

Adam CICHY, Artur SKÓRKOWSKI

POLITECHNIKA ŚLĄSKA, INSTYTUT METROLOGII, ELEKTRONIKI I AUTOMATYKI

## Wirtualny quasi-zrównoważony układ do pomiaru współczynnika strat dielektrycznych

Dr inż. Adam CICHY

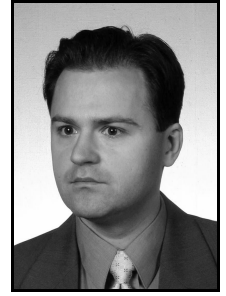
Adiunkt w Instytucie Metrologii, Elektroniki i Automatyki Wydziału Elektrycznego Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Autor i współautor ponad 20 publikacji z dziedziny metrologii elektrycznej. Członek PTETiS i IEEE. Główne zainteresowania naukowe: pomiary składowych impedancji, szczególnie w paśmie częstotliwości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



e-mail: artur.skorkowski@polsl.pl

### Streszczenie

Pomiary współczynnika strat dielektrycznych ( $\text{tg}\delta$ ) wykonuje się przede wszystkim w badaniach materiałowych oraz w celu diagnozowania stanu izolacji. Metody pomiaru współczynnika strat dielektrycznych charakteryzują się różnymi właściwościami, w pewnych przypadkach utrudniającymi lub uniemożliwiającymi pomiar. Pomiar  $\text{tg}\delta$  może być wykonywany bezpośrednio lub pośrednio – poprzez pomiar składowych impedancji lub admittancji. W pracy przedstawiona została wirtualna realizacja quasi-zrównoważonego układu do pomiaru współczynnika strat dielektrycznych wykorzystującego pomiar składowych impedancji. Układ zrealizowano z wykorzystaniem karty pomiarowej NI-6009 oprogramowanej w środowisku LabVIEW.

**Słowa kluczowe:** pomiar współczynnika strat dielektrycznych, układy quasi-zrównoważone.

### Virtual quasi-balanced circuit for the loss factor measurement

#### Abstract

Measurement of a dielectric loss factor is needed in material testing and in an insulation diagnostics. The methods of the loss factor measurement have different features, depending on an investigated object or frequency. In some cases the measurement is very tedious or impossible at all and then special measurement circuits (for example quasi-balanced circuits) should be used. The quasi-balanced circuits are AC circuits, which have been designated for impedance component measurements. 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 circuit. The circuit is driven to the quasi-balance status by controlling of one variable element. Then the value of the measured impedance component can be calculated according to the adjusted value of the variable element. The idea of the signal processing in the quasi-balanced circuit has been shown on Fig. 4. A virtual realization of the quasi-balanced circuit for loss factor measurements has been presented in this paper. The circuit has been built with the data acquisition card NI-6009, as a LabVIEW virtual instrument.

**Keywords:** loss factor measurement, quasi-balanced circuits.

## 1. Wstęp

Tangens kąta stratności (współczynnik strat dielektrycznych)  $\text{tg}\delta$  jest parametrem opisującym dwójnik o charakterze RC definiowanym jako relacja mocy czynnej  $P$  wydzielanej w dwójniku do mocy biernej  $Q$  tego dwójnika:

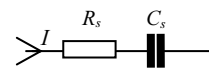
$$\text{tg}\delta = \frac{P}{Q}. \quad (1)$$

W zależności od wyboru modelu wspomnianego dwójnika można zależność powyższą zapisać odpowiednio:

- dla modelu szeregowego  $R_s C_s$  (rys. 1):

$$\text{tg}\delta = \frac{P}{Q} = \frac{I^2 R_s}{I^2 \frac{1}{\omega C_s}} = \omega R_s C_s; \quad (2)$$

gdzie:  $I$  – wartość skuteczna prądu dwójnika;

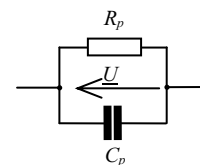


Rys. 1. Model szeregowy obiektu typu RC  
Fig. 1. A serial model of a RC type object

- dla modelu równoległego  $R_p C_p$  (rys. 2):

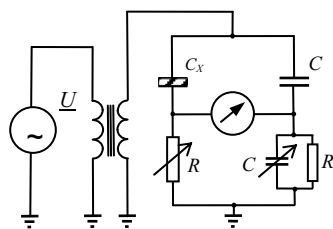
$$\text{tg}\delta = \frac{P}{Q} = \frac{U^2 / R_p}{U^2 / \frac{1}{\omega C_p}} = \frac{1}{\omega R_p C_p}; \quad (3)$$

gdzie:  $U$  – wartość skuteczna spadku napięcia na zaciskach dwójnika.



Rys. 2. Model równoległy obiektu typu RC  
Fig. 2. A parallel model of a RC type object

Pomiarów tangensa kąta stratności  $\text{tg}\delta$  dokonuje się najczęściej w badaniach materiałowych. Szczególne znaczenie posiadają badania omawianego parametru w ocenie jakości i stanu izolacji elektrycznej. Tangens kąta stratności może być mierzony metodami opartymi o definicję tego parametru (np. metodami kalorymetrycznymi, metodami wymagającymi pomiaru parametrów RC obiektu oraz metodami bezpośredniego pomiaru kąta fazowego) lub metodami dedykowanymi. Najczęściej w badaniach materiałów elektroizolacyjnych zastosowanie znajduje przedstawiony na rys. 3 mostek Scheringa [1].

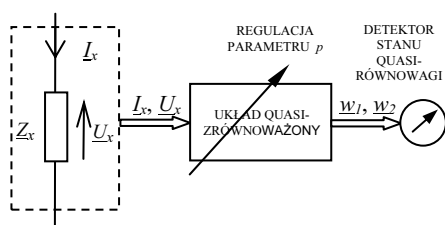


Rys. 3. Schemat ideowy mostka Scheringa  
Fig. 3. A block diagram of the Schering's bridge

W pomiarach tangensa kąta stratności pojawiają się problemy zależne przede wszystkim od częstotliwości, przy której wykonywane są pomiary oraz od właściwości samego obiektu pomiarowego. Zastosowanie niektórych metod (np. metody kalorymetrycznej) ogranicza się do laboratoryjnych badań materiałowych. Metody takie charakteryzują się dużą dokładnością, są jednak nieprzydatne w badaniach prowadzonych na obiektach przemysłowych takich jak linie kablowe, transformatory czy maszyny wirujące. Metody wykorzystujące pomiar składowych impedancji obiektu typu RC oraz bezpośredni pomiar kąta fazowego mogą być bezużyteczne w pewnych pasmach częstotliwości – np. pomiary metodami mostkowymi są praktycznie niemożliwe w paśmie częstotliwości VLF (częstotliwości  $10^{-5}$ ...10 Hz). Metody polegające na bezpośrednim pomiarze kąta fazowego są z kolei nieprzydatne w pomiarach przy wyższych częstotliwościach. Pomiar  $\text{tg}\delta$  o wartości 0,001 oznacza konieczność pomiaru kąta fazowego o wartości ok.  $0,06^\circ$ , co przy rozdzielczości na poziomie 1% może wymagać np. w metodzie pomiaru kąta przesunięcia fazowego z próbkowaniem synchronicznym pobrania 600000 próbek na okres. Częstotliwość próbkowania sygnału o częstotliwości 50 Hz musiałaby w takim wypadku wynosić 30 MHz. Z kolei w paśmie VLF czas pomiaru może być niedopuszczalnie długi.

## 2. Pomiar tangensa kąta stratności metodami quasi-zrównoważonymi

Metody quasi-zrównoważone są przemiennie prądowymi metodami pomiaru składowych impedancji i tangensa kąta stratności, w których układ pomiarowy sprowadzany jest do stanu wyróżnionego (najczęściej oznacza to sprowadzenie przesunięcia fazowego dwóch sygnałów wyróżnionych do z góry założonej wartości) poprzez zmianę wartości wyłącznie jednego parametru układu. [2, 3, 4, 5]. Układy realizujące quasi-zrównoważoną metodę pomiarową pozwalają co prawda na pomiar wyłącznie jednej składowej impedancji, ale po prostej zmianie konfiguracji układu można zmierzyć również drugą składową. W układach quasi-zrównoważonych nie występują problemy związane ze zbieżnością – są one stale maksymalnie zbieżne. Ideę pomiaru metodą quasi-zrównoważoną ilustruje rys. 4. Sygnały prądu  $I_x$  i napięcia  $U_x$  badanej impedancji są podawane na wejścia układu quasi-zrównoważonego. Poprzez regulację parametru  $p$  sprowadza się sygnały wyróżnione  $w_1$  i  $w_2$  do ustalonego stanu - założonego przesunięcia fazowego. Składowa mierzona jest wyznaczana jako funkcja parametru  $p$ .

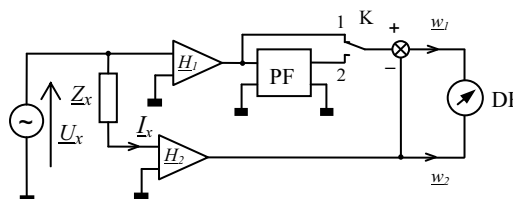


Rys. 4. Idea quasi-zrównoważonego pomiaru składowej impedancji  
Fig. 4. The idea of the quasi-balanced impedance components measurements

Współczesne układy pomiarowe budowane są coraz częściej jako struktury wirtualne. Sygnały pomiarowe w układach wirtual-

nych są przetwarzane na drodze programowej w wirtualnych blokach odpowiadających blokom schematu strukturalnego wirtualizowanego układu. Budowa wirtualnych układów pomiarowych jest znacznie ułatwiona w graficznych środowiskach takich jak np. LabVIEW czy DasyLab.

Tangens kąta stratności może być mierzony metodami quasi-zrównoważonymi pośrednio poprzez pomiar składowych  $R$  i  $C$ . Na rys. 5 przedstawiono schemat przełączalnego, quasi-zrównoważonego układu do pomiaru składowych rzeczywistej i urojonej impedancji  $Z_X$  [2]. Zmiana struktury układu realizowana jest poprzez zmianę położenia przełącznika K.



Rys. 5. Schemat blokowy quasi-zrównoważonego układu do pomiaru składowych impedancji  $Z_X$   
Fig. 5. A block diagram of the quasi-balanced circuit for the impedance components measurement

Poszczególne bloki i symbole na rys. 1 oznaczają:

$Z_X$  - badana impedancja;

$U_x, I_x$  - napięcie i prąd badanej impedancji  $Z_X$ ;

$w_1, w_2$  - wyróżnione sygnały wyjściowe poddawane detekcji;

$H_1$  - transmitancja przetwornika  $U_x/U$ ;

$H_2$  - transmitancja przetwornika  $I_x/U$ ;

K - przełącznik;

PF - przesuwnik fazowy o kąt  $90^\circ$ ;

DF - detektor fazoczuły wykrywający stan  $\arg w_1/w_2 = \pi/2$

Gdy przełącznik K jest w położeniu 1 - równania sygnałów  $w_1$  i  $w_2$  przyjmują postać:

$$\begin{cases} w_1 = H_1 U_x - H_2 I_x \\ w_2 = H_2 I_x \end{cases} \quad (4)$$

natomiast gdy przełącznik K jest w położeniu 2 odpowiednie równania przyjmują postać:

$$\begin{cases} w_1 = jH_1 U_x - H_2 I_x \\ w_2 = H_2 I_x \end{cases} \quad (5)$$

W stanie quasi-równowagi zachodzi związek

$$\arg w_1/w_2 = \pi/2 \quad (6)$$

wykrywany przez detektor stanu quasi-równowagi. Zależność (6) jest spełniona wtedy, gdy

$$\text{Re}\{w_1/w_2\} = 0 \quad (7)$$

Dla stanów quasi-równowagi osiągniętych w poszczególnych położeniach przełącznika K można zapisać:

- dla przełącznika K w położeniu 1:

$$\text{Re}\left\{\frac{w_1}{w_2}\right\} = \text{Re}\left\{\frac{H_1}{H_2} Z_X - 1\right\} = 0; \quad (8)$$

- natomiast dla przełącznika K w położeniu 2:

$$\text{Re}\left\{\frac{w_1}{w_2}\right\} = \text{Re}\left\{j\frac{H_1}{H_2} Z_X - 1\right\} = 0 \quad (9)$$

Jeżeli transmitancje  $H_1$  i  $H_2$  są liczbami rzeczywistymi, z równań (8) i (9) otrzymujemy zależności umożliwiające wyznaczenie składowych mierzonej impedancji:

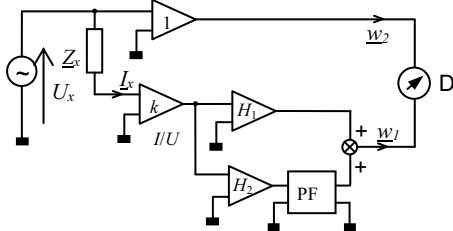
- dla przełącznika K w położeniu 1:

$$\operatorname{Re}\{Z_X\} = \frac{H_2}{H_1}; \quad (10)$$

- oraz dla przełącznika K w położeniu 2:

$$\operatorname{Im}\{Z_X\} = \mp \frac{H_2}{H_1}. \quad (11)$$

Na rys. 6 przedstawiono kolejny schemat blokowy aktywnego układu quasi-zrównoważonego, przeznaczonego do pomiaru współczynnika strat dielektrycznych  $\operatorname{tg} \delta$ .



Rys. 6. Schemat blokowy układu quasi-zrównoważonego do pomiaru współczynnika strat dielektrycznych  $\operatorname{tg} \delta$

Fig. 6. A block diagram of the quasi-balanced circuit for the loss factor measurement

W układzie przedstawionym na rys. 6 zastosowano ponownie detektor DF wykrywający stan quasi-równowagi  $\arg w_1/w_2 = \pi/2$ , czyli  $\operatorname{Re}(w_1/w_2) = 0$ . Transmitancje  $H_1$  i  $H_2$  są liczbami rzeczywistymi (wzmocnieniami wzmacniaczy).

W powyższym układzie sygnały podlegające detekcji  $w_1$  i  $w_2$  opisane są zależnościami:

$$\begin{cases} w_1 = k(H_1 I_X + jH_2 I_X) \\ w_2 = U_X \end{cases} \quad (12)$$

gdzie  $k$  – stała konwertera I/U w torze prądowym  $I_X$ .

Po sprowadzeniu układu z rys. 5 do stanu quasi-równowagi określonego relacją (7) otrzymujemy następujące równanie na wyznaczenie współczynnika strat dielektrycznych:

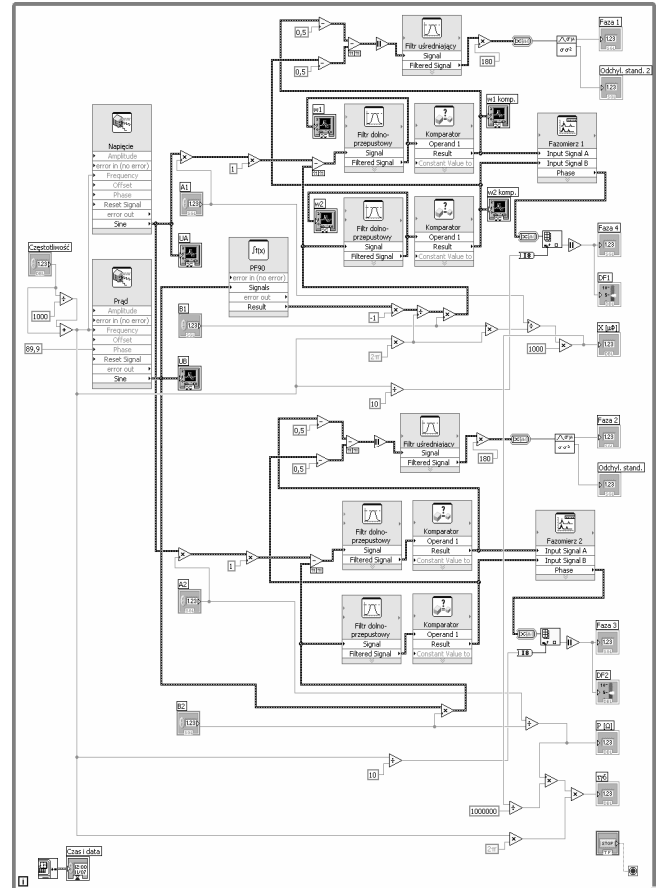
$$\operatorname{tg} \delta_X = \frac{H_2}{H_1}. \quad (13)$$

W przedstawionych powyżej układach pomiarowych na sygnałach pomiarowych realizowane są operacje wzmacniania, sumowania, przesuwania o kąt fazowy  $\pi/2$  oraz detekcji fazowej. Wspomniane operacje są łatwo realizowalne w sposób programowy na cyfrowych reprezentacjach sygnałów [7]. Operacja wzmacniania realizowana jest wówczas jako mnożenie próbki przez stałą, przesunięcie fazowe jako zmianę indeksu próbki w tablicy, natomiast detekcja fazoczuła może być zrealizowana w sposób algorytmiczny. Budowa algorytmu przetwarzania może być szczególnie łatwo zrealizowana z zastosowaniem oprogramowania graficznego.

### 3. Wirtualna realizacja układu do pomiaru współczynnika strat dielektrycznych

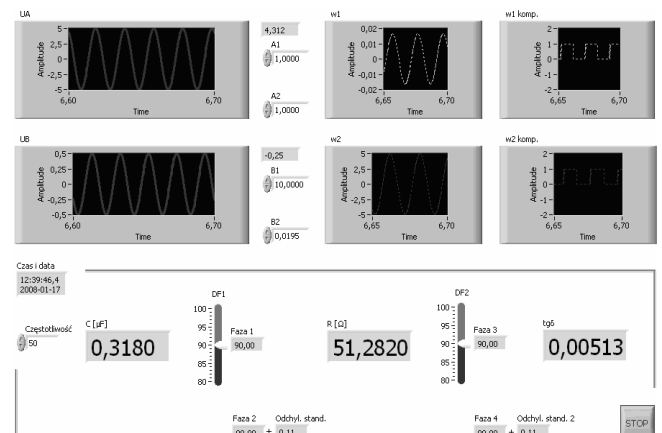
Do realizacji wirtualnej wybrano układ przedstawiony na rys. 5. W przeciwieństwie do układu z rys. 6 wspomniany układ umożli-

wia wyznaczenie współczynnika strat dielektrycznych na podstawie pomiaru składowych impedancji. Można zatem oprócz współczynnika strat wyznaczyć pojemność i rezystancję badanego obiektu. Sygnały pomiarowe badanego obiektu typu RC: spadek napięcia oraz prąd przetworzony na napięcie dołączono do wejść analogowych karty pomiarowej NI-6009. Dalsze przetwarzanie sygnałów pomiarowych dokonywane jest programowo. Strukturę programu - przyrządu wirtualnego zrealizowanego w graficznym środowisku programowania LabVIEW przedstawiono na rys. 7 natomiast panel przyrządu ukazujący wyniki przykładowych pomiarów przedstawiono na rys. 8.



Rys. 7. Struktura wirtualnego przyrządu do pomiaru współczynnika strat dielektrycznych  $\operatorname{tg} \delta$  zrealizowanego w środowisku LabVIEW

Fig. 7. The LabVIEW realization of the virtual loss factor meter



Rys. 8. Panel wirtualnego przyrządu do pomiaru współczynnika strat dielektrycznych  $\operatorname{tg} \delta$  zrealizowanego w środowisku LabVIEW

Fig. 8. Panel of the LabVIEW realization of the virtual loss factor meter

#### 4. Podsumowanie

Przedstawiony powyżej układ pomiarowy jest przeznaczony do pomiaru współczynnika strat dielektrycznych poprzez pomiar składowych impedancji i został zrealizowany jako układ wirtualny z zastosowaniem karty pomiarowej NI-6009. Oprogramowanie karty opracowano w środowisku LabVIEW.

Działanie układu zweryfikowano dokonując pomiaru obiektu typu RC zasilanego z generatora Agilent 33220A przebiegiem sinusoidalnym o częstotliwości 50 Hz i amplitudzie 5 V. Obiekt RC modeluje typową linię kablową, dla której realizowany jest pomiar współczynnika strat dielektrycznych w celu zdiagnozowania stanu izolacji. Wstępne wyniki pomiarów potwierdzają przydatność zaprezentowanego układu do pomiaru współczynnika strat dielektrycznych  $\text{tg}\delta$ . Maksymalny błąd dla rzeczywistego obiektu o  $\text{tg}\delta$  równym około 0,005 wyniósł około 3 %.

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-zrównoważenia układu oraz określenia wpływu kąta fazowego badanego obiektu na ten proces.

Wstępne badania przedstawionego układu wskazują na możliwości zastosowania wirtualnej realizacji koncepcji quasi-zrównoważonej metody pomiaru składowych 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).

#### 5. 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  $\text{Re}(w_1/w_2)=0$ . 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 Międzyuczelnianej Konferencji Metrologów MKM'98, Międzyzdroje 1998.
- [7] Cichy A.: Zastosowanie programowego przetwarzania sygnałów w quasi-zrównoważonych układach do pomiaru składowych immitancji.” Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej „Elektryka”, z.195, Gliwice 2005.

*Artykuł recenzowany*

#### INFORMACJE

## WYDAWNICTWO POMIARY AUTOMATYKA KONTROLA



specjalizuje się w wydawaniu czasopisma i książek popularno-naukowych w dziedzinie automatyki i pomiarów

Osoby i firmy przemysłowe zainteresowane współpracą z Wydawnictwem proszone są o kontakt bezpośredni dla uściślenia szczegółów współpracy

Wydawnictwo PAK  
00-050 Warszawa  
ul. Świętokrzyska 14A  
tel./fax 022 827 25 40

Redakcja PAK  
44-100 Gliwice  
ul. Akademicka 10, p. 30b  
tel./fax 032 237 19 45  
e-mail: wydawnictwo@pak.info.pl

www.pak.info.pl