

**Leszek FURMANKIEWICZ**

UNIwersytet Zielonogórski, Instytut Metrologii Elektrycznej,  
ul. Podgórna 50, 65-246 Zielona Góra

## Właściwości metody programowej korekcji błędów częstotliwościowych transformatora prądowego w zakresie nieliniowej pracy przy pomiarach mocy

Dr inż. Leszek FURMANKIEWICZ



Studia wyższe ukończył na Wydziale Elektrycznym Wyższej Szkoły Inżynierskiej w Zielonej Górze w 1988r. Stopień naukowy doktora otrzymał na Wydziale Elektrycznym Politechniki Zielonogórskiej w 1998 r. Obecnie pracuje na stanowisku adiunkta w Instytucie Metrologii Elektrycznej Uniwersytetu Zielonogórskiego. Głównie zainteresowania zawodowe to systemy pomiarowe oraz pomiary wielkości elektrycznych, a w szczególności pomiary parametrów sieci energetycznej.

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

### Streszczenie

Artykuł dotyczy metody korekcji częstotliwościowych błędów modułu i błędów fazowych opracowanej dla liniowych obwodów wejściowych. Korekcja realizowana jest w sposób programowy w dziedzinie widmowej. Przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych obrazujące skuteczność metody korekcji przy pomiarach mocy sygnałów w zakresie nieliniowej charakterystyki przetwarzania przekładnika prądowego. Wyniki badań wskazują, że możliwa jest korekcja błędów częstotliwościowych obwodów wejściowych przy pomiarach mocy również w zakresie nieliniowej pracy obwodów wejściowych.

**Słowa kluczowe:** przekładnik prądowy, błędy częstotliwościowe, korekcja błędów częstotliwościowych.

### Properties of the method of current transformer frequency error correction within the range of nonlinear operation for power measurements

#### Abstract

The paper deals with the method for correction of dynamic module and phase errors of linear input circuits. The method is implemented in the spectral domain in a programmed manner using the FFT algorithm. Correction of the signal spectrum is based on frequency characteristics of the input circuit module and phase errors determined on the basis of previous measurements [1]. The method can be used for measuring the RMS value and power of signals. This paper presents the results of experiments showing the effectiveness of the correction method for measuring the power in the range of the current transformer nonlinear operation. Figs. 1a and 1b show the frequency characteristics of the module and phase errors of the current transformer used for tests. The block diagrams of the measuring systems used for examination of the correction effectiveness for measuring sinusoidal and non-sinusoidal waveforms are depicted in Figs. 2 and 3. The power measurement errors before and after correction for a sinusoidal waveform of frequency 50 Hz and 350 Hz and a resistive load are presented in Fig. 4a, while Fig. 4b shows the power measurement errors before and after correction for the phase angle between the voltage and current equal to 30 and 60 degrees. In Tab. 1 there are given the power measurement errors before and after correction for the waveform containing the first and third harmonic and a resistive load. In Tab. 2 there are compared the power measurement errors before and after correction for the waveforms similar to that of the thyristor voltage regulator and for a resistive load. The results show that it is possible to correct the frequency errors of current transformers when measuring the power in the range of the transformer nonlinear operation.

**Keywords:** current transformer, frequency errors, frequency error correction.

### 1. Wprowadzenie

W przyrządach pomiarowych wielkości energetycznych wymagane jest dopasowanie poziomów mierzonych sygnałów (napięć i prądów) do poziomów napięć wejściowych przetworników

analogowo – cyfrowych, których wartości nie przekraczają  $\pm 10V$ . Z tego względu przed przetwornikiem analogowo – cyfrowym stosowane są obwody wejściowe. Aktualne wymagania stawiane przyrządom do pomiaru wielkości energetycznych powodują konieczność przetwarzania przebiegów niesinusoidalnych zwiększając tym samym częstotliwościowy zakres pracy obwodów wejściowych. Błędy częstotliwościowe obwodów wejściowych mogą być istotnymi składnikami całkowitego błędu pomiaru przy przetwarzaniu przebiegów niesinusoidalnych [1]. Opracowana przez autora programowa metoda korekcji błędów częstotliwościowych umożliwia zmniejszenie składowych błędów pomiaru wnoszonych przez obwody wejściowe. Wykazano dużą skuteczność metody przy pomiarze mocy sygnałów niesinusoidalnych z wykorzystaniem transformatorowych obwodów wejściowych stosowanych w fabrycznych przyrządach pomiarowych, w liniowym zakresie ich pracy [1]. W artykule zostaną zaprezentowane wyniki badań eksperymentalnych obrazujące właściwości metody korekcji błędów częstotliwościowych w zakresie nieliniowej pracy przekładnika prądowego przy pomiarach mocy. Znajomość skuteczności metody korekcji w zakresie nieliniowej pracy transformatora jest istotna, w przypadku zastosowania tej metody do pomiarów w warunkach, w których prąd mierzony wchodzi w zakres nieliniowej pracy transformatora.

### 2. Błędy obwodów wejściowych i metoda korekcji tych błędów

Podstawowymi parametrami metrologicznymi przekładników prądowych są przekładnia i błąd przekładni. Błąd przekładni określony jest przez dwa składniki: błąd modułu  $\delta_l$  i błąd fazowy  $\gamma_l$ , które są zależne od częstotliwości i prądu. Zatem przekładniki prądowe wprowadzają zniekształcenia liniowe i nieliniowe. Uwzględniając, że zniekształcenia nieliniowe wnoszone przez przekładniki prądowe są na poziomie niższym od 0.1%, przyjmuje się, że są to układy liniowe. Takie założenie było podstawą do opracowania metody korekcji błędów częstotliwościowych obwodów wejściowych (zniekształceń liniowych). Metoda korekcji realizowana jest w dziedzinie widmowej i wykorzystuje algorytm FFT. Korekcji widma sygnałów wyjściowych dokonuje się na podstawie charakterystyk częstotliwościowych błędów modułu i fazowych obwodów wejściowych, które są wyznaczone na podstawie wcześniejszych pomiarów. Metoda została zastosowana do korekcji błędów wnoszonych przez transformatorowe obwody wejściowe przy pomiarach mocy, jednak może być stosowana do dowolnego typu liniowych obwodów wejściowych. Algorytm korekcji zakłada znajomość charakterystyki częstotliwościowej błędów modułu napięciowego  $\delta_{Uk}$  i prądowego  $\delta_{Ik}$  obwodu wejściowego oraz błędów fazowych  $\gamma_{Uk}$  i  $\gamma_{Ik}$  tych obwodów, które zostały wyznaczone w zakładanym paśmie przetwarzania przyrządu obejmującym  $k$  harmonicznych. Sygnały wyjściowe obwodów są próbkowane, a następnie wyznaczane są wartości skuteczne harmonicznych sygnałów wyjściowych  $U_{Yk}$  - napięciowego i  $I_{Yk}$  - prądowego obwodu wejściowego oraz fazy harmonicznych  $\varphi_{UYk}$  - napięciowego i  $\varphi_{IYk}$  - prądowego obwodu wejściowego. W kolejnym etapie wyznaczane są widmowe charakterystyki modułów i fazowe sygnałów występujących przed obwodami wejściowymi z uwzględnieniem znamionowych współczynników przetwarzania napięciowego  $K_{Un}$  i prądowego  $K_{In}$  obwodu wejściowego. Zakładając, że w procesie próbkowania zbieranych jest  $N$  próbek mierzonych sygnałów moc czynna  $P_\delta$  obliczana jest następująco:

$$P_{\delta} = \frac{1}{K_{Un}} \frac{1}{K_{In}} \left( \frac{U_0}{1 + \delta_{U0}} \frac{I_0}{1 + \delta_{I0}} \right) + \frac{1}{K_{Un}} \frac{1}{K_{In}} \left( \sum_{k=1}^{N/2} \frac{U_{Yk}}{1 + \delta_{Uk}} \cdot \frac{I_{Yk}}{1 + \delta_{Ik}} \cdot \cos(\varphi_{UYk} - \varphi_{IYk} - \gamma_{Uk} + \gamma_{Ik}) \right) \quad (1)$$

Skuteczność metody korekcji można ocenić wyznaczając względny błąd  $\delta_P$  pomiaru mocy  $P_{\delta}$  po korekcji, w odniesieniu do mocy rzeczywistej  $P$  przetwarzanej przez obwody wejściowe:

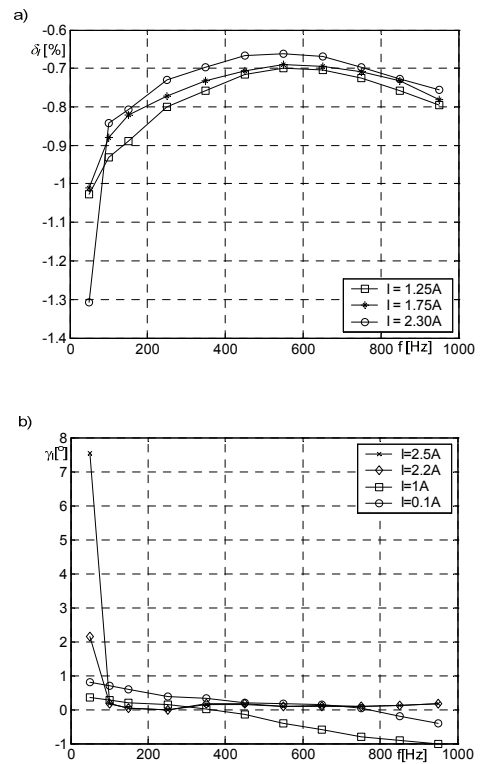
$$\delta_P = \frac{P_{\delta} - P}{P} \quad (2)$$

Dążąc do praktycznego zastosowania metody korekcji błędów częstotliwościowych należy ocenić wpływ błędów częstotliwościowych na dokładność przetwarzania mierzonej wielkości oraz określić wymagania dotyczące niepewności pomiaru błędów częstotliwościowych tych obwodów tak, aby zastosowanie korekcji było skuteczne. Skuteczność korekcji zmniejszając zniekształcenia nieliniowe wnoszone przez obwody wejściowe. Źródłem błędów po korekcji są pojawiające się w sygnale wyjściowym dodatkowe składowe harmoniczne, które są również poddawane korekcji. W takim przypadku algorytm korekcji, w zależności od znaku wyznaczonych błędów częstotliwościowych, może zwiększyć lub zmniejszyć udział dodatkowej harmonicznej w sygnale wyjściowym. W przypadku, gdy wystąpi zjawisko mieszania harmonicznych, składowe harmoniczne mogą być korygowane niewłaściwymi wartościami. W przypadku transformatorowych obwodów wejściowych dochodzi do sytuacji, w której sygnał mierzony wychodzi poza zakres liniowej pracy przekładnika powodując jego zniekształcenia. W takim przypadku istotna jest znajomość wpływu tych zniekształceń na skuteczność korekcji.

### 3. Wyniki badań eksperymentalnych

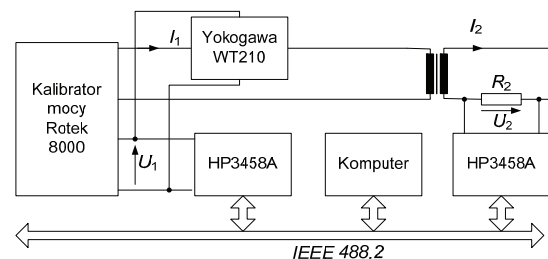
Do przeprowadzenia badań eksperymentalnych wykorzystano przekładnik prądowy stosowany w przemysłowych przetwornikach mocy o parametrach: znamionowy prąd wejściowy  $I_1 = 5A$ , liczba zwojów uzwojenia pierwotnego  $z_1=1$ , liczba zwojów uzwojenia wtórnego  $z_2=1000$ . Na potrzeby eksperymentu zwiększono liczbę zwojów w uzwojeniu pierwotnym do  $z_1=20$  w celu uzyskania nasycenia rdzenia przy prądzie wejściowym o wartości ok.  $2 \div 2.5A$ . Tak przygotowany transformator wykazywał zniekształcenia prądu wyjściowego (THD) z zakresu  $1 \div 16\%$  dla prądów wejściowych z zakresu  $1.8 \div 2.5A$ . Wyznaczono częstotliwościowe charakterystyki błędów modułu (rys. 1a) i błędów fazowych (rys. 1b) transformatora oraz charakterystyki prądowe tych błędów. Charakterystyki zostały wyznaczone w opracowanym w Instytucie Metrologii Elektrycznej Uniwersytetu Zielonogórskiego systemie pomiarowym, w którym realizowany jest pomiar metodą zespolonego stosunku napięć [2]. Niepewność pomiaru błędów modułu oszacowano na  $0,5\%$ , natomiast niepewność pomiaru błędów fazowych oszacowano na  $0,05^\circ$ . Charakterystyki częstotliwościowe błędów są silnie nieliniowe. Z tych charakterystyk można również odczytać silnie nieliniową zależność błędów modułu i błędów fazowych w funkcji prądu dla przebiegów o częstotliwości  $50Hz$ .

W celu sprawdzenia skuteczności metody korekcji zrealizowano systemy pomiarowe na bazie interfejsu IEEE 488.2, których uproszczone struktury przedstawiono na rys. 2 i rys. 3. System pomiarowy przedstawiony na rys. 2 zastosowano do przeprowadzenia badań przy przetwarzaniu mocy przebiegów sinusoidalnych i niesinusoidalnych z jedną nadharmoniczną. Źródłem przetwarzanych przebiegów był kalibrator mocy firmy Rotek model 8000 (rys. 3), natomiast w przypadku przebiegów poliharmonicznych źródłem sygnałów mierzonych był generator przebiegów arbitralnych Agilent 33220A (rys. 3). Do wyjścia generatora dołączono wzmacniacz mocy o maksymalnym prądzie wyjściowym równym  $3.2A$ .

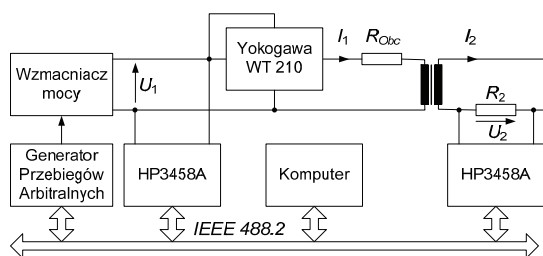


Rys. 1. Charakterystyki częstotliwościowe a) błędów modułu transformatora prądowego, b) błędów fazowych transformatora prądowego  
Fig. 1. Frequency characteristics of the current transformer module (a) and phase (b) error

Do pomiarów przebiegów napięcia i prądu wyjściowego transformatora prądowego zastosowano multimetry HP3458A pracujące w trybie próbkowania, określanym przez producenta jako *Direct Sampling*, z zewnętrznym wyzwalaniem. Proces próbkowania sygnału napięciowego i prądowego wyzwalany był jednocześnie przez zewnętrzny generator. W procesie próbkowania zbierano 512 próbek mierzonego sygnału. Na podstawie zebranych próbek wyznaczano widmo amplitudowe i fazowe przetwarzanych przebiegów, następnie realizowany był algorytm korekcji widma amplitudowego i fazowego przebiegu występującego na wyjściu przekładnika prądowego, po czym wyznaczano moc czynną zgodnie ze wzorem (1). Założono że błędy przetwarzania modułu  $\delta_{Uk}$  i fazy  $\gamma_{Uk}$  przebiegów napięciowych przez multimetr HP3458A są pomijalnie małe i przyjęto, że ich wartości są równe zero. Błędy przetwarzania mocy po korekcji wyznaczono zgodnie ze wzorem (2), gdzie za moc  $P$  przyjęto wartość wskazywaną przez miernik mocy Yokogawa WT210.



Rys. 2. Uproszczone schemat blokowy systemu pomiarowego do pomiarów mocy przebiegów sinusoidalnych i niesinusoidalnych z jedną nadharmoniczną  
Fig. 2. Simplified block diagram of the measuring system for power measurements of sinusoidal and nonsinusoidal waveforms with one superharmonic

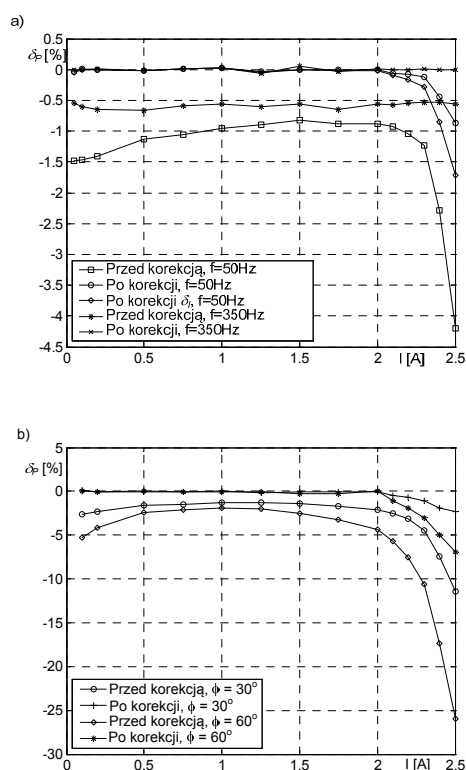


Rys. 3. Uproszczony schemat blokowy systemu pomiarowego do pomiarów mocy przebiegów niesinusoidalnych

Fig. 3. Simplified block diagram of the measuring system for power measurement of nonsinusoidal waveforms

Przeprowadzono badania skuteczności metody korekcji przy przetwarzaniu przez transformator przebiegów sinusoidalnych i niesinusoidalnych w zakresie liniowej i nieliniowej pracy transformatora. Na rys. 4a przedstawiono charakterystyki błędów pomiaru mocy bez korekcji  $\delta_p$  i po korekcji dla przebiegów o częstotliwości 50 Hz i 350 Hz i obciążenia rezystancyjnego. Widoczny jest wyraźny wzrost błędów pomiaru mocy bez korekcji w zakresie nieliniowej pracy transformatora (dla prądów większych od 2 A). Widoczne jest również wyraźne zmniejszenie wartości błędów pomiaru mocy po korekcji tylko błędów modułu (dla częstotliwości 50 Hz) oraz po korekcji błędów modułu i błędów fazowych.

Na rys. 4b przedstawiono charakterystyki błędów pomiarów mocy bez korekcji i po korekcji dla przebiegów sinusoidalnych w zależności od kąta przesunięcia fazowego pomiędzy napięciem i prądem.



Rys. 4. Charakterystyki prądowe błędów pomiaru mocy przed korekcją i po korekcji: a) dla wybranych częstotliwości, b) dla wybranych wartości kąta przesunięcia fazowego pomiędzy napięciem i prądem

Fig. 4. Current characteristics of power measurement errors before and after correction a) for selected frequencies, b) for selected phase angles between voltage and current

W przypadku dużych przesunięć fazowych pomiędzy napięciem i prądem decydujący wpływ na błąd pomiaru mocy mają błędy fazowe. Charakterystyki pokazują dużą skuteczność korek-

cji tych błędów również w zakresie nieliniowej pracy transformatora. W tabeli 1 przedstawiono błędy pomiarów mocy bez korekcji  $\delta_p$  i po korekcji  $\delta_{pp}$  dla przebiegów niesinusoidalnych i odbiornika rezystancyjnego w zależności od prądu przekładnika prądowego  $I_1$ . Wymuszeniem był sygnał zawierający składową podstawową i trzecią harmoniczną, której amplituda wynosiła 10 % amplitudy składowej podstawowej.

Tab. 1. Porównanie błędów pomiaru mocy przebiegów niesinusoidalnych przed korekcją i po korekcji w zależności od mierzonego prądu

Tab. 1. Comparison of the measurement errors of nonsinusoidal waveforms before and after correction depending on the measured current

$I_1$ [A]	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75
$\delta_p$ [%]	1,2	-1,2	-1,2	-1,1	-1,0	-1,0
$\delta_{pp}$ [%]	-0,12	-0,14	-0,19	-0,15	-0,19	-0,14
$I_1$ [A]	2,00	2,10	2,20	2,30	2,40	2,50
$\delta_p$ [%]	-1,0	-1,1	-1,4	-2,5	-4,7	-7,9
$\delta_{pp}$ [%]	-0,09	-0,16	-0,39	-1,4	-2,7	-4,9

Wyznaczono również błędy pomiaru mocy przy pomiarach przebiegów niesinusoidalnych (tab. 2) uzyskanych z syntezy 5 nieparzystych harmonicznych przebiegu wyjściowego z tyrystorowego regulatora napięcia o kształcie tzw. „ciętej sinusoidy”. Przebieg uzyskano przez odpowiednie zaprogramowanie generatora. Parametrem podczas badań był kąt załączenia tyrystora  $\alpha$ .

Tab. 2. Porównanie błędów pomiaru mocy przebiegów niesinusoidalnych przed korekcją i po korekcji w zależności od kąta załączenia tyrystora

Tab. 2. Comparison of the measurement errors of nonsinusoidal waveforms before and after correction depending on the thyristor firing angle

$\alpha$ [°]	15	30	45	60	75	90
$\delta_p$ [%]	-0,85	-0,92	-0,95	-1,2	-1,0	-0,7
$\delta_{pp}$ [%]	-0,18	-0,09	0,11	0,27	0,21	-0,15

Wyniki badań zamieszczone w tab. 1 i tab. 2 pokazują wyraźne zmniejszenie wartości błędów po korekcji również dla dużych zniekształceń mierzonego prądu. Skuteczność korekcji błędów pomiaru mocy przenoszonych przez składową podstawową ma decydujący wpływ na całkowity błąd pomiaru mocy po korekcji. Skuteczność korekcji błędów pomiaru mocy przenoszonych przez wyższe harmoniczne jest mniejsza od skuteczności korekcji błędów pomiaru mocy przenoszonych przez składową podstawową.

#### 4. Podsumowanie

Wyniki badań eksperymentalnych wskazują, że zastosowanie metody korekcji w zakresie liniowej i nieliniowej pracy prądowego transformatora pomiarowego zmniejsza błędy pomiaru mocy. Korekcja powoduje zmniejszenie składowych błędów pomiaru mocy wnoszonych przez częstotliwościowe błędy modułu i błędy fazowe. W zakresie nieliniowej pracy transformatora skuteczność korekcji jest znacznie mniejsza niż w zakresie liniowych charakterystyk przetwarzania.

#### 5. Literatura

- [1] Furmankiewicz L.: Programowa korekcja błędów wnoszonych przez obwoły wejściowe w przetwornikach mocy. Jakość i Użytkowanie Energii Elektrycznej, 1999.
- [2] Rybski R., Kaczmarek J.: Kalibracja próbującego systemu do pomiaru zespolonego stosunku napięć. Pomiary Automatyka Kontrola 7/8, 2002.

otrzymano / received: 28.06.2012

przyjęto do druku / accepted: 02.08.2012

artykuł recenzowany / revised paper