

**Adam CICHY, Artur SKÓRKOWSKI**

POLITECHNIKA ŚLĄSKA, INSTYTUT METROLOGII, ELEKTRONIKI I AUTOMATYKI

## Wirtualny miernik pojemności realizujący quasi-zrównoważoną metodę pomiaru modułu impedancji

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

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

### Streszczenie

Pomiar pojemności dwójnika może być dokonany poprzez pomiar modułu impedancji badanego obiektu. Jest to możliwe, jeżeli badaniu podlega obiekt o skrajnie różniących się składowych (np. kondensator niskostratny). Wówczas błąd przybliżenia składowej dominującej modułem impedancji może być pomijalnie mały. W pracy przedstawiona została wirtualna realizacja miernika pojemności wykorzystującego pomiar modułu impedancji i realizującego szczególną, niezerową metodę pomiaru - quasi-zrównoważoną metodę pomiarową. Miernik został zbudowany z wykorzystaniem karty pomiarowej USB NI-6009 oprogramowanej w środowisku LabVIEW.

**Słowa kluczowe:** pomiar pojemności, układy quasi-zrównoważone.

### Virtual capacitance meter realizing a quasi-balanced method of impedance modulus measurement

#### Abstract

Measurements of a capacitance can be performed by the measurement of an impedance modulus of an investigated object. It is possible, if a two-terminal network is represented by a series connection of a resistor and a capacitor and the reactance of the capacitor is considerably greater than the resistance (e.g. in a low-loss capacitor). In this case the error of the approximation can be omitted, as it has been shown in the equations (1)...(12). A virtual realization of such meter has been presented in this paper. The Fig. 2 shows the idea of the signal processing in the quasi-balanced circuit. Quasi-balanced circuits are the AC circuits designated for impedance components measurements. Similar as the balanced circuits, the quasi-balanced circuits have a special status called a quasi-balance status. This is usually a phase shift between two selected signals of the circuits. The circuit is driven to the quasi-balance status by controlling of only one variable element and then the value of the measured impedance component can be calculated according to the adjusting of the variable element. The meter has been built with the application of data acquisition card USB NI-6008, which has been controlled by a software programmed in the LabVIEW environment.

**Keywords:** capacitance measurement, quasi-balanced circuits.

### 1. Wstęp

Pomiary modułu impedancji nie są w praktyce wykonywane szczególnie często. Jednak, jeżeli badaniu podlega obiekt o skrajnie różniących się składowych (np. kondensator o odpowiednio małym współczynniku strat dielektrycznych lub cewka o dużej dobroci), błąd przybliżenia składowej dominującej modułem impedancji może być pomijalnie mały. W takim wypadku do pomiaru składowych impedancji lub parametrów takich jak pojemność lub indukcyjność można zastosować metodę przeznaczoną do pomiaru modułu impedancji. Jedną z takich metod może być metoda quasi-zrównoważona, znana przede wszystkim z realizacji mostków pasywnych [1, 2]. Obecnie metody quasi-

zrównoważone realizowane są jako układy aktywne [3, 4, 5, 6], ale coraz częściej jako układy wirtualne [8]. Quasi-zrównoważone metody pomiaru składowych immitancji charakteryzują się pewnymi korzystnymi cechami. W porównaniu do metod zerowych nie występuje w nich problem zbieżności - w procesie pomiarowym wykorzystuje się wyłącznie jeden element regulacyjny. Czułość quasi-zrównoważonych układów pomiarowych rośnie wraz ze zmniejszaniem częstotliwości oraz nie występują w ich strukturze elementy indukcyjne, a zatem mogą one być wykorzystane w pomiarach w paśmie częstotliwości podakustycznych. Ponadto algorytmiczne detektory fazoczułe pozwalają na skrócenie czasu detekcji do podwielokrotności okresu przebiegu. Takie cechy układów quasi-zrównoważonych pozwalają na wykonanie pomiaru w znacznie krótszym czasie niż przy wykorzystaniu innych metod pomiarowych. Przy częstotliwości 1 mHz pomiar, w którym niezbędna jest znajomość wartości skutecznej (np. pomiar metodą techniczną) wymaga czasu równego co najmniej okresowi przebiegu - a więc ponad 1000 sekund. Quasi-zrównoważony układ pomiarowy może pozwolić na znaczne skrócenie czasu pomiaru. W artykule przedstawiona zostanie realizacja quasi-zrównoważonej metody pomiaru pojemności poprzez pomiar modułu impedancji z wykorzystaniem programowego przetwarzania sygnałów pomiarowych. Celem niniejszej pracy było sprawdzenie koncepcji pomiaru, wyniki badań wykorzystane zostaną do budowy układu przeznaczanego do pracy w paśmie częstotliwości podakustycznych.

### 2. Błąd metody pomiarowej

Rzeczywista wartość pojemności jest związana ze składową bierną  $\text{Im} \underline{Z}_X$  badanej impedancji  $\underline{Z}_X$ , przy założeniu szeregowego modelu typu RC, zależnością:

$$C = \frac{1}{\omega \text{Im} \underline{Z}_X}, \quad (1)$$

natomiast wartość pojemności  $\hat{C}$  wyznaczona z wykorzystaniem modułu impedancji  $|\underline{Z}_X|$  jest równa:

$$\hat{C} = \frac{1}{\omega |\underline{Z}_X|}. \quad (2)$$

Względny błąd pomiaru pojemności spowodowany przyjęciem do obliczeń zamiast składowej biernej modułu impedancji wyniesie:

$$e_r(C) = \frac{\hat{C} - C}{C} = \frac{\frac{1}{\omega |\underline{Z}_X|} - \frac{1}{\omega \text{Im} \underline{Z}_X}}{\frac{1}{\omega \text{Im} \underline{Z}_X}} = \frac{\text{Im} \underline{Z}_X}{|\underline{Z}_X|} - 1 \quad (3)$$

Moduł impedancji związany jest ze składowymi impedancji następującą zależnością

$$|\underline{Z}_X|^2 = [\operatorname{Re}\underline{Z}_X]^2 + [\operatorname{Im}\underline{Z}_X]^2, \quad (4)$$

co dalej można zapisać jak poniżej:

$$|\underline{Z}_X|^2 = (\operatorname{Im}\underline{Z}_X)^2 \left[ \left( \frac{\operatorname{Re}\underline{Z}_X}{\operatorname{Im}\underline{Z}_X} \right)^2 + 1 \right]. \quad (5)$$

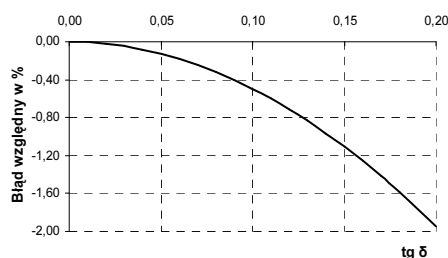
Uwzględniając w powyższym równaniu zależność opisującą tangens kąta stratności  $\delta$ :

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{\operatorname{Re}\underline{Z}_X}{\operatorname{Im}\underline{Z}_X} \quad (6)$$

otrzymuje się równanie opisujące względny błąd wyznaczenia pojemności spowodowany przybliżeniem składowej biernej modulem impedancji:

$$e_r(C) = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2\delta}} - 1. \quad (7)$$

Na rys.1 przedstawiono zależność powyższego błędu (wyrażonego w procentach) w funkcji współczynnika strat dielektrycznych  $\operatorname{tg}\delta$ .



Rys.1. Charakterystyka błędu wyznaczenia pojemności w funkcji współczynnika strat dielektrycznych  $\operatorname{tg}\delta$

Fig.1. The relative error of the capacitance measurement versus the loss factor of the capacitor  $\operatorname{tg}\delta$

Względny błąd wyznaczenia pojemności spowodowany przybliżeniem składowej biernej modulem impedancji powinien być mniejszy od założonej, granicznej wartości  $\varepsilon$ :

$$|e_r(C)| \leq \varepsilon. \quad (8)$$

Uwzględniając w równaniu (8) zależność (7) otrzymuje się:

$$\left| \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2\delta}} - 1 \right| \leq \varepsilon. \quad (9)$$

Ponieważ  $\operatorname{tg}\delta \geq 0$

$$\left| \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2\delta}} - 1 \right| = 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2\delta}}, \quad (10)$$

zatem warunek (9) przybiera postać

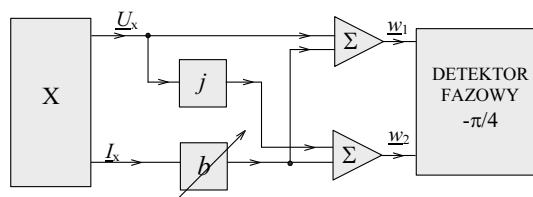
$$1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2\delta}} \leq \varepsilon, \quad (11)$$

skąd wynika, że:

$$\operatorname{tg}\delta \leq \frac{\sqrt{\varepsilon(2 - \varepsilon)}}{1 - \varepsilon}. \quad (12)$$

### 3. Quasi-zrównoważony układ do pomiaru modułu impedancji

Na rys. 2 przedstawiono schemat strukturalny quasi-zrównoważonego układu do pomiaru modułu impedancji. Syntezę układu opisano w pracy [7].



Rys. 2. Struktura quasi-zrównoważonego układu do pomiaru modułu impedancji  
Fig. 2. A block diagram of the quasi-balanced circuit for the measurement of the impedance modulus

Blok X zawiera badaną impedancję  $\underline{Z}_X$  oraz układy zasilające (generator). Sygnałami wyjściowymi są odpowiednio sygnały:  $\underline{U}_X$  – spadek napięcia na badanej impedancji oraz  $\underline{I}_X$  – prąd badanej impedancji. Sygnały  $\underline{U}_X$  oraz  $\underline{I}_X$  przetwarzane są według schematu z rys.1. Sygnały  $\underline{w}_1$  oraz  $\underline{w}_2$  doprowadzone do detektora fazowego są opisane zależnościami:

$$\begin{cases} \underline{w}_1 = \underline{U}_X + b\underline{I}_X \\ \underline{w}_2 = j\underline{U}_X + b\underline{I}_X \end{cases}. \quad (13)$$

Stan quasi-równowagi omawianego układu oznacza, że kąt przesunięcia fazowego pomiędzy sygnałami  $\underline{w}_1$  oraz  $\underline{w}_2$  układu jest równy  $-\pi/4$ . Stan taki opisuje zależność:

$$\operatorname{Arg}\left(\frac{\underline{w}_1}{\underline{w}_2}\right) = -\frac{\pi}{4}, \quad (14)$$

co oznacza, że:

$$\operatorname{Re}\left(\frac{\underline{w}_1}{\underline{w}_2}\right) = -\operatorname{Im}\left(\frac{\underline{w}_1}{\underline{w}_2}\right). \quad (15)$$

Stosunek sygnałów wyróżnionych  $\underline{w}_1$  oraz  $\underline{w}_2$  jest związany z mierzoną impedancją:

$$\frac{\underline{w}_1}{\underline{w}_2} = \frac{\underline{U}_X + b\underline{I}_X}{j\underline{U}_X + b\underline{I}_X} = \frac{\frac{\underline{U}_X}{\underline{I}_X} + b}{j\frac{\underline{U}_X}{\underline{I}_X} + b} = \frac{\underline{Z}_X + b}{j\underline{Z}_X + b}. \quad (16)$$

Przekształcając powyższe równanie otrzymuje się zależność:

$$\frac{\underline{w}_1}{\underline{w}_2} = \frac{(\underline{Z}_X + b)(-j\bar{\underline{Z}}_X + b)}{|j\underline{Z}_X + b|^2} = \frac{-j|\underline{Z}_X|^2 - j b \bar{\underline{Z}}_X + b \underline{Z}_X + b^2}{|j\underline{Z}_X + b|^2}, \quad (17)$$

czyli:

$$\frac{\underline{w}_1}{\underline{w}_2} = \frac{-j|\underline{Z}_X|^2 - j b (\operatorname{Re}\underline{Z}_X - j \operatorname{Im}\underline{Z}_X) + b (\operatorname{Re}\underline{Z}_X + j \operatorname{Im}\underline{Z}_X) + b^2}{|j\underline{Z}_X + b|^2} \quad (18)$$

a po przekształceniu:

$$\frac{\underline{w}_1}{\underline{w}_2} = \frac{-j|\underline{Z}_X|^2 - j b \operatorname{Re}\underline{Z}_X - b \operatorname{Im}\underline{Z}_X + b \operatorname{Re}\underline{Z}_X + j b \operatorname{Im}\underline{Z}_X + b^2}{|j\underline{Z}_X + b|^2}. \quad (19)$$

Jak wspomniano, stan quasi-równowagi analizowanego układu oznacza osiągnięcie przez sygnały wyróżnione  $w_1$  i  $w_2$  przesunięcia kąтового  $-\pi/4$ . Taki stan jest tożsamy z równością części rzeczywistej i części urojonej - ze zmienionym znakiem- relacji  $w_1/w_2$ . Części rzeczywista i urojona powyższego wyrażenia wynoszą odpowiednio:

$$\operatorname{Re} \frac{w_1}{w_2} = \frac{b \operatorname{Re} \underline{Z}_X - b \operatorname{Im} \underline{Z}_X + b^2}{|j\underline{Z}_X + b|^2}, \quad (20)$$

oraz:

$$\operatorname{Im} \frac{w_1}{w_2} = \frac{-|\underline{Z}_X|^2 - b \operatorname{Re} \underline{Z}_X + b \operatorname{Im} \underline{Z}_X}{|j\underline{Z}_X + b|^2}, \quad (21)$$

a zatem, po porównaniu

$$b \operatorname{Re} \underline{Z}_X - b \operatorname{Im} \underline{Z}_X + b^2 = |\underline{Z}_X|^2 + b \operatorname{Re} \underline{Z}_X - b \operatorname{Im} \underline{Z}_X \quad (22)$$

otrzymuje się:

$$|\underline{Z}_X|^2 = b^2, \quad (23)$$

i ostatecznie równanie na wyznaczenie modułu impedancji ma postać:

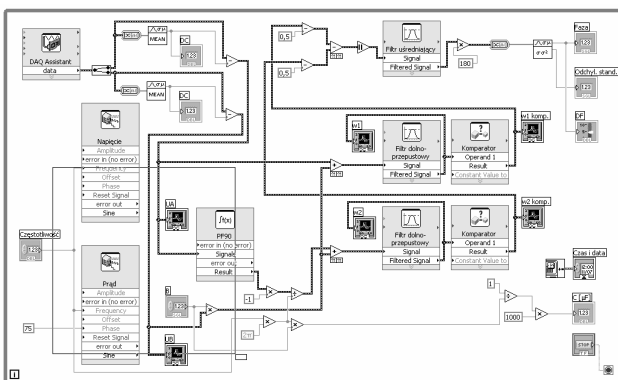
$$|\underline{Z}_X| = b. \quad (24)$$

Ponieważ układ wykorzystywany jest do pomiaru pojemności, równanie na wyznaczenie przybliżonej wartości pojemności będzie miało postać:

$$\hat{C} = \frac{1}{\omega |\underline{Z}_X|} = \frac{1}{\omega b} \quad (25)$$

#### 4. Wirtualna realizacja układu do pomiaru modułu impedancji

Przedstawiony powyżej układ pomiarowy został zrealizowany jako struktura wirtualna. Sygnały badanej pojemności: spadek napięcia oraz prąd przetworzony na napięcie dołączono do karty pomiarowej USB NI 6009. Dalsze przetwarzanie sygnałów wykonywane jest przez program zrealizowany w graficznym środowisku programowania LabVIEW. Strukturę programu stanowiącego przyrząd wirtualny przedstawia rys. 3.



Rys. 3. Struktura wirtualnego przyrządu do pomiaru pojemności zrealizowanego w środowisku LabVIEW

Fig. 3. The LabVIEW realization of the virtual capacitance meter

Podstawowe moduły opracowanego przyrządu wirtualnego przeznaczonego do pomiaru pojemności stanowią:

- wzmacniacz B o regulowanym wzmacnieniu sygnału  $U_B$  proporcjonalnego do prądu  $I_x$  płynącego przez badaną impedancję,
- przesuwnik fazowy PF realizujący przesunięcie przebiegu czasowego sygnału  $U_A = \underline{U}_x$  o kąt fazowy  $90^\circ$  (mnożenie przez jednostkę urojoną j),

- węzły sumacyjne generujące sygnały wyróżnione  $w_1$  i  $w_2$ ,
- detektor fazoczuły DF wskazujący przesunięcie fazowe między sygnałami wyróżnionymi  $w_1$  i  $w_2$ .

#### 5. Podsumowanie

Przedstawiony powyżej układ pomiarowy przeznaczony do pomiaru pojemności poprzez pomiar modułu impedancji został zrealizowany jako układ wirtualny z zastosowaniem karty pomiarowej NI 6009 oprogramowanej w środowisku LabVIEW. Taka realizacja pozwoliła na przeprowadzenie badań symulacyjnych oraz badań rzeczywistego obiektu typu RC, przy czym struktura programowego przetwarzania sygnałów pozostawała taka sama zarówno przy analizowaniu sygnałów pomiarowych generowanych programowo jak i podczas testów na obiekcie rzeczywistym zasilanym z generatora Agilent 33220A.

Obiekt badań – kondensator 100 nF połączony szeregowo z rezystorem 5 k $\Omega$  - zasilono ze wspomnianego generatora przebiegiem sinusoidalnym o częstotliwości 50 Hz i amplitudzie 5 V. Uzyskano wyniki potwierdzające przydatność zaprezentowanego układu do pomiaru pojemności. Maksymalny błąd dla rzeczywistego obiektu o tg $\delta$  równym 0,16 wyniósł 3,5 %. Błąd systematyczny spowodowany przybliżeniem części urojonej modułem impedancji powinien w takim przypadku być w granicach 1,2%, zatem w układzie istnieją inne źródła błędów nie wynikające bezpośrednio z założonego modelu. W dalszych badaniach prezentowanego układu pomiarowego należy skoncentrować się na szczegółowej analizie błędów i niepewności torów sygnałowych oraz określić ich wpływ na algorytm przetwarzania wykorzystany w prezentowanym przyrządzie wirtualnym. W świetle badań innych układów quasi-zrównoważonych można przypuszczać, że istotnym źródłem błędów okaże się także błąd detekcji fazoczułej. Należy zatem podjąć dalsze prace dotyczące analizy i poprawy procesu quasi-równoważenia układu oraz określenia wpływu kąta fazowego badanego obiektu na ten proces.

Wstępne badania przedstawionego układu wskazują na możliwość zastosowania wirtualnej realizacji koncepcji quasi-zrównoważonej metody pomiaru modułu impedancji: do pomiaru parametrów obiektów typu RC o małych kątach stratności oraz w aplikacjach, dla których nie jest wymagana duża dokładność pomiaru – np. w testowaniu stanu izolacji w paśmie częstotliwości podakustycznych, w którym występują problemy z zastosowaniem innych układów pomiarowych (np. takich jak klasyczne układy mostkowe).

#### 6. Literatura

- [1] Karandziejew K. B.: Pomiary elektryczne metodami mostkowymi i kompensacyjnymi. WNT, Warszawa 1969.
- [2] Cichy A., Szadkowski B.: Typowe rozwiązania quasi-zrównoważonych układów do pomiaru składowych immitancji. Zeszyty naukowe Politechniki Śląskiej, seria „Elektryka” nr, Gliwice 2000.
- [3] Szadkowski B.: Quasi-zrównoważone metody pomiaru immitancji. Rozprawy Elektrotechniczne 1985, 31, z. 2.
- [4] Szadkowski B.: Pomiar składowych immitancji metodą detekcji stanu  $\operatorname{Re}(w_1/w_2)=0$ . Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria „Elektryka” nr 108, Gliwice 1989.
- [5] Atmanand M. A., Jagadeesh Kumar V., Vempati G. K. Murti: A Microcontroller Based Quasi-Balanced Bridge for the Measurement of L, C and R. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 45, no. 3, June 1996.
- [6] Cichy A.: Quasi-zrównoważone układy do pomiaru składowych immitancji. Materiały XXX Międzuczelnianej Konferencji Metrologów MKM'98, Międzyzdroje 1998.
- [7] Cichy A.: Matematyczny model układów quasi-zrównoważonych. Materiały XII Sympozjum Modelowanie i Symulacja Systemów Pomiarowych „MiSSP 2002”, Krynica 2002.
- [8] Cichy A.: Zastosowanie programowego przetwarzania sygnałów w quasi-zrównoważonych układach do pomiaru składowych immitancji.” Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej „Elektryka”, z.195, Gliwice 2005.