

Daniel DUSZA*

WŁAŚCIWOŚCI METROLOGICZNE PRZEKŁADNIKA BROOKSA I HOLTZA

W artykule przeprowadzono analizę metrologiczną przekładnika dwurdzeniowego Brooksa i Holtza stosowanego w precyzyjnych układach pomiarowych. Oceniono wpływ przekładnika głównego i przekładnika pomocniczego na błąd wypadkowy przekładnika dwurdzeniowego. Otrzymane zależności wskazują, że dwurdzeniowy przekładnik Brooksa i Holtza ma bardzo dobre właściwości metrologiczne. Przedstawiona analiza metrologiczna została zweryfikowana wynikami badań modelowych przekładnika. Podane rozważania i otrzymane wyniki mogą być wykorzystane przy projektowaniu przekładników dwurdzeniowych.

1. WSTĘP

Przekładniki prądowe w technice pomiarowej są stosowane już od 124 lat. W tym czasie przeszły znaczący stopień ewolucji, ale mimo to w standardowych zastosowaniach mają konstrukcję zbliżoną do rozwiązań stosowanych pod koniec XIX wieku. W procesie ewolucji przekładników ich parametry metrologiczne poprawiono stosując najnowsze osiągnięcia technologiczne: blachy transformatorowe, materiały ferromagnetyczne zawierające nikiel, taśmy amorficzne i nanokrystaliczne oraz rozwiązania układowe pasywne zawierające drugi przekładnik i aktywne, w których stosuje się wzmacniacze elektroniczne.

Znaczące etapy w rozwoju przekładników prądowych miały miejsce:

- Na przełomie XIX i XX wieku [1] opracowano blachę transformatorową.
- W 1920 r. H.B. Brooks opatentował przekładnik dwurdzeniowy [3], w którym suma prądów płynęła przez jedną impedancję obciążenia, co powodowało, że przekładniki obciążały się, czyli występowało zjawisko interakcji.
- W 1922 r. H.B. Brooks i F.C. Holtz [4] opisali dwurdzeniowy przekładnik prądowy, w którym prądy wtórne przekładników płynęły przez impedancje obciąż-

* Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, Politechnika Wroclawska, ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław, daniel.dusza@pwr.wroc.pl

zenia o tej samej wartości, a wielkością wyjściową była suma napięć. Przekładnik ten mimo zasygnalizowanej wady charakteryzował się bardzo małymi błędami.

- W 1923 r. M.A. Ilioviči w publikacji [7] przedstawił przekładnik o dwóch magnetowodach, w którym punkt pracy przekładnika z obszaru magnetycznej przenikalności początkowej został przesunięty do obszaru przenikalności maksymalnej, minimalizując tym samym błąd przekładnika.
- W 1929 r. A. Boyajian i W. Skeats [2] przedstawili rozwiązanie układowe z przekładnikiem Brooksa, w którym przekładnik wspomagający eliminował zjawisko interakcji w tym przekładniku. Zastosowane rozwiązanie pozwalało uzyskać błąd przekładnika na poziomie 0,01%.
- Na przełomie lat 20. i 30. ubiegłego wieku opracowano materiały ferromagnetyczne, stopy niklu, żelaza, molibdenu i chromu.
- Na przełomie lat 70. i 80. opracowano taśmy amorficzne i materiały nanokryształiczne.

Literatura przedmiotu wskazuje, że rozwój przekładników osiągnięto stosując najnowsze zdobycia technologiczne – opracowanie materiałów ferromagnetycznych o bardzo dużej przenikalności zawierających nikiel (permaloj, supermaloj, mumetal), oraz stosując rozwiązania układowe przy wykorzystaniu układów pasywnych. Rozwój ten zakończył się w latach trzydziestych ubiegłego wieku.

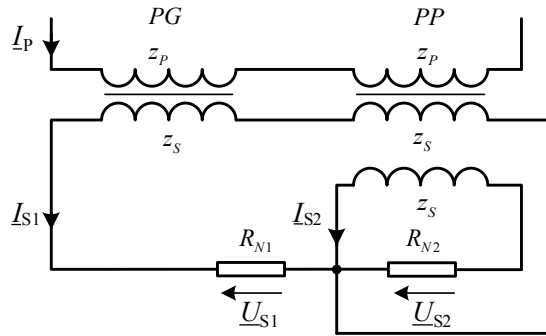
W następnym etapie rozwoju przekładników prądowych znaczące zmniejszenie błędów przekładników osiągnięto stosując wzmacniacze elektroniczne. Prekursorem był Boyajian, który w 1945 r. do korekcji błędów przekładników zastosował wzmacniacz elektroniczny. Opracowany przekładnik prądowy ze względu na sposób działania należy zaliczyć do klasy komparatorów prądu z indukcyjnym detektorem zera. Według tej zasady działania wielu pomiarowców opracowało przekładniki wspomagane wzmacniaczami elektronicznymi. Błędy przekładników minimalizowano również za pomocą konwerterów ujemnej rezystancji [5].

Należy podkreślić, że od opracowań przekładników przez Brooksa i Holtza, Iliovičiego i Bayajiana upłynęło 70 lat i w tym okresie nie opracowano nowych rozwiązań układowych przekładników. W związku z tym należy podjąć próbę optymalizacji np. przekładnika Brooksa i Holtza. W celu lepszego poznania właściwości metrologicznych przekładnika Brooksa i Holtza w oparciu o zdobyte doświadczenia i przemyślenia opracowano analizę metrologiczną tego przekładnika. Analiza metrologiczna pokazana przez Brooksa i Holtza w [4] jest analizą jakościową i umożliwia wyznaczenie błędu całkowitego przekładnika. W analizie jej stosowali wielkości, które są trudno mierzalne, takie jak: współczynnik przepływów magnetowodów, różnica przepływów w magnetowodach, indukcyjności wzajemne uzwojeń i w związku z tym rozważania te są mało czytelne i uniemożliwiają określenie wpływu przekładnika głównego i pomocniczego na błąd przekładnika dwurzeniowego.

Analiza metrologiczna przeprowadzona przez autora określa wpływ błędów poszczególnych przekładników na błąd wypadkowy. Takie ujęcie błędów pozwala na optymalny dobór klas poszczególnych przekładników w układzie Brooksa i Holtza.

2. WŁAŚCIWOŚCI METROLOGICZNE PRZEKŁADNIKA BROOKSA I HOLTZA

Przekładnik Brooksa i Holtza przedstawiony na rysunku 1 jest utworzony z dwóch przekładników: głównego PG i pomocniczego PP. Przekładnik główny i pomocniczy wymuszają w obwodach wtórnych prądy I_{S1} i I_{S2} , przy czym prąd I_{S2} ma wartość zbliżoną do prądu magnesującego przekładnika głównego.



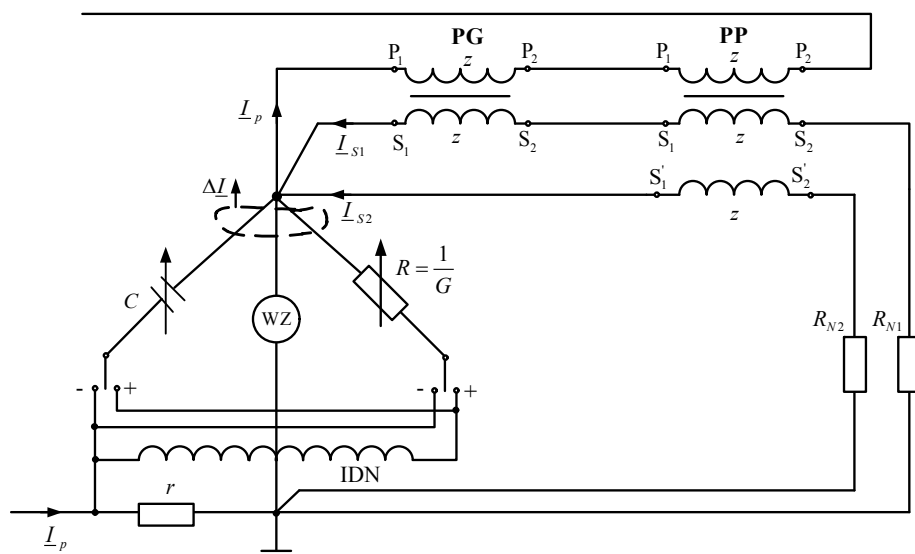
Rys.1. Rozwiązanie układowe przekładnika Brooksa i Holtza
Fig. 1. Circuit solution of Brooks and Holtz current transformer

Zaletą przekładnika Brooksa i Holtza w porównaniu z przekładnikiem Brooksa jest, że obwody wtórne przekładników mają jeden wspólny punkt i w związku z tym przekładniki nie oddziałują na siebie, czyli nie występuje efekt interakcji. Wadą przekładnika jest, że wielkością wyjściową jest suma napięć U_{S1} i U_{S2} występujących na rezystorach R_{N1} i R_{N2} . Dalsze rozważania przeprowadzono przy założeniu, że rezystancje obciążenia przekładników R_{N1} i R_{N2} są sobie równe. Założenie to implikuje, że nie występuje dodatkowy błąd przetwarzania prądu pierwotnego na napięcie wtórne.

3. WYZNACZENIE WŁAŚCIWOŚCI METROLOGICZNYCH PRZEKŁADNIKA BROOKSA I HOLTZA

Właściwości metrologiczne przekładnika Brooksa i Holtza wyznacza się w układzie kompensacyjno-różnicowym z kompensacją napięcia, realizującym metodę

pośrednią, w którym są stosowane trzy rezystory wzorcowe R_N kl. 0,01 limitujące dokładność pomiarów [6]. W celu zminimalizowania błędów pomiarów i uproszczenia układu pomiarowego przyjęto przekładnię przekładnika równą $k_{In}=1$. Przyjęcie przekładni równej jedności umożliwia porównanie prądów wtórnych z prądem pierwotnym układem kompensacyjno-różnicowym z kompensacją prądu metodą bezpośrednią, bez potrzeby stosowania wzorców (rys. 2). Układ ten nie powoduje interakcji, ponieważ w stanie równowagi układu pomiarowego, obwody wtórne przekładników PG i PP mają jedno wspólne połączenie i z punktu widzenia przetwarzania prądów jest równoważny układowi przekładnika pokazanego na rysunku 1.



Rys. 2. Układ kompensacyjno-różnicowy z kompensacją prądu do wyznaczania właściwości metrologicznych przekładnika Brooksa i Holtza
Fig. 2. Current compensation-finite difference system for testing Brooks & Holtz transformer

Błędy przekładnika Brooksa i Holtza, dla $k_{In} = 1$, opisuje równanie

$$\delta I_{BH} = \frac{I_{S1} + I_{S2} - I_P}{I_P} . \quad (1)$$

Zależność między prądem wtórnym prądy I_{S1} a pierwotnym I_P określa wzór

$$\delta I_I = \frac{I_{S1} - I_P}{I_P} . \quad (2)$$

Relację między prądem wtórnym I_{S2} a prądami I_P i I_{S1} wyraża związek

$$\delta I_{II} = \frac{I_{S2} - (I_P - I_{S1})}{I_P - I_{S1}}. \quad (3)$$

Po wprowadzeniu zależności (2) i (3) do wzoru (1) otrzymano

$$\delta I_{BH} = -\delta I_I \delta I_{II}. \quad (4)$$

Wyrażenie to wskazuje, że gdy nie ma efektu interakcji, to błąd przekładnika Brooksa i Holtza przyjmuje małą wartość, równą iloczynowi błędów δI_I i δI_{II} przekładników głównego i pomocniczego w odpowiednich konfiguracjach.

3.1. WYZNACZENIE BŁĘDÓW PRZEKŁADNIKA BROOKSA I HOLTZA

Błąd przekładnika Brooksa i Holtza określa równanie (1)

$$\delta I_{BH} = \frac{I_{S1} + I_{S2} - I_P}{I_P} = \frac{\Delta I}{I_P}. \quad (5)$$

Zgodnie z powyższym wzorem w układzie pokazanym na rysunku 2 wielkością poprawną jest prąd pierwotny I_P . Różnicę ΔI między porównywanymi prądami, w stanie równowagi układu, określają parametry admitancyjnego dzielnika prądu (r, G, C, IDN) [8].

$$\Delta I = (I_P - \Delta I)r \frac{R + \frac{1}{j\omega C}}{R \cdot \frac{1}{j\omega C}} = (I_P - \Delta I) \left(r \frac{1}{R} + j\omega rC \right). \quad (6)$$

Ponieważ $\Delta I \ll I_P$, to powyższą zależność opisuje wyrażenie

$$\Delta I = I_P (rG + j\omega rC). \quad (7)$$

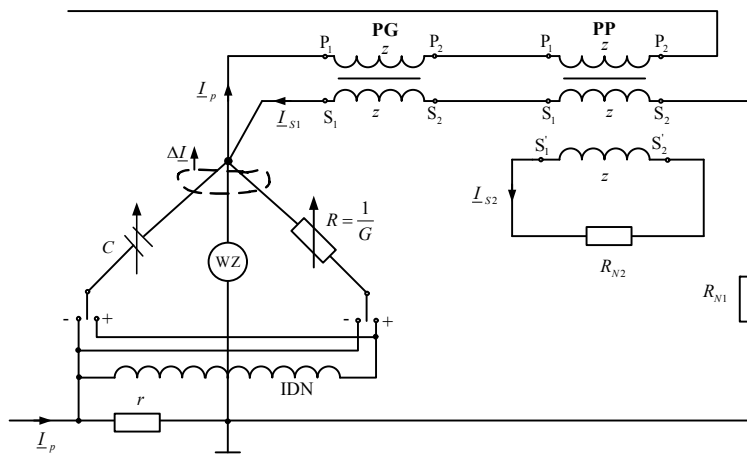
Łącząc wzory (5) i (7) otrzymano relację określającą błąd przekładnika Brooksa i Holtza

$$\delta I_{BH} = \frac{\Delta I}{I_P} = rG + j\omega rC. \quad (8)$$

3.2. WYZNACZENIE BŁĘDU δI_I PRZEKŁADNIKA GŁÓWNEGO I POMOCNICZEGO

Zależność między prądem wtórnym I_{S1} , a prądem pierwotnym I_P określono wzorem (2) i wyznaczono w układzie pokazanym na rysunku 3.

Błąd δI_I przekładnika wyznacza się z zależności (8).

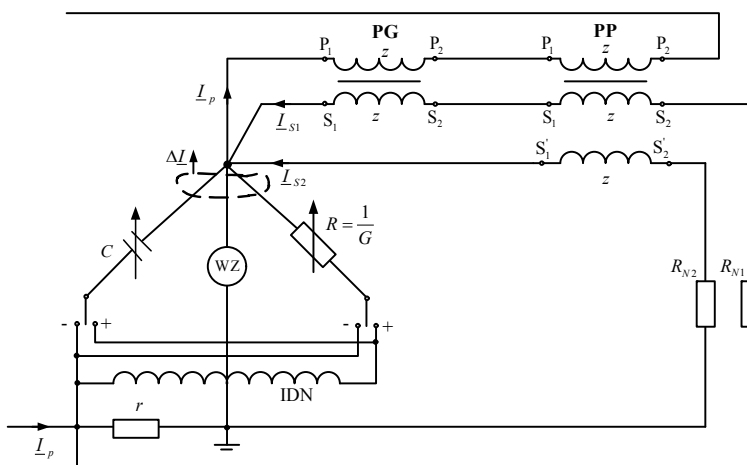


Rys. 3. Układ kompensacyjno-różnicowy wyznaczający błędy δI_I przekładnika utworzonego z przekładnika głównego i pomocniczego

Fig. 3. Current compensation-finite difference system for determine transformer δI_I error created from main and auxiliary transformer

3.3. WYZNACZENIE BŁĘDU δI_{II} PRZEKŁADNIKA GŁÓWNEGO I POMOCNICZEGO

Błąd δI_{II} opisuje wzór (3), który odwzorowuje układ zilustrowany na rysunku 4.



Rys. 4. Układ kompensacyjno-różnicowy wyznaczający błąd δI_{II} przekładnika utworzonego z przekładnika głównego i pomocniczego

Fig. 4. Current compensation-finite difference system for determine transformer δI_{II} error created from main and auxiliary transformer

Zgodnie z układem przedstawionym na rys. 4. różnica prądów ΔI płynąca w stanie zrównoważonym przez rezystor R i kondensator C

$$\Delta I = (\underline{I}_P - \underline{I}_{S1} - \Delta I) r \frac{R + \frac{1}{j\omega C}}{R \cdot \frac{1}{j\omega C}} \approx (\underline{I}_P - \underline{I}_{S1})(rR + j\omega rC). \quad (9)$$

Błąd δI_{II} przekładnika określa zależność

$$\delta I_{II} = \frac{\Delta I}{\underline{I}_P - \underline{I}_{S1}} = rG + j\omega rC. \quad (10)$$

Błąd prądowy określa składnik

$$\delta I = rG, \quad (11)$$

natomiast błąd kątowy jest równy

$$\gamma = \omega rC. \quad (12)$$

Niedokładność pomiaru błędu prądowego przekładnika wynosi [8]

$$\Delta(\delta I) = \delta I \frac{\delta r + \delta G}{100}, \quad (13)$$

błędu kąтового jest równa

$$\Delta\gamma = \gamma \frac{\delta\omega + \delta r + \delta C}{100}. \quad (14)$$

Pomiary przeprowadzono dobierając właściwości metrologiczne rezystorów wzorcowych R_{N1} , R_{N2} i elementów dzielników napięć i prądu tak, że niepewności pomiarów występują na trzecim miejscu znaczącym.

4. WYNIKI BADAŃ

Na rysunku 5 przedstawiono wyniki badań przeprowadzonych w układach pomiarowych opisanych w rozdziale 3 dla dwóch wartości rezystorów wzorcowych R_{N1} , R_{N2} równych 1 Ω , 0,1 Ω .

Otrzymane wyniki pomiarów wskazują, że błędy przekładników w przedziale zmian prądu od 0,1 A do 2 A dla obciążenia $R_N = 1 \Omega$ przyjmuje wartości

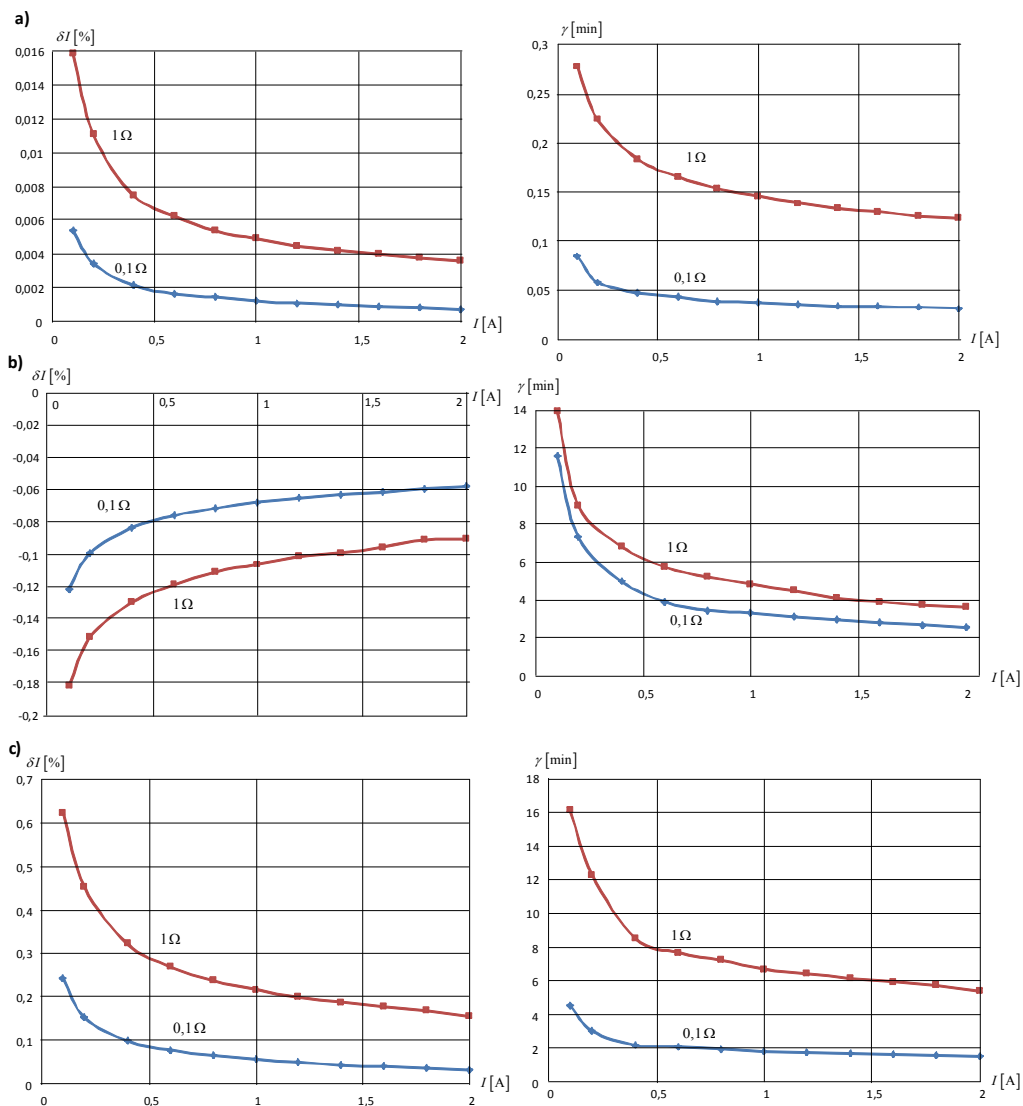
δI_{BH} : od +0,016% do +0,0038%,

γ_{BH} : od +0,28 min do +0,15 min.

Błędy przekładników głównego i pomocniczego zawarte są w przedziale

δI_I : od -0,12% do -0,059%,

γ_I : od +0,14 min do +3,8 min,
 δI_{II} : od +0,63% do -0,16%,
 γ_{II} : od +5,5 min do +16 min.



Rys. 5. Błędy modułu i argumentu dla Brooksa i Holtza δI_{BH} a), δI_I b), δI_{II} c)
 przekładnika utworzonego z przekładnika głównego i pomocniczego
 Fig. 5. Modulus and argument transformer error for Brooks and Holtz δI_{BH} a), δI_I b), δI_{II} c)
 created from main and auxiliary transformer

Porównanie błędów przekładnika Brooksa i Holtza δI_{BH} z błędami δI_I i δI_{II} przekładników głównego i pomocniczego wskazuje, że nie jest spełnione równanie (4). Na przykład dla prądu 2,0 A, na podstawie wartości błędów δI_I i δI_{II} błąd przekładnika δI_{BH} powinien wynosić

$$\delta I_{BH} = -\delta I_I \delta I_{II} = -\frac{-0,059 \cdot 0,16}{100} = 0,000094\%,$$

natomiast z pomiarów wynika wartość $\delta I_{BH} = +0,0038\%$.

Zdaniem autora różnica ta może być spowodowana sprzężeniami magnetycznymi i pojemnościowymi przekładników. W prowadzonych rozważaniach nie uwzględniono sprzężeń magnetycznych i pojemnościowych. Sprzężenia te są trudne do określenia i nie były uwzględnione w prowadzonej analizie. Należy zauważyć, że w przypadku gdy przekładnik główny i pomocniczy mają większe błędy to iloraz analizowanych błędów jest znacznie mniejszy.

5. WNIOSKI

Otrzymane wyniki pomiarów wskazują, że przekładnik Brooksa i Holtza spełnia wymagania wskaźnika klasy stawiane przez normę [9]:

- 0,01 – dla obciążenia rezystorem 1 Ω ,
- 0,002 – dla obciążenia rezystorem 0,1 Ω .

Właściwości metrologiczne przekładnika Brooksa i Holtza można w pełni wykorzystać gdy rezystory wzorcowe są o dwie klasy lepsze od klas przekładników.

Przeprowadzone rozważania i analiza wyników pomiarów może stanowić punkt wyjścia do próby opracowania przekładnika, który nie miałby wad przekładnika Brooksa i Holtza.

Wadą przekładnika Brooksa i Holtza ponadto jest, że wielkością wyjściową jest suma napięć na rezystorach R_{N1} i R_{N2} .

LITERATURA

- [1] BAUER R., *Die Messwandler*, Springer Verlag, Berlin 1953.
- [2] BOYAJIAN A., SKEATS W.F., *Bushing-Type Current Transformers for Metering*, American Institute of Electrical Engineers, Transactions of the , July 1929, Vol. 48, No. 3, 949–951.
- [3] BROOKS H.B., Britisches Patent 169093 z 6.09.1920.
- [4] BROOKS H.B., HOLTZ F.C., *The Two-Stage Current Transformer*, American Institute of Electrical Engineers, Transactions of the , Jan. 1922, Vol. XLI, No., 382–393.
- [5] DUSZA D., NAWROCKI Z., *Przekładnik prądowy z konwerterem ujemnej rezystancji*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Pol. Wroc., 2010, nr 30, 394–402.
- [6] DUSZA D., *Dwurdzeniowe przekładniki prądowe*, [w:] *Metrologia dziś i jutro*, pod red. Jerzego Jakubca, Zbigniewa Moronia, Henryka Juniewicza, Wrocław, Of. Wyd. Pol. Wroc., 2010. 145–153.

- [7] ILIOVIĆI M.A., *Transformateurs d'intensite' compoundes*, Bull. de la Socie'te', Franc. des Electr., 1923, No. 3, 59.
- [8] NAWROCKI Z., *Problemy porównywania prądów stałych oraz sinusoidalnych prądów przemien-nych o krotnych wartościach*, Prace Naukowe Instytutu Metrologii Elektrycznej Politechniki Wro-
cławskiej, Z. 32, Seria Monografie, nr 8, Wrocław 1989.
- [9] PN-EN 60044-1, *Przekładniki. Przekładniki prądowe*.

METROLOGICAL PROPERTIES OF BROOKS AND HOLTZ CURRENT TRANSFORMER

The paper presents metrological analysis of two-stage Brooks and Holtz transformer which are using in precision measurement circuits. The influence of the main transformer and the auxiliary transformer secondary to the resultant error of two-stage transformer was evaluated. Obtained relations indicates that the dual-stage Brooks and Holtz transformer has a very good metrological properties. Presented analysis was verified by transformer model tests. These considerations and results can be used to design dual-stage transformers.