

Leszek FURMANKIEWICZ, Ryszard RYBSKI
 UNIwersytet ZIELONOGÓRSKI
 INSTYTUT METROLOGII ELEKTRYCZNEJ

Wieloparametrowe przyrządy do pomiaru wielkości energetycznych

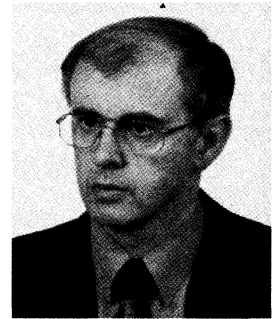
Dr inż. Leszek FURMANKIEWICZ

Studia wyższe ukończył na Wydziale Elektrycznym Wyższej Szkoły Inżynierskiej w Zielonej Górze w 1988r. Po ukończeniu studiów rozpoczął pracę w Instytucie Automatyki i Metrologii w Wyższej Szkole Inżynierskiej w Zielonej Górze. Stopień naukowy doktora otrzymał na Wydziale Elektrycznym Politechniki Zielonogórskiej w 1998 r. Jest autorem ponad 20 publikacji naukowych i technicznych oraz wielu wdrożeń wyników badań do przemysłu. Obecnie pracuje na stanowisku adiunkta w Instytucie Metrologii Elektrycznej Uniwersytetu Zielonogórskiego.



Dr inż. Ryszard RYBSKI

Studia wyższe ukończył na Wydziale Elektrycznym Wyższej Szkoły Inżynierskiej w Zielonej Górze w 1979r. Stopień naukowy doktora otrzymał na Wydziale Elektrycznym Politechniki Wrocławskiej w 1989r. Jest autorem 40 publikacji naukowych oraz wielu opracowań zrealizowanych na zamówienie przemysłu. Obecnie pracuje na stanowisku adiunkta w Instytucie Metrologii Elektrycznej Uniwersytetu Zielonogórskiego.



Streszczenie

W artykule przedstawiono przegląd opracowanych w Instytucie Metrologii Elektrycznej i wdrożonych do produkcji w OBRME METROL w Zielonej Górze przyrządów pomiarowych przeznaczonych do pomiaru parametrów sieci energetycznych i oceny jakości energii elektrycznej. Przedstawiono metody przetwarzania i strukturę przyrządów. Omówiono modele matematyczne obwodów wejściowych, przedstawiono wyniki badań oraz metodę korekcji błędów wnoszonych przez obwody wejściowe.

Abstract

Sampling instruments capable of measuring multiple electrical parameters in three phase systems are presented in this paper. A software method of correcting an errors that are introduced by measuring transformers on power measurements accuracy with distorted signals also is presents. The method has been implemented in sampling of power meters. Result of the method also are shown.

1. Wprowadzenie

W Instytucie Metrologii Elektrycznej od wielu lat prowadzone są prace nad przetwornikami pomiarowymi i miernikami przeznaczonymi do pomiaru parametrów sieci energetycznej. Dążąc za tendencjami rozwojowymi obserwowanymi na świecie w tej grupie przyrządów, na początku lat 90-tych zdecydowano się na realizację przyrządów wieloparametrowych realizujących metodę cyfrowego przetwarzania sygnałów i wyposażonych w cyfrowe wyjście komunikacyjne umożliwiające pracę we współczesnych systemach monitorowania i sterowania.

W wyniku tych prac zostały opracowane i wdrożone do produkcji w OBRME METROL w Zielonej Górze następujące przemysłowe przyrządy pomiarowe:

- Multiprzetwornik PX7,

- Miernik parametrów sieci MPS7,
- Miernik parametrów sieci MPS,
- Przenośny miernik parametrów sieci PMPS,
- Analizator jakości energii AJE1,
- Przenośny analizator energii AJE2,
- Laboracyjny analizator energii AJE3.

Oprócz przyrządów przemysłowych opracowano prototyp laboratoryjnego analizatora jakości energii elektrycznej AJE3.

Programowym uzupełnieniem fizycznych przyrządów pomiarowych jest rodzina wdrożonych do produkcji wirtualnych przetworników pomiarowych serii P7V [1], z której do pomiarów wieloparametrowych przeznaczone są multiprzetwornik wirtualny PX7V i wirtualny analizator harmonicznych MPS-AHV.

Wymienione przyrządy pomiarowe przeznaczone są do pomiaru parametrów sieci energetycznej trójfazowej 3-przewodowej i 4-przewodowej. Podstawowe wielkości mierzone przez multiprzetwornik i mierniki parametrów sieci to wartości skuteczne napięć i prądów, moce i częstotliwość napięcia. Analizatory jakości energii realizują dodatkowo analizę widma amplitudowego napięć i prądów oraz rejestrują zdarzenia w napięciu sieciowym i w częstotliwości napięcia.

2. Metoda pomiarowa

W opracowanych przyrządach zastosowano metodę próbkowania. Zaletą przyjętej metody pomiarowej jest możliwość jednoczesnego wyznaczenia wielu parametrów w prostej strukturze układowej. Kolejną zaletą zastosowanej metody pomiarowej jest to, że niezbędne do wykonania operacje matematyczne na sygnałach analogowych, takie jak mnożenie i uśrednianie (w przypadku pomiaru mocy czynnej) oraz mnożenie, uśrednianie i pierwiastkowanie (w przypadku pomiaru wartości skutecznej) są wykonywane przez mikrokontroler z błędem pomijalnie małym w stosunku do klasy projektowanych przyrządów. Przy dostatecznie dużej częstotliwości

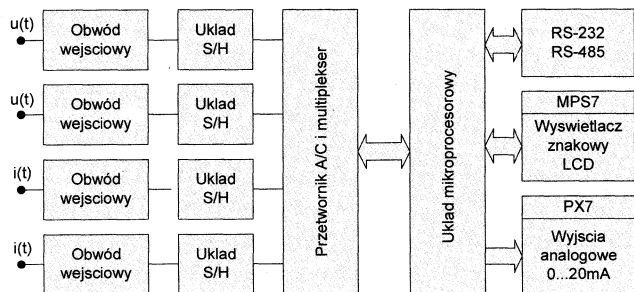
próbkowania, próbki zawierają praktycznie kompletną informację o przebiegach napięć i prądów, co umożliwiło wyznaczenie dodatkowych parametrów mierzonych przebiegów bez rozbudowy struktury układu. Parametrami tymi są: współczynniki szczytu i kształtu napięć i prądów, wartości szczytowe napięć i prądów, wartości skuteczne harmonicznym zawartych w przebiegach napięcia i prądu oraz współczynniki zawartości harmonicznym w mierzonych przebiegach.

Pośród znanych algorytmów próbkowania, w przyrządach do pomiaru przebiegów okresowych najczęściej stosowane jest próbkowanie cykliczne. W zależności od stosunku częstotliwości próbkowania do częstotliwości sygnału próbkowanego, próbkowanie cykliczne można podzielić na synchroniczne i asynchroniczne. W opracowanych przyrządach przemysłowych zastosowano próbkowanie synchroniczne, z częstotliwością zapewniającą pobranie 128 próbek przebiegu w jego okresie. W przyrządzie laboratoryjnym AJE3, częstotliwość próbkowania synchronicznego jest ustawiana przez użytkownika. Możliwe jest w AJE3 również cykliczne próbkowanie asynchroniczne.

Wirtualne przyrządy pomiarowe PX7V i MPS-AHV realizują algorytmy obliczeń parametrów przebiegów w oparciu o próbki otrzymane z przyrządów fizycznych PX7 i MPS.

3. Przetworniki i mierniki parametrów sieci

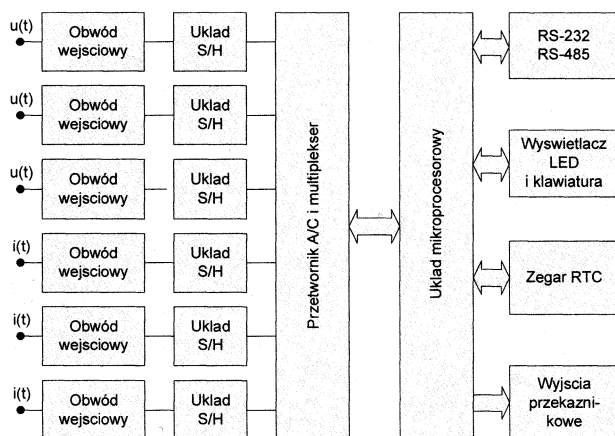
Multiprzetwornik PX7 [3] i miernik MPS7 [5] zostały przewidziane do pomiarów w sieci trójfazowej 3-przewodowej. W przyrządach tych, w tzw. układzie Arona, mierzone są dwa napięcia międzyfazowe i dwa prądy (rys.1). Sygnały napięcia i prądu, po przetworzeniu przez transformatorowe obwody wejściowe, próbkowane są synchronicznie i jednocześnie, a następnie przetwarzane na postać cyfrową przez 12-bitowy przetwornik analogowo – cyfrowy. Próbkki sygnałów mierzonych gromadzone są w pamięci układu mikroprocesorowego zrealizowanego na bazie mikrokontrolera 8-bitowego 80C32 - w przetworniku PX7 i 80C320 - w mierniku MPS7. Układ mikroprocesorowy ze zgromadzonej w pamięci cyfrowej reprezentacji sygnałów wyznacza 12 podstawowych parametrów sieci energetycznej takich jak: wartości skuteczne napięć międzyfazowych, wartości skuteczne prądów, moce trójfazowe, współczynnik mocy czynnej, współczynnik mocy bierniej, kąt przesunięcia fazowego i częstotliwość.



Rys.1. Struktura blokowa przetwornika PX7 i miernika MPS7

W multiprzetworniku PX7 wartości 4 mierzonych parametrów przetwarzane są na znormalizowany sygnał prądowy (0...20mA lub 4...20mA). W mierniku MPS7 wartości wszystkich mierzonych parametrów eksponowane są na czterech, kolejno wybieranych stronach, wyświetlacza znakowego typu LCD.

Badania marketingowe wykazały, że w grupie potencjalnych nabywców mierników parametrów sieci, oprócz zainteresowania miernikami mierzącymi podstawowe parametry sieci, występuje zainteresowanie pełną informacją o przekazywanej mocy ze źródła do obciążenia i parametrami obciążenia. Fakt ten przyczynił się do opracowania tablicowego przyrządu MPS [5] i przenośnego przyrządu PMPS. Mierniki MPS i PMPS przeznaczone są do pomiarów w sieci trójfazowej 4-przewodowej. Ich strukturę przedstawiono na rys. 2.

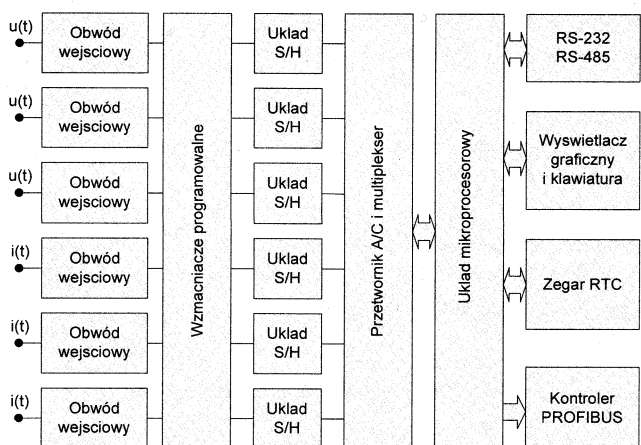


Rys.2. Struktura blokowa miernika MPS

W mierniku MPS próbkowane są trzy napięcia fazowe i trzy prądy. W torach prądowych zastosowano transformatorowe obwody wejściowe, a w torach napięciowych dzielniki rezystancyjne. W przyrządzie przenośnym PMPS tory prądowe są przystosowane do podłączenia cęgów pomiarowych lub elastycznych czujników prądu. Na podstawie jednocześnie zebranych w ciągu jednego okresu napięć próbek, układ mikroprocesorowy oblicza podstawowe parametry każdej z faz sieci, takie jak: napięcia, prądy, moce, współczynniki mocy, kąty przesunięć fazowych, częstotliwość napięcia i energię czynną i bierną. Oprócz wymienionych podstawowych parametrów każdej z faz sieci obliczane są inne, trudno mierzalne w sposób bezpośredni parametry sieci i obciążenia. Do tych parametrów zalicza się: wartości maksymalne napięć i prądów, współczynniki szczytu napięć i prądów, współczynniki kształtu napięć i prądów, impedancje i rezystancje obciążenia. W bloku przetwarzania miernika MPS zastosowano, podobnie jak w mierniku MPS7, 12-bitowe przetworniki analogowo – cyfrowe i 8-bitowy mikrokontroler 80C320. Uwzględniając większe zapotrzebowanie miernika MPS na moc obliczeniową niż miernika MPS7, blok wyświetlacza i klawiatury zrealizowano na bazie drugiego mikrokontrolera 80C31. Wartości mierzonych parametrów eksponowane są na trzech czterocyfrowych polach odczytowych LED. W mierniku MPS jest dostępny tryb programowego ustawiania zakresów pomiarowych oraz nastaw dla wyjść alarmowych. Przedstawione przyrządy wieloparametrowe umożliwiają pomiary z błędami podstawowymi nie przekraczającymi $\pm 0,2\%$ w przypadku wartości skutecznych napięcia i prądu, $\pm 0,5\%$ w przypadku mocy i $\pm 0,1\%$ w przypadku częstotliwości. Przyrządy są wyposażone w cyfrowe wyjścia komunikacyjne w standardzie RS 232 lub RS 485 z protokołem OB-RBUS.

4. Analizatory jakości energii

W połowie lat 90-tych miał miejsce duży wzrost zainteresowania tematyką jakości energii elektrycznej. Jego wynikiem było m.in. wprowadzenie w 1997 r. Prawa Energetycznego oraz norm dotyczących kompatybilności elektromagnetycznej i jakości energii elektrycznej. Wymienione akty prawne i normatywne wskazywały, że wystąpi zapotrzebowanie na szeroką gamę przyrządów przeznaczonych do pomiaru jakości energii elektrycznej o zróżnicowanych właściwościach metrologicznych i funkcjonalnych (od najprostszyc – przenośnych do laboratoryjnych). W tym czasie zostały opracowane w Instytucie Metrologii Elektrycznej analizatory jakości energii: tablicowy - AJE1, przenośny - AJE2 i laboratoryjny - AJE3. Na rys. 3 przedstawiono strukturę analizatorów AJE1 i AJE2.



Rys.3. Struktura blokowa analizatora AJE1 i AJE2

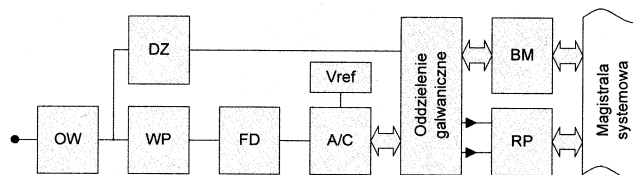
W przemysłowych analizatorach AJE1 [8] i AJE2 mierzone są trzy napięcia fazowe i trzy prądy. W torach prądowych zastosowano transformatorowe obwody wejściowe, a w torach napięciowych dzielniki rezystancyjne. W przenośnym analizatorze AJE2 tory prądowe są przystosowane do współpracy z cęgami pomiarowymi lub elastycznymi czujnikami prądowymi. Układ przetwarzania zrealizowano na bazie mikrokontrolera 16-bitowego 80C167, który posiada w swojej strukturze 10-bitowy przetwornik analogowo – cyfrowy z multiplexerem na wejściu. Jednoczesne próbkowanie sygnałów mierzonych zapewniają układy próbkująco – pamiętające. Przyrząd może pracować w dwóch trybach: pomiary i rejestracja zdarzeń. W trybie "pomiary" mierzone sygnały są próbkowane jednocześnie w ciągu trzech okresów napięcia mierzonego. Mikrokontroler oblicza następujące parametry: wartości skuteczne napięć fazowych, wartości skuteczne napięć międzyfazowych, wartości skuteczne prądów, moce czynne, bierne i pozorne każdej fazy i trójfazowe, współczynniki mocy czynnej i biernej każdej fazy i trójfazowe, energię czynną i biernej, współczynniki szczytu i kształtu napięcia oraz prądu, odchylenia napięć fazowych, wartości skuteczne harmonicznych napięcia oraz prądu (do 40-harmonicznej), współczynniki zawartości harmonicznych napięcia oraz prądu, współczynnik niesymetrii napięcia, odchylenie częstotliwości. W trybie "rejestracja zdarzeń" realizowane jest ciągłe próbkowanie trzech napięć sieciowych i pomiar częstotliwości. Do obliczeń wartości skutecznej napięcia zastosowano okna pomiarowe: 200ms-3s-10min-2h. W przypadku częstotliwości zastosowano 10 sekundowe okno pomiarowe. W tym trybie przyrząd rejestruje zaburzenia w odniesieniu do

zadanych wartości napięcia i częstotliwości. Wyniki pomiarów eksponowane są na wyświetlaczu LCD w postaci alfanumerycznej i graficznej.

Przemysłowe analizatory jakości energii umożliwiają pomiary z błędami podstawowymi nie przekraczającymi $\pm 0,5\%$ w przypadku wartości skutecznych napięcia i prądu, $\pm 0,5\%$ w przypadku mocy i $\pm 0,1\%$ w przypadku częstotliwości. Przyrządy są wyposażone w cyfrowe wyjścia komunikacyjne w standardzie RS 232 lub RS 485 z protokołem OBRBUS. Opcjonalnie przyrządy mogą być wyposażone w sprzętowy kontroler umożliwiający pracę w sieci przemysłowej w standardzie PROFIBUS-DP.

Konstrukcja laboratoryjnego analizatora jakości energii AJE3 została oparta na często stosowanej w tego typu przyrządach strukturze – komputer PC połączony z zewnętrznym układem pomiarowym. Dzięki takiej strukturze uzyskuje się szerokie możliwości rejestracji i prezentacji wyników [9].

Analizator laboratoryjny ma konstrukcję modułową. Poszczególne moduły: kanały pomiarowe napięciowe, kanały pomiarowe prądowe, sterownik mikroprocesorowy wraz z interfejsami komunikacyjnymi, zasilacz zostały zaprojektowane w postaci eurokarty o wymiarach 160x100 mm. Wszystkie kanały pomiarowe posiadają oddzielenie galwaniczne. Na rys. 4 przedstawiono uproszczoną strukturę blokową jednego toru przetwarzania analizatora. W napięciowych kanałach pomiarowych rolę obwodu wejściowego *OW* pełni dzielnik rezystancyjny ze wzmacniaczem o programowalnym wzmocnieniu *WP*. W torach prądowych mierzony prąd przetwarzany jest na napięcie za pomocą precyzyjnych boczników *OW*. Sygnał napięciowy z bocznika jest wzmacniany przez scalony wzmacniacz pomiarowy *WP* o programowalnym wzmocnieniu. Filtr dolnoprzepustowy *FD* ogranicza pasmo mierzonych sygnałów. Do przetwarzania sygnałów na postać cyfrową zostały zastosowane 16-bitowe kompensacyjne przetworniki analogowo – cyfrowe *A/C* z szeregowym interfejsem komunikacyjnym, co uprościło realizację separacji galwanicznej pomiędzy kanałami pomiarowymi. Do realizacji oddzielenia galwanicznego zastosowano szybkie transoptory przystosowane do pracy z sygnałami cyfrowymi, z prędkościami do 20Mb/s. Zastosowany przetwornik analogowo – cyfrowy wymaga zewnętrznego źródła napięcia odniesienia *Vref* i posiada zdolność do autokalibracji realizowanej w sposób sprzętowo – programowy. Kolejnym blokiem kanału pomiarowego jest detektor zera *DZ*, którego sygnał wyjściowy wykorzystywany do synchronizacji sygnału próbkowania. Układy buforów magistrali *BM* i rejestrów przesuwanych *RP* umożliwiają współpracę kanałów pomiarowych ze sterownikiem mikroprocesorowym.



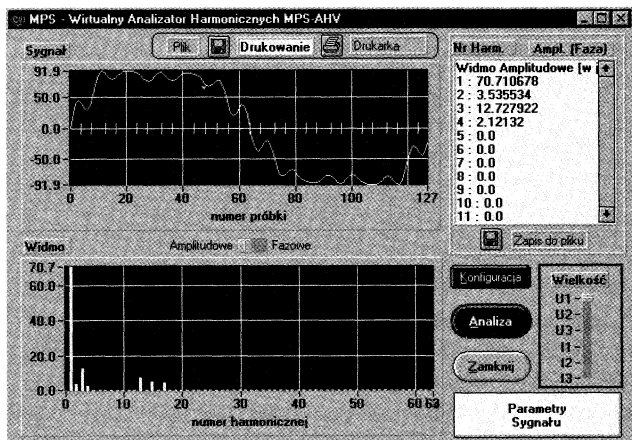
Rys.4. Struktura blokowa toru przetwarzania analizatora AJE3

Sterownik analizatora AJE3 został zrealizowany w oparciu o 32-bitowy mikrokontroler nowej generacji typu RISC – SH7032 firmy Hitachi, charakteryzujący się dużą mocą obliczeniową. Większość instrukcji wykonywanych jest w jednym cyklu zegarowym (50ns). Sterownik mikroprocesorowy zawiera następujące elementy: blok szybkiej statycznej pa-

mięci RAM o organizacji 128k x 16 i czasie dostępu 50ns, pamięć EPROM o organizacji 256k x 8, interfejs komunikacji szeregowy RS-232, układ synchronizacji częstotliwości próbkowania z częstotliwością mierzonego sygnału oraz opcjonalne układy interfejsu IEEE-488 i dynamicznej pamięci RAM o organizacji 1M x 16. Ważnym blokiem w strukturze sterownika mikroprocesorowego jest rozbudowany układ generacji sygnału próbkującego. Możliwe jest, za pomocą pętli PLL, generowanie sygnału próbkującego zsynchronizowanego z częstotliwością dowolnego sygnału mierzonego. Możliwe jest generowanie sygnału próbkującego z pominięciem układu synchronizacji. Częstotliwość próbkowania takiego sygnału jest programowana. Dzięki zastosowaniu układu DDS możliwe jest generowanie sygnału próbkującego o częstotliwości regulowanej z 32-bitową rozdzielczością. Dynamiczna pamięć RAM została przewidziana dla potrzeb rejestracji wartości chwilowych przebiegów w długim okresie czasu. W celu wykorzystania mocy obliczeniowej zastosowanego w AJE3 mikrokontrolera, kod programu z pamięci EPROM jest kopiowany do szybkiej statycznej, 16-bitowej pamięci RAM. Funkcje wymagające największej wydajności obliczeniowej są kopiowane do wewnętrznej, 32-bitowej pamięci RAM mikrokontrolera. Algorytm pracy analizatora obejmuje automatyczne określanie zakresów pomiarowych, akwizycję sygnałów oraz realizację zadań komunikacyjnych. Zadania związane z przetwarzaniem informacji pomiarowej (m.in. realizacji algorytmu FFT), wizualizacją wyników oraz interfejsem użytkownika są realizowane przez komputer PC.

5. Wirtualne przyrządy pomiarowe

Wirtualne przetworniki pomiarowe serii P7V [1] przetwarzają i eksponują wyniki pomiarów wykonywanych przez fizyczne przetworniki serii P7. Przesyłanie wyników do komputera odbywa się poprzez interfejs szeregowy RS-232 lub RS-485. Wirtualne przyrządy współpracujące z multipretwornikiem PX7 i miernikiem MPS, oprócz wyników obliczeń uzyskanych z tych przyrządów wykorzystują w swoich algorytmach przetwarzania również próbki sygnałów mierzonych, które umożliwiają przeprowadzenie analizy częstotliwościowej tych sygnałów. Na rys. 5 przedstawiono widok panelu wirtualnego analizatora harmonicznych odtwarzającego kształt wybranego sygnału, widmo amplitudowe oraz dokładne wartości poszczególnych harmonicznych oraz ich kąty fazowe.



Rys.5. Panel wirtualnego analizatora harmonicznych

6. Obwody wejściowe

W Instytucie Metrologii Elektrycznej wraz z pracami mającymi na celu opracowywanie nowych przyrządów do pomiaru wielkości energetycznych są prowadzone badania dotyczące zagadnień błędów pomiaru mocy i metod korekcji tych błędów. Jednym ze źródeł tych błędów są błędy wnoszone przez obwody wejściowe. Aktualnie stawiane wymagania przyrządom pomiarowym powodują konieczność przetwarzania przebiegów niesinusoidalnych zwiększając tym samym ich częstotliwościowy zakres pracy.

W przyrządach przemysłowych, ze względu na wymaganą zwykle separację galwaniczną, na wejściach prądowych przyrządów stosowane są przekładniki prądu, a na wejściach napięciowych stosowane są przekładniki napięcia lub dzielniki napięcia. W przyrządach laboratoryjnych, ze względu na wymagane szerokie pasmo częstotliwościowe najczęściej stosuje się boczniaki w torach prądowych i dzielniki rezystancyjne w torach napięciowych. Poniżej zostaną przedstawione wybrane wyniki prac dotyczących prądowych obwodów wejściowych w postaci przekładnika prądu i boczniaka rezystancyjnego [6,7,9].

Najważniejszymi parametrami obwodów wejściowych są: przekładnia i błąd przekładni. Błąd przekładni jest wielkością zespoloną. W przypadku transformatorowych obwodów wejściowych moduł błędu przekładni nazywany jest błędem prądowym

$$|\Delta I| = \frac{|I_2| \cdot k_{in} - |I_1|}{|I_1|} \quad (1)$$

gdzie: $|I_1|$, $|I_2|$ - moduł wartości skutecznej prądu pierwotnego i wtórnego,

k_{in} - przekładnia znamionowa przekładnika prądu.

Argument błędu przekładni nazywany jest błędem kątowym.

W przypadku boczniaka rezystancyjnego, pełniącego rolę przetwornika prądu na napięcie, głównym źródłem błędów przekładni jest indukcyjność resztkowa. Błąd modułu $|\Delta I|$ i błąd kątowy δ_I można określić następująco

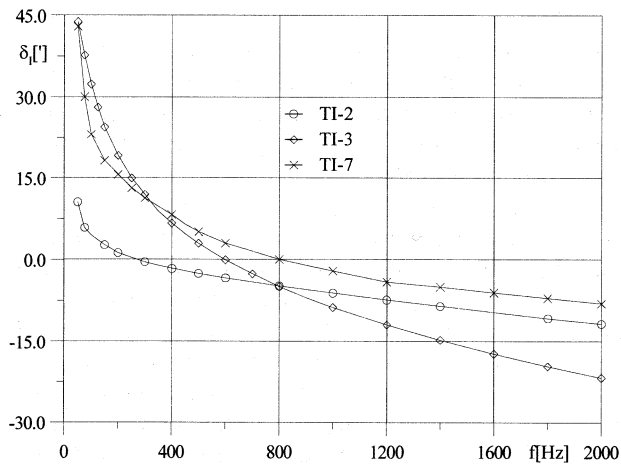
$$|\Delta I| = \sqrt{1 + \omega^2 \left(\frac{L_B}{R_B} \right)^2} - 1 = \sqrt{1 + \omega^2 \tau^2} - 1 \quad (2)$$

$$\delta_I = ar \operatorname{tg} \omega \frac{L_B}{R_B} = ar \operatorname{tg} \omega \tau \quad (3)$$

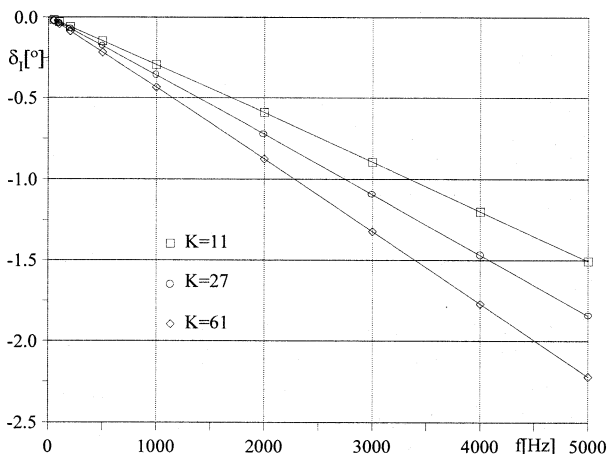
gdzie: L_B , R_B - indukcyjność i rezystancja boczniaka.

Na rys. 6 przedstawiono, wyznaczone podczas badań eksperymentalnych, charakterystyki częstotliwościowe błędów kątowych wybranych przekładników prądu stosowanych przez firmy polskie i zagraniczne w przetwornikach mocy. Na rys. 7 przedstawiono charakterystyki błędów kątowego układu - boczniak rezystancyjny ze wzmacniaczem pomiarowym, zastosowanego w analizatorze AJE3. Charakterystyki błędów obwodów wejściowych wyznaczono w opracowanym przez autorów układzie pomiarowym. Zastosowano metodę cyfrowego przetwarzania sygnałów opartą o szybką transformację Fouriera.

Wynik badań eksperymentalnych i analiza błędów przetwarzania mocy sygnałów niesinusoidalnych umożliwiły ocenę wpływu błędów obwodów wejściowych na błąd przetwarzania mocy.



Rys.6. Charakterystyki częstotliwościowe błędu kąowego wybranych przekładników prądu



Rys.7. Charakterystyka częstotliwościowa błędu kąowego bocznika 50mΩ SRC301 VISHAY ze wzmacniaczem pomiarowym INA128 dla trzech wartości wzmocnienia K

Przyjęto, że obwody wejściowe są pobudzone przebiegami niesinusoidalnymi występującymi w obwodach z tyrystorową regulacją mocy (o kształcie tzw. „ciętej sinusoidy”). Sygnał taki często występuje w obwodach energetycznych i zawiera wszystkie nieparzyste harmoniczne o liczalnych amplitudach i fazach. Dla przypadku, w którym jedynym źródłem błędów są błędy kąowe przekładnika prądu można mierzoną moc czynną wyrazić w następujący sposób

$$P_{\delta} = |U_1| \cdot |I_1| \cdot \cos(\varphi + \delta_1) + \sum_{k=3}^N |U_k| \cdot |I_k| \cdot \cos(\varphi_k + \delta_k) \quad (4)$$

gdzie: $|U_1|$, $|U_k|$ - wartość skuteczna podstawowej i k-tej harmonicznej napięcia,

$|I_1|$, $|I_k|$ - wartość skuteczna podstawowej i k-tej harmonicznej prądu,

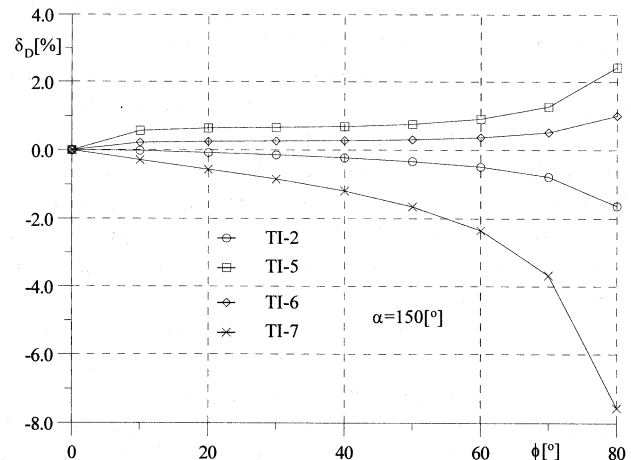
δ_1 , δ_k - błędy kąowe przekładnika dla podstawowej i k -tej harmonicznej,

φ_1 , φ_k - kąty przesunięć fazowych pomiędzy harmonicznymi napięcia i prądu.

Przyjmując, że P oznacza wartość mocy wyznaczoną dla przekładnika o zerowych błędach przekładni, błąd przetwarzania mocy spowodowany błędami kąowymi obwodów wejściowych można wyznaczyć ze wzoru

$$\delta_D = \frac{P_{\delta} - P}{P} \quad (5)$$

Na rys. 8 przedstawiono obliczone błędy pomiaru mocy dla sygnałów mierzonych o kącie odcięcia 150° spowodowane błędami kąowymi wybranych przekładników prądu.



Rys.8 Błąd przetwarzania mocy spowodowany błędami kąowymi wybranych przekładników prądu

Z przeprowadzonych badań wynika, że parametry obwodów wejściowych mają istotny wpływ na dokładność pomiaru mocy sygnałów niesinusoidalnych. Wartość błędu dodatkowego przetwarzania mocy w decydującym stopniu zależy od kąta przesunięcia fazowego pomiędzy podstawową harmoniczną napięcia i prądu oraz odkształcenia sygnału. Przetwornik przemysłowy klasy 0,5, określonej dla sygnałów sinusoidalnych, może mierzyć moc z błędem wielokrotnie przekraczającym klasę jeśli sygnały wejściowe będą znacznie odkształcone. Mając to na uwadze opracowano metodę programowej korekcji błędów wnoszonych przez obwody wejściowe dla mierników mocy, w których zastosowano cyfrowe przetwarzanie sygnałów. 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. Założono również, że w analizowanym zakresie zmian prądu wejściowego ($0,05 \div 1,2I_n$) transformatorowe obwody wejściowe są liniowe.

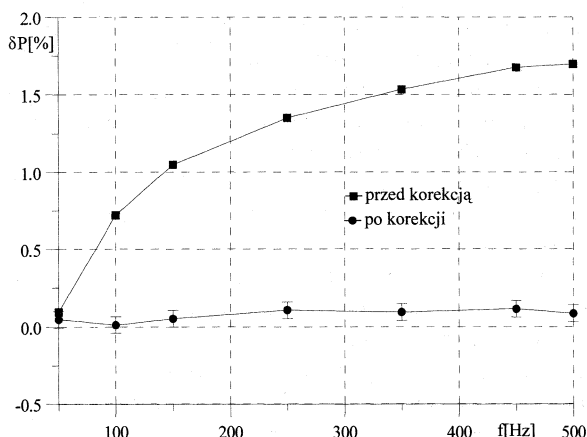
Zaproponowana metoda korekcji polega na:

- pomiarze metodą próbkowania sygnałów wyjściowych obwodu napięciowego i prądowego,
- obliczeniu wartości skutecznych harmonicznych 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 harmonicznych 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 kąowych obwodów wejściowych
- obliczeniu mocy czynnych harmonicznych 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 harmonicznymi zawartych w przetwarzanym sygnale z uwzględnieniem nominalnych wartości przekładni obwodów wejściowych.

Skuteczność opracowanej metody korekcji zależy głównie od dokładności wyznaczenia charakterystyk błędów przekładni obwodów wejściowych. Z przeprowadzonych badań symulacyjnych [7] wynika, że znajomość błędów modułu obwodów wejściowych z dokładnością $\pm 5\%$ i znajomość błędów kątowych z dokładnością $\pm 3'$ umożliwia zmniejszenie składowej błęd pomiaru mocy spowodowanej tymi błędami do poziomu 0,1 – 0,5%.

W celu weryfikacji opracowanej metody korekcji zaprojektowano model próbkującego przetwornika mocy z transformatorowymi obwodami wejściowymi [7]. Przeprowadzono badania mające na celu porównanie wyników przetwarzania przetwornika mocy realizującego programową korekcję błędów ze wskazaniem przyrządów wzorcowych. Badania przeprowadzono dla przebiegów sinusoidalnych i niesinusoidalnych. Na rys. 8 przedstawiono przykładowe wyniki badań eksperymentalnych skuteczności opracowanej metody korekcji dla sygnałów sinusoidalnych. Na charakterystyce przedstawiającej błędy po korekcji zaznaczono przedziały niepewności pomiaru mocy przyrządem wzorcowym.



Rys. 8. Charakterystyki błęd pomiaru mocy przed korekcją oraz po korekcji dla przebiegu sinusoidalnego $\varphi=20[^\circ]$

W przypadku sygnałów niesinusoidalnych błędy przetwarzania mocy po korekcji uległy zmniejszeniu z poziomu kilkukilkunastu procent do poziomu błędów przyrządów przyjętych za wzorcowe.

7. Podsumowanie

Opracowanie w Instytucie Metrologii Elektrycznej i wdrożenie w OBRME Metrol rodziny przyrządów przeznaczonych do pomiaru parametrów sieci energetycznej i analizy jakości energii elektrycznej było naturalną konsekwencją prowadzonych od wielu lat w Instytucie prac badawczych w zakresie konstrukcji przyrządów do pomiaru wielkości elektrycznych oraz ścisłych wieloletnich kontaktów z lokalnymi firmami z tej branży. Z drugiej strony podjęcie tematyki wynikało z bieżącej obserwacji i analizy problemów związanych z szeroko rozumianą jakością energii elektrycznej. W połowie lat 90-tych było już oczywiste, że będzie rosło w kraju zapotrzebowanie na przyrządy i systemy zapewniające po-

miar i analizę parametrów jakości energii elektrycznej umożliwiających m.in. racjonalizację zużycia energii, z uwzględnieniem powstających w tym czasie uregulowań prawnych.

Przedstawione w artykule przyrządy, od najprostszych - przenośnych, do stosunkowo złożonych - laboratoryjnych, działają w oparciu o metodę próbkowania sygnałów. Zastosowanie metody próbkowania sprawiło, że większość operacji na sygnałach pomiarowych realizowana jest w sposób programowy. Dzięki temu zapewniono możliwość wyznaczenia wielu parametrów opisujących mierzone sygnały, przy zastosowaniu prostej struktury układowej oraz łatwość modyfikacji właściwości funkcjonalnych przyrządów. Ponadto możliwe było zastosowanie odpowiednich algorytmów poprawiających właściwości metrologiczne. Jednym z przykładów takiego podejścia jest przedstawiona w artykule metoda programowej korekcji błędów pomiaru mocy wnoszonych przez obwody wejściowe.

Literatura

1. Bolikowski J., Kaczmarek J.: *Wirtualne przetworniki pomiarowe serii P7V*. Pomiary Automatyka Kontrola 2000, nr 3.
2. Bolikowski J.: *Problematyka dokładności pomiaru mocy sygnałów niesinusoidalnych*. Materiały konferencyjne. Elektrotechnika Prądy Niesinusoidalne. Zielona Góra, 2000.
3. Furmankiewicz L.: *Multiprzetwornik wielkości elektrycznych*. Metrologia i Systemy Pomiarowe 12. Materiały konferencyjne XXIV Międzyuczelniana Konferencja Metrologów, Warszawa – Gdańsk, 1992.
4. Furmankiewicz L., Pierzgałski W.: *Miernik parametrów sieci energetycznej*. Materiały konferencyjne. II Szkoła - Konferencja Metrologia Wspomagana Komputerowo. Zegrze k/Warszawy, 1995.
5. Furmankiewicz L., Pierzgałski W.: *Nowa generacja przetworników pomiarowych i cyfrowych mierników parametrów sieci energetycznej*. Systemy pomiarowe w badaniach naukowych i przemyśle. Materiały konferencyjne, Zielona Góra 1996.
6. Furmankiewicz L., Rybski R.: *Wpływ obwodów wejściowych na dokładność przetwarzania przetworników mocy*. Materiały konferencyjne. III Konferencja Elektrotechnika Prądów Niesinusoidalnych. Zielona Góra, 1997, str. 205-214.
7. Furmankiewicz L.: *Możliwości programowej korekcji błędów wnoszonych przez transformatorowe obwody wejściowe w przetwornikach mocy przy pomiarze sygnałów odkształconych*. Rozprawa doktorska. Politechnika Zielonogórska. Zielona Góra, 1998.
8. Furmankiewicz L., Markowski A.: *Analizator jakości energii elektrycznej AJE1*. Elektrotechnika Prądy niesinusoidalne. Materiały konferencyjne. Zielona Góra 2000, str. 141-146.
9. Kaczmarek J., Rybski R.: *Laboratoryjny analizator energii elektrycznej AJE3*. Pomiary i sterowanie w procesach przemysłowych. IV Sympozjum. Zielona Góra, 1999.

Artykuł recenzowany.