

Adam CICHY
Brunon SZADKOWSKI

TYPOWE ROZWIĄZANIA QUASI-ZRÓWNOWAŻONYCH UKŁADÓW DO POMIARU SKŁADOWYCH IMMITANCJI

Streszczenie. W artykule zestawiono znane z literatury układy quasi-zrównoważone przeznaczone do pomiaru składowych immitancji. Przedstawiono przykłady mostków quasi-zrównoważonych oraz aktywnych układów quasi-zrównoważonych. Zaprezentowano odpowiedni model matematyczny układów aktywnych. Podsumowano właściwości omówionych układów.

TYPICAL REALIZATIONS OF QUASI-BALANCED CIRCUITS FOR IMMITANCE COMPONENTS MEASUREMENT

Summary. A review of quasi-balanced circuits for immitance components measurement has been presented in this paper. Some examples of quasi-balanced bridges and active quasi-balanced circuits have been presented. A mathematical model of quasi-balanced circuit has been presented. The properties of the presented circuits have been compiled as well.

1. WPROWADZENIE

W literaturze można znaleźć opisy różnych układów przeznaczonych do pomiaru składowych immitancji. Powszechnie znane są zmiennoprądowe układy realizujące metody wychyleniowe oraz metody zerowe, przeznaczone do pomiaru składowych biernych, czynnych, modułów, kątów fazowych oraz współczynników dyssypacji impedancji i admitancji o charakterze RL i RC. Poniżej przedstawiono przegląd układów pomiarowych realizujących szczególną metodę pomiarową – metodę quasi-zerową, stosunkowo rzadko opisywaną w literaturze. Układy quasi-zrównoważone umożliwiają pomiar tylko jednej składowej badanej immitancji, co często w praktyce jest wystarczające. Wspomniane układy zachowują pewne cechy zrównoważonych układów pomiarowych, a mianowicie w obu metodach istnieje wyróżniony stan,

do którego należy sprowadzić układ poprzez zmianę nastaw odpowiednich elementów regulacyjnych.

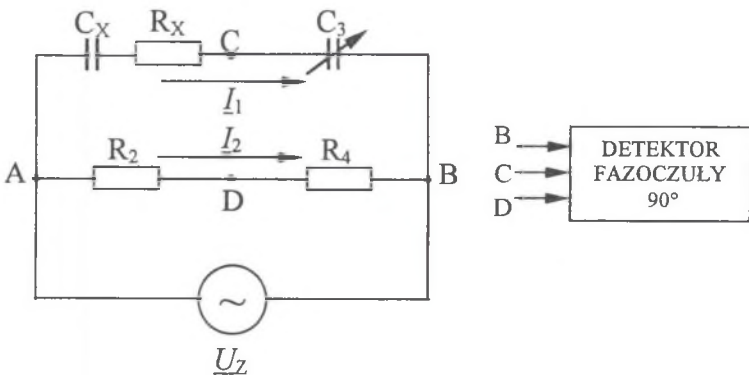
Pierwszymi układami quasi-zrównoważonymi były układy mostkowe [1,4] (opisane w dalszym ciągu w p. 2), zbudowane z elementów pasywnych. W późniejszych latach autorzy opracowali tzw. aktywne układy quasi-zrównoważone [2,3,5] (opisane w dalszym ciągu w p.3), które nie są układami mostkowymi. Przedstawione, typowe rozwiązania omawianych układów pozwolą na pewne zorientowanie się w ich właściwościach. Należy jednak zwrócić uwagę, że dla dokonania pełniejszych analiz właściwości metrologicznych przedstawionych układów – przydatne byłoby wykorzystanie uogólnionych modeli (strukturalnych, matematycznych) tych układów.

W odniesieniu do quasi-zrównoważonych układów mostkowych można wykorzystać znany w literaturze [1] ogólny model mostka niezrównoważonego, natomiast w odniesieniu do niemostkowych, aktywnych układów quasi-zrównoważonych – odpowiedni, ogólny model wymaga opracowania. W dalszym ciągu autorzy przedstawiają propozycję ogólnego modelu strukturalnego i matematycznego, opisującego działanie aktywnych układów quasi-zrównoważonych.

2. MOSTKOWE UKŁADY QUASI-ZRÓWNOWAŻONE

Mostki quasi-zrównoważone znane są dość dawno [1], niemniej nadal są stosowane i doskonalone [4].

Na rys.1 przedstawiono przykładowo schemat układu mostka quasi-zrównoważonego przeznaczonego do pomiaru pojemności C_X obiektu o charakterze RC.



Rys.1. Schemat mostka quasi-zrównoważonego do pomiaru pojemności C_X
 Fig.1. Diagram of the quasi-balanced bridge for C_X capacity measurement

Poszczególne symbole na rys. 1 oznaczają:

R_X, C_X - rezystancja i pojemność tworzące badaną impedancję $Z_X = R_X + \frac{1}{j\omega C_X}$;

C_3 - wzorcowy kondensator nastawny;

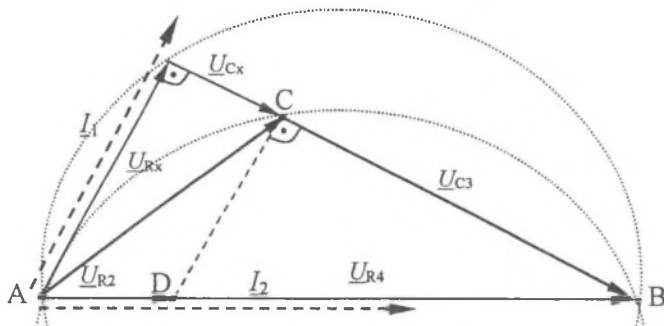
\underline{U}_Z - napięcie zasilające;

R_2, R_4 - rezystory wzorcowe;

I_1, I_2 - prądy w gałęziach mostka.

Detektor fazoczuły, przyłączony do węzłów B, C, D mostka służy do detekcji stanu quasi-równowagi (kąąt przesunięcia fazowego pomiędzy napięciami \underline{U}_{CD} i \underline{U}_{CB} równy 90°) uzyskiwanego w wyniku zmian pojemności nastawnego kondensatora wzorcowego C_3 . Po osiągnięciu stanu quasi-równowagi – odpowiedni wykres wskazowy rozważanego mostka przyjmuje postać jak na rys.2. Zakładamy, że detektor praktycznie nie pobiera mocy z obwodu kontrolowanego.

W omawianym układzie elementem regulacyjnym może być zarówno kondensator wzorcowy C_3 , jak i odpowiednio rezystory R_2 lub R_4 .



Rys.2. Wykres wskazowy mostka quasi-zrównoważonego z rys. 1
 Fig. 2. Phasor diagram of the quasi-balanced bridge from the Fig. 1

Korzystając z przedstawionego na rys.1 wykresu wskazowego można zauważyć, że stosunki odpowiednich napięć układu spełniają proporcję

$$\frac{U_{CX}}{U_{C3}} = \frac{U_{R2}}{U_{R4}} \quad (1)$$

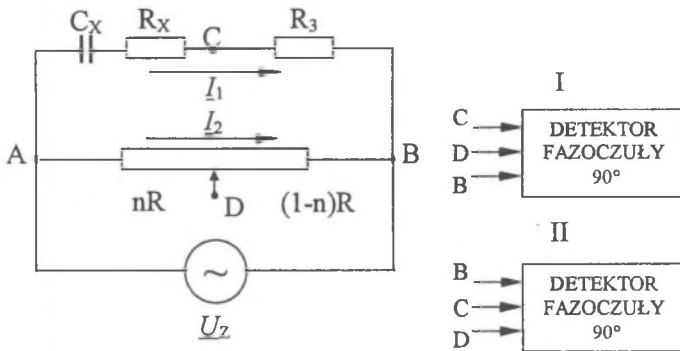
Napięcia występujące w równaniu (1) są iloczynami odpowiednich prądów i impedancji, zatem równanie powyższe po uproszczeniu można zapisać następująco

$$X_X = X_3 \frac{R_4}{R_2} \quad (2)$$

skąd można wyznaczyć mierzoną pojemność C_X według zależności

$$C_X = C_3 \frac{R_2}{R_4} \quad (3)$$

Innym przykładem mostka quasi-zrównoważonego, przeznaczonego do pomiaru współczynnika strat dielektrycznych ($\text{tg}\delta$), jest układ przedstawiony na rys.3.



Rys. 3. Schemat mostka quasi-zrównoważonego do pomiaru współczynnika $\text{tg}\delta$
Fig.3. Diagram of the quasi-balanced bridge for tangent δ measurement

Poszczególne bloki i symbole na rys.3 oznaczają:

R_X, C_X - rezystancja i pojemność tworzące badaną impedancję $\underline{Z}_X = R_X + \frac{1}{j\omega C_X}$;

R_3 - wzorcowy rezystor (nastawny);

\underline{U}_Z - napięcie zasilające;

R - rezystancja potencjometru;

n - nastawa potencjometru;

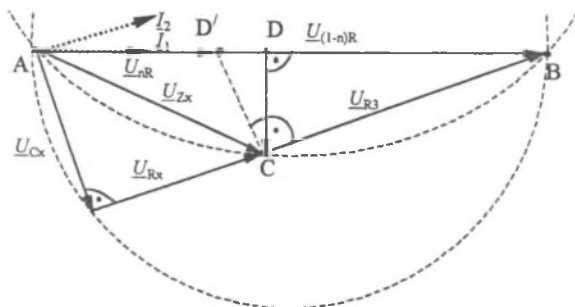
I_1, I_2 - prądy w gałęziach mostka.

Odpowiedni wykres wskazowy mostka (w stanie quasi-równowagi) przedstawiono na rys.4. W omawianym układzie „quasi-równoważenie” przeprowadza się w dwóch etapach. W pierwszym etapie suwak potencjometru R znajduje się w pozycji środkowej, a do stanu quasi-równowagi doprowadza się za pomocą nastawnego rezystora wzorcowego R_3 (wybrany stan quasi-równowagi jest wzajemna ortogonalność napięć \underline{U}_{AD} oraz \underline{U}_{DC}). Korzystając z wykresu wskazowego na rys.4 można napisać

$$I_1 Z_X = I_1 R_3, \quad (4)$$

skąd wynika zależność

$$Z_x = R_3. \quad (5)$$



Rys. 4. Wykres wskazowy mostka quasi-zrównoważonego z rys.3
 Fig. 4. Phasor diagram of the quasi-balanced bridge from the Fig.3

W drugim etapie układ pomiarowy doprowadza się do stanu quasi-równowagi zmieniając nastawę potencjometru R . Stanem wyróżnionym jest w tym przypadku wzajemna ortogonalność napięć $\underline{U}_{D'C}$ oraz \underline{U}_{CB} . Z wykresu na rys.4 wynika wówczas następująca proporcja

$$\frac{I_1 R_x}{I_1 R_3} = \frac{I_2 \cdot R \cdot n}{I_2 \cdot R \cdot (1-n)} \quad (6)$$

Wykorzystując otrzymaną w pierwszym kroku zależność

$$R_3 = Z_x = \sqrt{R_x^2 + X_x^2} \quad (7)$$

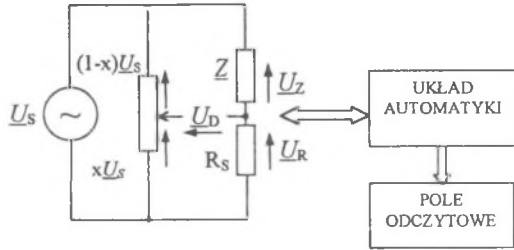
można równanie (6) przekształcić do postaci

$$\frac{R_x}{\sqrt{R_x^2 + X_x^2}} = \frac{n}{(1-n)}. \quad (8)$$

Po podstawieniu do równania (8) definicyjnej zależności $\operatorname{tg} \delta = \frac{R_x}{X_x}$ i przekształceniach otrzymujemy relację umożliwiającą obliczenie interesującego nas współczynnika strat dielektrycznych

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{n}{\sqrt{1-2n}}. \quad (9)$$

Według podobnej idei zrealizowany został przedstawiony na rys.5 automatyczny mostek do pomiaru składowych impedancji (współczynnika strat dielektrycznych kondensatorów $\text{tg } \delta$ i dobroci cewek Q) [4].



Rys.5. Schemat zautomatyzowanego mostka quasi-zrównoważonego do pomiaru składowych impedancji

Fig.5. Diagram of the automatic quasi-balanced bridge for impedance components measurement

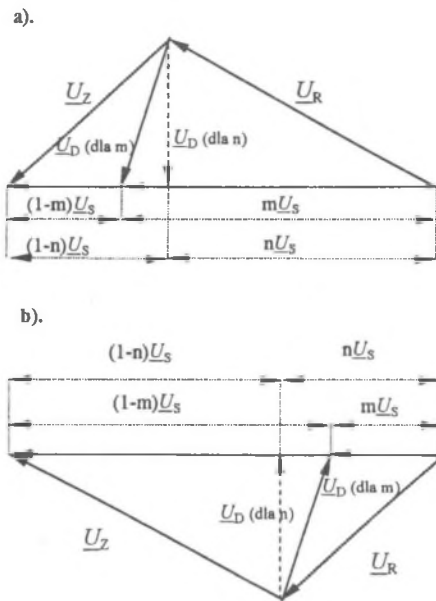
W układzie z rys.5 mierzone parametry $\text{tg } \delta$ i Q wyznacza się również w wyniku dwóch kolejnych procesów quasi-równoważenia układu. Na rys.6 przedstawiono odpowiednie wykresy wskazowe napięć mostka z rys.5 (w stanach quasi-równowagi), dla różnych rodzajów badanych obiektów.

Korzystając z wykresów wskazowych (rys.6) omawianego układu można wyznaczyć odpowiednie składowe immitancji typu RL ze wzorów [4]:

$$\begin{cases} \omega L = R_s \frac{\sqrt{m-n}}{m\sqrt{n}} \\ R_L = R_s \frac{1-m}{m} \\ Q = \sqrt{\frac{(m-n)}{n}} \frac{1}{(1-m)} \end{cases} \quad (10)$$

oraz typu RC – ze wzorów:

$$\begin{cases} \omega C_p = \frac{1}{R_s} \sqrt{\frac{(n-m)}{(1-n)}} \frac{1}{(1-m)} \\ G_p = \frac{1}{R_s} \frac{m}{(1-m)} \\ \text{tg } \delta = m \sqrt{\frac{(1-n)}{(n-m)}} \end{cases} \quad (11)$$



Rys.6. Wykresy wskazowe mostka quasi-zrównoważonego z rys.5.

- a) pomiar impedancji typu RC;
- b) pomiar impedancji typu RL

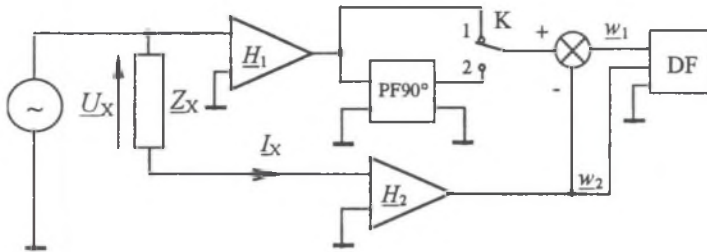
Fig.6. Phasor diagram of the quasi-balanced bridge from the Fig.5

- a) the RC impedance measurement;
- b) the RL impedance measurement

3. AKTYWNE UKŁADY QUASI-ZRÓWNOWAŻONE

W pracach [2] i [3] przedstawiono koncepcje aktywnych układów quasi-zrównoważonych oraz ogólne podstawy teoretyczne całej klasy tego typu układów, jednak ich właściwości nie zostały jeszcze w pełni zbadane. Potwierdzenie przydatności aktywnych układów quasi-zrównoważonych do pomiarów immitancji wymaga jeszcze szczegółowych badań i przeprowadzenia odpowiednich weryfikacji doświadczalnych.

Na rys.7 przedstawiono zmodyfikowany w stosunku do [3] schemat quasi-zrównoważonego układu do pomiaru składowych impedancji Z_X . Modyfikacja układu polega na wyprowadzeniu sygnału \underline{u}_2 z wyjścia przetwornika \underline{H}_2 oraz na zastosowaniu jednego przetwornika \underline{H}_1 z przełączanym wyjściem; uzyskane sygnały \underline{u}_1 i \underline{u}_2 są sygnałami napięciowymi [5].



Rys.7. Schemat blokowy quasi-zrównoważonego układu do pomiaru składowych impedancji
Fig. 7. Diagram of the quasi-balanced circuit for impedance components measurement

Poszczególne bloki i symbole na rys. 7 oznaczają:

Z_X - badana impedancja;

U_X, I_X - napięcie i prąd badanej impedancji Z_X

w_1, w_2 - sygnały wyjściowe (podlegające detekcji);

H_1 - przetwornik U_X/U o transmitancji H_1 ;

H_2 - przetwornik I_X/U o transmitancji H_2 ;

K - przełącznik (klucz);

PF90° - przesuwnik fazy 90°;

DF - detektor fazoczuły (wykrywający stan $\text{Re } w_1/w_2 = 0$ równoważny stanowi $\text{arg } w_1/w_2 = \pi/2$).

Równania sygnałów w_1 i w_2 dla klucza K w położeniu 1 mają postać

$$\begin{cases} w_1 = H_1 U_X - H_2 I_X \\ w_2 = H_2 I_X \end{cases} \quad (12)$$

natomiast dla klucza K w położeniu 2 – przyjmują postać

$$\begin{cases} w_1 = jH_1 U_X - H_2 U_X \\ w_2 = H_2 U_X \end{cases} \quad (13)$$

Równanie quasi-równowagi, dla klucza K w położeniu 1, określa zależność

$$\text{Re} \left\{ \frac{w_1}{w_2} \right\} = \text{Re} \left\{ \frac{H_1 U_X - H_2 I_X}{H_2 I_X} \right\} = \text{Re} \left\{ \frac{H_1}{H_2} Z_X - 1 \right\} = 0 \quad (14)$$

natomiast dla klucza K w położeniu 2 - zależność

$$\operatorname{Re}\left\{\frac{w_1}{w_2}\right\} = \operatorname{Re}\left\{\frac{jH_1 U_X - H_2 I_X}{H_2 I_X}\right\} = \operatorname{Re}\left\{j\frac{H_1}{H_2} Z_X - 1\right\} = 0. \quad (15)$$

Z równań 14 i 15 otrzymujemy odpowiednie zależności pozwalające wyznaczyć składowe mierzonej impedancji:

- klucz K w poz. 1:

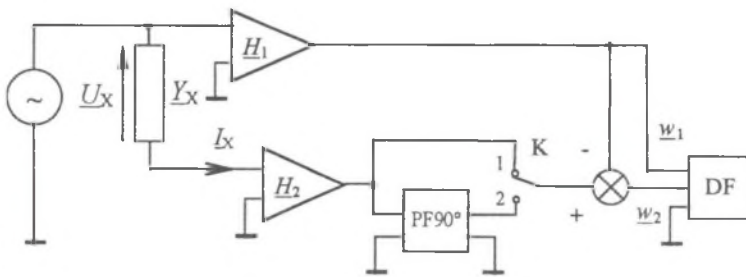
$$\operatorname{Re}\{Z_X\} = \frac{H_2}{H_1}, \quad (16)$$

- klucz K w poz. 2:

$$\operatorname{Im}\{Z_X\} = \mp \frac{H_2}{H_1}. \quad (17)$$

przy czym należy zaznaczyć, że transmitancje H_1 i H_2 są liczbami rzeczywistymi (są to wzmocnienia odpowiednich wzmacniaczy wykorzystanych do budowy przetworników).

Na rys.8 przedstawiono quasi-zrównoważony układ do pomiaru składowych admittancji Y_X .



Rys.8. Schemat blokowy quasi-zrównoważonego układu do pomiaru składowych admittancji
Fig.8. Diagram of the quasi-balanced circuit for admittance components measurement

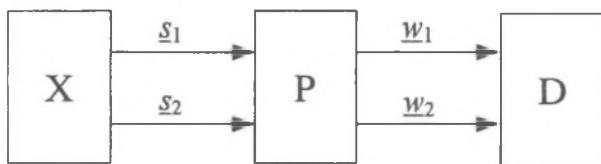
W podobny sposób jak dla poprzedniego układu możemy dla układu z rys.8 wyprowadzić równania pozwalające na wyznaczenie składowych badanej admittancji Y_X . Dla klucza K w położeniu 1 - otrzymujemy

$$\operatorname{Re}\{Y_X\} = \frac{H_2}{H_1} \quad (18)$$

natomiast dla klucza K w położeniu 2:

$$\operatorname{Im}\{\underline{Y}_X\} = \mp \frac{H_2}{H_1} \quad (19)$$

Na rys.9 przedstawiono ogólny schemat blokowy, według którego można opisać działanie aktywnych układów quasi-zrównoważonych, których schematy szczegółowe przedstawiono na rys.7 i 8.



Rys.9. Ogólny schemat blokowy quasi-zrównoważonego układu do pomiaru składowych immitancji

Fig.9. A general diagram of the quasi-balanced circuit for immitance components measurement

Poszczególne symbole na rys.9 oznaczają:

- X - blok, w którym wytwarzane są sygnały pomiarowe s_1 i s_2 (zawierający mierzoną immitancję X oraz obwody zasilające);
- s_1 i s_2 - sygnały reprezentujące zamiennie prąd i napięcie badanej immitancji;
- P - blok przetwarzania sygnałów s_1 i s_2 na sygnały wyjściowe w_1 i w_2 ;
- D - detektor fazoczuły;

Badana immitancja X jest zdefiniowana równaniem:

$$\underline{X} = \frac{s_1}{s_2} \quad (20)$$

Najczęściej stosowanym sposobem detekcji fazoczułej jest detekcja kąta przesunięcia fazowego 90° - odpowiadająca detekcji stanu $\operatorname{Re}(w_1/w_2)=0$, (gdzie w_1 i w_2 są sygnałami wejściowymi detektora fazoczułego). Jeżeli transmitancja przetwornika P dobrana zostanie w ten sposób, aby jego równanie przetwarzania miało postać:

$$\frac{w_1}{w_2} = a\underline{X} - b \quad (21)$$

lub

$$\frac{w_1}{w_2} = ja\underline{X} - b \quad (22)$$

gdzie a i b – nastawne parametry przetwornika P (liczby rzeczywiste),
to w stanie quasi-równowagi równania (21) i (22) sprowadzają się do postaci:

$$a \operatorname{Re}\{\underline{X}\} - b_1 = 0 \quad (23)$$

lub

$$\mp a \operatorname{Im}\{\underline{X}\} - b_2 = 0 \quad (24)$$

gdzie $b_{1,2}$ – wartości nastawione dla osiągnięcia stanów $\operatorname{Re}\{\underline{w}_1/\underline{w}_2\}=0$ w kolejnych przypadkach określonych w równaniach (21) i (22), regulacja $\alpha_{1,2}$ nie jest wymagana.

Z równań (23) i (24) możemy wyznaczyć składowe mierzonej immitancji \underline{X} :

$$\operatorname{Re}\{\underline{X}\} = \frac{b_1}{a} \quad (25)$$

lub

$$\operatorname{Im}\{\underline{X}\} = \mp \frac{b_2}{a} \quad (26)$$

Ogólny schemat blokowy układu quasi-zrównoważonego przedstawiony na rys.9 jest również prawdziwy w odniesieniu do poprzednio omówionych, mostkowych układów quasi-zrównoważonych. Rozważmy na przykład układ mostka quasi-zrównoważonego z rys.1. Wybrany stan quasi-równowagi w tym mostku jest stan opisany równaniem

$$\angle(\underline{U}_{CD}, \underline{U}_{CB}) = 90^\circ \equiv \operatorname{Re}\left\{\frac{\underline{U}_{CD}}{\underline{U}_{CB}}\right\} = 0. \quad (27)$$

Sygnałami wyróżnionymi \underline{w}_1 i \underline{w}_2 są odpowiednie napięcia \underline{U}_{CD} oraz \underline{U}_{CB} opisane następującymi zależnościami

$$\begin{cases} \underline{w}_1 = \underline{U}_{CD} = \left(\underline{U}_x + \frac{1}{j\omega C_3} \underline{I}_x \right) \frac{R_4}{R_2 + R_4} - \frac{1}{j\omega C_3} \underline{I}_x = \frac{R_4}{R_2 + R_4} \underline{U}_x - \frac{1}{j\omega C_3} \frac{R_2}{R_2 + R_4} \underline{I}_x \\ \underline{w}_2 = \underline{U}_{CB} = \frac{1}{j\omega C_3} \underline{I}_x \end{cases} \quad (28)$$

Równanie quasi-równowagi (por. równ. (27))

$$\operatorname{Re}\left\{\frac{\underline{w}_1}{\underline{w}_2}\right\} = \operatorname{Re}\left\{\frac{\frac{R_4}{R_2 + R_4} \underline{U}_x - \frac{1}{j\omega C_3} \frac{R_2}{R_2 + R_4} \underline{I}_x}{\frac{1}{j\omega C_3} \underline{I}_x}\right\} = \mp \frac{\omega C_3 R_4}{R_2 + R_4} \operatorname{Im}\{\underline{Z}_x\} - \frac{R_2}{R_2 + R_4} = 0 \quad (29)$$

Rozwiązując równanie (29) ze względu na pojemność C_x otrzymujemy zależność identyczną do równania (3)

$$\mp \frac{\omega R_4}{R_2 + R_4} \frac{1}{\omega C_x} = \frac{R_2}{R_2 + R_4} \Rightarrow C_x = C_x \frac{R_2}{R_4} \quad (30)$$

Zauważmy, że przetwornik P (por. rys.9) będzie miał dla rozważanego układu strukturę opisaną równaniem identycznym z równaniem (22)

$$\frac{w_1}{w_2} = jaX - b \quad (31)$$

Podobną analizę można przeprowadzić dla innych nieaktywnych układów quasi-zrównoważonych.

4. PODSUMOWANIE

Przedstawione w p. 2 i 3 układy quasi-zrównoważone są wyłącznie układami prądu przeniennego. Wszystkie opisane układy cechują się prostym i szybkim procesem pomiarowym (procesem quasi-równoważenia), wymagającym użycia tylko jednego elementu regulacyjnego. Oznacza to, że zbieżność omawianych układów jest stale maksymalna (w przeciwieństwie do układów zrównoważonych), co znacznie ułatwia automatyzację układów quasi-zrównoważonych.

Układy quasi-zrównoważone umożliwiają wprawdzie pomiar tylko jednej ze składowych badanej immitancji, jednak prosta zmiana konfiguracji układu umożliwia pomiar pozostałych składowych. W praktyce często wystarcza pomiar jednej składowej, np. pomiar $\text{tg}\delta$ w diagnostyce izolacji.

Mostkowe układy quasi-zrównoważone są znacznie szerzej opisane w literaturze niż aktywne układy quasi-zrównoważone. Te ostatnie stanowią nową i mało zbadaną klasę układów pomiarowych. Zaproponowany w p.3 model matematyczny może być podstawą do dalszej analizy właściwości metrologicznych całej klasy układów quasi-zrównoważonych.

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 $\operatorname{Re} w_1/w_2=0$. ZN Pol. Śl., ser. „Elektryka” z. 108, Gliwice 1989.
4. 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.
5. Cichy A.: Quasi-zrównoważone układy do pomiaru składowych immitancji. Materiały XXX Międzuczelnianej Konferencji Metrologów MKM'98, Międzyzdroje 1998.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Zygmunt KUŚMIEREK

Wpłynęło do Redakcji dnia 10 marca 2000 r.

Abstract

A review of quasi-balanced circuits for measurement of immitance components has been presented in this paper. Some examples of quasi-balanced bridges and active quasi-balanced circuits have been given, as well as a mathematical model of the quasi-balanced circuit has been presented. The properties of the presented circuits have been compiled, too.

One can find in bibliography many methods for measurements of immitance components. Particularly, the balanced or non-zero methods for measurements of active or passive components and dissipation coefficients of the impedance and admittance of RL and RC objects have been described. There is also mentioned the other method, namely the quasi-balanced method. It has one feature similar to the balanced method. In both of them one can distinguish the specific state of the circuit to which it should be brought by means of regulation elements.

Only a few quasi-balanced methods have been described so far. The quasi-balanced bridge is shown in Fig.1. Its phasor diagram is presented in Fig.2 [1]. The equation (3) describes the measured capacity C_X . The other quasi-balanced bridge is shown in Fig.3. with its phasor diagram in Fig.4. The equation (9) describes the measured tangent δ . The automatic quasi-balanced bridges are presented in Figs. 5 and 6 [4], and described by the equations (10) and (11). Figs.7 and 8 show the active quasi-balanced circuits for immitance component measurement [5]. The equations (16), (17), (18) and (19) describe these structures. A mathematical model of the quasi-balanced circuit is presented in Fig.9 for which the equations (25) and (26) have been derived.

The quasi-balanced measuring circuits presented in Chapters 2 and 3 are ac circuits. Their measuring procedure is simple and fast. Moreover, it is easy to be automatized.

The quasi-balanced measuring circuits are able to measure one impedance component only, however it is possible to measure the other impedance component after simple reconfiguration of these circuits. It can be useful for example for dissipation coefficient $\operatorname{tg}\delta$ measurements or in insulation diagnostic.