

Leszek FURMANKIEWICZ

INSTYTUT METROLOGII ELEKTRYCZNEJ, UNIWERSYTET ZIELONOGÓRSKI

Korekcja błędów częstotliwościowych obwodów wejściowych przy pomiarach wartości skutecznej sygnałów i mocy czynnej**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 metodę programowej korekcji błędów częstotliwościowych liniowych obwodów wejściowych realizowaną w dziedzinie widmowej. Metoda wymaga znajomości częstotliwościowych charakterystyk błędów modułu i błędów fazowych korygowanego obwodu. Niepewność wyznaczenia tych charakterystyk jest jednym ze składników decydujących o skuteczności korekcji. Przedstawiono analizę niepewności pomiarów po korekcji przy pomiarach wartości skutecznej i mocy czynnej sygnałów odkształconych.

Słowa kluczowe: korekcja dynamiczna, pomiary wartości skutecznej, pomiary mocy.

Frequency errors correction of input circuit in RMS and power measurements**Abstract**

This paper presents a software method of dynamic errors correction realised in spectrum domain. The correcting method is based on the knowledge of frequency characteristics of magnitude and phase errors. Measurement uncertainty of this errors influence on correction efficiency. An analyses of measurement uncertainty after correction with RMS and real power of distorted signals measurements is also shown.

Keywords: dynamic correction, RMS measurements, power measurements.

1. Wprowadzenie

Jako obwody wejściowe w przetwornikach wielkości elektrycznych stosowane są w torach prądowych boczniki rezystancyjne lub przekładniki prądowe, a w torach napięciowych przekładniki napięciowe lub dzielniki napięcia. Boczniki i dzielniki rezystancyjne stosowane są w przyrządach wysokiej klasy, ze względu na wymagane szerokie pasmo częstotliwościowe, a transformatorowe obwody wejściowe stosowane są w przyrządach przemysłowych. Obwody wejściowe przyrządów pomiarowych obciążone są błędami częstotliwościowymi wynikającymi z faktu, że ich schematy zastępcze zawierają poza rezystorami elementy o reaktancjach zależnych od częstotliwości. Błędy obwodów wejściowych mogą być istotnymi składnikami całkowitego błędu pomiaru. W pracy [2] pokazano, że pomiar mocy przebiegów odkształconych, przy zastosowaniu transformatorowych obwodów wejściowych, może być obciążony błędem kilkukrotnie przekraczającym błąd określany dla przebiegów sinusoidalnych. Została opracowana programowa metoda korekcji błędów obwodów wejściowych w

dziedzinie widmowej. Korekcji dokonuje się na podstawie charakterystyk częstotliwościowych błędów modułu i fazy, które są wyznaczone na podstawie wcześniejszych pomiarów. Metodę zweryfikowano doświadczalnie w przy pomiarach mocy czynnej [2]. Jednym ze składników decydujących o skuteczności metody jest niepewność wyznaczenia częstotliwościowych charakterystyk błędów obwodów wejściowych. W artykule przedstawiono analizę niepewności pomiaru wartości skutecznej sygnałów odkształconych i ich mocy czynnej w zależności od niepewności wyznaczenia charakterystyk częstotliwościowych obwodów wejściowych.

2. Błędy obwodów wejściowych

Przyjmując założenie, że obwody wejściowe przyrządu pomiarowego są przetwornikami liniowymi, do opisu ich właściwości częstotliwościowych stosuje się transmitancję widmową

$$K(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)}, \quad (1)$$

gdzie: $Y(j\omega)$ i $X(j\omega)$ są transformatami Fouriera przebiegu wyjściowego i wejściowego. Podając na wejście obwodu wymuszenie sinusoidalne można na podstawie transmitancji wyznaczyć amplitudę Y_m sygnału wyjściowego

$$Y_m = |K(j\omega)X(j\omega)|. \quad (2)$$

Moduł transmitancji widmowej, równy stosunkowi amplitudy sygnału wyjściowego Y_m i wejściowego X_m

$$|K(j\omega)| = \frac{Y_m}{X_m} \quad (3)$$

jest nazywany charakterystyką amplitudową, a argument transmitancji widmowej

$$\varphi(\omega) = \arg[K(j\omega)] \quad (4)$$

określa przesunięcie pomiędzy sygnałem wyjściowym i wejściowym i jest nazywany charakterystyką fazową.

Od obwodów wejściowych stosowanych w przyrządach do pomiaru sygnałów energetycznych wymaga się stałej charakterystyki amplitudowej w paśmie przetwarzania przyrządu oraz zerowej lub liniowej charakterystyki fazowej. Charakterystyki rzeczywistych obwodów wejściowych odbiegają od tych wymagań, obwody posiadają błędy dynamicznymi.

Błąd dynamiczny Δ definiuje się jako różnicę pomiędzy odpowiedzią widmową obwodu rzeczywistego i obwodu idealnego o transmitancji K

$$\Delta(j\omega) = Y(j\omega) - KX(j\omega). \quad (5)$$

Moduł błędu dynamicznego Δ_m nazywa się błędem modułu lub błędem amplitudy

$$\Delta_m = |\Delta(j\omega)|, \quad (6)$$

a argument γ błędu dynamicznego nazywany jest błędem fazowym

$$\gamma = \arg(\Delta(j\omega)). \quad (7)$$

W praktyce wygodnie jest posługiwać się względnym błędem dynamicznym δ , który można wyrazić wzorem

$$\delta = \left| \frac{Y(j\omega) - KX(j\omega)}{KX(j\omega)} \right| = \left| \frac{K(j\omega) - K}{K} \right|. \quad (8)$$

Elementami decydującymi o błędach dynamicznych obwodów wejściowych są, występujące na ich schematach zastępczych, kondensatory reprezentujące pojemności pasywnicze lub w transformatorach pojemności pomiędzy uzwojeniami, pojemności własne uzwojeń oraz cewki reprezentujące m.in. indukcyjności pasywnicze. Charakterystyki częstotliwościowe błędów obwodów wejściowych można wyznaczyć metodą eksperymentalną lub w oparciu o parametry elementów schematu zastępczego [2].

3. Błędy pomiaru wartości skutecznej i mocy czynnej

Wartość skuteczna okresowego sygnału niesinusoidalnego jest równa pierwiastkowi z sumy kwadratów wartości skutecznych harmonicznych zawartych w przetwarzanym sygnale z harmoniczną zerową włącznie. Wartość skuteczną napięcia U i prądu I wyraża się wzorami:

$$U = \sqrt{U_0^2 + \sum_{k=1}^N U_k^2}, \quad (9)$$

$$I = \sqrt{I_0^2 + \sum_{k=1}^N I_k^2}. \quad (10)$$

Moc czynna P okresowych przebiegów niesinusoidalnych jest równa sumie mocy czynnych harmonicznych zawartych w przetwarzanych sygnałach z harmoniczną zerową włącznie

$$P = U_0 I_0 + \sum_{k=1}^N U_k I_k \cos(\varphi_k). \quad (11)$$

We wzorach (9) – (11) przyjęto oznaczenia: U_0, I_0 – składowe stałe napięcia i prądu, U_k, I_k – wartości skuteczne harmonicznych napięcia i prądu, φ_k – kąt przesunięcia fazowego pomiędzy k -tą harmoniczną napięcia i prądu, N – liczba harmonicznych zawartych w przetwarzanych sygnałach.

Wartości skuteczne napięcia U_δ i prądu I_δ po przetworzeniu przez obwody wejściowe o współczynniku przetwarzania K_{Un} i K_{In} obarczone są błędami modułu tych obwodów δ_{Uk} i δ_{Ik} i można je wyrazić wzorami:

$$U_\delta = K_{Un} \sum_{k=0}^N \sqrt{((1 + \delta_{Uk}) \cdot U_k)^2}, \quad (12)$$

$$I_\delta = K_{In} \sum_{k=0}^N \sqrt{((1 + \delta_{Ik}) \cdot I_k)^2}. \quad (13)$$

Moc czynną P_δ po przetworzeniu przez napięciowe i prądowe obwody wejściowe obarczona jest błędami modułu i błędami fazowymi tych obwodów i można ją wyrazić wzorem

$$P_\delta = K_{U0}(1 + \delta_{U0})K_{I0}(1 + \delta_{I0})U_0 I_0 + K_{Un}K_{In} \sum_{k=1}^N (1 + \delta_{Uk}) \cdot (1 + \delta_{Ik}) U_k I_k \cos(\varphi_k + \gamma_{Uk} - \gamma_{Ik}). \quad (14)$$

W zależnościach (12) - (14) przyjęto następujące oznaczenia parametrów obwodów wejściowych: K_{Un} i K_{In} - znamionowe współczynniki przetwarzania, δ_{Uk} i δ_{Ik} - błędy modułu, a γ_{Uk} i γ_{Ik} - błędy fazowe napięciowego i prądowego obwodu wejściowego. Błędy względne przetwarzania wartości skutecznej sygnałów lub ich mocy spowodowane błędami obwodów wejściowych można wyznaczyć z zależności

$$\delta_X = \frac{X_\delta - X}{X}, \quad (15)$$

gdzie: X_δ oznacza wartość skuteczną lub moc po przetworzeniu przez obwody wejściowe, a X oznacza wartość rzeczywistą mierzonej wielkości. W pracy [2] pokazano, że błąd przetwarzania mocy, w przypadku transformatorowych obwodów wejściowych stosowanych w fabrycznych przetwornikach pomiarowych, przy przetwarzaniu mocy sygnałów odkształconych może osiągnąć wartość kilkunastu procent, co znacznie przewyższa błąd przyrządu występujący przy przetwarzaniu sygnałów sinusoidalnych. Celowym zatem jest stosowanie korekcy błędów wnoszonych przez obwody wejściowe.

4. Korekcja błędów obwodów wejściowych

Metoda korekcji przeznaczona jest do zastosowania w przyrządach pomiarowych realizujących cyfrowe przetwarzanie sygnałów. Przy opracowaniu metody założono, że błędy modułu δ_{Uk} i δ_{Ik} oraz błędy fazowe γ_{Uk} i γ_{Ik} obwodów wejściowych wyznaczone są jednorazowo lub okresowo podczas kalibracji przyrządu pomiarowego. Zakłada się również, że zmiany wartości tych błędów w czasie są pomijalnie małe i nie zależą w istotny sposób od czynników zewnętrznych takich jak temperatura, wilgotność, itp.

Sygnały wyjściowe obwodu napięciowego $u_y(t)$ i prądowego $i_y(t)$ są próbkowane, a następnie na każdym ciągu N próbek napięcia u_{Yn} i prądu i_{Yn} pobranych w równych odstępach czasu jest realizowany algorytm dyskretnego przekształcenia Fouriera DFT. Algorytm ten dostarcza N równoodległych próbek widma A_k zespolonego ciągu wejściowego pobranych w punktach o pulsacjach $\omega_k = 2\pi k/N$

$$A_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} u_{Yn} \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}kn}, \quad (16)$$

gdzie: $k=0, 1, 2, \dots, N-1$.

Następnie wyznaczone są wartości skuteczne harmonicznych sygnału napięciowego U_{Yk} zgodnie ze wzorem

$$U_{Yk} = \sqrt{\frac{1}{2}(\operatorname{Re}^2(A_k) + \operatorname{Im}^2(A_k))}, \quad (17)$$

gdzie: $k=0, 1, 2, \dots, N/2$ oraz fazy φ_{UYk} harmonicznych przebiegu

$$\varphi_{UYk} = \arg(A_k) = \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{Im}(A_k)}{\operatorname{Re}(A_k)} \quad (18)$$

gdzie: $k=1, 2, \dots, N/2$.

W analogiczny sposób wyznaczane są wartości skuteczne I_{Yk} i fazy φ_{Yk} harmonicznych sygnału prądowego. W kolejnym etapie wyznaczana jest widmowa charakterystyka amplitudowa sygnału napięciowego występującego przed obwodem wejściowym z uwzględnieniem błędów amplitudowych i widmowa charakterystyka fazowa z uwzględnieniem błędów kątowych:

$$U_{Xk} = \frac{1}{K_{Un}} \cdot \frac{U_{Yk}}{1 + \delta_{Uk}}, \quad (19)$$

$$\varphi_{UXk} = \varphi_{UYk} - \gamma_{Uk} \quad (20)$$

gdzie: $k=0,1,\dots,N$, a N oznacza liczbę mierzonych harmonicznych.

W analogiczny sposób wyznaczana jest widmowa charakterystyka amplitudowa sygnału prądowego I_{Xk} i widmowa charakterystyka fazowa φ_{IXk} .

Uwzględniając opisany powyżej algorytm przetwarzania wartość skuteczną napięcia i moc czynną oblicza się następująco

$$U = \frac{1}{K_{Un}} \sqrt{\sum_{k=0}^{N-1} \left(\frac{U_{Yk}}{1 + \delta_{Uk}} \right)^2} \quad (21)$$

$$P = \frac{1}{K_{Un}} \frac{1}{K_{In}} \left(\frac{U_0}{1 + \delta_{U0}} \cdot \frac{I_0}{1 + \delta_{I0}} \right) + \quad (22)$$

$$+ \frac{1}{K_{Un}} \frac{1}{K_{In}} \left(\sum_{k=1}^{N-1} \frac{U_{Yk}}{1 + \delta_{Uk}} \cdot \frac{I_{Yk}}{1 + \delta_{Ik}} \cdot \cos(\varphi_{UY} - \varphi_{IY} - \gamma_U + \gamma_I) \right)$$

Z zależności 21 wynika, że do wyznaczenia wartości skutecznej sygnałów wymagana jest znajomość wartości skutecznych harmonicznych zmierzonych za obwodem wejściowym i błędów modułu dla wyznaczonych harmonicznych. Do wyznaczenia mocy czynnej (22) wymagana jest znajomość wartości skutecznych harmonicznych napięcia i prądu, błędów modułu obwodu napięciowego i prądowego, kątów przesunięć fazowych pomiędzy napięciem i prądem zmierzonych harmonicznych oraz błędów fazowych wprowadzanych przez obwody wejściowe.

5. Skuteczność korekcji

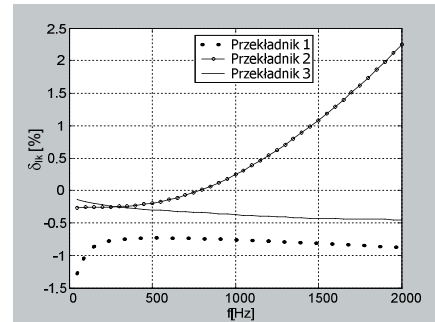
Pomiar wartości skutecznej i mocy przedstawioną metodą jest pomiarem pośrednim, a niepewność pomiaru tych wielkości zależy od niepewności pomiaru wszystkich wielkości występujących we wzorach (21) i (22). W dalszej części pracy zostaną przedstawione wyniki badań wpływu niepewności pomiaru charakterystyk częstotliwościowych błędów modułu i błędów fazowych obwodów wejściowych na niepewność pomiaru wartości skutecznej sygnałów i ich mocy po korekcji. Wyznaczona będzie złożona niepewność standardowa względna [3].

Zakładając, że niepewności pomiaru po korekcji jest spowodowana niepewnością wyznaczenia charakterystyk błędów modułu, niepewność pomiaru wartości skutecznej sygnału napięciowego można wyznaczyć ze wzoru

$$u_c(U) = \frac{\sqrt{\sum_{k=0}^{N-1} \left(U_{Xk} \frac{\delta_{Uk} u_{\delta_{Uk}}}{1 + \delta_{Uk}} \right)^2}}{\sqrt{\sum_{k=0}^{N-1} (U_{Xk})^2}} \quad (23)$$

gdzie: $u_{\delta_{Uk}}$ - oznacza niepewność całkowitą pomiaru błędu modułu dla k-tej harmonicznej. W analogiczny sposób można wyznaczyć niepewność pomiaru prądu $u_c(I)$.

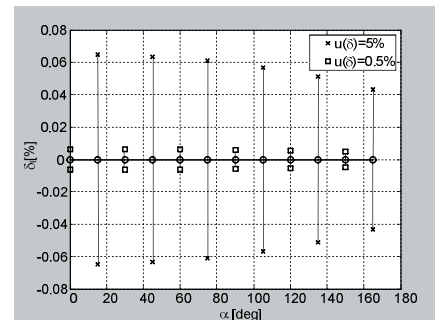
Przeprowadzono badania symulacyjne pozwalające ocenić niepewność wyrażoną zależnością (23). Aby wyniki badań miały znaczenie praktyczne, do obliczeń przyjęto charakterystyki błędów modułu transformatorowych przekładników prądowych stosowanych w fabrycznych przyrządach do pomiaru parametrów sieci energetycznej kilku producentów. Charakterystyki wyznaczono w systemie pomiarowym z kartą akwizycji danych. Do przetwarzania danych wykorzystano algorytm oparty na DFT. Na rys. 1 przedstawiono charakterystyki błędów modułu stosowanych w badaniach przekładników prądowych. W badaniach zastosowano sygnał testowy występujący w tyrystorowych regulatorach napięcia, o kształcie tzw. „ciętej sinusoidy”. Parametrem podczas badań był kąt odcięcia α .



Rys. 1. Częstotliwościowe charakterystyki błędów modułu przekładników prądowych

Fig. 1. Frequency characteristics of current transformers module errors

Na rys. 2 przedstawiono błąd pomiaru wartości skutecznej prądu po korekcji błędów modułu przekładnika „1”, dla dwóch wartości niepewności pomiaru błędów modułu: $u=5\%$ i $u=0,5\%$.



Rys. 2. Błąd pomiaru wartości skutecznej prądu po korekcji spowodowany błędami modułu przekładnika prądowego

Fig. 2. Current RMS measurement error after correction obtain as result of current transformer module errors

Z rysunków 1 i 2 wynika, że niepewność pomiaru wartości skutecznej po korekcji zależy od kształtu sygnału i wartości błędów modułu. W przypadku przekładnika „1”, przy znacznym udziale wyższych harmonicznych w przetwarzanym sygnale, niepewność pomiaru po korekcji jest mniejsza niż w przypadku sygnału sinusoidalnego, co wynika ze zmniejszających się wartości błędów modułu tego przekładnika dla wyższych harmonicznych (rys 1). Znajomość błędów modułu z niepewnością 5% umożliwia znaczne zmniejszenie składowej błęd pomiaru wartości skutecznej prądu spowodowanej tymi błędami. Niepewność pomiaru po korekcji nie przekracza kilku setnych procenta. W przypadku dokładniejszego wyznaczenia charakterystyk błędów modułu (z niepewnością 0,5%) niepewność pomiaru po korekcji nie przekracza wartości 0,01%.

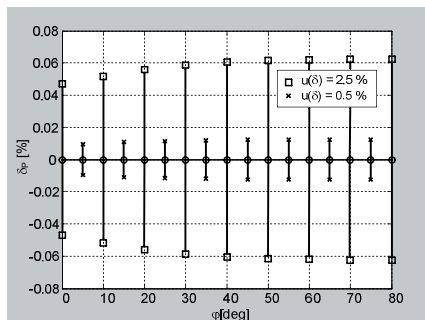
W przypadku mocy czynnej przeanalizowano wpływ niepewności pomiaru błędów modułu i błędów fazowych obwodów wejściowych na niepewność pomiaru po korekcji. Zakładając, że niepewności pomiaru mocy po korekcji spowodowana jest niepewnością wyznaczenia charakterystyk

błędów modułu prądowego obwodu wejściowego, niepewność tą można obliczyć z zależności

$$u_C(P) = \frac{\sqrt{\left(U_0 I_0 \frac{\delta_{I0}}{1 + \delta_{I0}} \right)^2 + \sum_{k=1}^{N-1} (U_k I_k \cos(\varphi_k))^2 \left(\frac{\delta_{I_k} u_{\delta_{I_k}}}{1 + \delta_{I_k}} \right)^2}}{\sum_{k=0}^{N-1} U_k I_k \cos(\varphi_k)} \quad (24)$$

gdzie: $u_{\delta_{I_k}}$ - oznacza niepewność całkowitą pomiaru błędu modułu dla k-tej harmonicznej. W analogiczny sposób można przedstawić niepewność pomiaru mocy spowodowaną niepewnością wyznaczenia charakterystyki błędu modułu napięciowego obwodu wejściowego.

Posługując się zależnością (24) przeprowadzono badania symulacyjne dla sygnałów odkształconych, odbiornika o charakterze rezystancyjno – indukcyjnościowym, przy zmieniającym się kącie przesunięcia fazowego pomiędzy podstawową harmoniczną napięcia i prądu. Na rys. 3 przedstawiono wyniki tych obliczeń dla przekładnika prądowego i napięciowego obwodu wejściowego, o zbliżonej częstotliwościowej charakterystyce błędu modułu, dla dwóch wartości niepewności pomiaru charakterystyk błędów modułu tych obwodów wejściowych (0,5% i 2,5%) oraz kąta $\alpha=90^\circ$. Rezultaty obliczeń, przedstawione graficznie na rys. 3, wskazują, że znajomość błędów modułu z niepewnością 0,5% umożliwia zmniejszenie składowej błęd pomiaru mocy spowodowanej tymi błędami do poziomu kilku setnych procenta.



Rys. 3. Błąd pomiaru mocy po korekcji spowodowany błędami modułu obwodów wejściowych

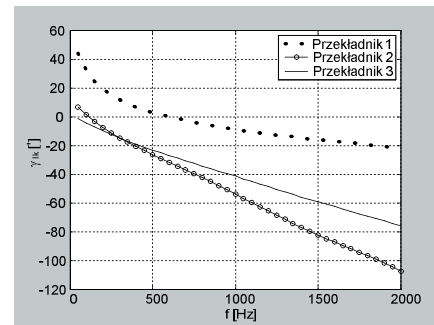
Fig. 3. Power measurement error after correction obtain as result of input circuit module errors

Zakładając, że niepewności pomiaru mocy po korekcji spowodowana jest niepewnością wyznaczenia częstotliwościowej charakterystyki błędów fazowych prądowego obwodu wejściowego, niepewność tą można wyznaczyć z zależności

$$u_C(P) = \frac{\sqrt{\sum_{k=0}^{N-1} U_k^2 I_k^2 \sin^2(\varphi_k + \gamma_{I_k}) (u_{\gamma_{I_k}})^2}}{\sum_{k=0}^{N-1} U_k I_k \cos(\varphi_k + \gamma_{I_k})} \quad (25)$$

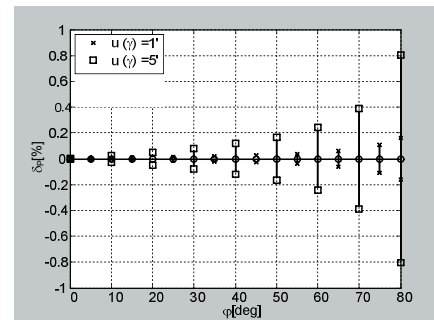
gdzie: $u_{\gamma_{I_k}}$ oznacza niepewność pomiaru błędy fazowego dla k-tej harmonicznej. Analogiczna zależność obowiązuje dla napięciowego obwodu wejściowego. Posługując się zależnością (25) przeprowadzono obliczenia dla sygnałów odkształconych, odbiornika o charakterze rezystancyjno – indukcyjnościowym, przy zmieniającym się kącie przesunięcia fazowego pomiędzy podstawową harmoniczną napięcia i prądu. W obliczeniach wykorzystano charakterystyki częstotliwościowe błędów fazowych przekładników prądowych przedstawione na rys. 4. Na

rys 5 przedstawiono wyniki tych obliczeń dla dwóch wartości niepewności pomiaru błędów fazowych (1' i 5').



Rys. 4. Częstotliwościowe charakterystyki błędów fazowych przekładników prądowych

Fig. 4. Frequency characteristics of current transformers phase errors



Rys. 5. Błąd pomiaru mocy po korekcji spowodowany błędami fazowymi obwodu prądowego

Fig. 5. Power measurement error after correction obtain as result of current transformer phase errors

Wyniki badań przedstawione graficznie na rys. 5 świadczą o możliwości zmniejszenia błędów pomiaru mocy po korekcji do poziomu kilku dziesiątych procenta, przy znajomości błędów fazowych obwodów wejściowych z niepewnością kilku minut.

6. Podsumowanie

W artykule przedstawiono metodę korekcji błędów częstotliwościowych liniowych obwodów wejściowych realizowaną w dziedzinie widmowej. Metoda wymaga znajomości błędów częstotliwościowych obwodów wejściowych. O skuteczności korekcji decyduje m.in. niepewność z jaką wyznaczono te błędy. Przeprowadzona analiza niepewności pomiaru wartości skutecznej i mocy po korekcji pozwoliła określić wymagania dokładnościowe dla układów pomiarowych stosowanych do wyznaczenia błędów obwodów wejściowych na potrzeby korekcji dynamicznej. Uzyskane wyniki badań posłużą do oceny całkowitej niepewności pomiaru wybranych parametrów sygnałów elektrycznych z uwzględnieniem innych źródeł niepewności.

7. Literatura

- [1] Bolikowski J, Furmankiewicz L.: Sposób korekcji błędów częstotliwościowych obwodów wejściowych przyrządu pomiarowego przy pomiarach elektrycznej mocy czynnej, napięcia i prądu. Patent nr 191138. Urząd Patentowy RP. Data zgłoszenia 1999, data udzielenia 2006.
- [2] Furmankiewicz L: Możliwości programowej korekcji błędów wnoszonych przez transformatorowe obwody wejściowe w przetwornikach mocy przy pomiarze sygnałów odkształconych. Praca doktorska. Politechnika Zielonogórska, Zielona Góra 1998.
- [3] Wyrażanie niepewności pomiaru: Przewodnik. Główny Urząd Miar, Warszawa 1999.