

Artur SKÓRKOWSKI, Adam CICHY

POLITECHNIKA ŚLĄSKA, INSTYTUT METROLOGII, ELEKTRONIKI I AUTOMATYKI

Testowanie wirtualnej realizacji quasi-zrównoważonego układu do pomiaru pojemności

Dr inż. Artur SKÓRKOWSKI

Pracuje na stanowisku adiunkta w Instytucie Metrologii, Elektroniki i Automatyki na Wydziale Elektrycznym Politechniki Śląskiej. Główne kierunki działalności naukowo-badawczej to: miernictwo precyzyjne (konstruowanie i badania indukcyjnych dzielników napięcia), obróbka danych pomiarowych, systemy pomiarowe, interfejsy bezprzewodowe, przyrządy wirtualne (oprogramowanie w środowisku LabVIEW). Członek PTETiS, IEEE i Sekcji PPM KMian PAN.



e-mail: artur.skorkowski@polsl.pl

Dr inż. Adam CICHY

Adiunkt w Instytucie Metrologii, Elektroniki i Automatyki Wydziału Elektrycznego Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Autor i współautor ponad 20 publikacji z dziedziny metrologii elektrycznej. Członek PTETiS i IEEE. Główne zainteresowania naukowe: pomiary składowych impedancji, szczególnie w paśmie częstotliwości podakustycznych, pomiary kąta fazowego.



e-mail: adam.cichy@polsl.pl

Streszczenie

Zasadniczym celem pracy było sprawdzenie możliwości realizacji quasi-zrównoważonego układu do pomiaru pojemności w wersji wirtualnej. W pracy przedstawiono schematy przyrządu wirtualnego oprogramowanego w środowisku LabVIEW, realizującego pomiar pojemności w układzie quasi-zrównoważonym z różnego typu detektorami fazoczułymi. Ponadto przedstawiono wyniki testowania podstawowych modułów opracowanej wirtualnej realizacji układu pomiarowego. Do budowy testowanego układu wykorzystano komputer klasy PC wyposażony w kartę pomiarową NI-6009. Pracą karty pomiarowej oraz obliczeniami steruje aplikacja napisana w graficznym środowisku programowania LabVIEW.

Słowa kluczowe: układ quasi-zrównoważony, pomiar pojemności, przyrząd wirtualny.

Testing of the virtual realization of the quasi-balanced circuit for the capacitance measurement

Abstract

A basic purpose of this research was to verify a possibility of a virtual realization of the quasi-balanced circuit for the capacitance measurement. Diagrams of virtual instrument programmed in LabVIEW platform for the capacitance measurement in quasi-balanced circuit with different phase detector have been presented in this paper. Results of testing of fundamental modules of virtual realization measurement circuit have been presented as well. The tested circuit was build using a PC computer and the DAQ card NI-6009. The DAQ card and the calculation have been controlled by the application developed in the graphical development platform LabVIEW.

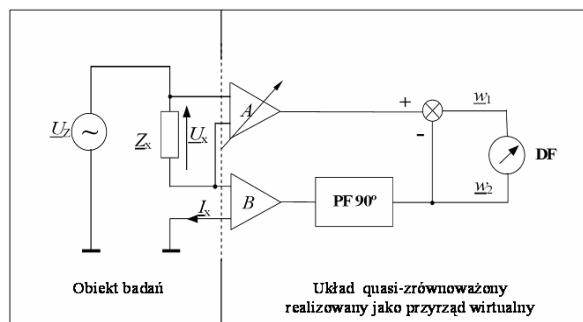
Keywords: quasi-balanced circuit, capacitance measurement, virtual instrument.

1. Wstęp

Układy quasi-zrównoważone są to przemiennoprądowe układy pomiarowe przeznaczone do pomiaru składowych impedancji lub admitancji [1...5]. W układach takich osiąga się tzw. stan quasi-równowagi poprzez zmianę nastaw pojedynczego elementu regulacyjnego. Stan quasi-równowagi to z góry założony stan niezerowy – na ogół oznaczający osiągnięcie wybranego przesunięcia fazowego pomiędzy sygnałami wyróżnionymi układu. Do zalet omawianych układów można zaliczyć stale maksymalną zbieżność, wadą jest brak możliwości jednoczesnego pomiaru obydwu składowych immitancji, chociaż zwykle pomiar drugiej składowej jest możliwy po nieskomplikowanej rekonfiguracji układu.

Współczesne przyrządy pomiarowe budowane są coraz częściej jako przyrządy wirtualne. Operacje realizowane na sygnałach pomiarowych w technice analogowej są wykonywane programowo na próbkowanych i kwantowanych sygnałach. Schemat blokowy układu (rys. 1) opisującego przetwarzanie analogowe staje się wówczas algorytmem pomiarowym (przyrząd wirtualny).

Układy quasi-zrównoważone bardzo łatwo poddają się wirtualizacji, ponieważ w omawianych układach występują jedynie operacje sumowania, wzmacniania lub przesuwania sygnałów o kąt fazowy $\pm\pi/2$. Detekcja fazoczuła może być również wykonywana metodami algorytmicznymi [6].



Rys. 1. Schemat blokowy aktywnego quasi-zrównoważonego układu do pomiaru składowych impedancji

Fig. 1. Block diagram of the quasi-balanced circuit for the impedance elements measurement

2. Badany quasi-zrównoważony układ do pomiaru pojemności

Schemat blokowy badanego układu pomiarowego przedstawiony został na rys. 1. Sygnały podlegające detekcji w_1 i w_2 można opisać zależnościami:

$$\begin{cases} w_1 = A \cdot \underline{U}_x - jB \underline{I}_x \\ w_2 = jB \underline{I}_x \end{cases} \quad (1)$$

Detektor fazoczuły DF stwierdza stan quasi-równowagi oznaczający ortogonalność sygnałów w_1 i w_2 , co oznacza, że spełniony jest warunek:

$$\operatorname{Re} \left(\frac{w_1}{w_2} \right) = 0 \quad (2)$$

Z zależności (1) i (2) wynika, że:

$$\operatorname{Re} \left(\frac{A \cdot \underline{U}_x - jB \underline{I}_x}{jB \underline{I}_x} \right) = \operatorname{Re} \left(\frac{A}{jB} \underline{Z}_x - 1 \right) = 0 \quad (3)$$

skąd można wyznaczyć składową urojoną mierzonej impedancji:

$$\text{Im}(Z_x) = \frac{B}{A} \quad (4)$$

Jeżeli obiekt badany modelowany będzie szeregowym połączeniem RC, wówczas pojemność C można wyznaczyć z zależności:

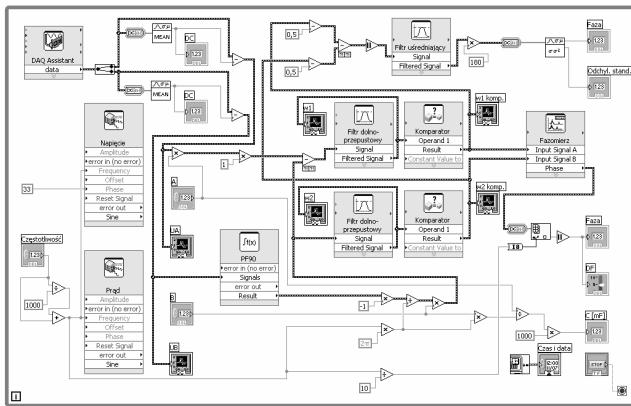
$$C = \frac{A}{\omega B} \quad (5)$$

3. Wirtualna realizacja badanego układu do pomiaru pojemności

Quasi-zrównoważony układ pomiarowy do pomiaru pojemności przedstawiony na rys. 1 został zrealizowany jako przyrząd wirtualny (rys. 2). Sygnały pomiarowe, takie jak spadek napięcia na impedancji mierzonej oraz prąd przetworzony na napięcie, doprowadzone zostały do karty pomiarowej USB NI 6009. Dalsze przetwarzanie sygnałów w torach pomiarowych wykonywane jest przez program zrealizowany w graficznym języku programowania LabVIEW 8.0.

Opracowany przyrząd wirtualny składa się z czterech podstawowych modułów:

- wzmacniacz A napięcia U_A mierzonego na badanej impedancji,
- wzmacniacz B napięcia U_B proporcjonalnego do prądu płynącego przez badaną impedancję,
- przesuwnik PF zrealizowany jako układ różniczkujący próbkowany sygnał U_B ,
- detektor fazoczuły DF, którego zadaniem jest pomiar przesunięcia fazowego między sygnałami \underline{w}_1 i \underline{w}_2 .



Rys. 2. Układ quasi-zrównoważony realizowany jako przyrząd wirtualny (prawa część układu pomiarowego z rys. 1)
Fig. 2. The quasi-balanced circuit realized as virtual instrument (the right part of the measurement circuit presented in Fig. 1)

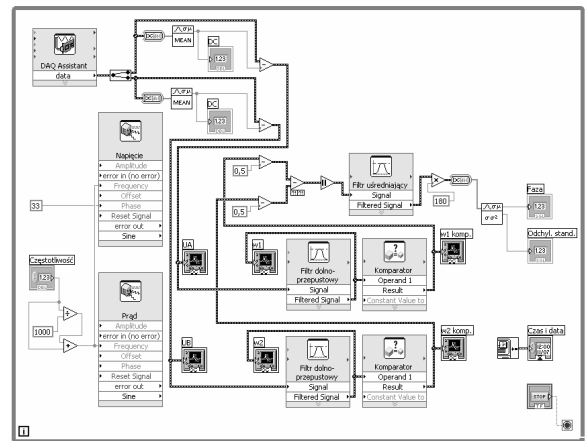
Sygnał U_A oraz zróżniczkowany przez przesuwnik fazowy PF sygnał U_B są doprowadzone do węzła sumacyjnego w celu wygenerowania sygnału \underline{w}_1 . Sygnał \underline{w}_2 będący przesuniętym w fazie o 90° sygnałem U_B oraz sygnał \underline{w}_1 są doprowadzane do komparatorów, które porównują te sygnały z poziomem odniesienia równym zero (detekcja przejścia sygnału sinusoidalnego przez zero). Powstałe w ten sposób sygnały prostokątne są poddawane detekcji fazoczułej w celu określenia przesunięcia fazowego między nimi.

4. Testowanie modułów układu pomiarowego

Najistotniejszym modułem opracowanego przyrządu wirtualnego, decydującym w głównej mierze o dokładności pomiaru jest detektor fazoczuły DF. Przetestowano wiele znanych rozwiązań układów do pomiaru przesunięcia fazowego takich jak układy z licznikami impulsów, układy z przetwornikiem czas-amplituda impulsu – TPHC (ang. *Time to Pulse Height Converter*), układy

z ekspanderem czasowym będącym częścią składową przetworników TDC (ang. *Time to Digital Converter*) [7]. Ostatecznie zdecydowano się na zastosowanie dwóch fazomierzy w celu weryfikacji wyników detekcji fazoczułej.

Pierwsze rozwiązanie zastosowanego w układzie pomiarowym fazomierza (rys. 3) wykorzystuje zależność między wartością średnią z różnicy wartości chwilowych dwóch przebiegów napięcia w czasie półokresu a wartością przesunięcia fazowego między przebiegami czasowymi tych napięć. Jest to idea pomiaru przesunięcia fazowego łatwo adaptowalna w przyrządach wirtualnych. Pomiar przesunięcia fazowego próbkowanych przebiegów czasowych musi uwzględniać częstotliwość próbkowania szczególnie gdy metoda oparta jest na procedurach uśredniania.



Rys. 3. Diagram wirtualnego fazomierza uśredniającego
Fig. 3. Diagram of the virtual smoothing phase-meter

Dokładność takiego sposobu pomiaru przesunięcia fazowego jest uzależniona od sposobu uśredniania (szerokości okna filtru uśredniającego). Dla sygnałów próbkowanych z daną częstotliwością odchylenie standardowe mierzonego przesunięcia fazowego między dwoma sygnałami zależy od szerokości okna uśredniania różnicy wartości chwilowych tych sygnałów (tab. 1).

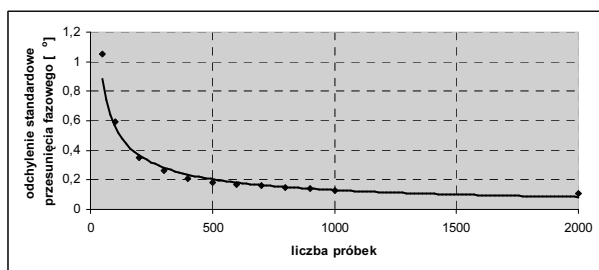
Tab. 1. Zależność odchylenia standardowego mierzonego przesunięcia fazowego między dwoma sygnałami od szerokości okna uśredniania różnicy wartości chwilowych tych sygnałów przy danej częstotliwości próbkowania porównywanych sygnałów

Tab. 1. Dependence between the measured phase standard deviation and the half-width of the moving average window for noted timing frequency

Połowa szerokości okna uśredniania [liczba próbek]	Odchylenie standardowe mierzonego przesunięcia fazowego w [stopniach] dla danej częstotliwości próbkowania porównywanych sygnałów	
	Częstotliwość próbkowania 1kS/s	Częstotliwość próbkowania 10kS/s
50	1,05	83,72
100	0,59	77,00
200	0,35	61,39
300	0,26	40,83
400	0,21	19,09
500	0,18	0,18
600	0,17	12,94
700	0,16	17,59
800	0,15	15,30
900	0,14	8,45
1000	0,13	0,13
2000	0,11	0,11
5000	0,09	0,10

Na rys. 4 przedstawiono zależność odchylenia standardowego mierzonego przesunięcia fazowego dwóch sygnałów próbkowanych z częstotliwością 1kS/s od szerokości okna uśredniania różnicy porównywanych sygnałów, którą wyrażono liczbą uśred-

nianych próbek. Zwiększanie szerokości okna uśredniania (obliczenia na większej liczbie próbek) powoduje mniejsze zmiany wartości sygnału na wyjściu filtra uśredniającego. Należy jednak zwrócić uwagę na fakt wydłużania się czasu oczekiwania na wynik takiego uśredniania. Szukanie optymalnego okna uśredniania musi uwzględniać częstotliwość próbkowania porównywanych sygnałów oraz ich własną częstotliwość. Podczas testów opracowanego przyrządu wirtualnego częstotliwości sygnałów pomiarowych były zmieniane w zakresie 10 ... 100Hz (typowa wartość 50Hz).



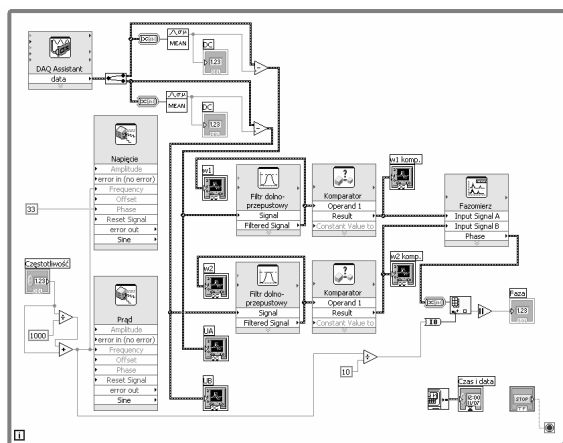
Rys. 4. Zależność odchylenia standardowego mierzonego przesunięcia fazowego dwóch sygnałów próbkowanych z częstotliwością 1kS/s od szerokości okna uśredniania (liczby próbek) różnicy porównywanych sygnałów

Fig. 4. Measured phase standard deviation vs. half-width of moving average window for two signals timing with the frequency 1kS/s

Analiza wyników prezentowanych w tab. 1 i na rys. 4 uwidacznia, iż optymalne okno uśredniania ma szerokość równą 1kS zarówno dla częstotliwości 1kS/s jak i 10kS/s. Różnica polega na tym, że w przypadku sygnałów próbkowanych z częstotliwością 10kS/s wynik otrzymujemy już po 0,1s, a nie po 1s jak to jest w przypadku próbkowania 1kS/s.

Drugim rozwiązaniem zastosowanego w układzie pomiarowym fazomierza jest dostępny w środowisku LabVIEW moduł dwukanałowej analizy widmowej DCSM (ang. *Dual Channel Spectral Measurement*), który umożliwia między innymi pomiar przesunięcia fazowego między dwoma sygnałami o dowolnym kształcie. Pomiary za pomocą tego modułu wykonywane są w pewnym zakresie częstotliwości uzależnionym od częstotliwości próbkowania porównywanych sygnałów. Gdy ta częstotliwość wynosi 1kS/s wtedy analizowane jest widmo 0 ... 500Hz z krokiem 10Hz.

Schemat fazomierza zbudowanego w oparciu o moduł DCSM przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Diagram fazomierza widmowego zbudowanego w oparciu o moduł DCSM

Fig. 5. Diagram of spectral phase-meter executed as DCSM module

Istotną kwestią przy stosowaniu tego typu fazomierza jest odczytanie przesunięcia fazowego dla częstotliwości sygnałów mierzonych. W tym celu zastosowano na wyjściu fazomierza funkcję *Index Array* do pobierania z tablicy zawartości komórki o podanym indeksie [8]. Numer indeksu wybierany jest w zależ-

ności od częstotliwości podanych sygnałów i odpowiada ich podstawowej harmonicznej. Taki sposób pomiaru fazy pozwala na otrzymanie poprawnego wyniku nawet wtedy gdy sygnały są odkształcone i nie zastosowano wcześniejszej filtracji (filtry dolnoprzepustowe).

Moduł przesuwnika PF90 został zrealizowany jako układ różniczkujący spróbkowany sygnał U_B . Taką funkcjonalność w środowisku LabVIEW posiada moduł *Time Domain*, który należy odpowiednio skonfigurować, szczególnie zwracając uwagę na wybór opcji *continuous calculation* jako trybu obliczeń.

Pozostałe części podstawowych modułów opracowanego przyrządu wirtualnego (wzmacniacze, filtry, komparatory) zrealizowano wykorzystując standardowe funkcje i struktury graficznego środowiska programowania LabVIEW [9].

5. Podsumowanie i kierunki dalszych badań

Zaprezentowana w pracy wirtualna realizacja quasi-zrównoważonego układu do pomiaru pojemności była testowana zarówno dla sygnałów pomiarowych generowanych w sposób programowy (symulacja) jak i w rzeczywistym obwodzie z impedancją mierzoną typu RC zasilaną z generatora sygnałów sinusoidalnych Agilent 33220A, tak jak to przedstawiono na rys. 1 (częstotliwość pomiarowa 50Hz, amplituda 5V). Wyniki symulacji oraz weryfikacja doświadczalna funkcjonowania układu pomiarowego potwierdziły możliwości pomiaru pojemności z rozdzielczością 0,1nF. Rozdzielczość pomiarowa w testowanym układzie została zdeterminowana przez impedancję wejściową zastosowanej karty pomiarowej. Przedstawiona koncepcja realizacji pomiaru pojemności na wstępnym etapie testowania w pełni się sprawdziła i okazała się szczególnie dogodną do wirtualnej realizacji. Analizowane rozwiązania detektora fazoczułego ujawniły zasadnicze źródła niepewności pomiaru oraz pozwoliły na optymalne skonfigurowanie modułów układu pomiarowego. Kierunki dalszych badań zakładają zwiększenie rozdzielczości pomiaru oraz zwiększenie zakresu częstotliwości mierzonych sygnałów, szczególnie w kierunku infraniskich częstotliwości. Planowane są również próby realizacji korelacyjnego detektora fazoczułego, którego działanie może skrócić czas pomiaru.

6. Literatura

- [1] Karandziejew K. B.: Pomiary elektryczne metodami mostkowymi i kompensacyjnymi. WNT, Warszawa 1969.
- [2] Szadkowski B.: Quasi-zrównoważone metody pomiaru immitancji. Rozprawy Elektrotechniczne 1985, 31, z.2.
- [3] Szadkowski B.: Pomiar składowych immitancji metodą detekcji stanu $Re(w/w_2)=0$. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria „Elektryka” nr 108, Gliwice 1989.
- [4] Cichy A.: Quasi-zrównoważone układy do pomiaru składowych immitancji. Materiały XXX Międzyuczelnianej Konferencji Metrologów MKM'98, Międzyzdroje 1998.
- [5] Cichy A., Szadkowski B.: Typowe rozwiązania quasi-zrównoważonych układów do pomiaru składowych immitancji. Zeszyty naukowe Politechniki Śląskiej, seria „Elektryka” nr, Gliwice 2000.
- [6] Cichy A.: Zastosowanie programowego przetwarzania sygnałów w quasi-zrównoważonych układach do pomiaru składowych immitancji.” Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej „Elektryka”, z.195, Gliwice 2005.
- [7] Tłaczała W.: Środowisko LabVIEW w eksperymencie wspomaganym komputerowo. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2002.
- [8] Świsulski D.: Komputerowa technika pomiarowa. Oprogramowanie wirtualnych przyrządów pomiarowych w LabVIEW. Agenda Wydawnicza PAK-u, Warszawa 2005.
- [9] LabVIEW Fundamentals. National Instruments Corporation 2005.