

Janusz GUZIK

ANALIZA ZBIEŻNOŚCI AKTYWNYCH RÓWNONAPIĘCIOWYCH KOMPARATORÓW ADMITANCJI PRZEZNACZONYCH DO SZEROKOPASMOWYCH BADAŃ DIELEKTRYKÓW

Streszczenie. W artykule przedstawiono sposób analitycznego określenia wartości kąta zbieżności γ , będącego miarą zbieżności komparatora admitancji w założonym zakresie częstotliwości wraz ze wskazaniem optymalnego rozmieszczenia par (p, q) elementów nastawnych dla przypadków pomiaru składowych $(\text{Re}Y_X, \text{Im}Y_X)$ i $(\text{Im}Y_X, \text{tg}\delta_X)$ badanego dielektryka.

CONVERGENCE ANALYSIS OF ACTIVE EQUIVOLTAGE ADMITTANCE COMPARATOR CIRCUIT USED FOR WIDE-BAND INVESTIGATIONS OF DIELECTRICS

Summary. In the paper the analytic procedure of determining the convergence angle value γ which is a measure of the admittance comparator circuit convergence has been presented. The comparator can be used in the assumed frequency range. The optimal distribution of the pairs of the setting elements (p, q) for the case of measurement of the admittance components $(\text{Re}Y_X, \text{Im}Y_X)$ and $(\text{Im}Y_X, \text{tg}\delta_X)$ of the investigated dielectrics have been given as well.

1. WPROWADZENIE

W zmiennoprądowych badaniach dielektryków występuje potrzeba wyznaczenia częstotliwościowych zmian ich parametrów typu immitancyjnego, np. składowych admitancji $(\text{Re}Y_X, \text{Im}Y_X)$ oraz $(\text{Im}Y_X, \text{tg}\delta_X)$ w dostatecznie szerokim zakresie częstotliwości, np. od 10^{-3} Hz do 10^{+6} Hz [1, 6, 7].

Jedną z klas układów najlepiej nadających się do tego celu może być klasa równonapięciowych komparatorów admitancji z zastosowaniem aktywnych przetworników typu i/u

o ogólnym schemacie ideowym przedstawionym na rys.1, opisanym następującym równaniem przetwarzania [1]:

$$\Delta U = U_X - U_N = (H_X I_X - H_N I_N) = E_g (Y_X H_X - Y_N H_N), \quad (1)$$

gdzie: ΔU – sygnał wyjściowy komparatora,

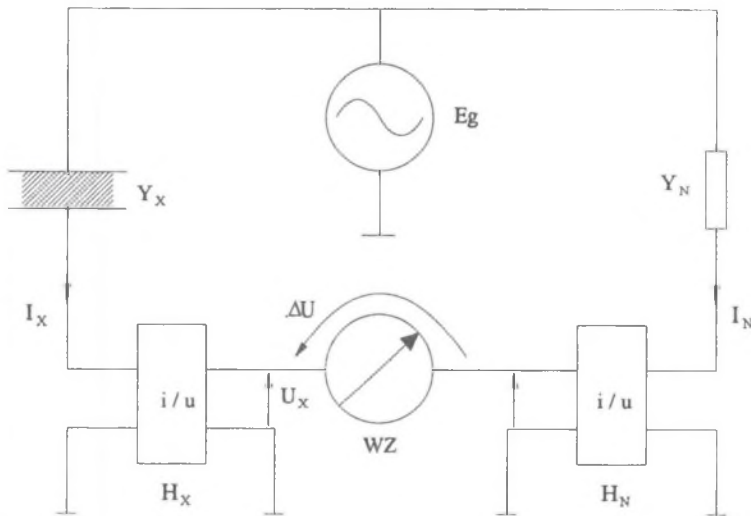
U_X, U_N – sygnały napięciowe podlegające kompensacji w obwodzie wskaźnika zera WZ,

H_X, H_N – transmitancje zastosowanych przetworników i/u w torach prądów I_X i I_N płynących przez komparowane admitancje: badanego dielektryka Y_X i zastosowanego wzorca Y_N ,

E_g – źródło napięcia zasilającego układ komparatora,

przy czym dla stanu komparacji ($\Delta U = 0$) obowiązuje zależność:

$$Y_X = \frac{H_N}{H_X} Y_N \quad (2)$$



Rys.1. Schemat ideowy ogólnego układu komparatora admitancji z kompensacją napięć U_X i U_N

Fig.1. Schematic diagram of the general admittance comparator circuit with compensation of voltages U_X and U_N

Zbadanie zbieżności ma szczególne znaczenie dla pracy komparatora w przykładowym zakresie najmniejszych częstotliwości (10^{-3} - 10) Hz, gdyż umożliwia znaczne skrócenie czasu jego równoważenia [1, 6], co jest równoznaczne ze skróceniem czasu pomiaru parametrów immitancyjnych badanego dielektryka. Uzyskanie krótkiego czasu pomiaru ułatwia ponadto spełnienie w układzie komparatora warunków bezpośredniego odczytu, co omówiono w pracy [1].

W dalszym ciągu celem przeprowadzonej analizy zbieżności będzie podanie warunków, których spełnienie umożliwia uzyskanie maksymalnej zbieżności w dostatecznie szerokim zakresie częstotliwości.

2. ANALIZA ZBIEŻNOŚCI DLA ROZPATRYWANEGO UKŁADU KOMPARATORA

Zbieżność komparatora admitancji można określić poprzez podanie tzw. kąta zbieżności γ , zdefiniowanego w sposób następujący [1, 7]:

$$\gamma = \text{Arg}\left(\frac{\partial \Delta U}{\partial p}\right) - \text{Arg}\left(\frac{\partial \Delta U}{\partial q}\right), \quad (3)$$

gdzie:

ΔU – sygnał wyjściowy komparatora, opisany za pomocą zależności (1),

p, q – elementy nastawne, pozwalające na sprowadzenie komparatora do stanu komparacji ($\Delta U = 0$).

Możliwe są przy tym następujące warianty (I), (II) i (III) rozmieszczenia elementów nastawnych (p, q):

- (I) – elementy nastawne p i q umieszczone są w dowolnym, lecz tym samym bloku schematu komparatora wg rys.1 (wybranych spośród bloków przetworników i/u o transmitancjach H_X, H_N i bloku wzorca admitancji Y_N),
- (II) – elementy nastawne p i q umieszczone są w różnych blokach schematu komparatora wg rys.1. (wybranych spośród bloków przetworników i/u o transmitancjach H_X, H_N i bloku wzorca admitancji Y_N),
- (III) – elementy nastawne p i q umieszczone są w różnych blokach schematu komparatora wg rys.1 (wybranych spośród bloków przetworników i/u o transmitancjach H_X, H_N i bloku wzorca admitancji Y_N), z tym jednak, że są to elementy tego samego rodzaju: $(p_X, p_N), (p_X, p_Y), (p_N, p_Y), (q_X, q_N), (q_X, q_Y)$ i (q_N, q_Y) .

Dla sygnału wyjściowego komparatora (1) wartość kąta zbieżności γ określonego za pomocą definicji (3) można zapisać następującym wzorem:

$$\gamma = \text{Arg}\left[\frac{\partial}{\partial p} E_g(Y_X H_X - Y_N H_N)\right] - \text{Arg}\left[\frac{\partial}{\partial q} E_g(Y_X H_X - Y_N H_N)\right], \quad (4)$$

gdzie:

(p,q) – para elementów nastawnych wybrana z następującego zbioru elementów:

$$\{(p_X = \operatorname{Re} H_X, q_X = \operatorname{Im} H_X), (p_N = \operatorname{Re} H_N, q_N = \operatorname{Im} H_N), \\ (p_Y = \operatorname{Re} Y_N, q_Y = \operatorname{Im} Y_N)\} \text{ wg wariantów (I) - (III).}$$

Stąd obliczone na podstawie wzoru (4) wartości kątów zbieżności γ przy zastosowaniu następujących oznaczeń:

$$\varphi_X = \operatorname{Arg} Y_X, \quad (5a)$$

$$\varphi_N = \operatorname{Arg} H_N, \quad (5b)$$

$$\varphi_Y = \operatorname{Arg} Y_N. \quad (5c)$$

zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Wartości kątów zbieżności γ dla poszczególnych wariantów (I) - (III) rozmieszczenia par (p,q) elementów nastawnych komparatora

Wariant	Blok H_X		Blok H_N		Blok Y_N		Kąt zbieżności γ
	Re H_X	Im H_X	Re H_N	Im H_N	Re Y_N	Im Y_N	
I	p_X	q_X					$-\frac{\pi}{2}$
			p_N	q_N			$+\frac{\pi}{2}$
					p_Y	q_Y	
II	p_X			q_N			$+\frac{\pi}{2} - (\varphi_Y - \varphi_X)$
		q_X	p_N				$-\frac{\pi}{2} - (\varphi_Y + \varphi_X)$
	p_X					q_Y	$+\frac{\pi}{2} + (\varphi_X - \varphi_N)$
		q_X			p_Y		$-\frac{\pi}{2} - (\varphi_X + \varphi_N)$
			p_N			q_Y	$-\frac{\pi}{2} - (\varphi_Y + \varphi_N)$
				q_N	p_Y		
III	p_X		p_N				$\varphi_X - \varphi_Y$
		q_X		q_N			
	p_X				p_Y		$\varphi_X - \varphi_N$
		q_X				q_Y	
			p_N		p_Y		$\varphi_Y - \varphi_N$
			q_N		q_Y		

Z porównania danych zamieszczonych w tabeli 1 wynika, że wariant (I) rozmieszczenia par (p, q) elementów nastawnych pozwala na uzyskanie maksymalnej zbieżności $\gamma = \pm \frac{\pi}{2}$, niezależnie od częstotliwości. Dla wariantów (II) i (III) – odpowiednie wartości kątów zbieżności γ nie osiągają wartości maksymalnej $\gamma = \pm \frac{\pi}{2}$, a ponadto są one zawsze zależne od częstotliwości f, ponieważ: $\varphi_X = \varphi_X(f)$, $\varphi_N = \varphi_N(f)$ i $\varphi_Y = \varphi_Y(f)$.

Ponadto cechą charakterystyczną wariantu (III) wyboru rozmieszczenia par (p, q) elementów nastawnych jest to, że dla szczegółowych równań komparacji składowych mierzonej admittancji Y_X zapisanych w postaci [1]:

$$\operatorname{Re} Y_X = \frac{p_X (p_N p_Y - q_N q_Y) + q_X (p_N q_Y + q_N p_Y)}{p_X^2 + q_X^2}, \quad (6a)$$

$$\operatorname{Im} Y_X = \frac{p_X (p_N q_Y + q_N p_Y) - q_X (p_N p_Y - q_N q_Y)}{p_X^2 + q_X^2}, \quad (6b)$$

$$\operatorname{tg} \delta_X = \frac{p_X (p_N p_Y - q_N q_Y) + q_X (p_N q_Y + q_N p_Y)}{p_X (p_N q_Y + q_N p_Y) - q_X (p_N p_Y - q_N q_Y)}, \quad (6c)$$

wybór par: (p_X, p_N), (p_X, p_Y), (q_X, q_N), (q_X, q_Y), (p_N, p_Y) i (q_N, q_Y) nie pozwala na spełnienie warunków bezpośredniego odczytu i zrównoważenia komparatora przy jednoczesnym pomiarze obydwu składowych admittancji ($\operatorname{Re} Y_X$, $\operatorname{Im} Y_X$) lub ($\operatorname{Im} Y_X$, $\operatorname{tg} \delta_X$) badanego dielektryka. Z tego też względu wariant (III) nie będzie w dalszych rozważaniach brany pod uwagę.

3. OGRANICZENIA WYBORU OPTYMALNEJ PARY (P, Q) ELEMENTÓW NASTAWNYCH KOMPARATORA

Ostateczny wybór optymalnej (z punktu widzenia zbieżności komparatora) pary elementów nastawnych (p, q) zależy będzie zatem od [1]:

- wyboru konkretnej pary składowych admittancji ($\operatorname{Re} Y_X$, $\operatorname{Im} Y_X$) lub ($\operatorname{Im} Y_X$, $\operatorname{tg} \delta_X$) badanego dielektryka, podlegających pomiarowi,
- spełnienia warunków zadowalającej czułości,
- spełnienia warunków bezpośredniego odczytu,
- wyboru rodzaju wzorca, (stały lub nastawny) odpowiednich składowych admittancji Y_N , tj. ($\operatorname{Re} Y_N$, $\operatorname{Im} Y_N$) lub ($\operatorname{Im} Y_N$, $\operatorname{tg} \delta_N$).

Ad a) Można pokazać [1, 7], że wariantowi (I) rozmieszczenia par (p,q) elementów nastawnych odpowiada pomiar składowych ($\text{Re}Y_X$, $\text{Im}Y_X$), natomiast wariantowi (II) – odpowiednio pomiar składowych ($\text{Im}Y_X$, $\text{tg}\delta_X$) badanej admitancji dielektryka.

Mając zatem na uwadze, że

$$\varphi_X = \text{Arg}Y_X = -\left(\frac{\pi}{2} - \delta_X\right), \quad (7a)$$

$$\varphi_N = \text{Arg}H_N, \quad (7b)$$

$$\varphi_Y = \text{Arg}Y_Y = -\left(\frac{\pi}{2} - \delta_Y\right), \quad (7c)$$

gdzie: δ_X , δ_Y – kąty stratności badanego dielektryka i wzorca, wartości odpowiednich kątów zbieżności γ dla obydwu wariantów (I) i (II) pomiaru składowych admitancji badanego dielektryka zestawiono w tablicy 2.

Ponieważ w praktyce [6] częściej dokonuje się pomiaru składowych ($\text{Im}Y_X$, $\text{tg}\delta_X$) badanych dielektryków, to z tego punktu widzenia w pierwszym rzędzie należy wybrać następujące pary elementów nastawnych komparatora: (p_X , q_N) lub (p_N , q_Y). Wybór pozostałych par (p , q) dla pomiaru składowych ($\text{Im}Y_X$, $\text{tg}\delta_X$) ma znaczenie drugorzędne i jest niekorzystny, gdyż wartość kąta zbieżności γ jest wtedy zależna wprost od wartości kąta $\varphi_N = \varphi_N(f)$, a tym samym od częstotliwości f , co wpływa na ograniczenie zakresu poprawnej pracy zarówno samego przetwornika i/u , jak i – całego układu komparatora [3, 4].

Ograniczeń takich nie ma, przy pomiarze składowych ($\text{Re}Y_X$, $\text{Im}Y_X$) badanej admitancji i wówczas wszystkie pary: (p_X , q_X), (p_N , q_N) i (p_Y , q_Y) są pod tym względem wzajemnie równoważne.

Ad b) Warunkiem zadowalającej czułości komparatora w przyjętym zakresie częstotliwości jest spełnienie relacji [5]:

$$S \geq S_{\min}, \quad (8)$$

gdzie:

$$S = \frac{\partial|\Delta U|}{\partial|Y_X|} = |E_g| \cdot |H_X| \quad \text{i} \quad S_{\min} = |E_g| \cdot |H_{X\min}|$$

oznaczają odpowiednio bezwzględną czułość komparatora i zakładaną, minimalną wartość tej czułości w zakładanym zakresie częstotliwości pracy komparatora.

Zatem relację (8) można przepisać w postaci

$$\sqrt{p_X^2 + q_X^2} \geq \sqrt{p_{X\min}^2 + q_{X\min}^2}, \quad (9)$$

gdzie: $p_X = \text{Re} H_X$, $q_X = \text{Im} H_X$ i odpowiednio $p_{X\min} = \text{Re} H_{X\min}$, $q_{X\min} = \text{Im} H_{X\min}$.

Stąd wniosek, że najłatwiej jest spełnić wymaganie zadowalającej czułości (9) dla pomiaru składowych ($\text{Re}Y_X$, $\text{Im}Y_X$) dokonując wprost wyboru tych par (p , q), które nie zawierają składowych p_X i q_X , tzn. par (p_N , q_N) i (p_Y , q_Y). Taki sposób postępowania jest nie do przyjęcia w przypadku pomiaru składowych ($\text{Im}Y_X$, $\text{tg}\delta_X$), gdyż wówczas dla wyboru par (p_N , q_Y) i (p_Y , q_N) kąt zbieżności γ jest funkcją częstotliwości f : $\gamma = \pi - \varphi_N = \pi - \varphi_N(f)$. Zatem dla tego wariantu pomiaru składowych ($\text{Im}Y_X$, $\text{tg}\delta_X$) należy dokonać wyboru następujących par: (p_X , q_N) i (p_N , q_X), przy czym wtedy zgodnie z relacją (9): $p_X \geq p_{X\min}$ i $q_X \geq q_{X\min}$.

Tabela 2

Wartości kątów zbieżności γ dla dwóch wariantów pomiaru składowych ($\text{Re}Y_X$, $\text{Im}Y_X$) oraz ($\text{Im}Y_X$, $\text{tg}\delta_X$) badanej admitancji dielektryka

Składowe Y_X	Blok H_X		Blok H_N		Blok Y_N		Kąt zbieżności γ
	Re H_X	Im H_X	Re H_N	Im H_N	Re Y_N	Im Y_N	
($\text{Re}Y_X$, $\text{Im}Y_X$)	p_X	q_X					$-\frac{\pi}{2}$
			p_N	q_N			$+\frac{\pi}{2}$
					p_Y	q_Y	
($\text{Im}Y_X$, $\text{tg}\delta_X$)	p_X			q_N			$+\frac{\pi}{2} - (\delta_Y - \delta_X) \approx +\frac{\pi}{2}$
		q_X	p_N				$+\frac{\pi}{2} - (\delta_Y + \delta_X) \approx +\frac{\pi}{2}$
	p_X					q_Y	$-(\varphi_N - \delta_X) \approx -\varphi_N$
		q_X			p_Y		$-(\varphi_N + \delta_X) \approx -\varphi_N$
			p_N			q_Y	$\pi - (\varphi_N + \delta_N) \approx \pi - \varphi_N$
				q_N	p_Y		

Ad c) Warunki bezpośredniego odczytu dla omawianego układu komparatora prowadzą do następujących układów równań wzajemnie niezależnych [2]:

– dla pomiaru składowych ($\text{Re}Y_X$, $\text{Im}Y_X$) admitancji Y_X :

$$\left. \begin{matrix} \text{Re}Y_X = k_1(p) \\ \text{Im}Y_X = l_1(q) \end{matrix} \right\} \text{ lub } \left. \begin{matrix} \text{Re}Y_X = k_2(q) \\ \text{Im}Y_X = l_2(p) \end{matrix} \right\}, \quad (10)$$

– dla pomiaru składowych ($\text{Im } Y_X$, $\text{tg}\delta_X$) admitancji Y_X :

$$\left. \begin{array}{l} \text{Im } Y_X = l_2(p) \\ \text{tg } \delta_X = m_1(q) \end{array} \right\} \text{ lub } \left. \begin{array}{l} \text{Im } Y_X = l_1(q) \\ \text{tg } \delta_X = m_2(p) \end{array} \right\} \quad (11)$$

W wyniku przeprowadzonych szczegółowych rozważań dla wszystkich możliwych przypadków rozmieszczenia par (p, q) elementów nastawnych komparatora uzyskano następujące wnioski ogólne dotyczące warunków bezpośredniego odczytu dla układu komparatora z rys. 1 [1, 2]:

- 1) nie jest możliwe spełnienie warunków bezpośredniego odczytu dla obydwu wariantów pomiaru składowych ($\text{Re}Y_X$, $\text{Im}Y_X$) i ($\text{Im}Y_X$, $\text{tg}\delta_X$) badanego dielektryka przy wyborze pary (p_X, q_X) ,
- 2) warunkiem koniecznym bezpośredniego odczytu przy pomiarach składowych ($\text{Re } Y_X$, $\text{Im } Y_X$) mierzonej admitancji Y_X jest umieszczenie obu elementów nastawnych (p, q) w jednym z bloków H_X , H_N lub Y_N (por. schemat komparatora wg rys.1). Natomiast w przypadku pomiaru składowych ($\text{Im } Y_X$, $\text{tg } \delta_X$) – warunkiem koniecznym jest rozmieszczenie par (p, q) elementów nastawnych w różnych blokach, wybranych spośród H_X , H_N i Y_N ,
- 3) warunki bezpośredniego odczytu można zapisać w bardziej ogólnej postaci za pomocą następujących wzorów:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Arg } A = 0 \quad \text{lub} \quad \pm \pi/2 \\ \text{Arg } B = \text{Arg } A \end{array} \right\} \quad (12)$$

lub

$$\left. \begin{array}{l} \text{Arg } A = 0 \quad \text{lub} \quad \pm \pi/2 \\ \text{Arg } B = \text{Arg } A \pm \pi/2 \end{array} \right\} \quad (13)$$

gdzie: $A, B \in \{H_N, H_X, Y_N\}$, a sposób przyporządkowania H_N , H_X i Y_N do wielkości A, B występujących we wzorach (12) i (13) wynika z tabeli 3. Spośród dwóch możliwych do wyboru ogólnych warunków bezpośredniego odczytu wg relacji (12) i (13) – znacznie prostszym w technicznej realizacji wydaje się przyjęcie warunku określonego relacją (12).

Najlepszą techniczną realizacją warunków bezpośredniego odczytu dla układu komparatora wg rys.1 jest zapewnienie warunku określonego relacją (12) dla wielkości $A, B \in \{H_N, H_X, Y_N\}$ występujących odpowiednio w tabeli 3, tzn. dokonanie wyboru par: (p_N, q_N) , (p_Y, q_Y) , (p_N, q_X) , (p_Y, q_X) , (p_N, q_Y) i (p_Y, q_N) .

Ad d) Wybór rodzaju wzorca Y_N (stały lub nastawny) ma podstawowe znaczenie przy ocenie niepewności pomiaru odpowiednich składowych badanego dielektryka. Z tego też względu zastosowanie wzorca stałego ($p_Y = \text{const}$, $q_Y = \text{const}$) powoduje, że wybór przy pomiarach składowych ($\text{Re}Y_X$, $\text{Im}Y_X$) oraz ($\text{Im}Y_X$, $\text{tg}\delta_X$) ograniczony jest odpowiednio do par: (p_X, q_X) i (p_N, q_N) oraz (p_X, q_N) i (p_N, q_X) .

Tabela 3

Wartości współczynników A i B występujących w ogólnych warunkach bezpośredniego odczytu (12) i (13) [2]

(p, q)	(p _N , q _N)	(p _Y , q _Y)	(p _X , q _N)	(p _N , q _X)	(p _X , q _Y)	(p _Y , q _X)	(p _N , q _Y)	(p _Y , q _N)
A	Y _N	H _N	H _X					
B	H _X		Y _N	H _N		H _N		
						Y _N		

4. WNIOSKI

Podsumowując wyniki analizy zbieżności omawianego układu komparatora i uwzględniając wszystkie ograniczenia wyboru optymalnych par (p, q) elementów nastawnych uzyskano następujące wnioski ogólne:

- 1) przy pomiarach składowych (ReY_X, Im Y_X) mierzonej admitancji Y_X konieczne jest umieszczenie obu elementów nastawnych (p, q) w bloku H_N (por. schemat komparatora wg rys. 1), tzn. wybór pary (p_N, q_N), dla której

$$\text{Re}Y_X = p_N \left(\frac{p_X p_Y + q_X q_Y}{p_X^2 + q_X^2} \right) \text{ i } \text{Im}Y_X = q_N \left(\frac{p_X p_Y + q_X q_Y}{p_X^2 + q_X^2} \right),$$

- 2) w przypadku natomiast pomiaru składowych (Im Y_X, tg δ_X) – warunkiem koniecznym jest rozmieszczenie par (p, q) elementów nastawnych w blokach H_X i H_N, tzn. wybór pary (p_N, q_X), gdzie q_X ≥ q_{Xmin}, dla której

$$\text{Im}Y_X = \frac{1}{q_X} (q_Y q_N) \text{ i } \text{tg} \delta_X = p_N \left(\frac{1}{q_N} \right).$$

LITERATURA

1. Guzik J.: Szerokopasmowe układy pomiarowe do badania dielektryków. Rozprawa doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice 1996.
2. Guzik J.: Warunki bezpośredniego odczytu w układzie aktywnego równonapięciowego komparatora przeznaczonego do szerokopasmowych badań dielektryków, ZN Pol. Śl., ser. Elektryka, z. 158, Gliwice 1997.
3. Guzik J.: Ocena zakresu częstotliwości poprawnej pracy aktywnego równonapięciowego komparatora przeznaczonego do szerokopasmowych badań dielektryków, ZN Pol. Śl., ser. Elektryka, z. 158, Gliwice 1997.

4. Guzik J.: Dobór parametrów toru przetwornika I/U przy założonych charakterystykach częstotliwościowych komparatora do szerokopasmowych badań dielektryków, ZN Pol. Śl., ser. Elektryka, z. 162, Gliwice 1998.
5. Guzik J., Szadkowski B.: Analiza czułości aktywnych równonapięciowych komparatorów admittancji przeznaczonych do badań dielektryków w zakresie infraniskich częstotliwości (10^{-3} - 10) Hz, ZN Pol. Śl., ser. Elektryka, z. 156, Gliwice 1996.
6. Rost A.: Messung Dielektrischer Stoffeigenschaften, Vieweg, Braunschweig 1978.
7. Szadkowski B.: Synteza metod pomiaru imittancji, ZN Pol. Śl., ser. Elektryka, z. 93, Gliwice 1984.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Danuta TURZENIECKA

Wpłynęło do Redakcji dnia 25 maja 1999 r.

Abstract

The analytic procedures of determining the convergence of balancing the comparator represented by the angle γ have been presented in this paper. The block diagram of the analysed active, equivoltage comparator circuit used for wide-band investigations of dielectrics has been shown in Fig.1.

Denotations of the symbols used in Fig.1 are as follows:

Y_X, Y_N – measuring and standard admittances,

H_X, H_N – transmittances of the applied current-to-voltage converters,

E_g – supply voltage of the comparator circuit,

I_X, I_N – currents flowing through the admittances Y_X and Y_N , respectively,

U_X, U_N – output signals of the applied current-to-voltage converters compensated in the output converter circuit PW.

The principle of operation of the presented comparator circuit is as follows. The compared admittances Y_X and Y_N represented by the current signals I_X and I_N are converted by the current-to-voltage converters with the transmittances H_X and H_N into the voltage signals U_X and U_N , respectively. For the state of comparison $\Delta U = 0$ the measured dielectric admittance Y_X can be calculated from the following equation (see Eq. (2))

$$Y_X = \frac{H_N}{H_X} Y_N ,$$

where H_X, H_N - transmittances of the used current-to-voltage converters,

Y_X, Y_N - measured and standard admittances, respectively.

The idea of the proposed procedures is based on the convergence angle γ definition (Eq.3) and the solution of (Eq.4) where (p, q) are the setting elements of the blocks H_X , H_N and Y_N (see Fig.1).

When analysing the influence of various factors on the convergence angle γ all the following factors should be taken into consideration:

- distribution of the setting elements (p, q) enabling the balance of the comparator circuit,
- requirements of the maximum sensitivity and the direct reading criteria,
- type of the admittance standard (non - adjustable, adjustable) for the case of measurement of the admittance components $(\text{Re}Y_X, \text{Im}Y_X)$ and $(\text{Im}Y_X, \text{tg}\delta_X)$ of the investigated dielectrics, respectively.

The best technical distribution of the setting elements (p, q) is when the setting elements (p, q) appear in:

- the block H_N (see Fig. 1), e.g. $(p, q) \equiv (p_N, q_N)$, - for measurement of the admittance components $(\text{Re}Y_X, \text{Im}Y_X)$,
- the blocks H_X and H_N (see Fig. 1), e.g. $(p, q) \equiv (p_N, q_X)$, - for measurement of the admittance components $(\text{Im}Y_X, \text{tg}\delta_X)$.