

Leszek FURMANKIEWICZ

INSTYTUT METROLOGII ELEKTRYCZNEJ UNIWERSYTET ZIELONOGÓRSKI

## Pomiar błędów częstotliwościowych obwodów wejściowych przetworników energetycznych metodą pomiaru zespolonego stosunku napięć

Dr inż. Leszek FURMANKIEWICZ

Absolwent Wydziału Elektrycznego Wyższej Szkoły Inżynierskiej w Zielonej Górze. Stopień doktora nauk technicznych uzyskał na Wydziale Elektrycznym Politechniki Zielonogórskiej w roku 1998. Obecnie pracuje na stanowisku adiunkta w Instytucie Metrologii Elektrycznej Uniwersytetu Zielonogórskiego. Obszar zainteresowań obejmuje zagadnienia związane z pomiarami wielkości elektrycznych, a w szczególności z pomiarami parametrów sieci energetycznych.



e-mail: l.furmankiewicz@ime.uz.zgora.pl

### Streszczenie

W artykule przedstawiono koncepcję pomiaru błędów częstotliwościowych obwodów wejściowych stosowanych elektroenergetycznych przyrządach pomiarowych. Błąd modułu i błąd fazowy wyznaczone są na podstawie pomiaru zespolonego stosunku napięć w próbującym systemie pomiarowym. Koncepcja pomiaru została wykorzystana do wyznaczenia błędów przekładni transformatorowych obwodów wejściowych. Zaprezentowano strukturę systemu pomiarowego i przykładowe wyniki badań, które posłużyły do korekcji błędów częstotliwościowych obwodów wejściowych przy pomiarach wartości skutecznej i mocy.

**Słowa kluczowe:** błędy częstotliwościowe, obwody wejściowe energetycznych przyrządów pomiarowych.

### Measurement of the frequency errors of input circuit using a complex voltage ratio measurement

#### Abstract

The paper presents an idea of frequency errors measurement of the input circuit implemented in measurement instruments of power systems. The module and the phase errors are calculated on the basis of complex voltage ratio measurement in DAQ system (fig. 2). The idea was used to frequency errors measurement of current measuring transformers used in some power transducers (fig. 3). The results of the measurement were used to correction of the errors that are introduced by measuring transformers on power measurement accuracy with distorted signals.

**Keywords:** frequency errors, input circuit of power measurement instruments.

### 1. Wstęp

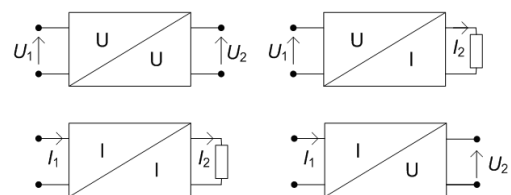
We współczesnej technice pomiarowej coraz powszechniej stosowane są cyfrowe przyrządy próbkujące. W przyrządach takich sygnały analogowe przetwarzane są na postać cyfrową za pomocą przetworników analogowo – cyfrowych, a dalsze przetwarzanie realizowane jest przez mikroprocesor realizujący odpowiedni algorytm programowy. W tych przyrządach daje się wyróżnić część analogową (zawierającą układy występujące przed układem próbkującym – pamiętającym oraz analogowe części układu próbkującego – pamiętającego i przetwornika analogowo- cyfrowego) i część cyfrową zawierającą mikroprocesor i układy pamięci. W przypadku, gdy wartości mierzonych sygnałów przekraczają poziomy napięć wejściowych przetworników analogowo- cyfrowych, lub zachodzi potrzeba realizacji oddzielenia galwanicznego, przed przetwornikiem analogowo – cyfrowym stosowane są obwody wejściowe. Obwody wejściowe są zatem pierwszym elementem występującym w torach przetwarzania przyrządów pomiarowych więc ich parametry w decydujący sposób wpływają na właściwości całego toru przetwarzania. Obwody charakteryzują się błędami częstotliwościowymi (błędem modułu i błędem fazo-

wym) wynikającymi z faktu, że ich schematy zastępcze zawierają elementy o reaktancjach zależnych od częstotliwości. Błędy te mogą powodować istotny wpływ na dokładność pomiaru parametrów przetwarzanych sygnałów.

Dążąc do zwiększenia dokładności przyrządów pomiarowych stosuje się korekcję błędów częstotliwościowych wprowadzanych przez obwody wejściowe [1]. Opracowana przez autora i zaprezentowana m.in. w pracy [2] metoda korekcji błędów częstotliwościowych obwodów wejściowych jest realizowana w dziedzinie widmowej. Do przeprowadzenia korekcji wymagana jest znajomość częstotliwościowych charakterystyk błędów modułu i błędów fazowych obwodów wejściowych, które są przetwornikami sygnałów pomiarowych. Do tego celu może być stosowany pomiar zespolonego stosunku napięć z wykorzystaniem kart pomiarowych i metod cyfrowego przetwarzania sygnałów [3].

### 2. Obwody wejściowe i ich błędy

W przyrządach pomiarowych wielkości energetycznych mierzone są napięcia i prądy. Do przetwarzania napięcia stosuje się przekładniki napięciowe, dzielniki napięcia lub przekładniki prądu z szeregowo włączonym rezystorem ograniczającym prąd. Do przetwarzania prądu stosuje się przekładniki prądu i przetworniki prąd - napięcie takie jak boczniki, czujniki hallotronowe, czujniki magnetorezystancyjne, cewki Rogowskiego [4]. Dzielniki napięcia i boczniak stosowane są w przyrządach laboratoryjnych, a w przyrządach przemysłowych, głównie ze względu na potrzebę oddzielenia galwanicznego pomiędzy badanym obiektem a przyrządem pomiarowym, stosowane są pozostałe przetworniki realizujące funkcję oddzielenia galwanicznego w sposób naturalny. Uogólniając, obwody wejściowe przyrządów energetycznych można zaklasyfikować do następujących grup przetworników: napięcie-napięcie, napięcie prąd, prąd-prąd i prąd napięcie (rys. 1).



Rys. 1. Obwody wejściowe przyrządów do pomiaru wielkości energetycznych  
Fig. 1. Input circuits of measuring instruments to electrical quantities measurement

Wymagania stawiane współczesnym obwodom wejściowym powodują konieczność przetwarzania przebiegów niesinusoidalnych, a to powoduje zwiększenie ich częstotliwościowego zakresu pracy. Od obwodów wejściowych wymaga się, aby w paśmie przetwarzania przyrządu charakterystyka amplitudowa była stała, a charakterystyka fazowa była zerowa lub liniowa. Dodatkowo obwody wejściowe powinny posiadać liniową charakterystykę przetwarzania. Charakterystyki rzeczywistych obwodów wejściowych odbiegają od przedstawionych wymagań, co w przypadku ich charakterystyk częstotliwościowych wyraża się za pomocą błędów częstotliwościowych. Błędy te wynikają z faktu, że schematy zastępcze tych obwodów zawierają elementy o reaktancjach zależnych od częstotliwości [5].

Błąd częstotliwościowy (dynamiczny)  $\delta$  jest wielkością zespoloną i jest definiowany jako różnica pomiędzy odpowiedzią widmową obwodu rzeczywistego i obwodu idealnego o transmitancji  $K$

$$\delta = \underline{Y} - K \underline{X}, \quad (1)$$

gdzie:  $\underline{Y}$  i  $\underline{X}$  są transformatami Fouriera przebiegu wyjściowego i wejściowego.

Moduł błędu dynamicznego  $\delta$  nazywa się błędem modułu lub błędem amplitudy

$$\delta = \text{mod}(\underline{\delta}), \quad (2)$$

a argument  $\gamma$  błędu dynamicznego nazywany jest błędem fazowym

$$\gamma = \text{arg}(\underline{\delta}). \quad (3)$$

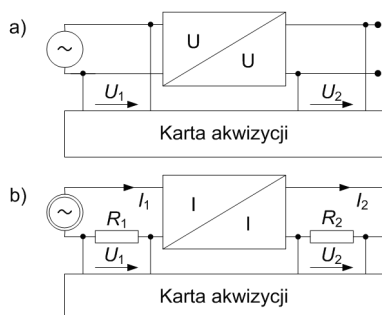
W praktyce wygodnie jest posługiwać się względnym błędem dynamicznym  $\delta$ , który można wyrazić wzorem

$$\delta = \text{mod}\left(\frac{\underline{Y} - K\underline{X}}{K\underline{X}}\right) = \text{mod}\left(\frac{K - K}{K}\right). \quad (4)$$

Błąd modułu i błąd fazowy obwodów wejściowych stosowanych w przetwornikach energetycznych można wyznaczyć na podstawie parametrów schematu zastępczego lub przez pomiar sygnału wejściowego i wyjściowego.

### 3. Koncepcja pomiaru i układy pomiarowe

Błędy modułu i błędy fazowe obwodów wejściowych można wyznaczyć dokonując pomiaru zespolonego stosunku napięć w próbkującym, dwukanałowym systemie akwizycji sygnałów. Zaletą takiego rozwiązania jest możliwość wyznaczenia charakterystyk częstotliwościowych błędów modułu i błędów fazowych w jednym układzie pomiarowym. Na rys. 2a i 2b przedstawiono struktury układów do pomiaru błędów częstotliwościowych obwodów przetwarzających napięcie na napięcie i prąd na prąd. W układzie do pomiaru błędów przetworników prądowych wymagane jest zastosowanie rezystorów w roli przetworników prądu na napięcie.



Rys. 2. Schemat blokowy systemu do pomiaru błędów częstotliwościowych: a) napięciowego obwodu wejściowego, b) prądowego obwodu wejściowego  
Fig. 2. Block diagram of the system for frequency errors measurement of: a) voltage input circuit, b) current input circuit

W układzie przedstawionym na rys. 2a dokonywany jest pomiar zespolonego stosunku napięć

$$\underline{K}_U = \frac{\underline{U}_1}{\underline{U}_2} = \frac{U_1 e^{j\varphi_{U1}}}{U_2 e^{j\varphi_{U2}}} = K_U e^{j(\varphi_{U1} - \varphi_{U2})} = K_U e^{j\gamma_U} \quad (5)$$

Zakładając, że nominalny stosunek napięć obwodu wejściowego wynosi  $K_{Un}$ , względny błąd modułu wynosi

$$\delta_U = \frac{K_{Un}}{K_U} - 1, \quad (6)$$

a błąd fazowy  $\gamma_U$  jest różnicą argumentów mierzonych napięć

$$\gamma_U = \varphi_{U1} - \varphi_{U2}. \quad (7)$$

W układzie przedstawionym na rys. 2 b zespolony stosunek napięć określony jest zależnością

$$\underline{K}_U = \frac{\underline{U}_1}{\underline{U}_2} = \frac{I_1 e^{j\varphi_{I1}} Z_1 e^{j\varphi_{Z1}}}{I_2 e^{j\varphi_{I2}} Z_2 e^{j\varphi_{Z2}}} = K_U e^{j(\varphi_{U1} - \varphi_{U2} + \varphi_{Z1} - \varphi_{Z2})}, \quad (8)$$

gdzie  $Z_1, Z_2$  są impedancjami rezystorów  $R_1, R_2$ .

Zakładając, że nominalny stosunek prądów obwodu wejściowego wynosi  $K_{In}$ , względny błąd modułu i błąd fazowy można wyznaczyć z zależności

$$\delta_I = \frac{K_{In}}{K_U} \frac{Z_1}{Z_2} - 1 \quad (9)$$

$$\gamma_I = \varphi_{U1} - \varphi_{U2} + \varphi_{Z1} - \varphi_{Z2}. \quad (10)$$

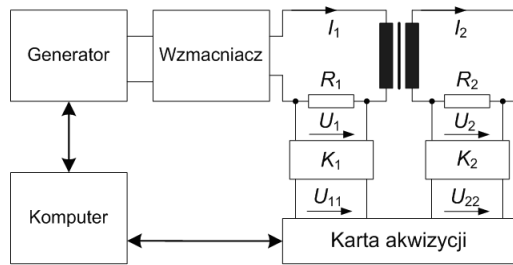
Z zależności (9) i (10) wynika, że do wyznaczenia błędu modułu wymagana jest znajomość modułów impedancji rezystorów zastosowanych w roli przetworników prąd - napięcie, a do wyznaczenia błędu fazowego wymagana jest znajomość błędów fazowych tych rezystorów. Modyfikując układy pomiarowe przedstawione na rys. 2 i analizując je w sposób analogiczny do zależności (5-10) można dokonać pomiaru błędów przetworników typu napięcie-prąd lub prąd-napięcie.

Obwody wejściowe stosowane w przyrządach do pomiaru wielkości energetycznych w przeważającej większości przystosowane są do pomiaru napięć do 400 V, prądów do 5-10 A i częstotliwości do 2 kHz. Przedstawiony wyżej, stosunkowo prosty, sposób pomiaru błędów modułu i fazy ma w praktycznej realizacji szereg ograniczeń, a przy spełnieniu wymagań dotyczących zakresów przetwarzanych sygnałów i przy założeniu odpowiednio dużej dokładności pomiaru, wymaga spełnienia pewnych dodatkowych warunków. Ażeby zapewnić korzystne warunki pomiaru zespolonego stosunku napięć, amplitudy porównywanych napięć powinny być na zbliżonym poziomie, a ponadto poziom ten powinien być dopasowany do zakresów pomiarowych układu akwizycji [3].

### 4. Układ pomiarowy i wyniki badań

Uwzględniając przedstawione wyżej wymagania zrealizowano system pomiarowy, w którym dokonano pomiaru błędów częstotliwościowych napięciowego obwodu wejściowego składającego się z transformatora prądowego i rezystora szeregowego ograniczającego prąd wejściowy [5] oraz błędów przekładników prądowych stosowanych w fabrycznych przetwornikach mocy kilku krajowych i zagranicznych producentów. Podstawę systemu pomiarowego stanowił opracowany w Instytucie Metrologii Elektrycznej Uniwersytetu Zielonogórskiego system do precyzyjnego pomiaru zespolonego stosunku napięć [3] oparty na 16-bitowej karcie akwizycji danych.

Na rys. 3 przedstawiono schemat blokowy układu, w którym badano przekładniki prądowe. Uwzględniając potrzebę dopasowania amplitud mierzonych sygnałów do zakresu napięć wejściowych karty akwizycji oraz wartości przekładni badanych przekładników, w układzie do badania przekładników prądowych ( $K_{In} = 1000$  i prądzie pierwotnym  $I_1 = 5$  A) zastosowano rezystory wzorcowe o rezystancjach nominalnych  $R_1 = 0,1 \Omega$  i  $R_2 = 100 \Omega$ . Dodatkowo, mając na uwadze nie przekroczenie dopuszczalnej mocy rozpraszanej przez rezystor wzorcowy  $R_1$ , zastosowano wzmacniacz  $K_1$ . Przy doborze rezystora  $R_2$  uwzględniono wpływ jego wartości na błędy przekładni [5] i z tego względu zastosowano rezystor o takiej wartości rezystancji, jak w układzie aplikacyjnym przekładnika. Uwzględniając potrzebę dopasowania amplitudy sygnału do wejścia karty akwizycji zastosowano wzmacniacz  $K_2$ . Pomiaru błędów amplitudowych i fazowych wykonano w zakresie częstotliwości od 50 Hz do 2 kHz.



Rys. 3. Schemat blokowy systemu do pomiaru błędów przekładnika prądowego  
Fig. 3. Block diagram of system for current transformer errors measurement

W celu wyznaczenia błędów modułu i fazy w przedstawionym układzie pomiarowym należy uwzględnić wzmocnienia  $K_1$  i  $K_2$  wzmacniaczy. Współczynniki wzmocnienia wzmacniaczy można przedstawić w następujący sposób

$$\underline{K}_1 = K_1 \cdot e^{j\varphi_{K1}} \quad \underline{K}_2 = K_2 \cdot e^{j\varphi_{K2}} \quad (11)$$

W przedstawionym układzie próbkowane są napięcia wyjściowe wzmacniaczy

$$U_{11} = K_1 U_1 \quad U_{22} = K_2 U_2 \quad (12)$$

Wyznaczając zespolony stosunek napięć  $K_w = U_{11}/U_{12}$ , a następnie uwzględniając relacje pomiędzy tym stosunkiem, a stosunkiem prądów  $K_f = I_1/I_2$  wyznaczono błąd modułu i błąd fazowy przekładnika prądowego

$$\delta_I = \frac{K_w Z_1 K_1}{K_u Z_2 K_2} - 1 \quad (13)$$

$$\gamma_I = (\varphi_{U_{11}} + \varphi_{Z_2} + \varphi_{K_2}) - (\varphi_{U_{22}} + \varphi_{Z_1} + \varphi_{K_1}) = (\varphi_{U_{11}} - \varphi_{U_{22}}) + \gamma_D \quad (14)$$

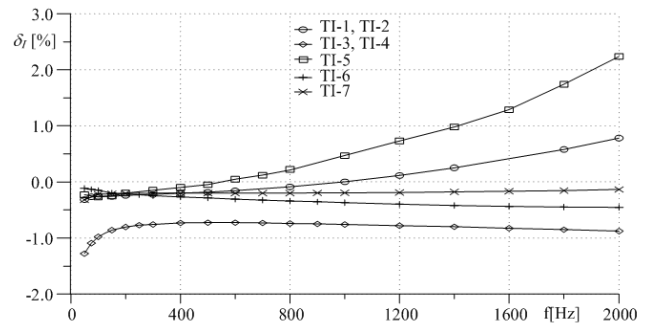
gdzie:

$$\gamma_D = (\varphi_{Z_2} - \varphi_{Z_1} - \varphi_{K_1} + \varphi_{K_2}) \quad (15)$$

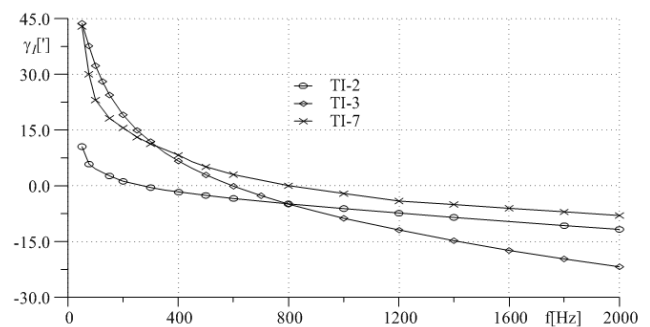
Występujące w zależności 13 moduły impedancji rezystorów i moduły wzmocnień wzmacniaczy oraz występujące w zależnościach 14-15 przesunięcia fazowe wprowadzane przez rezystory i wzmacniacze zostały wyznaczone w ramach procedur kalibracyjnych. Przesunięcie fazowe wprowadzane przez rezystancję  $R_1 = 0,1 \Omega$  wyznaczono na podstawie stałej czasowej wyznaczonej w opracowanym do tego celu układzie pomiarowym [6].

Na rys. 4 i 5 przedstawiono przykładowe wyniki pomiarów błędów modułu i błędów fazowych badanych przekładników prądowych. Wyniki wskazują, że błędy modułu nie przekraczają kilku procent, natomiast błędy fazowe są rzędu kilkadziesiąt minut.

Z zależności 13 wynika, że niepewność pomiaru błędów modułu zależy od niepewności wyznaczenia stosunku modułów mierzonych napięć, niepewności wyznaczenia stosunku modułów impedancji rezystorów wzorcowych oraz stosunku modułów wzmocnienia wzmacniaczy. W przypadku pomiaru błędu fazowego, niepewność pomiaru zależy od niepewności pomiaru zespolonego stosunku napięć oraz niepewności pomiaru pasożytniczych przesunięć fazowych  $\gamma_D$ . Uwzględniając wyznaczoną eksperymentalnie niepewność pomiaru zespolonego stosunku napięć na poziomie  $10 \cdot 10^{-6}$  w przypadku pomiaru modułu i  $30 \cdot 10^{-6}$  w przypadku pomiaru fazy (przy częstotliwości około 500 Hz) [3], decydującym składnikiem niepewności pomiaru błędów modułu była niepewność wyznaczenia stosunku modułów impedancji rezystorów wzorcowych, którą oszacowano na 0,5%. W przypadku pomiaru błędów fazowych decydującym składnikiem niepewności pomiaru była niepewność wyznaczenia pasożytniczych przesunięć wprowadzanych przez impedancje rezystorów wzorcowych. Niepewność pomiaru błędów fazowych oszacowano na poziomie 3'.



Rys. 4. Charakterystyki częstotliwościowe błędów modułu przekładników prądu  
Fig. 4. Frequency characteristics of module error of some current transformers



Rys. 5. Charakterystyki częstotliwościowe błędów fazowych przekładników prądu  
Fig. 5. Frequency characteristics of phase error of some current transformers

Z przeprowadzonych przez autora prac wynika, że znajomość błędów modułu obwodów wejściowych z niepewnością 0,5% oraz błędów fazowych z niepewnością 5' umożliwia znaczne zmniejszenie składowej błędów pomiaru mocy i wartości skutecznej sygnałów spowodowanej błędami częstotliwościowymi tych obwodów.

## 5. Podsumowanie

W pracy przedstawiono koncepcję pomiaru błędów częstotliwościowych obwodów wejściowych oraz system pomiarowy, w którym tą koncepcję zrealizowano. Uzyskane wyniki badań posłużyły do weryfikacji koncepcji korekcji błędów częstotliwościowych transformatorowych obwodów wejściowych przy pomiarach wartości skutecznej sygnałów energetycznych i ich mocy.

## 6. Literatura

- [1] L. Kadar, P. Hacksel, J. Wikston: The effect of current and voltage transformers accuracy on harmonic measurements in electronic arc furnaces. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 33, no. 3, May/June 1997, pp. 780-783.
- [2] L. Furmankiewicz: Możliwości programowej korekcji błędów wnoszonych przez transformatorowe obwody wejściowe w przetwornikach mocy przy pomiarze sygnałów odkształconych. Rozprawa doktorska. Politechnika Zielonogórska. Zielona Góra, 1998.
- [3] R. Rybski, J. Kaczmarek: Kalibracja próbkującego systemu do pomiaru zespolonego stosunku napięć. Pomiary Automatyka Kontrola. 7/8, 2002, pp. 93-96.
- [4] J. Bolikowski: Czujniki prądu. Elektrotechnika Prądy Niesinusoidalne, VI Szkoła Konferencyjna. Zielona Góra, 2002, pp. 181-192.
- [5] J. Bolikowski (red.): Podstawy projektowania inteligentnych przetworników pomiarowych wielkości elektrycznych. Wydawnictwo WSInż w Zielonej Górze, Zielona Góra 1993
- [6] L. Furmankiewicz, R. Rybski: Pomiar stałej czasowej rezystorów o małej wartości rezystancji. Pomiary Automatyka Kontrola. 6, 2006, pp. 42 - 44.