, 1992.
- [3]. Racka-Dzietko K.: Struktura i właściwości magnetyczne nanocząstek Fe-Cr w funkcji zawartości chromu. Praca doktorska. Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk, Warszawa 2007.
- [4]. Łastowiecki J.: Układy pomiarowe prądu w energoelektronice. COSIW SEP, Warszawa 2003.
- [5]. Czarnecki L.: Moce w obwodach elektrycznych z niesinusoidalnymi przebiegami prądów i napięć. OW PW, Warszawa 2005.
- [6]. Kacejko P. Machowski J.: Zwarcia w systemach elektroenergetycznych. WNT, Warszawa 2005
- [7]. Halinka A.: Badanie dokładności metrologicznej toru pomiarowego układu decyzyjnego zabezpieczeń elektroenergetycznych w szerokim zakresie zmian częstotliwości. Projekt badawczy KBN: N505 024 31/3647, 13.11.2006-12.05.2009.
- [8]. Tumanski S.: Handbook of magnetic measurements. CRC Press a Taylor & Francis Group, New York 2011.
- [9]. Electromagnetic transformer modelling including the ferromagnetic core David Ribbenfjärd, Doctoral thesis in Electrical Systems, Stockholm, Sweden 2010.
- [10]. Blankiewicz K.: Badanie pętli histerezy magnetycznej ferromagnetyków i ferrytów przy użyciu oscyloskopu. Laboratorium Fizyki I „P”. Politechnika Warszawska, Wydział Fizyki.
- [11]. PN-78/M-02137. Tolerancje kształtu i położenia.
- [12]. PN-EN/60044-1:2000. Przekładniki. Przekładniki prądowe.