

WIESŁAW MICZULSKI

Instytut Metrologii Elektrycznej Politechniki Zielonogórskiej

UKŁADY DO POMIARU IMPEDANCJI METODĄ PRZETWARZANIA KĄTÓW PRZESUNIĘĆ FAZOWYCH

W artykule przedstawiono klasyfikację układów do pomiaru impedancji metodą przetwarzania kątów przesunięć fazowych (PKPF). Dla każdego ze sposobów pomiaru impedancji w układzie komparacji i mostkowym określono schemat układu pomiarowego, podstawowe zależności umożliwiające obliczenie składowych impedancji oraz wymagania stawiane impedancji wzorcowej. Wskazano, który z prezentowanych sposobów pomiaru impedancji charakteryzuje się najlepszymi właściwościami metrologicznymi.

1. WPROWADZENIE

Wielkościami wyjściowymi parametrycznych przetworników wielkości nieelektrycznych na elektryczne są m.in. moduł impedancji (np. absorpcyjne przetworniki wilgotności), rezystancja (np. tensometryczne przetworniki naprężeń), pojemność (np. przetworniki grubości materiałów) i indukcyjność (np. przetworniki przesunięć liniowych), których wartości mogą być wyznaczone w różnych układach pomiarowych. O strukturze układu pomiarowego i jego parametrach (np. napięcie zasilania, częstotliwość pracy) decydują głównie właściwości metrologiczne przetworników. Dlatego też istotnym staje się poszukiwanie nowych metod i układów pomiarowych umożliwiających pomiar impedancji z określonymi wymaganiami metrologicznymi.

Pomiary impedancji należą do tej grupy pomiarów wielkości elektrycznych, w której wyznaczanie impedancji odbywa się w sposób bezpośredni, wynikający z definicji

$$Z_x = \frac{U_x}{I_x} \quad (1)$$

gdzie: Z_x — mierzona impedancja,

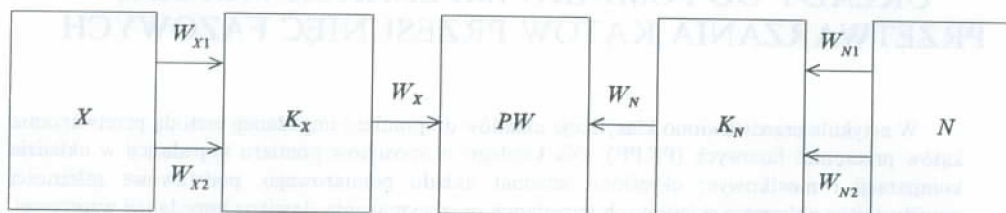
U_x — spadek napięcia na mierzonej impedancji,

I_x — prąd płynący przez mierzona impedancję.

Pomiary impedancji oparte na pomiarze U_x i I_x mogą być wykonywane w układach pomiarowych realizujących metodę pośredniego porównania ze wzorcem (np. metoda techniczna, omomierz, metoda stanów nieustalonych [1]) lub bezpośredniego porównania ze wzorcem metodą zerową lub niezerową (np. metody komparacyjne,

metody mostkowe [2–5]). Pomiary impedancji mogą być również oparte na pomiarze kątów przesunięć fazowych między odpowiednio wybranymi napięciami występującymi w układach pomiarowych [6–10]. Ta grupa układów pomiarowych realizuje metodę bezpośredniego porównania ze wzorcem opartą na metodzie niezerowej, w której impedancja mierzona Z_X jest porównywana z impedancją wzorcową Z_N .

Celem pracy jest przedstawienie układów pomiarowych i sposobów pomiaru impedancji metodą przetwarzania kątów przesunięć fazowych (PKPF).



Rys. 1. Ogólny schemat strukturalny pomiaru impedancji metodą przetwarzania kątów przesunięć fazowych

Ogólny schemat strukturalny reprezentujący układy do pomiaru impedancji metodą PKPF przedstawiono na rys. 1. Tak zdefiniowany schemat strukturalny zawiera bloki X i N reprezentujące obwody zawierające odpowiednio impedancję mierzoną Z_X i impedancję wzorcową Z_N , w których wytwarzane są sygnały pomiarowe W_{X1} , W_{X2} , W_{N1} i W_{N2} opisane zależnościami

$$W_{X1} = |W_{X1}| e^{j\psi_{X1}} \quad (2)$$

$$W_{X2} = |W_{X2}| e^{j\psi_{X2}} \quad (3)$$

$$W_{N1} = |W_{N1}| e^{j\psi_{N1}} \quad (4)$$

$$W_{N2} = |W_{N2}| e^{j\psi_{N2}} \quad (5)$$

W układach pomiarowych są to odpowiednio wybrane napięcia lub prądy o określonej amplitudzie i fazie początkowej, które są doprowadzane do przetworników K_X i K_N realizujących operacje przetwarzania kątów przesunięć fazowych między sygnałami W_{X1} i W_{X2} oraz W_{N1} i W_{N2} na sygnały W_X i W_N według zależności

$$W_X = \psi_{X1} - \psi_{X2} \quad (6)$$

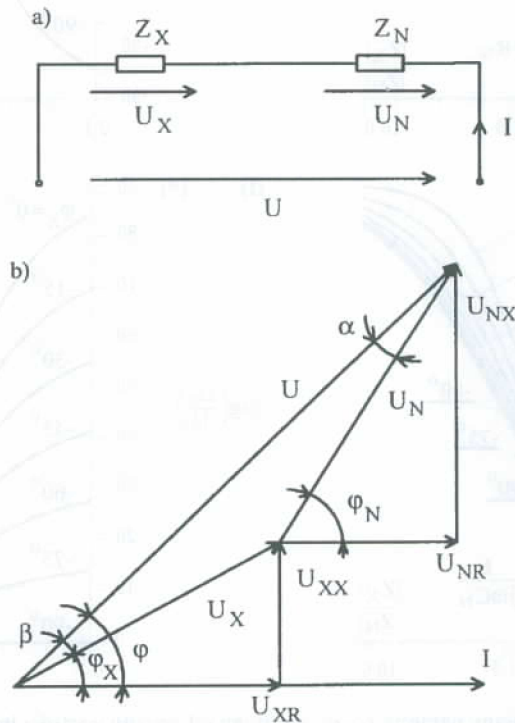
$$W_N = \psi_{N1} - \psi_{N2} \quad (7)$$

Zadaniem przetwornika wyjściowego PW jest realizacja obliczeń impedancji na podstawie znanych wartości W_X , W_N i Z_N .

2. UKŁAD KOMPARACJI RÓWNOPRĄDOWEJ

W układach do pomiaru impedancji metodą bezpośredniego porównania ze wzorcem wyróżniane są układy porównania napięć (równoprądowe), układy porównania prądów (równonapciowe) i układy mostkowe. W przypadku stosowania układów porównania prądów do pomiaru impedancji metodą PKPF istnieje konieczność przetworzenia prądu na napięcie w obwodach wejściowych przetworników K_X i K_N , a dopiero w dalszej kolejności pomiar impedancji zgodnie z ogólnym schematem strukturalnym (rys. 1). Takie działanie powoduje rozszerzenie struktury toru pomiarowego i zmniejszenie dokładności pomiaru. Natomiast układ porównania napięć, inaczej zwany układem komparacji równoprądowej, stosowany do pomiaru impedancji metodą PKPF [8, 9, 10, 11] nie ma takich wad. Na rys. 2 przedstawiono układ pomiarowy i wykres wektorowy ilustrujący sposób pomiaru impedancji w układzie komparacji równoprądowej. Napięcia U_X i U_N opisane są zależnościami

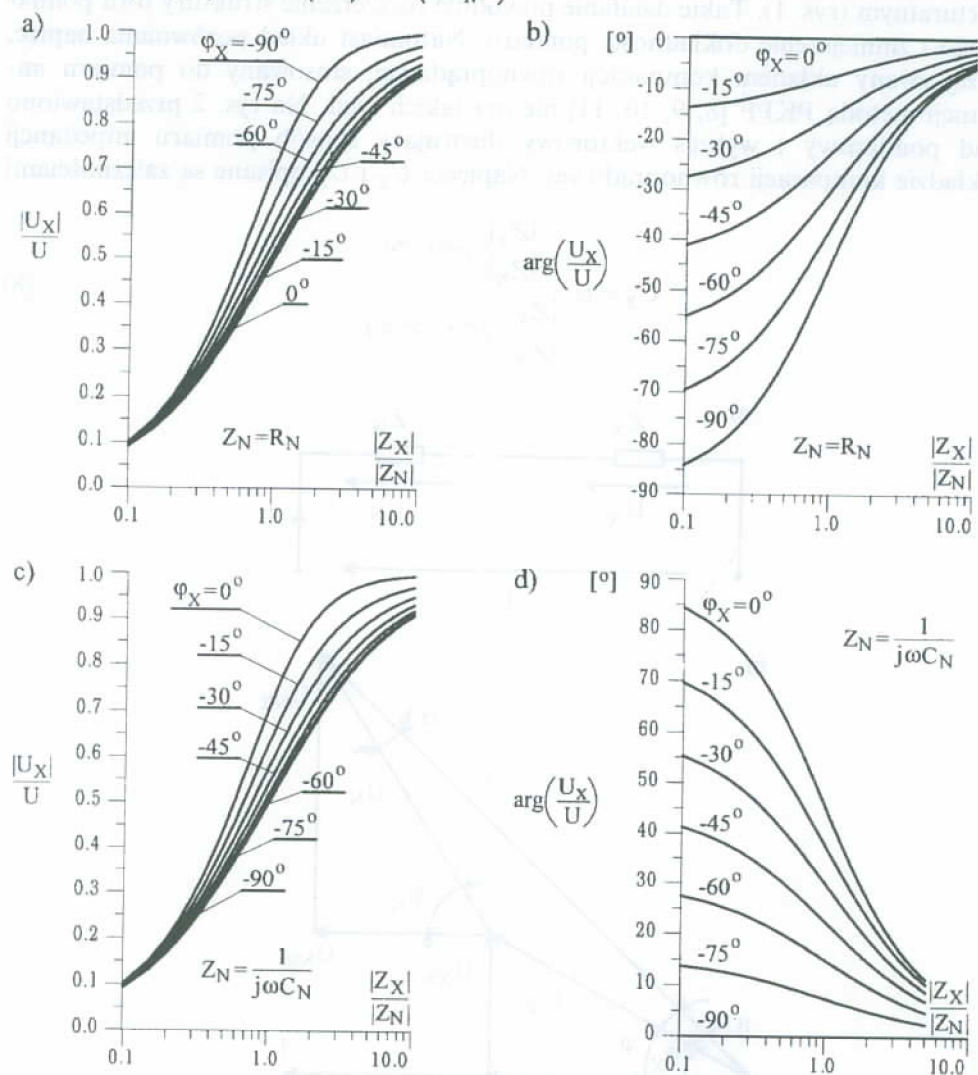
$$U_X = U \frac{\frac{|Z_X|}{|Z_N|} e^{j(\varphi_X - \varphi_N)}}{\frac{|Z_X|}{|Z_N|} e^{j(\varphi_X - \varphi_N)} + 1} \quad (8)$$



Rys. 2. a) Układ komparacji równoprądowej, b) wykres wektorowy

$$U_N = U \frac{1}{\frac{|Z_X|}{|Z_N|} e^{j(\varphi_X - \varphi_N)} + 1} \quad (9)$$

Moduły i argumenty napięć U_X i U_N zależą między innymi od wartości mierzonej impedancji Z_X . Na rys. 3 przedstawiono przykładowe charakterystyki $\frac{|U_X|}{|U|} = f\left(\frac{|Z_X|}{|Z_N|}\right)$ i $\arg\left(\frac{U_X}{U}\right) = f\left(\frac{|Z_X|}{|Z_N|}\right)$ dla określonych wartości argumentu φ_X



Rys. 3. a) i c) Względne zmiany napięcia U_X w zależności od zmiany wartości impedancji Z_X dla różnych wartości argumentu φ_X ; b) i d) zależność zmiany kąta przesunięcia fazowego między napięciami U_X a U w zależności od zmiany wartości impedancji Z_X dla różnych wartości argumentu φ_X

mierzonej impedancji Z_X przy założeniu, że impedancję wzorcową stanowi rezystor wzorcowy R_N (rys. 3a, b) i kondensator wzorcowy C_N (rys. 3c, d). W podobny sposób można otrzymać w/w charakterystyki dla innych wartości argumentu φ_X jak również dla napięcia U_N .

Z charakterystyk tych wynika, że:

- 1) wartość modułu napięcia U_X i U_N zależy od wartości impedancji Z_X ; umożliwia to pomiar składowych impedancji metodą trzech woltomierzy,
- 2) wartość kąta przesunięcia fazowego między napięciem U_X i U oraz U_N i U zależy od wartości impedancji Z_X ; umożliwia to pomiar składowych impedancji metodą przetwarzania kątów przesunięć fazowych,
- 3) pomiar impedancji Z_X metodą PKPF jest możliwy do realizacji wówczas, gdy $Z_X \neq Z_N$, co oznacza, że gdy:
 - impedancję wzorcową Z_N stanowi rezystor wzorcowy, to argument mierzonej impedancji Z_X musi być różny od zera ($\varphi_X \neq 0$),
 - impedancję wzorcową Z_N stanowi kondensator wzorcowy C_N , to argument mierzonej impedancji Z_X musi być różny od -90° ($\varphi_X \neq -90^\circ$).

Z wniosku 3 wynika, że jako impedancję wzorcową należy odpowiednio zastosować rezystor wzorcowy lub kondensator wzorcowy, aby można było mierzyć impedancję Z_X o dowolnym charakterze.

Przyjmując, że impedancje Z_X i Z_N opisane są zależnościami

$$Z_X = |Z_X| e^{j\varphi_X} = R_X + jX_X \quad (10)$$

$$Z_N = |Z_N| e^{j\varphi_N} = R_N + jX_N \quad (11)$$

to na podstawie wykresu wektorowego (rys. 2b) otrzymano

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{U_{XX} + U_{NX}}{U_{XR} + U_{NR}} = \frac{X_X + X_N}{R_X + R_N} = \frac{|Z_X| \sin \varphi_X + |Z_N| \sin \varphi_N}{|Z_X| \cos \varphi_X + |Z_N| \cos \varphi_N} \quad (12)$$

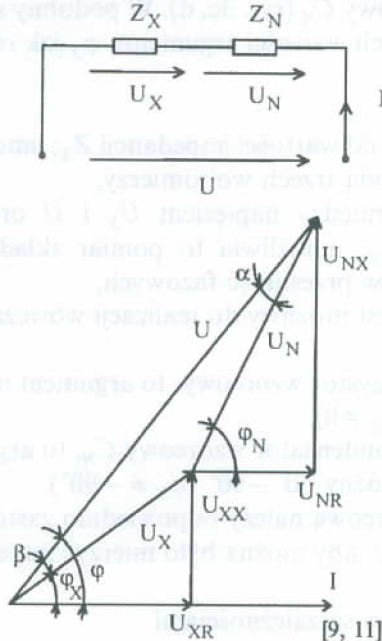
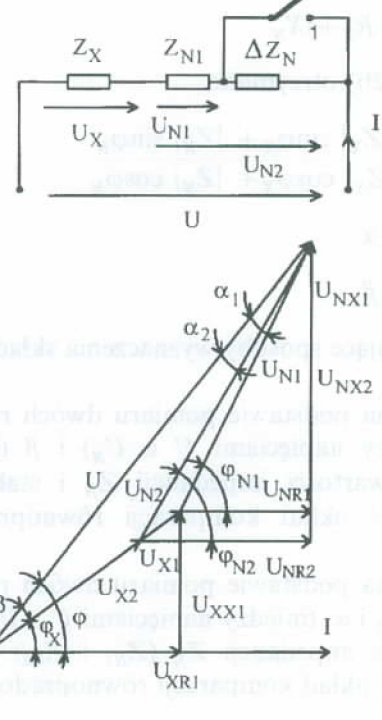
$$\varphi = \varphi_N - \alpha \quad (13)$$

$$\varphi = \varphi_X + \beta \quad (14)$$

Z zależności (12), (13) i (14) wynikają następujące sposoby wyznaczenia składowych impedancji Z_X :

- 1) wyznaczanie składowych impedancji na podstawie pomiaru dwóch różnych kątów przesunięć fazowych α (między napięciami U a U_N) i β (między napięciami U a U_X) przy zadanej wartości impedancji Z_N i stałej częstotliwości f napięcia zasilającego U układ komparacji równoprądowej [9, 11],
- 2) wyznaczanie składowych impedancji na podstawie pomiaru dwóch różnych wartości kąta przesunięcia fazowego α_1 i α_2 (między napięciami U a U_N) przy dwóch różnych zadanych wartościach impedancji Z_N (Z_{N1} i Z_{N2}) i stałej częstotliwości f napięcia zasilającego U układ komparacji równoprądowej [8].

T a b e l a 1. Układ porównawczy równoprądowej z przetwarzaniem kątów przesunięć fazowych

Lp.	Nazwa układu – schemat ideowy – wykres wektorowy – literatura	Zależności do wyznaczania składowych impedancji Z_X
1	Układ porównawczy równoprądowej z pomiarem kątów przesunięć fazowych α i β  [9, 11]	– moduł Z_X: z (12) oraz uwzględniając (13) i (14) $ Z_X = Z_N \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \quad (15)$ – argument Z_X: - dla impedancji $Z_N = R_N$ i impedancji Z_X o dowolnym charakterze $\varphi_X = \alpha + \beta$ (16) - dla impedancji $Z_N = \frac{1}{j\omega C_N}$ i impedancji Z_X o charakterze pojemnościowym $\varphi_X = -(-90^\circ + \alpha + \beta)$ (17) - dla impedancji $Z_N = \frac{1}{j\omega C_N}$ i impedancji Z_X o charakterze indukcyjnym $\varphi_X = -90^\circ + \alpha + \beta$ (18)
2	Układ porównawczy równoprądowej z pomiarem kątów przesunięć fazowych α_1 i α_2  [8]	Uwzględniając (13) w (12), to $\tan(\varphi_N - \alpha) = \frac{ Z_X \sin \varphi_X + Z_N \sin \varphi_N}{ Z_X \cos \varphi_X + Z_N \cos \varphi_N} \quad (19)$ oraz, że $Z_{N2} = Z_{N1} + \Delta Z_N \quad (20)$ to – składowa czynna R_X wynosi: $R_X = \frac{ Z_{N1} \sin \varphi_{N1} - Z_{N2} \sin \varphi_{N2}}{\tan(\varphi_{N1} - \alpha_1) - \tan(\varphi_{N2} - \alpha_2)} -$ $- Z_{N1} \frac{\cos \varphi_{N1} \tan(\varphi_{N1} - \alpha_1)}{\tan(\varphi_{N1} - \alpha_1) - \tan(\varphi_{N2} - \alpha_2)} -$ $- Z_{N1} \frac{\cos \varphi_{N2} \tan(\varphi_{N2} - \alpha_1)}{\tan(\varphi_{N1} - \alpha_1) - \tan(\varphi_{N2} - \alpha_2)} \quad (21)$ – składowa bierna X_X jest równa: $X_X = \frac{ Z_{N1} \cos \varphi_{N1} \tan(\varphi_{N1} - \alpha_1) \tan(\varphi_{N2} - \alpha_2)}{\tan(\varphi_{N2} - \alpha_2) - \tan(\varphi_{N1} - \alpha_1)} -$ $- \frac{ Z_{N2} \cos \varphi_{N2} \tan(\varphi_{N1} - \alpha_1) \tan(\varphi_{N2} - \alpha_2)}{\tan(\varphi_{N2} - \alpha_2) - \tan(\varphi_{N1} - \alpha_1)} +$ $+ \frac{ Z_{N2} \sin \varphi_{N2} \tan(\varphi_{N1} - \alpha_1)}{\tan(\varphi_{N2} - \alpha_2) - \tan(\varphi_{N1} - \alpha_1)} - \frac{ Z_{N1} \sin \varphi_{N1} \tan(\varphi_{N2} - \alpha_2)}{\tan(\varphi_{N2} - \alpha_2) - \tan(\varphi_{N1} - \alpha_1)} \quad (22)$

W tabeli 1 przedstawiono schematy ideowe, wykresy wektorowe oraz zależności do wyznaczania składowych impedancji Z_X dla wyżej przedstawionych sposobów jej pomiaru.

3. UKŁAD MOSTKOWY

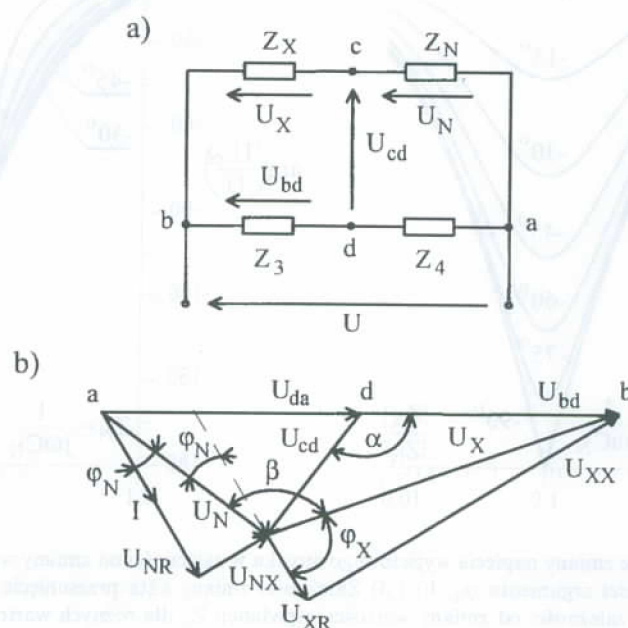
W grupie mostków prądu zmiennego przeznaczonych do wyznaczania impedancji Z_X metodą niezerową wyróżnia się mostki nie zrównoważone i mostki quasi-zrównoważone. Te ostatnie stanowiły dla autora podstawę określenia sposobu pomiaru impedancji metodą PKPF [12].

W mostku quasi-zrównoważonym (rys. 4) z detekcją fazową pomiar modułu impedancji Z_X wymaga takich nastaw impedancji Z_N , aby mierzony kąt przesunięcia fazowego między napięciami U_{cd} a U_{bd} był równy 90° (przy założeniu, że impedancja $Z_3 = Z_4$) [3, 13].

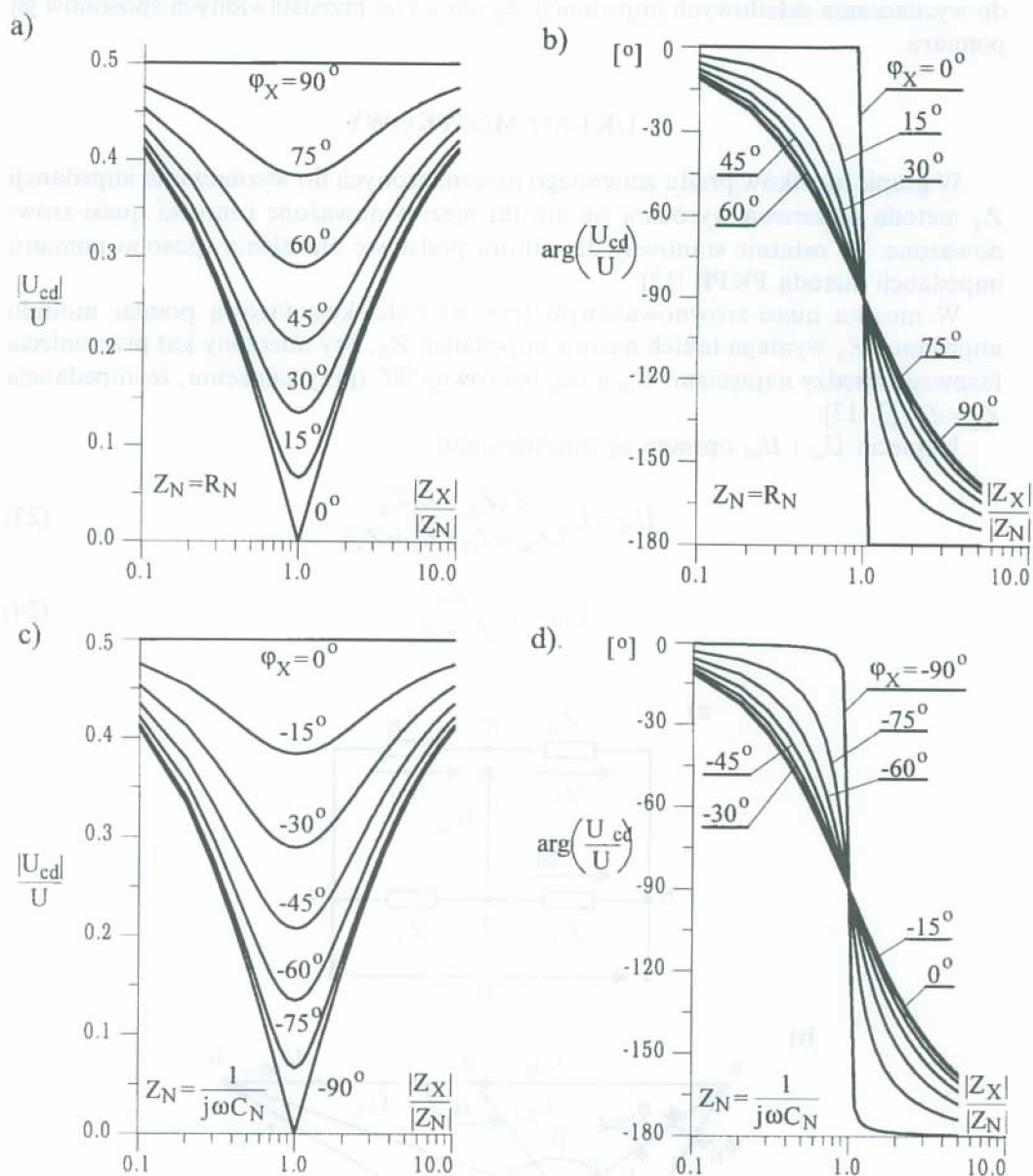
Napięcia U_{cd} i U_{bd} opisane są zależnościami

$$U_{cd} = U \frac{Z_N Z_3 - Z_X Z_4}{(Z_N + Z_X)(Z_3 + Z_4)} \quad (23)$$

$$U_{bd} = U \frac{Z_3}{Z_3 + Z_4} \quad (24)$$



Rys. 4. a) Mostek quasi-zrównoważony, b) wykres wektorowy



Rys. 5. a) i c) Względne zmiany napięcia wyjściowego mostka w zależności od zmiany wartości impedancji Z_X dla różnych wartości argumentu φ_X ; b) i d) Zależności zmiany kąta przesunięcia fazowego między napięciami U_{cd} a U w zależności od zmiany wartości impedancji Z_X dla różnych wartości argumentu φ_X

Przy założeniu, że $Z_3 = Z_4$ napięcie U_{bd} jest równe połowie napięcia zasilania mostka U . Moduł i argument napięcia U_{cd} zależą między innymi od wartości mierzonej impedancji Z_X . Na rys. 5 przedstawiono przykładowe charakterystyki $\frac{|U_{cd}|}{|U|} = f\left(\frac{|Z_X|}{|Z_N|}\right)$ i $\arg\left(\frac{U_{cd}}{U}\right) = f\left(\frac{|Z_X|}{|Z_N|}\right)$ dla różnych wartości argumentu φ_X mierzonej impedancji Z_X przy założeniu, że impedancję wzorcową Z_N stanowi rezystor wzorcowy R_N (rys. 5a, b) i kondensator wzorcowy C_N (rys. 5 c, d). W podobny sposób można otrzymać w/w charakterystyki dla innych wartości argumentu φ_X . Z charakterystyk tych wynika, że:

- 1) wartość kąta przesunięcia fazowego między napięciami U_{cd} i U jest równa 90° dla $|Z_X| = |Z_N|$ i dowolnego argumentu (φ_X) mierzonej impedancji Z_X ; umożliwia to pomiar modułu impedancji Z_X mostkiem quasi-zrównoważonym z detekcją fazową,
- 2) wartość kąta przesunięcia fazowego między napięciami U_{cd} i U zależy od wartości impedancji Z_X , dla określonych wartości $|Z_X|$, φ_X i charakteru impedancji wzorcowej Z_N jest to zależność w przybliżeniu liniowa; zastąpienie detektora fazy przetwornikiem kąta przesunięcia fazowego umożliwia pomiar składowych impedancji metodą PKPF,
- 3) pomiar impedancji Z_X metodą PKPF jest możliwy do realizacji wówczas, gdy $Z_X \neq Z_N$, co oznacza, że gdy:
 - impedancję wzorcową Z_N stanowi rezystor wzorcowy, to argument mierzonej impedancji Z_X musi być różny od zera ($\varphi_X \neq 0$),
 - impedancję wzorcową Z_N stanowi kondensator wzorcowy C_N , to argument mierzonej impedancji Z_X musi być różny od $+\pi/2$ lub $-\pi/2$ ($\varphi_X \neq +\pi/2$ lub $\varphi_X \neq -\pi/2$).

Z wniosku 3 wynika, że jako impedancję wzorcową należy odpowiednio zastosować rezystor wzorcowy lub kondensator wzorcowy, aby można było mierzyć impedancję Z_X o dowolnym charakterze.

Stan quasi-równowagi mostka określony jest zależnością [14]

$$W = \frac{U_{cd}}{U_{bd}} = \frac{Z_N Z_3 - Z_X Z_4}{(Z_N + Z_X) Z_3} \quad (25)$$

Stosując w miejsce wskaźnika fazoczułego, umożliwiającego stwierdzenie kiedy kąt przesunięcia fazowego między napięciami U_{cd} a U_{bd} jest równy 90° , przetwornik kąta przesunięcia fazowego otrzymano układ, w którym przy stałej wartości impedancji wzorcowej Z_N można wyznaczyć impedancję na podstawie pomiaru odpowiednio wybranych kątów przesunięć fazowych. Z zależności (25) można obliczyć kąt przesunięcia fazowego (α) między napięciami U_{cd} a U_{bd} . Przyjmując, że

$$\frac{U_{bd}}{U_{da}} = \frac{Z_3}{Z_4} = k e^{j0} \quad (26)$$

tangens kąta α jest równy

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\operatorname{Im}(W)}{\operatorname{Re}(W)} = \frac{(1+k) |Z_X| |Z_N| \sin(\varphi_X - \varphi_N)}{k |Z_X|^2 - |Z_N|^2 + (k-1) |Z_X| |Z_N| \cos(\varphi_X - \varphi_N)} \quad (27)$$

Z (27) wynika ogólna zależność na moduł impedancji Z_X

$$|Z_X| = |Z_N| \left(a + \sqrt{a^2 + \frac{1}{k}} \right) \quad (28)$$

gdzie:

$$a = \frac{(k+1) \sin(\varphi_X - \varphi_N) - (k-1) \cos(\varphi_X - \varphi_N) \operatorname{tg} \alpha}{2k \operatorname{tg} \alpha} \quad (29)$$

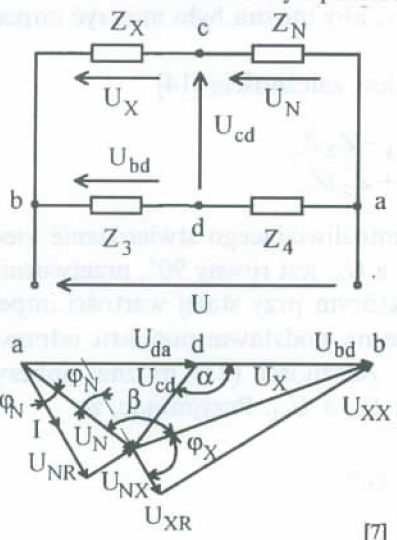
φ_X — argument impedancji Z_X określony zależnością wynikającą z wykresu wektorowego (rys. 4b)

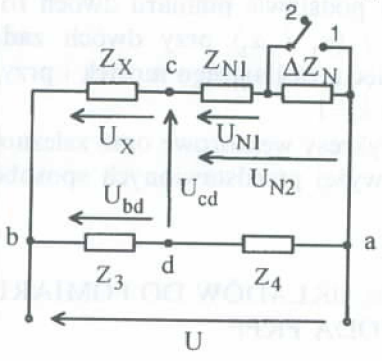
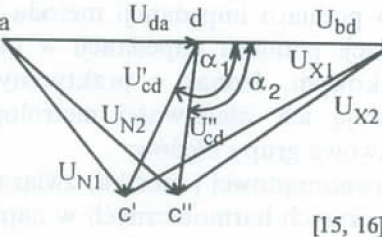
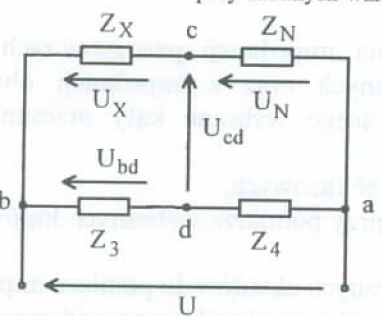
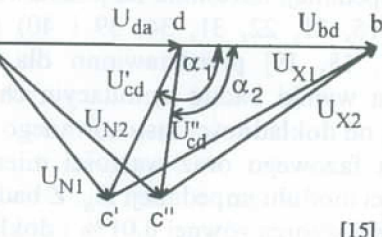
$$\varphi_X = 180^\circ + \varphi_N - \beta \quad (30)$$

Z zależności (28–30) wynikają następujące sposoby wyznaczania impedancji:

- 1) wyznaczanie składowych impedancji na podstawie pomiaru dwóch różnych kątów przesunięć fazowych α i β przy zadanej wartości impedancji wzorcowej Z_N , stałej wartości częstotliwości f napięcia zasilającego mostek oraz przy $k=1$,

T a b e l a 2. Układ mostkowy z przetwarzaniem kątów przesunięć fazowych

Lp.	Nazwa układu — schemat ideowy — wykres wektorowy — literatura	Zależności do wyznaczania składowych impedancji Z_X
1	2	3
1	Układ mostkowy z pomiarem kątów przesunięć fazowych α i β  [7]	— moduł Z_X: $ Z_X = Z_N \left(\frac{\sin \beta}{\operatorname{tg} \alpha} + \sqrt{\left(\frac{\sin \beta}{\operatorname{tg} \alpha} \right)^2 + 1} \right) \quad (31)$ — argument Z_X: • dla impedancji $Z_N = R_N$ i impedancji Z_X o dowolnym charakterze $\varphi_X = 180^\circ - \beta \quad (32)$ • dla impedancji $Z_N = \frac{1}{j\omega C_N}$ i impedancji Z_X o dowolnym charakterze $\varphi_X = 90^\circ - \beta \quad (33)$

1	2	3
	Układ mostkowy z pomiarem kątów przesunięć fazowych α_1 i α_2 przy zadanych wartościach Z_{N1} i Z_{N2}  2  [15, 16]	– moduł Z_X: $ Z_X = \sqrt{\frac{ Z_{N1} Z_{N2} (Z_{N1} \operatorname{tg} \alpha_1 - Z_{N2} \operatorname{tg} \alpha_2)}{ Z_{N2} \operatorname{tg} \alpha_1 - Z_{N1} \operatorname{tg} \alpha_2}} \quad (34)$ $Z_{N2} = Z_{N1} + \Delta Z_N \quad (35)$ – argument Z_X: $\beta = \arcsin \left(0,5 \frac{ Z_X ^2 - Z_{N1} ^2}{ Z_X Z_{N1} } \operatorname{tg} \alpha_1 \right) \quad (36)$ - dla impedancji $Z_N = R_N$ i impedancji Z_X o dowolnym charakterze $\varphi_X = 180^\circ - \beta \quad (37)$ - dla impedancji $Z_N = \frac{1}{j\omega C_N}$ i impedancji Z_X o dowolnym charakterze $\varphi_X = 90^\circ - \beta \quad (38)$
	Układ mostkowy z pomiarem kątów przesunięć fazowych α_1 i α_2 przy zadanych wartościach częstotliwości f_1 i f_2  2  [15]	– przykładowo dla $Z_X = R_X + jX_X$ i $Z_N = R_N$ składowe bierną i czynną mierzonej impedancji przy częstotliwości f_1 można wyznaczyć z zależności: $X_X = \frac{2f_1 Z_N (f_1 \operatorname{tg} \alpha_1 - f_2 \operatorname{tg} \alpha_2)}{\operatorname{tg} \alpha_1 \operatorname{tg} \alpha_2 (f_1^2 - f_2^2)} \quad (39)$ $R_X = \sqrt{\frac{2X_X Z_N }{\operatorname{tg} \alpha_1} - X_X^2 + Z_N ^2} \quad (40)$ – a dla $Z_X = R_X - jX_X$ i $Z_N = R_N$ składowe bierną i czynną mierzonej impedancji przy częstotliwości f_1 można wyznaczyć z zależności: $X_X = \frac{2f_2 Z_N (f_1 \operatorname{tg} \alpha_1 - f_2 \operatorname{tg} \alpha_2)}{\operatorname{tg} \alpha_1 \operatorname{tg} \alpha_2 (f_2^2 - f_1^2)} \quad (41)$ $R_X = \sqrt{\frac{2X_X Z_N }{\operatorname{tg} \alpha_1} - X_X^2 + Z_N ^2} \quad (42)$

- 2) wyznaczanie składowych impedancji na podstawie pomiaru dwóch różnych wartości kąta przesunięcia fazowego α (α_1 i α_2) przy dwóch zadanych wartościach impedancji wzorcowej Z_N (Z_{N1} i Z_{N2}), i przy stałej wartości częstotliwości f napięcia zasilającego mostek oraz przy $k=1$,
- 3) wyznaczanie składowych impedancji na podstawie pomiaru dwóch różnych wartości kąta przesunięcia fazowego α (α_1 i α_2) przy dwóch zadanych wartościach częstotliwości f (f_1 i f_2) napięcia zasilającego mostek i przy stałej wartości impedancji wzorcowej Z_N oraz $k=1$.

W tabeli 2 przedstawiono schematy ideowe, wykresy wektorowe oraz zależności do wyznaczania składowych impedancji Z_X dla wyżej przedstawionych sposobów jej pomiaru.

4. WŁAŚCIWOŚCI METROLOGICZNE UKŁADÓW DO POMIARU IMPEDANCJI METODĄ PKPF

Z przedstawionej klasyfikacji układów do pomiaru impedancji metodą PKPF wynika, że możliwe są różne sposoby realizacji pomiaru impedancji w układzie komparacji równoprądowej i układzie mostkowym. Jednak o praktycznym zastosowaniu przedstawionych układów decydują ich właściwości metrologiczne. W układach tych należy wyróżnić trzy podstawowe grupy błędów:

- a) błędy układu pomiarowego (komparacji równoprądowej i mostka) związane z:
 - błędem wynikającym z występowania wyższych harmonicznych w napięciach układu pomiarowego,
 - błędem wzorca, zależnym od dokładności jego wykonania, stałej czasowej τ lub $\text{tg}\delta$ i stabilności jego parametrów,
 - błędami wynikającymi z występowania impedancji pasożytniczych związanych z wpływem sprzężeń doziemnych oraz z impedancji obwodów wejściowych przetwornika fazy mierzącego wybrane kąty przesunięć fazowych,
- b) błędy pomiaru wybranych kątów przesunięć fazowych,
- c) błędy pobudliwości układu pomiarowego przy pomiarze wybranych kątów przesunięć fazowych.

Podstawą do oceny właściwości metrologicznych układów do pomiaru impedancji metodą PKPF była analiza błędu pomiaru impedancji określona na podstawie błędu podstawowego wynikającego z zależności (15, 21, 22, 31, 34, 39 i 40) i błędu pobudliwości. W pracach [7, 11, 15, 17, 18, 19] przedstawiono dla układu komparacji równoprądowej i układu mostka wyniki badań symulacyjnych określających zależności błędu pomiaru impedancji od dokładności zastosowanego wzorca Z_N , dokładności pomiaru kąta przesunięcia fazowego oraz wartości mierzonego modułu impedancji Z_X w stosunku do wartości modułu impedancji Z_N . Z badań tych wynika, że dla przyjętych wartości dokładności wzorca równej 0,01% i dokładności pomiaru kąta przesunięcia fazowego równej 0,02°, wartość błędu pomiaru modułu

impedancji zmienia się w bardzo szerokich granicach (od 0,03% przy $\frac{|Z_X|}{|Z_N|} = 1$ dla układu mostkowego do kilkudziesięciu procent przy $\frac{|Z_X|}{|Z_N|} = 0,1$ dla układu komparacji równoprądowej). Zastosowanie procedury minimalizującej błąd pomiaru impedancji [18, 19] polegającej na odpowiednim doborze parametrów wzorca Z_N (procedura adaptacji), umożliwia wyznaczanie modułu impedancji z błędem mniejszym od 0,1% dla pierwszego sposobu realizacji pomiaru impedancji w układzie mostkowym (tab. 2, poz. 1) oraz z błędem mniejszym od 0,2% dla pierwszego sposobu realizacji pomiaru impedancji w układzie komparacji równoprądowej (tab. 1, poz. 1). Pozostałe sposoby pomiaru impedancji w układzie komparacji równoprądowej i w układzie mostkowym charakteryzują się dużo większymi wartościami błędów pomiaru. Istotny wpływ na dokładność pomiaru impedancji metodą PKPF ma dokładność pomiaru kątów przesunięć fazowych. Przykładowo dla układu mostkowego zmiana dokładności pomiaru kąta przesunięcia fazowego z $0,02^\circ$ na $0,05^\circ$ powoduje zmianę wartości błędu pomiaru modułu impedancji z 0,1% do 0,25% (przy $\frac{|Z_X|}{|Z_N|} = 0,4$). Podobnie znaczący wpływ na dokładność pomiaru impedancji ma występowanie wyższych harmonicznych w napięciu zasilania układu pomiarowego. W pracach [20, 21] przedstawiono wyniki badań symulacyjnych, z których wynika, że amplitudy i fazy początkowe poszczególnych harmonicznych napięcia zasilania układu pomiarowego wpływają w różny sposób i w dużym stopniu na błąd pomiaru modułu impedancji. Zapewnienie współczynnika zniekształceń nieliniowych napięcia zasilającego układ pomiarowy na poziomie 0,02% umożliwia pomiar impedancji z błędem dodatkowym nie większym niż 0,05%. Z badań tych wynika również to, że mierzona impedancja Z_X nie może być elementem nieliniowym. Stanowi to ograniczenie możliwości stosowania metody PKPF do pomiaru impedancji. W pracy [22] określono wpływ parametrów wzorca na dokładność pomiaru impedancji, a w pracy [18] wpływ impedancji wejściowej przetwornika kąta przesunięcia fazowego. W pracach tych określono również procedury minimalizujące wpływ tych wielkości na dokładność pomiaru impedancji. Skuteczność działania tych procedur jest na tyle wystarczająca, że wymienione błędy dodatkowe mogą być pominięte.

5. PODSUMOWANIE

Z przedstawionej klasyfikacji układów do pomiaru impedancji metodą PKPF wynika, że możliwe są różne sposoby realizacji pomiaru impedancji w układzie komparacji równoprądowej i w układzie mostkowym. Przedstawione w pkt. 4, na podstawie cytowanej literatury, właściwości metrologiczne tych układów pozwalają wnioskować, że pomiar impedancji w układzie mostkowym realizowany pierwszym sposobem (tab. 2, poz. 1) jest najkorzystniejszy ze względu na osiągnięte dokładności

pomiaru. Wprowadzenie technik mikroprocesorowych do realizacji układu pomiarowego oraz zastosowanie procedur korekcji błędów [23] (min. procedury zerowania, kalibracji i adaptacji) umożliwiają pomiar impedancji w układzie mostkowym metodą PKPF z dokładnością $0,1\% \div 0,5\%$, która zależy od dokładności rezystora wzorcowego R_N i dokładności pomiaru kątów przesunięć fazowych.

LITERATURA

1. Sydenham P.H.: *Podręcznik metrologii — tom 2. Podstawy praktyczne*, WKŁ Warszawa 1989.
2. Hirszberg L.: *Analiza procesu równoważenia układów Logana*, praca doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice 1979.
3. Karandiejew K.B.: *Pomiary elektryczne metodami mostkowymi i kompensacyjnymi*, WNT, Warszawa 1969.
4. Miłek M.: *Komparacja wielkości elektrycznych i magnetycznych*, Zeszyty naukowe Politechniki Śląskiej nr 696, Gliwice 1981.
5. Szadkowski B.: *Synteza metod pomiaru immitancji*, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Elektryka Z. 93, Gliwice 1984.
6. Madej P.: *Metrologiczne aspekty metody fazowej w badaniach stratności kondensatorów w zakresie małych częstotliwości*, praca doktorska, Politechnika Wrocławska, Wrocław 1982.
7. Miczulski W.: *Pomiar modułu impedancji w układach mostkowych z przetwarzaniem kątów przesunięć fazowych*, Metrologia i systemy pomiarowe nr 6, Warszawa 1990.
8. Obst E.: *Zagadnienie wykorzystania cyfrowego pomiaru przesunięć fazowych w pomiarach wartości składowych impedancji*, praca doktorska, Politechnika Poznańska, Poznań 1989.
9. Patent nr SU1167530 (USSR).
10. Saegusa T., Hagiwara N., Suzuki Y., Murase H.: *Wide-band digital Tan-δ meter using a phase comparison system*, IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. IM-29, No. 4, Dec. 1980.
11. Miczulski W.: *Pomiar modułu impedancji metodą komparacji równoprądowej z przetwarzaniem kątów przesunięć fazowych*, Mat. konf. XXI Międzyuczelnianej Konferencji Metrologów, Wrocław 1989.
12. Miczulski W.: *Analiza metrologiczna metod pomiaru $|Z|$ w układach z mikroprocesorem i jej weryfikacja na przykładzie wilgotnościomierza absorpcyjnego*, praca doktorska, Politechnika Wrocławska, Wrocław 1988.
13. Szadkowski B.: *Quasi-zrównoważone metody pomiaru impedancji*, Rozprawy Elektrotechniki nr 31, z. 2, Warszawa 1985.
14. Karandiejew K.B., Sztambiergier T.A.: *Obobscziennaja teorija mostowych ciepiej pieriemennogo toka*, Wyd. Syberyjskiego oddziału Akademii Nauk ZSRR, Nowosybirsk 1961.
15. Miczulski W.: *Pomiar impedancji metodą przetwarzania kątów przesunięć fazowych*, Metrologia i systemy pomiarowe nr 16, Warszawa 1993.
16. Miczulski W.: *Sposób pomiaru składowych immitancji*, Patent PL. 170219.
17. Miczulski W.: *Właściwości metrologiczne komparatora impedancji z przetwarzaniem kątów przesunięć fazowych*, Mater. konf. XXVII MKM 95, Wydawnictwo Wyższej Szkoły Inżynierskiej w Zielonej Górze, Zielona Góra 1995.
18. Miczulski W.: *Badania symulacyjne właściwości metrologicznych mostka do pomiaru impedancji*, Mater. konf. IV Sympozjum „Modelowanie i Symulacja Systemów Pomiarowych” Krynica 94, Wydawnictwo Zakładu Metrologii AGH, Kraków 1994.
19. Miczulski W.: *Metody korekcji błęd pomiaru impedancji w układzie mostkowych z przetwarzaniem kątów przesunięć fazowych*, Mater. konf. XXVII MKM 95, Wydawnictwo Wyższej Szkoły Inżynierskiej w Zielonej Górze, Zielona Góra 1995.

20. Miczulski W.: *Wpływ wyższych harmonicznych na dokładność pomiaru impedancji metodą mostkową z przetwarzaniem kątów przesunięć fazowych*, Mater. konf. XXIX MKM 97, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 1997.
21. Miczulski W.: *Pomiar impedancji metodą komparacji równoprądowej z przetwarzaniem kątów przesunięć fazowych przy napięciach niesinusoidalnych*, Mater. konf. VII Sympozjum „Modelowanie i Symulacja Systemów Pomiarowych” Krynica 97, Wydawnictwo Zakładu Metrologii AGH, Kraków 1997.
22. Miczulski W.: *Minimalizacja wpływu błędu wzorca pojemności na dokładność pomiaru modułu impedancji mostkiem quasi-zrównoważonym z przetwarzaniem kątów przesunięć fazowych*, Zeszyty naukowe nr 95, Wyższa Szkoła Inżynierska, Zielona Góra 1991.
23. Miczulski W.: *Procedury korekcji błędów w pomiarach impedancji metodą przetwarzania kątów przesunięć fazowych*, Mater. konf. X Krajowej Konferencji Naukowo-Technicznej „Zastosowanie mikroprocesorów w automatyce i pomiarach”, Wydawnictwo Przemysłowego Instytutu Elektrotechniki w Warszawie, Warszawa 1996.

IMPEDANCE MEASUREMENT SYSTEMS BASED ON PROCESSING ANGLE PHASE SHIFT METHOD

S u m m a r y

In the paper, classification of impedance measurement systems based on processing angle phase shift method is presented. To each solution of impedance measuring in comparison and bridge method there are determined: block diagram of a measuring system, basic relationships to impedance component calculation and requirements for pattern impedance. At the end, it is shown which presented method of the impedance measurement offers the best metrological features.