

PROGRAMOWA KOREKCJA BŁĘDÓW WNOSZONYCH PRZEZ OBWODY WEJŚCIOWE W PRZETWORNIKACH MOCY¹⁾

Using Software as a Method of Correcting Errors in Power Transducers

Leszek FURMANKIEWICZ

Politechnika Zielonogórska

Streszczenie: W artykule przedstawiono wpływ błędów transformatorowych obwodów wejściowych stosowanych w elektronicznych przetwornikach mocy, na dokładność przetwarzania mocy sygnałów niesinusoidalnych. Zaprezentowano metodę programowej korekcji składowej błędu pomiaru mocy wnoszonej przez obwody wejściowe oraz przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych potwierdzające skuteczność korekcji.

Summary: This paper presents a software method of correcting an errors that are introduced by measuring transformers on power measurements accuracy with distorted signals. The method has been implemented in a sampling of power transducers. The basis of the method is knowledge concerning the frequency response of measuring transformers errors (both current and voltage modules and current and voltage phases). The current and voltage signals are sampled, and FFT is executed. Real power is calculated as a sum of power harmonics in compliance with transformers errors (modules and phases). Results of the method also are shown.

1. WPROWADZENIE

Aktualne wymagania stawiane przetwornikom wielkości elektroenergetycznych powodują konieczność przetwarzania parametrów przebiegów niesinusoidalnych, zwiększając tym samym ich częstotliwościowy zakres pracy. Przy tym, rozszerzenie pasma nie powinno powodować wzrostu błędów przetwarzania. Stosowane powszechnie w obwodach wejściowych elektronicznych przetworników mocy przekładniki pomiarowe są źródłem znacznych błędów, których nie można korygować klasycznymi metodami ze względu na ich zależność od kształtu sygnałów wejściowych. Stąd parametry produkowanych przetworników mocy określane są dla sygnałów sinusoidalnych, a dodatkowe błędy od kształtu sygnałów podawane są (nie zawsze) w sposób orientacyjny.

Dążąc do zwiększenia dokładności przetworników przy przetwarzaniu mocy przebiegów niesinusoidalnych należy, obok właściwego wyboru metody przetwarzania, ocenić wpływ błędów wnoszonych przez obwody wejściowe na

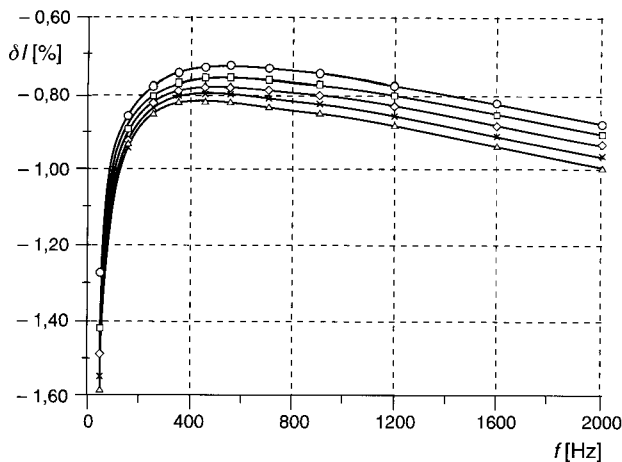
wypadkowy błąd przetwarzania. Wyniki takiej analizy powinny umożliwiać:

- określenie wymagań stawianych obwodom wejściowym, co pozwoli na ich właściwy wybór w zależności od zastosowania oraz — tam, gdzie będzie to niezbędne — optymalizację konstrukcji ze względu na minimalny błąd przetwarzania,
- korekcję wpływu składowej błędu wnoszonej przez obwody wejściowe przez zastosowanie odpowiednich procedur programowych.

2. WPŁYW BŁĘDÓW OBWODÓW WEJŚCIOWYCH

Najważniejszymi parametrami metrologicznymi obwodów wejściowych są przekładnia i błąd przekładni. W przypadku przekładnika prądowego o przekładni znamionowej K_n określony jest błąd prądowy nazywany błędem modułu [3]:

1) Artykuł był prezentowany podczas IV Szkoły — Konferencji pt.: „Elektrotechnika — prądy niesinusoidalne” w Zielonej Górze (18–20 czerwca 1998 r.). Decyzją Komitetu Naukowego konferencji został wybrany do opublikowania w czasopiśmie **Jakość i Użytkowanie Energii Elektrycznej** (Informacje, strona 121).



Rys. 1. Charakterystyki częstotliwościowe błędu modułu przekładnika prądu dla wybranych wartości prądu

$$\delta I = \frac{K_n \cdot I_s - I_p}{I_p} \quad (1)$$

gdzie:

- I_p — rzeczywisty prąd pierwotny
- I_s — rzeczywisty prąd wtórny odpowiadający prądowi I_p w chwili pomiaru.

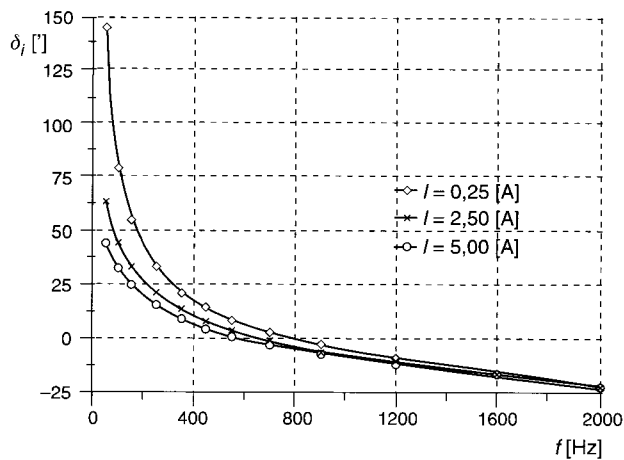
Błąd kątowy definiowany jest jako kąt fazowy pomiędzy wektorami prądów pierwotnego i wtórnego, jeżeli zwroty wektorów są tak dobrane, że w idealnym przekładniku błąd jest równy zero. Błąd kątowy uznaje się za dodatni, gdy wektor prądu wtórnego wyprzedza wektor prądu pierwotnego [3]. Analogicznie można zdefiniować błędy napięciowego obwodu wejściowego.

Zbadanie wpływu obwodów wejściowych na błąd przetwarzania mocy wymaga znajomości charakterystyk częstotliwościowych i prądowych błędów modułu i błędów kątowych. W przeprowadzonych badaniach wykorzystano charakterystyki wybranych przekładników stosowanych w fabrycznych przetwornikach mocy czynnej takich firm, jak: Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Metrologii Elektrycznej METROL w Zielonej Górze, LUMEL w Zielonej Górze, NORMA i Elektroizmieritel z Witebska. Charakterystyki te wyznaczono metodą cyfrowego przetwarzania sygnałów w paśmie częstotliwości $50 \div 2000$ Hz z wykorzystaniem algorytmu szybkiej transformacji Fouriera [2]. Błędy modułu zmierzono z dokładnością $\pm 1\%$, a błędy kątowe z dokładnością $\pm 5'$. Przykładowe wyniki pomiarów błędów przekładni jednego z przekładników prądowych przedstawiono na rysunkach 1 i 2. Charakterystyki składowych błędów przekładni innych przekładników przedstawiono w pracach [2, 4].

Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono charakterystyki składowych błędów przekładni napięciowego obwodu wejściowego.

Przyjmując, że jedynym źródłem błędów pomiaru mocy czynnej są błędy przekładni obwodów wejściowych, można przetwarzaną moc czynną przedstawić w następujący sposób:

$$P_{\delta} = \sum_{k=1}^N U_k \cdot I_k \cdot (1 + \delta U_k + \delta I_k) \cdot \cos(\varphi_k + \delta_{uk} - \delta_{ik}) \quad (2)$$



Rys. 2. Charakterystyki częstotliwościowe błędu kątowego przekładnika prądu dla wybranych wartości prądu

gdzie:

- U_k, I_k — wartości skuteczne k -tej harmonicznej napięcia i prądu,
- $\delta U_k, \delta I_k$ — błędy modułu obwodu napięciowego i prądowego dla k -tej harmonicznej,
- δ_{uk}, δ_{ik} — błędy kątowe obwodu napięciowego i prądowego dla k -tej harmonicznej,
- φ_k — kąt przesunięcia fazowego pomiędzy k -tą harmoniczną napięcia i prądu.

Błąd przetwarzania mocy spowodowany błędami obwodów wejściowych można obliczyć ze wzoru:

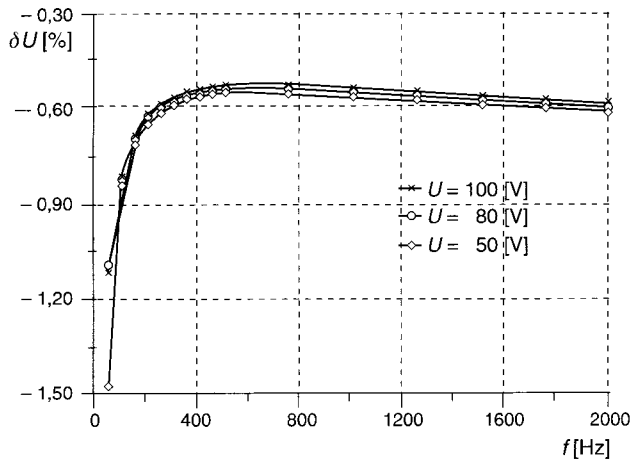
$$\delta_D = \frac{P_{\delta} - P}{P} \quad (3)$$

gdzie P oznacza wartość mocy wyznaczoną dla obwodów wejściowych o zerowych błędach przekładni.

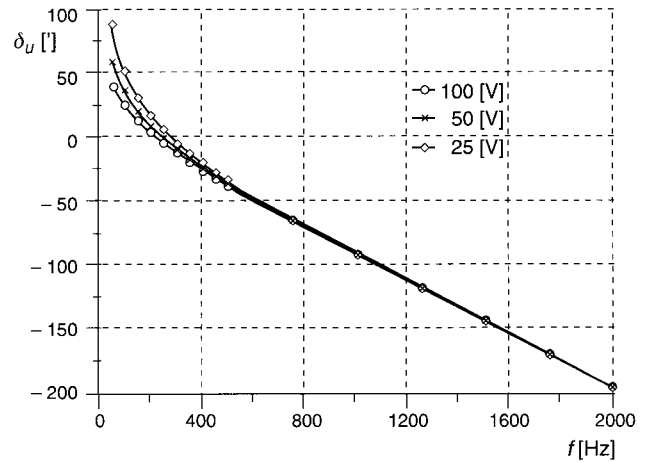
Wykorzystując zależności (2), (3) oraz wyznaczone z pomiarów charakterystyki błędów obwodów wejściowych (rys.1, 2, 3, 4) przeprowadzono badania symulacyjne wpływu kształtu napięcia i prądu na dodatkowy błąd przetwarzania mocy. Jako przebiegi testowe przyjęto przebiegi o kształcie tzw. „ciętej sinusoidy” występujące w obwodach z tyrystorową regulacją mocy. W badaniach symulacyjnych przyjęto, że źródło napięcia obciążone jest liniowym odbiornikiem o charakterze rezystancyjno-indukcyjnym. Sposób uwzględniania w obliczeniach parametrów przetwarzanych przebiegów (widmo amplitudowe) i parametrów obciążenia przedstawiono w pracy [2].

Na rysunku 5 przedstawiono charakterystyki błędów przetwarzania mocy spowodowanych błędami wybranych obwodów wejściowych. Ponadto, przyjęto następujące oznaczenia: α — kąt odcięcia sinusoidy, φ — kąt przesunięcia fazowego pomiędzy podstawową harmoniczną napięcia i prądu.

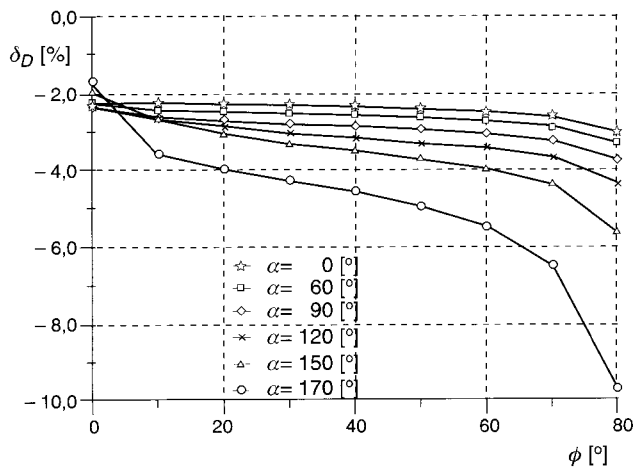
Wyniki badań symulacyjnych przedstawione graficznie na rysunku 5 wskazują, że składowa błędów przetwarzania mocy spowodowana błędami przekładni obwodów wejściowych stosowanych w fabrycznych przetwornikach mocy, przy pomiarach przebiegów typu „cięta sinusoida”, osiąga znaczne wartości ($2 \div 10\%$), gdy błędy przemysłowych przetworników mocy dla przebiegów sinusoidalnych są rzędu



Rys. 3. Charakterystyki częstotliwościowe błędu modułu napięciowego obwodu wejściowego dla wybranych wartości napięcia



Rys. 4. Charakterystyki częstotliwościowe błędu kąтового napięciowego obwodu wejściowego dla wybranych wartości napięcia



Rys. 5. Błąd przetwarzania mocy spowodowany błędami modułu i błędami kątowymi napięciowego i prądowego obwodu wejściowego

$0,5 \div 1\%$. Wartość błędu dodatkowego przetwarzania mocy przebiegów o kształcie „ciętej sinusoidy” w decydującym stopniu zależy od kąta przesunięcia fazowego pomiędzy harmoniczną podstawową napięcia i prądu oraz odkształcenia sygnału.

Zmniejszenie błędów przekładni transformatorowych obwodów wejściowych można realizować metodami konstrukcyjno-technologicznymi, które są skuteczne w wąskim zakresie częstotliwości (korekcja zwojowa lub pojemnościowa) lub wymagają stosowania pewnych rozwiązań układowych (elektroniczna kompensacja błędów) [1]. Zastosowanie mikroprocesorów w przyrządach pomiarowych, oprócz realizacji skomplikowanych algorytmów przetwarzania, daje możliwości zmniejszania błędów pomiaru na drodze korekcji programowej.

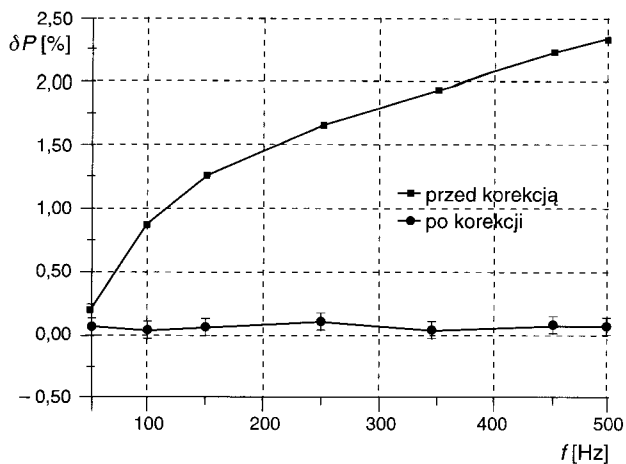
3. METODA PROGRAMOWEJ KOREKCJI

Przy opracowaniu metody korekcji założono, że błędy przekładni obwodów wejściowych wyznaczane są jednorazowo na etapie produkcji. Przyjęto, że zmiany wartości tych błędów w czasie są pomijalnie małe i nie zależą w istotny sposób od czynników zewnętrznych (np. temperatury wilgotności, itp.).

Zaproponowana metoda korekcji polega na:

- pomiarze metodą próbkowania sygnałów wyjściowych obwodu napięciowego i prądowego,
- obliczeniu wartości skutecznych harmonicznich zawartych w sygnale napięciowym i prądowym (analiza widma amplitudowego metodą DFT),
- obliczeniu przesunięć fazowych pomiędzy k -tą harmoniczną napięcia i prądu (analiza widma fazowego metodą DFT),
- uwzględnieniu poprawek w zmierzonych wartościach skutecznych harmonicznich napięcia i prądu; poprawki są wyznaczane na podstawie charakterystyk błędów modułu,
- uwzględnieniu poprawek w obliczonych wartościach przesunięć fazowych pomiędzy k -tą harmoniczną napięcia i prądu; poprawki są wyznaczone na podstawie charakterystyk błędów kątowych obwodu napięciowego i prądowego,
- obliczeniu mocy czynnych harmonicznich zawartych w sygnałach na podstawie skorygowanych wartości skutecznych napięcia i prądu oraz skorygowanej wartości kąta przesunięcia fazowego,
- obliczeniu mocy czynnej mierzonego sygnału, odkształconego przez sumowanie skorygowanych wartości mocy czynnych harmonicznich zawartych w przetwarzanym sygnale, z uwzględnieniem nominalnych wartości przekładni obwodów wejściowych.

Skuteczność zaproponowanej metody korekcji zależy głównie od dokładności wyznaczenia charakterystyk błędów przekładni obwodów wejściowych i dokładności pomiaru widma amplitudowego oraz fazowego przetwarzanych przebiegów. Przeprowadzono badania symulacyjne niepewności pomiaru mocy czynnej po korekcji, przy założeniu, że



Rys. 6. Charakterystyki błędów pomiaru mocy przed korekcją oraz po korekcji, dla $U = 100 \text{ V}$, $I = 5 \text{ A}$, $\varphi = 40 \text{ deg}$

jedynym źródłem tej niepewności jest niepewność pomiaru błędów przekładni obwodów wejściowych. Aby uzyskane rezultaty miały znaczenie praktyczne, do obliczeń przyjęto charakterystyki błędów przekładni fizycznych modeli obwodów wejściowych. Jako wymuszenie zastosowano sygnał typu „cięta sinusoida”. Badania przeprowadzono dla zmieniających się wartości kąta odcięcia sygnału napięciowego α i kąta przesunięcia fazowego φ pomiędzy podstawową harmoniczną napięcia i prądu.

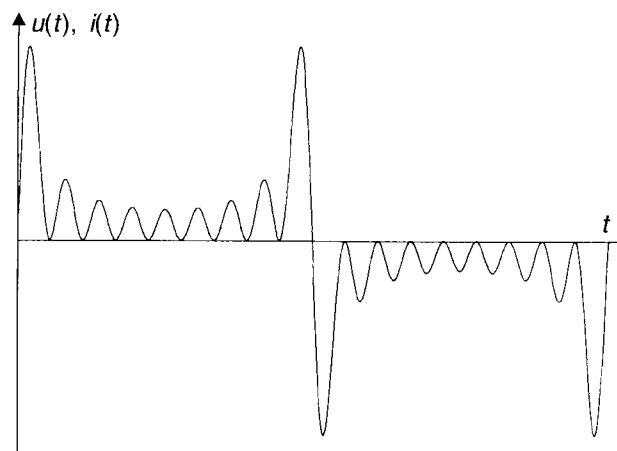
Z uzyskanych wyników badań symulacyjnych [2] wynika, że znajomość błędów modułu obwodów wejściowych z dokładnością $\pm 5\%$ i znajomość błędów kątowych z dokładnością $\pm 3'$ umożliwi zmniejszenie składowej błędów pomiaru mocy spowodowanej tymi błędami do poziomu $0,1 \div 0,5\%$.

4. WYNIKI BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

W celu weryfikacji opracowanej metody programowej korekcji składowej błędów, wprowadzanej przez obwody wejściowe, zaprojektowano model próbkującego przetwornika mocy z transformatorowymi obwodami wejściowymi. Na wejściach przetwornika mocy zastosowano przekładniki o znanych charakterystykach błędów modułu (rys. 1, 3) i błędów kątowych (rys. 2, 4). Do przetwarzania analogowo – cyfrowego zastosowano kartę akwizycji danych firmy National Instruments AT-A2150 zawierającą 16-bitowe przetworniki a/c oraz umożliwiającą próbkowanie przebiegów z częstotliwością 51,2kHz. Model przetwornika mocy został zrealizowany z wykorzystaniem techniki przyrządów wirtualnych. Algorytm przetwarzania wraz z procedurami korekcyjnymi realizowany jest przez komputer PC.

Przeprowadzono badania eksperymentalne, mające na celu porównanie wyników przetwarzania przetwornika mocy, realizującego programową korekcję, ze wskazaniami przyrządu wzorcowego. Badania przeprowadzono dla przebiegów sinusoidalnych i niesinusoidalnych.

W układzie pomiarowym dla przebiegów sinusoidalnych jako źródło sygnałów zastosowano kalibrator SQ33, jako przyrząd wzorcowy — przetwornik mocy firmy Yokogawa



Rys. 7. Przebiegi napięcia i prądu zastosowane w badaniach eksperymentalnych — test pierwszy

2885 klasy 0,05 w zakresie częstotliwości $47 \div 400 \text{ Hz}$ przy $\cos \varphi = 1$. Przed rozpoczęciem badań model przetwornika mocy został skalibrowany dla nominalnych wartości sygnałów wejściowych ($U = 100 \text{ V}$, $I = 5 \text{ A}$, $\cos \varphi = 1$). Na podstawie uzyskanych wyników pomiarów i zależności (4) obliczono błędy pomiaru mocy z programową korekcją błędów i bez korekcji.

$$\delta P = \frac{P - P_W}{P_W} \quad (4)$$

gdzie P_W oznacza moc zmierzoną przetwornikiem wzorcowym, a P — moc zmierzona badanym przetwornikiem mocy.

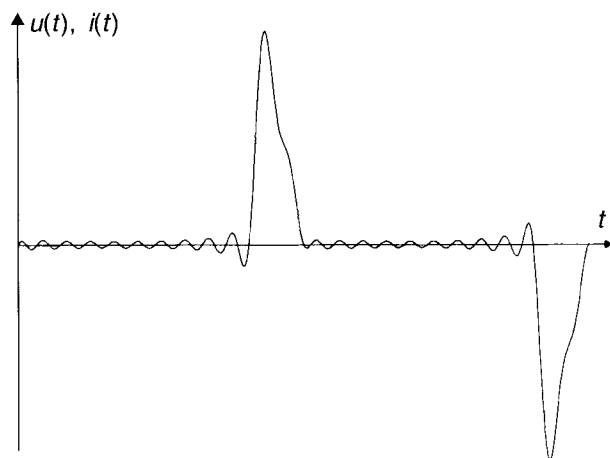
Na rysunku 6 przedstawiono przykładowe charakterystyki błędów pomiaru mocy przebiegów sinusoidalnych.

Skuteczność opracowanej metody korekcji błędów w przypadku pomiarów przebiegów niesinusoidalnych sprawdzono w układzie pomiarowym, w którym jako źródło sygnałów zastosowano generator cyfrowy, umożliwiający generowanie praktycznie dowolnych przebiegów na podstawie próbek przesłanych z komputera PC. Sygnał z generatora jest podłączony do wzmacniacza mocy, którego obciążenie stanowi odbiornik rezystancyjny. Moc wydzielana na obciążeniu mierzona jest za pomocą przetwornika mocy. Jako przyrządy wzorcowe zastosowano multimetry umożliwiające pomiar prawdziwej wartości skutecznej prądu i napięcia RMS. Przy rezystancyjnym charakterze obciążenia moc czynna równa jest mocy pozornej mierzonej za pomocą multimetrów.

Dokładność pomiaru mocy przyrządami przyjętymi za wzorcowe w zrealizowanym układzie pomiarowym wynosi $\pm 0,3\%$. Zmierzono moc czynną przebiegów niesinusoidalnych o kształtach przedstawionych na rysunkach 7 i 8.

Sygnał przedstawiony na rysunku 7 zawiera 8 kolejnych nieparzystych harmonicznym sygnału energetycznego o jednakowych amplitudach i fazach.

Sygnał przedstawiony na rysunku 8 ma kształt zbliżony do sygnału występującego w obwodach elektroenergetycznych, zawiera 30 harmonicznym sygnału typu „cięta sinusoida” o kącie odcięcia $\alpha = 120^\circ$. Zastosowanie w badaniach



Rys. 8. Przebiegi napięcia i prądu zastosowane w badaniach eksperymentalnych — test drugi

przebiegów o ograniczonym widmie pozwoliło zminimalizować wpływ składowej błędu pomiaru mocy spowodowanej pominięciem w analizach harmonicznym o częstotliwościach wyższych od 2kHz [2].

W tabeli 1 przedstawiono porównanie błędów pomiaru mocy przebiegów, przedstawionych na rysunkach 7 i 8, za pomocą przetwornika mocy, bez korekcji i z korekcją.

Z przedstawionych w tabeli 1 rezultatów obliczeń wynika, że błędy pomiaru mocy po korekcji uległy zmniejszeniu do poziomu dokładności pomiaru mocy przyrządami przyjętymi za wzorcowe.

5. PODSUMOWANIE

Błędy pomiaru mocy przebiegów sinusoidalnych (przedstawione graficznie na rysunku 6) i niesinusoidalnych (przedstawione w tabeli 1) potwierdzają skuteczność programowej korekcji składowej błędu pomiaru mocy wnoszonej przez transformatorowe obwody wejściowe przy pomiarach mocy przebiegów sinusoidalnych i niesinusoidalnych. Po zastosowaniu korekcji błędy przetwarzania mocy uległy zmniejszeniu

Tabela 1. Porównanie błędów pomiaru mocy

Kształt sygnałów	Błąd pomiaru mocy	Błąd pomiaru mocy po korekcji %
Rys. 7	-13,2	-0,3
Rys. 8	-2,6	0,2

niem z poziomu od kilku–kilkunastu procent do poziomu błędów przetwarzania przyrządów przyjętych za wzorcowe (0,05 ÷ 0,3%).

Wysoka skuteczność programowej korekcji błędów jest potwierdzeniem dokładnej znajomości charakterystyk błędów wnoszonych przez obwody wejściowe oraz dużej dokładności zastosowanej metody przetwarzania mocy czynnej.

Opracowana metoda korekcji pozwoliła na zrealizowanie przetwornika mocy do pomiarów przebiegów niesinusoidalnych, charakteryzującego się błędem porównywalnym z błędami przemysłowych przetworników mocy, które podawane są jedynie dla przebiegów sinusoidalnych (0,5 ÷ 1%).

LITERATURA

1. Bolikowski J., Czarnecki L., Miłek M.: *Pomiary wartości skutecznej i mocy w obwodach o przebiegach niesinusoidalnych*. PWN, Warszawa 1990, 79–82.
2. Furmankiewicz L.: *Możliwości programowej korekcji błędów wnoszonych przez transformatorowe obwody wejściowe przy pomiarze mocy przebiegów niesinusoidalnych*. Praca doktorska. Zielona Góra 1998.
3. *Przekładniki prądowe*. Polska Norma PN-IEC 185+A1, 1994.
4. Rybski R., Furmankiewicz L.: *Wpływ obwodów wejściowych na dokładność przetwarzania przetworników mocy*. Materiały III Konferencji „Elektrotechnika prądów niesinusoidalnych”, Zielona Góra, 1997, 205–214.



Dr inż. Leszek Furmankiewicz

Studia wyższe ukończył na Wydziale Elektrycznym Wyższej Szkoły Inżynierskiej w Zielonej Górze w 1988 r. Po ukończeniu studiów rozpoczął pracę w Instytucie Automatyki i Metrologii Elektrycznej w Wyższej Szkole Inżynierskiej w Zielonej Górze. Stopień doktora nauk technicznych uzyskał na Wydziale Elektrycznym Politechniki Zielonogórskiej w 1998 r. Jest autorem 15 publikacji naukowych.