

JANUSZ KACZMAREK
WŁODZIMIERZ KULESZA
UNIWEYSYTET ZIELONOGÓRSKI
INSTYTUT METROLOGII ELEKTRYCZNEJ

Koncepcja budowy trójfazowego kalibratora napięć i prądów przemiennych

Streszczenie

W artykule przedstawiono podstawowe założenia techniczne projektu trójfazowego kalibratora napięć i prądów przemiennych, przeznaczonego do sprawdzania mierników mocy lub energii prądu trójfazowego przy sygnałach sinusoidalnych i odkształconych. Do konstrukcji kalibratora zastosowano procesory sygnałowe oraz szereg innych zaawansowanych układów cyfrowych, zapewniających wysokie parametry metrologiczne i eksploatacyjne urządzenia. Kalibrator jest realizowany w ramach projektu celowego nr 8 T10C 062 2000/C/5085.

Abstract

In the paper, design concept and basics guidelines of three phase ac voltage and current calibrator are presented. The calibrator is designed for checking power and energy meters with sinusoidal and non sinusoidal signals. Some sophisticated digital devices such a DSP processors, DDS chips, a/c and d/c converters and microcomputer systems are applied to achieve high performance and usefulness of the calibrator.

WSTĘP

Wszystkie przyrządy pomiarowe wymagają okresowego sprawdzania parametrów metrologicznych. W przypadku sprawdzania przyrządów przeznaczonych do pomiarów wielkości elektrycznych jako źródła wzorcowe są stosowane kalibratory napięć i prądów, umożliwiające programowanie w szerokim zakresie nastaw wielkości wyjściowych. Oferta rynkowa kalibratorów różnych klas dokładności jest bardzo szeroka w przypadku kalibratorów napięć lub prądów, w mniejszym zakresie kalibratorów tzw. fantomu mocy [2], tj. z jednoczesnym generowaniem napięcia i prądu przemiennego z programowanym przesunięciem fazowym między wielkościami wyjściowymi. Jednofazowe lub trójfazowe kalibratory mocy są urządzeniami umożliwiającymi sprawdzanie mierników mocy lub energii prądu elektrycznego. W przypadku kalibratorów fantomu mocy prądu trójfazowego oferta rynkowa jest bardzo ograniczona i reprezentowana przez kilku producentów na świecie, w tym firmę P.W. INMEL z Zielonej Góry, producenta trójfazowego kalibratora SQ 33, który generuje napięcia i prądy sinusoidalne. Zwykle producenci mierników mocy lub energii specyfikują parametry metrologiczne tych przyrządów dla pomiaru przebiegów sinusoidalnych, podczas gdy w coraz większym zakresie w sieci energetycznej występują przebiegi odkształcone. Do

sprawdzania mierników w takich warunkach są wymagane kalibratory generujące także przebiegi odkształcone o dobrze znanej charakterystyce. Zapotrzebowanie energetyki na kalibratory tego typu skłoniło firmę P.W. INMEL do opracowania nowej konstrukcji trójfazowego kalibratora mocy prądu przemiennego INMEL 8033 z możliwością generowania sygnałów wyjściowych z programowaną wartością amplitudy wyższej harmonicznej.

STRUKTURA TRÓJFAZOWEGO KALIBRATORA MOCY INMEL 8033

Założenia konstrukcyjno-metrologiczne

Założenia konstrukcyjno-metrologiczne stanowią podstawę do opracowania struktury kalibratora INMEL8033. W ramach prac koncepcyjnych, po analizie rynku i związanych z tym oczekiwań klientów przyjęto, że kalibrator INMEL8033 ma być kalibratorem fantomu mocy i energii w układzie trójfazowym wytwarzającym na sześciu wyjściach trzy przebiegi napięciowe i trzy przebiegi prądowe. Przebiegi te mogą być przesunięte względem siebie o zadany kąt. W tabeli 1 przedstawiono założone podstawowe parametry metrologiczne sygnałów wyjściowych kalibratora.

W stosunku do parametrów kalibratora SQ 33, zdecydowanej poprawie ma ulec dokładność generacji przesunięcia fazowego $\Delta\phi$. Pozwoli to na zmniejszenie błędu generacji mocy dla $\cos\phi \neq 1$. Ponadto, zwiększone zostaną możliwości funkcjonalne kalibratora INMEL 8033, m.in. będzie istniała możliwość dodawania do generowanego w danym kanale przebiegu wyższej harmonicznej o definiowanej częstotliwości oraz o amplitudzie definiowanej w zakresie 15% amplitudy sygnału podstawowego.

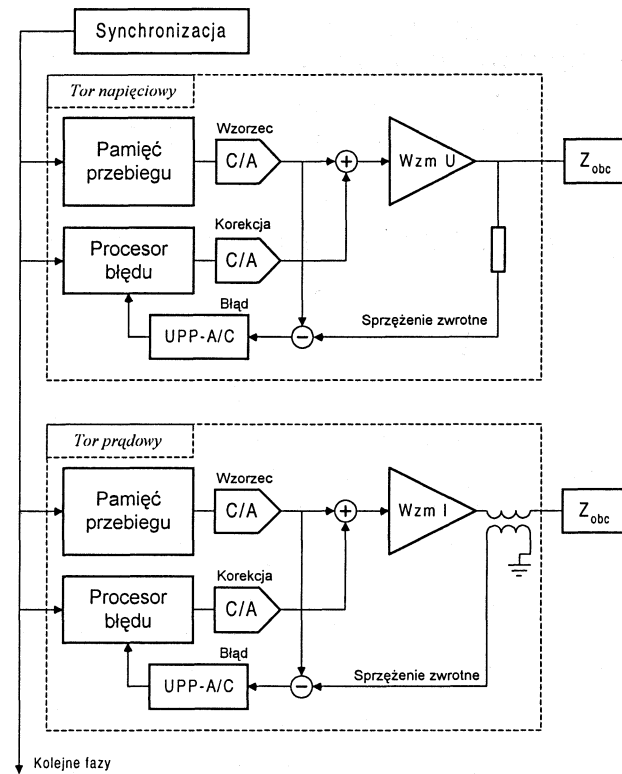
Wybór struktury kalibratora

Dokonanie wyboru struktury kalibratora INMEL 8033 poprzedziła analiza istniejących rozwiązań komercyjnych [1][4][5] oraz rozwiązań koncepcyjnych powstałych w wyniku prac badawczych [2]. Szczególną uwagę zwrócono na klasyczną strukturę kalibratora trójfazowego z analogowymi wzmacniaczami błędów, przetwornikami wartości średniej lub skutecznej (RMS) i detektorami przejścia przez zero [5], zastosowaną m.in. w kalibratorze SQ 33 oraz strukturę kalibratora mocy firmy Rotek 8000, obecnie charakteryzującego się najlepszymi parametrami metrologicznymi wśród konstrukcji komercyjnych [4],

Tab. 1. Podstawowe parametry metrologiczne kalibratora INMEL 8033

Wielkość	Zakres	Zakres nastaw	Obciążalność	Błąd podstawowy
Napięcie	140V	1,4-140V	200 mA	$\pm(0,04+0,01)\%$
	280V	2,8-280V	100 mA	
	750V	7,5-750V	30 mA	
Prąd	0,5A	0,005-0,5A	20V	$\pm(0,04+0,01)\%$
	2,5A	0,025-2,5A	8V	
	10A	0,1-10A	2V	
	50A	0,5-50A	0,5V	
Moc pozorna S		3*(0,0065 - 37500) VA		$\pm 0,08\%$
Moc czynna P		0 - 3*37500W		$\pm 0,08\%$ dla $\cos\varphi=1$ $\pm 0,1\%$ dla $\cos\varphi=0,5$
Częstotliwość	100Hz	40-99,99Hz		0,01Hz
	1000Hz	100-1250Hz		0,1Hz
Kąt		$\pm 180^\circ$		0,1° dla 48-62Hz
			0,3° dla 40-1250Hz	
Czas		1 - 540 min.		1s/tE*100 %
Energia		Wynika z nastaw mocy i czasu		Wynika z wartości błędu mocy i czasu

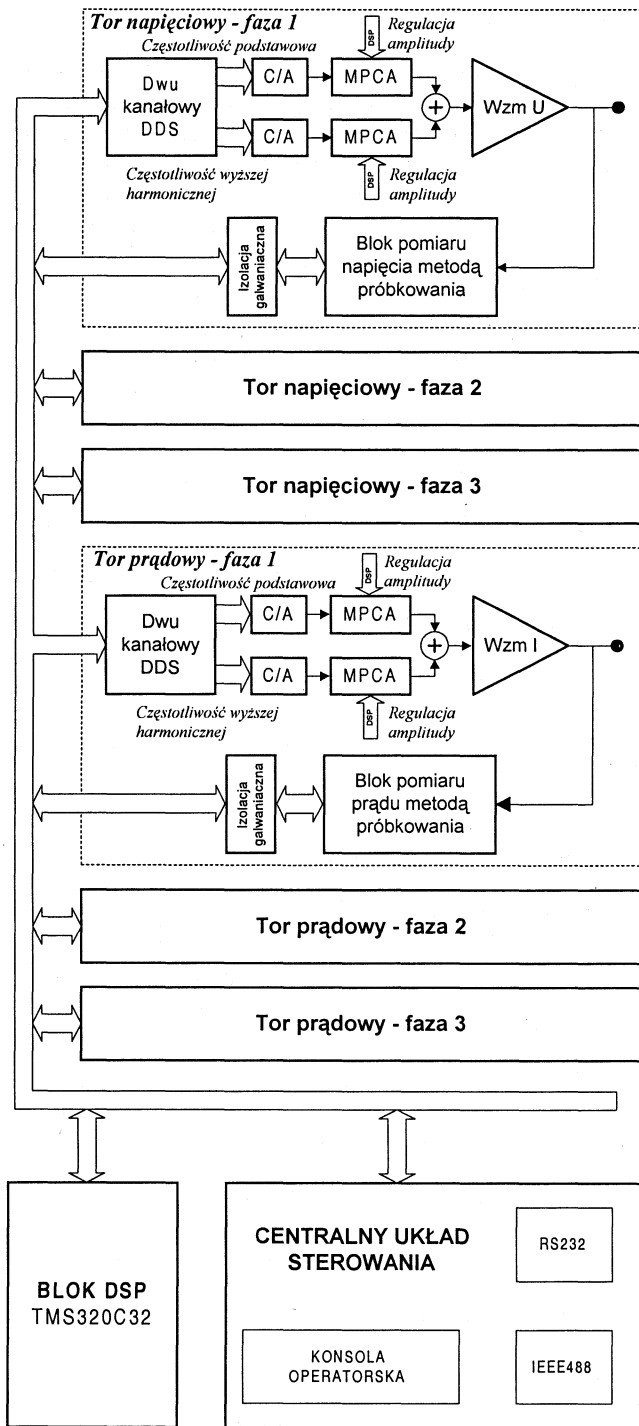
którego konstrukcja jest oparta na zastosowaniu cyfrowego przetwarzania sygnałów do generacji i stabilizacji sygnałów wyjściowych. W rozwiązaniu pierwszym, ze względu na zastosowanie do pomiaru wartości napięcia i prądu przetworników wartości średniej działających w oparciu o prostowniki dwupołówkowe, nie jest możliwy pomiar przebiegów odkształconych. Do tego celu należałoby zastosować przetworniki wartości skutecznej RMS. Jednak aby możliwe było osiągnięcie założonych parametrów, ze względu na nie najlepsze parametry temperaturowe przetworniki należałoby umieścić w termostatach. Przy konieczności stosowania sześciu przetworników spowodowałoby to znaczną komplikację konstrukcji. Liniowość takich przetworników szczególnie dla małych wartości, gdzie dodatkowo należy się liczyć z szumami i zakłóceniami, również mogłaby się okazać niewystarczająca. Inną istotną wadą analizowanego rozwiązania jest metoda pomiaru kąta fazowego poprzez wykorzystanie detektora przejścia przez zero, bardzo wrażliwego na zniekształcenia przebiegu wyjściowego i szumy. Alternatywna w stosunku do analogowej konstrukcja kalibratora firmy ROTEK charakteryzuje się zastosowaniem do pomiaru parametrów sygnałów wyjściowych kalibratora analogowo-cyfrowych przetworników próbkujących. Na rys.1 przedstawiono rozwiązanie bloków generacji sygnałów wyjściowych takiego kalibratora.



Rys. 1. Struktura bloków generacji sygnałów kalibratora mocy ROTEK 8000

Współczesne kalibratory charakteryzują się dużym stopniem zastosowania techniki cyfrowej do konstrukcji podstawowych bloków funkcjonalnych kalibratora, włączenie z wykorzystaniem zaawansowanych metod cyfrowego przetwarzania sygnałów. Układy cyfrowe są stosowane w procesie generacji sygnałów (układy bezpośredniej cyfrowej syntezy częstotliwości) oraz ich stabilizacji poprzez precyzyjny pomiar parametrów generowanych sygnałów. Takie podejście determinuje strukturę współczesnego kalibratora, w której kluczową rolę odgrywa precyzyjny pomiar parametrów sygnałów kalibratora z wykorzystaniem algorytmów cyfrowego przetwarzania sygnałów. W tym celu jest stosowany cyfrowy przetwornik wieloparametrowy, który mierzy wszystkie istotne parametry generowanych na wyjściu sygnałów i stanowi element pętli sprzężenia zwrotnego w bloku generacji. Parametry metrologiczne układu pomiarowego mają decydujący wpływ na precyzję całego kalibratora. Na rys.2 przedstawiono strukturę opracowanego kalibratora mocy.

Generację sygnałów w torach napięciowym i prądowym zrealizowano w oparciu o układy bezpośredniej cyfrowej syntezy częstotliwości (DDS), które mogą być zbudowane z pamięci RAM lub ROM zawierających cyfrową reprezentację generowanych sygnałów oraz liczników adresowych [4] lub scalonych układów DDS z wbudowanymi funkcjami \sin . Stosowanie scalonych układów DDS upraszcza w znacznym stopniu konstrukcję bloku generacji przy jednoczesnym zapewnieniu bardzo dobrych parametrów częstotliwościowych (stabilność i



Rys. 2. Struktura trójfazowego kalibratora mocy

rozdzielczość nastawy) oraz fazowych w przypadku układów wielokanałowych. Cyfrowy sygnał z dwukanałowych układów DDS zostaje zamieniony na postać analogową za pomocą przetworników cyfrowo-analogowych, najczęściej 10-12 bitowych. Do realizacji nastawy amplitudy są stosowane mnożące 16-bitowe przetworniki c/a. Dalej sygnały o częstotliwościach podstawowej harmonicznej i n-tej harmonicznej są sumowane. Wpadkowy sygnał jest podawany na wejście napięciowego wzmacniacza mocy (tory napięciowe) oraz na wejście prądowego wzmacniacza mocy (tory prądowe). W celu uzyskania odpowiedniej precyzji generowanych

sygnałów wyjściowych w każdym kanale kalibratora zastosowano cyfrową pętlę sprzężenia zwrotnego zbudowaną z układu normalizacji, przetwornika a/c, procesora sygnałowego oraz mnożącego przetwornika c/a. Znormalizowane sygnały pomiarowe proporcjonalne do sygnałów wyjściowych kalibratora są próbkowane (przetwarzanie a/c). Następnie na podstawie uzyskanych próbek procesor sygnałowy wyznacza nowe wartości nastaw, które są przekazywane do odpowiednich układów regulacji. Cały proces jest powtarzany do momentu, gdy różnica pomiędzy wartością nastawy nominalnej i wartością zmierzoną jest mniejsza od przyjętego poziomu.

Układy sterowania kalibratora

Sterowanie w kalibratorze INMEL 8033 będzie realizowane w układzie wielokomputerowym, składającym się z trzech uzupełniających się funkcjonalnie systemów mikrokomputerowych, są to:

- Centralny Układ Sterowania (CUS) – zadaniem tego bloku jest sterowanie modułami wyboru zakresów wzmacniaczy napięciowych i prądowych, modułami wyboru zakresów pomiarowych przetwornika wieloparametrowego, modułami wyboru sygnałów synchronizacji i taktowania układów generacyjnych. Innym ważnym zadaniem CUS jest obsługa interfejsu programowego typu człowiek – maszyna za pośrednictwem konsoli operatorskiej lub interfejsu typu maszyna – maszyna za pośrednictwem interfejsu komunikacyjnego (IEEE488 lub RS232).
- Konsola operatorska – zadaniem tego bloku jest obsługa interfejsu użytkownika w oparciu o klawiaturę oraz wyświetlacz.
- Blok DSP – zadaniem tego bloku jest sterowanie wybranymi blokami toru pomiarowego kalibratora - sterowanie mnożącymi przetwornikami cyfrowo-analogowymi, zapewniającymi realizację nastaw amplitud sygnałów wyjściowych, sterowanie przetwornikami analogowo-cyfrowymi, realizującymi pomiar sygnałów wyjściowych kalibratora, sterowanie układami DDS w celu nastaw fazy i częstotliwości sygnałów wyjściowych, pomiar mocy, stabilizacja sygnałów wyjściowych kalibratora w oparciu o procedury cyfrowego przetwarzania sygnałów, realizacja cyfrowej pętli sprzężenia zwrotnego w torach generacji sygnałów wyjściowych.

Centralny układ sterowania oraz konsola operatorska zostały zrealizowane w oparciu o system mikrokomputerowy rodziny C166 firmy Infineon Technologies. Duża moc obliczeniowa tego systemu pozwala na realizację sterowania kalibratorem w czasie rzeczywistym oraz umożliwia zrealizowanie przyjaznego intuicyjnego interfejsu użytkownika. Do realizacji bloku DSP został wybrany procesor sygnałowy zmiennoprzecinkowy firmy Texas Instruments TMS320C32-40, który charakteryzuje się odpowiednio dużymi możliwościami przetwarzania danych: 40 MFLOP oraz 20 MIPS.

INTERFEJS UŻYTKOWNIKA

Tryby pracy kalibratora

Kalibrator może być stosowany do realizacji pomiarów w trybie bezpośredniej obsługi manualnej przez operatora lub w trybie obsługi zdalnej za pośrednictwem interfejsu pomiarowego.

Praca w trybie obsługi ręcznej

Podstawowym założeniem przyjętym przy projektowaniu interfejsu użytkownika było zapewnienie przyjaznej obsługi kalibratora. Ze względów ergonomicznych obsługa ręczna kalibratora odbywa się za pośrednictwem konsoli połączonej z kalibratorem przewodem. Konsola składa się z sekcji klawiatury numerycznej z klawiszami edycyjnymi, klawiatury dedykowanej z oznaczeniami wprowadzanych jednostek lub wymuszenia trybu pracy, klawiszy włączenia i wyłączenia wyjść kalibratora, klawiszy funkcyjnych ogólnego przeznaczenia. Wartość nastaw wyjściowych może być także zmieniana za pomocą obrotowego kodera impulsowego. Ze względu na dużą liczbę parametrów opisujących nastawy wyjściowe (prąd, napięcie, przesunięcie fazowe między prądem a napięciem, częstotliwość, zakresy napięcia i prądu, tryb pracy), do ich przedstawienia konieczne było zastosowanie wyświetlacza graficznego. Zastosowany podświetlany wyświetlacz LCD o dużej rozdzielczości 320x240 punktów umożliwia czytelne zobrazowanie zróżnicowanych informacji. Obsługa zaawansowanych funkcji kalibratora jest dostępna w trybie wielopoziomowego menu.

Praca w systemie interfejsu

Kalibrator standardowo jest wyposażony w dwa podstawowe interfejsy komunikacyjne: system IEEE 488.2 oraz RS 232. Badania marketingowe wskazały, że taka konfiguracja najbardziej odpowiada użytkownikom kalibratorów. Rozkazy interfejsowe realizowane przez kalibrator mają takie same formaty niezależnie od typu interfejsu (z wyjątkiem specyficznych rozkazów związanych z transmisją szeregową, np. kody błędów transmisji lub związanych z realizacją standardu IEEE 488.2). W trybie obsługi zdalnej kalibrator ma wyłączone sterowanie lokalne z wyjątkiem akceptacji klawisza przejścia do trybu wyłączenia sygnałów wyjściowych. Lista rozkazów interfejsowych pozwala na realizację wszystkich trybów pracy analogicznie do obsługi ręcznej. Za pośrednictwem interfejsu możliwe jest także odczytanie aktualnego trybu pracy, odczytanie wszystkich nastaw oraz kodów błędów programowania. Innym zastosowaniem interfejsu IEEE 488.2 jest umożliwienie pracy w systemie pomiarowym do automatycznego wzorcowania kalibratora w procesie produkcji i sprawdzania kalibratora.

PODSUMOWANIE

Realizacja trójfazowego kalibratora fantomu mocy prądu przemiennego według przedstawionej koncepcji powinna zapewnić osiągnięcie założonych parametrów metrologicznych kalibratora, jak również przyjazną dla użytkownika obsługę urządzenia. Nowoczesna konstrukcja kalibratora z zastosowaniem zaawansowanych elementów elektronicznych i mikrokomputerowych powinna zapewnić mu konkurencyjność względem innych tego typu konstrukcji. Możliwość sprawdzania mierników energetycznych także przy sygnałach odkształconych jest znaczącym rozszerzeniem funkcjonalności kalibratora.

LITERATURA

1. A.Gubish, P.L.Lualdi, P.N.Miljanic and J.L.West: *Power Calibrator Using Sampled Feedback for Current and Voltage*; IEEE Trans. Instrum. Meas., vol.46, no 2, 1997, pp.403-407.
2. A.Carullo, Ferraris, M.Parvis, A.Vallan: *Phantom Power Generator for The Calibration of Wattmeters in Distorted Environments*; Proceedings, vol.1, IMEKO TC-4 Symposium on Development in Digital Measuring Instrumentation, Naples, Italy, 1998, pp.67-71.
3. F.Sandu, W.Szabo: *Time-Domain Signal Processing for Power Measurement in Industrial Networks*; Proceedings, vol.1, IMEKO TC-4 Symposium on Development in Digital Measuring Instrumentation, Naples, Italy, 1998, pp.359-364.
4. Operator Manual. Model 8000 Power and Energy Calibrator. ROTEK, USA
5. *Analiza i wybór schematu strukturalnego kalibratora mocy INMEL 8033*, Politechnika Zielonogórska, Raport nr 1 z realizacji prac badawczo-rozwojowych projektu celowego 8 T 10C 062 2000C/5085.

Artykuł recenzowany.