

Janusz GUZIK
Brunon SZADKOWSKI

ANALIZA BŁĘDU POMIARU ADMITANCJI W UKŁADZIE AKTYWNEGO, RÓWNONAPIĘCIOWEGO KOMPARATORA PRZEZNACZONEGO DO SZEROKOPASMOWYCH BADAŃ DIELEKTRYKÓW

Streszczenie. Przeanalizowano wpływ poszczególnych parametrów układu na błąd pomiaru admitancji w układzie szerokopasmowego komparatora dielektryków, pracującego np. w zakresie od 10^{-3} do 10^6 Hz o strukturze zaproponowanej w pracy [1]. Wskazano sposoby minimalizacji błędu pomiaru admitancji oraz zaproponowano procedurę wzorcowania układu komparatora.

ANALYSIS OF THE ADMITTANCE MEASURING ERROR IN THE ACTIVE, EQUIVOLTAGE COMPARATOR CIRCUIT USED FOR WIDE-BAND INVESTIGATIONS OF DIELECTRICS

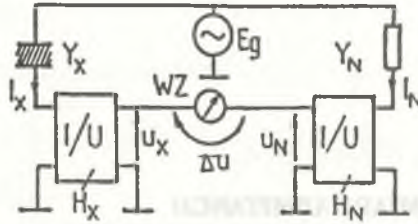
Summary. Influence of individual circuit parameters on the admittance measuring error of the wide-band (e.g. from 10^{-3} Hz to 10^6 Hz) dielectric comparator circuit has been analysed in the paper. The comparator circuit structure is based on that one suggested and described in the paper [1]. Ways of the admittance measuring error minimalization have been given. Procedure of comparator circuit calibration has been presented as well.

1. WPROWADZENIE

Szerokopasmowe badania dielektryków pozwalają z reguły na pełniejszą ocenę stanu badanego dielektryka niż występuje to w przypadku badań przeprowadzonych przy jednej częstotliwości (np. 50 lub 1000 Hz) [6].

Z przeprowadzonego przeglądu literatury dotyczącej klasy komparatorów (np. [1, 2]) wynika, że najodpowiedniejszą klasą układów do szerokopasmowych badań dielektryków w zakresie (10^{-3} - 10^6) Hz jest klasa aktywnych, równonapięciowych komparatorów admitancji [1]. Schemat

ideowy ogólny układ takiego komparatora (z kompensacją napięć U_X i U_N) zamieszczono na rys.1 [1].



Rys.1. Schemat ideowy ogólnego układu komparatora admittance 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

Równanie przetwarzania idealnego układu komparatora jest następujące [1]

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

a stąd w stanie komparacji ($\Delta U = 0$)

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

gdzie:

ΔU — sygnał wyjściowy komparatora,

WZ — wskaźnik zera,

E_g — źródło napięcia zasilającego układ komparatora,

U_X, U_N — sygnały napięciowe podlegające kompensacji w obwodzie wskaźnika zera,

Y_X, Y_N — admittance badanego dielektryka i zastosowanego wzorca,

H_X, H_N — transmittancje zastosowanych przetworników I/U o równaniach przetwarzania:

$$U_X = I_X H_X \text{ i } U_N = I_N H_N.$$

W rzeczywistym układzie komparatora obowiązuje natomiast zależność

$$\Delta U' = E_g (Y_X H_X - Y_N H_N) \mp \delta_U, \quad (3)$$

gdzie: δ_U — wartość sygnału wyjściowego komparatora reprezentująca błąd komparacji (odniesiony do obwodu wskaźnika zera WZ).

W stanie komparacji ($\Delta U = 0$)

$$Y'_X = \frac{H_N}{H_X} Y_N \pm \frac{\delta_U}{E_g H_X}, \quad (4)$$

przez co pomiar admittancji Y_X badanego dielektryka obarczony jest całkowitym błędem o wartości równej

$$\delta_{YX}^0 = \pm \frac{Y'_X - Y_X}{Y_X} = \pm \frac{\delta_U}{E_g Y_N H_N}. \quad (5)$$

Całkowity błąd pomiaru admittancji δ_{YX}^0 można określić sumą następujących składników

$$\delta_{YX}^0 = (\delta_{YX}^0)_{IU} + (\delta_{YX}^0)_{YN} + (\delta_{YX}^0)_{WZ} + (\delta_{YX}^0)_{Eg}, \quad (5a)$$

gdzie:

- $(\delta_{YX}^0)_{IU}$ — błąd pomiaru admittancji Y_X uwzględniający wpływ parametrów zastosowanych przetworników I/U,
- $(\delta_{YX}^0)_{YN}$ — błąd pomiaru admittancji Y_X uwzględniający wpływ parametrów zastosowanego wzorca admittancji Y_N ,
- $(\delta_{YX}^0)_{WZ}$ — błąd pomiaru admittancji Y_X uwzględniający wpływ parametrów wskaźnika zera WZ,
- $(\delta_{YX}^0)_{Eg}$ — błąd pomiaru admittancji Y_X uwzględniający wpływ parametrów źródła napięcia E_g zasilającego komparator.

W dalszym ciągu przeprowadzono analizę poszczególnych błędów składowych $(\delta_{YX}^0)_{IU}$, $(\delta_{YX}^0)_{YN}$, $(\delta_{YX}^0)_{WZ}$, $(\delta_{YX}^0)_{Eg}$ dla komparatora o schemacie z rys. 1.

2. WPŁYW BŁĘDU δ_{IU}^0 PRZETWORNIKÓW I/U

Zastosowany do rozważań odpowiedni schemat ideowy układu komparatora przedstawiono na rys. 2.

Przez δ_{IU}^X i δ_{IU}^N — oznaczono wypadkowe, sprowadzone do wyjścia przetwornika, bezwzględne błędy przetworników I/U o transmitancjach odpowiednio równych H_X i H_N . Dla stanu komparacji ($\Delta U = 0$) błąd pomiaru admittancji Y_X badanego dielektryka jest określony za pomocą zależności (por. (5))

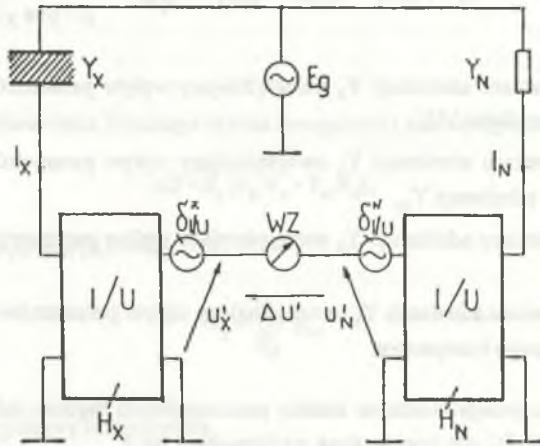
$$(\delta_{YX}^0)_{IU} = \pm \frac{|\delta_{IU}^X| + |\delta_{IU}^N|}{E_g Y_N H_N}. \quad (6)$$

W szczególności dla $|\delta_{IU}^x| = |\delta_{IU}^N| = |\delta_{IU}|$

$$(\delta_{yx}^0)_{IU} = \pm \frac{2 |\delta_{IU}|}{E_x H_N Y_N} \quad (6a)$$

W pracy [3] przeanalizowano w sposób szczegółowy wpływ poszczególnych parametrów przetwornika I/U na częstotliwościową charakterystykę błędu δ_{IU} oraz podano kryteria doboru tych parametrów.

Dla właściwie zaprojektowanego przetwornika [3] wartość błędu $(\delta_{yx}^0)_{IU} = \pm (0,5 \div 1)\%$ tylko w zakresie infraniskich częstotliwości ($10^{-3} - 10$) Hz, przy czym dla $f > 10$ Hz $(\delta_{yx}^0)_{IU} \approx 0$.



Rys.2. Wpływ błędów δ_{IU}^x i δ_{IU}^N zastosowanych rzeczywistych przetworników I/U

Fig.2. Influence of the parameters δ_{IU}^x and δ_{IU}^N of the real I/U converters applied in the comparator

3. WPŁYW BŁĘDU WZORCA δ_{YN} I ADMITANCJI BOCZNIKUJĄCYCH

$Y_{x1}, Y_{x2}, Y_{N1}, Y_{N2}$

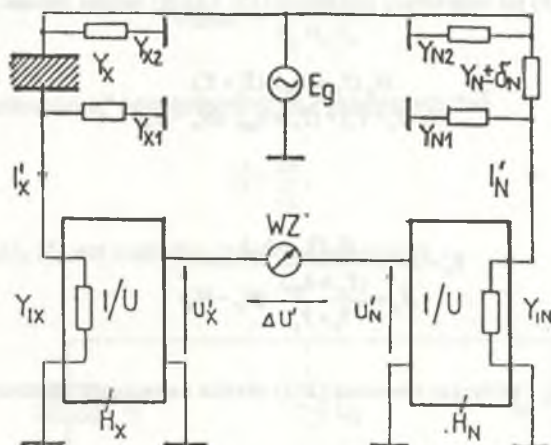
Zgodnie ze schematem wg rys.3 dla układu obowiązuje równanie przetwarzania

$$\Delta U' = H_x I'_x - H_N I'_N \quad (7)$$

gdzie

$$I'_X = E_g \frac{Y_{IX} Y_X}{Y_X + Y_{IX} + Y_{X1}} \quad (7a)$$

$$I'_N = E_g \frac{Y_{IN} (Y_N \pm \delta_{YN})}{Y_N \pm \delta_{YN} + Y_{IN} + Y_{N1}} \quad (7b)$$



Rys.3. Wpływ błędu wzorca δ_{YN} i admittancej bocznikujących Y_{X1} , Y_{X2} , Y_{N1} , Y_{N2} ; Y_{IX} , Y_{IN} — admittancej wejściowe przetworników I/U o transmittancjach (odpowiednio) równych H_X i H_N

Fig.3. Influence of the standard error δ_{YN} and shunt admittances Y_{X1} , Y_{X2} , Y_{N1} , Y_{N2} ; Y_{IX} , Y_{IN} — input admittances of I/U converters with transmittances equal to H_X and H_N , respectively

Wstawiając równania (7a) i (7b) do równania (7) otrzymujemy równanie przetwarzania (7) w następującej postaci

$$\Delta U' = E_g \left[\frac{Y_X H_X Y_{IX}}{Y_X + Y_{IX} + Y_{X1}} - \frac{(Y_N \pm \delta_{YN}) H_N Y_{IN}}{Y_N \pm \delta_{YN} + Y_{IN} + Y_{N1}} \right] \quad (8)$$

a stąd dla $\Delta U' = 0$

$$Y'_X = \frac{H_N (Y_N \pm \delta_{YN}) Y_{IN} (Y_{IX} + Y_{X1})}{H_X Y_{IX} (Y_{IN} + Y_{N1}) + (Y_N \pm \delta_{YN}) (H_X Y_{IX} - H_N Y_{IN})} \quad (9)$$

Przyjmijmy dla uproszczenia rozważań

$$Y_{IX} = Y_{IN} = Y_1, \quad (10)$$

$$Y_{XI} = Y_{NI} = Y_1, \quad (10a)$$

$$Y_{IX} = Y_{IX} = Y_2. \quad (10b)$$

Wówczas równanie (9) po wstawieniu zależności (10) ÷ (10b) można zapisać jako

$$Y'_X = \frac{H_N(Y_N \pm \delta_{YN}) (Y_1 + Y_1)}{H_X(Y_1 + Y_1) + (Y_N \pm \delta_{YN}) (H_X - H_N)} \quad (11)$$

lub

$$Y'_X = \frac{H_N(Y_N \pm \delta_{YN})}{H_X + \frac{(Y_N \pm \delta_{YN})}{Y_1 + Y_1} (H_X - H_N)}. \quad (11a)$$

Na ogół $Y_1 + Y_1 > Y_N$ i wówczas równanie (11a) określa następująca zależność

$$Y'_X = \frac{H_N(Y_N \pm \delta_{YN})}{H_X}. \quad (11b)$$

Ostatecznie wartość szukanego błędu $(\delta_{YX}^0)_{YN}$ wyznaczmy wprost z definicji

$$(\delta_{YX}^0)_{YN} = \frac{Y'_X - Y_X}{Y_X} = \pm \frac{\delta_{YN}}{Y_N} = \pm \delta_{YN}^0. \quad (12)$$

Wartość błędu $(\delta_{YX}^0)_{YN}$ jest zatem wprost wartością względnego błędu δ_{YN}^0 zastosowanego wzorca admitancji, a tym samym jest silnie zależna od częstotliwości f .

4. WPŁYW PARAMETRÓW WSKAŹNIKA ZERA WZ

Podstawowymi parametrami wskaźnika zera WZ mającymi wpływ na błąd $(\delta_{YX}^0)_{WZ}$ rzeczywistego układu komparatora są: admitancja wejściowa Y_{WZ} i próg pobudliwości $\Delta\alpha$ (rys.4).

W pracy [4] przeanalizowano wpływ admittancej wejściowej Y_{WZ} zastosowanego wskaźnika zera WZ. Zapewniając by

$$|Y_{WZ}| \leq \operatorname{Re}(Y_{OX}), \operatorname{Re}(Y_{ON}), \tag{13}$$

co nie jest trudne, zważywszy, że $\operatorname{Re}(Y_{OX}) = \operatorname{Re}(Y_{ON}) = (0,01 + 0,02) S$ [5] — wpływ wskaźnika zera

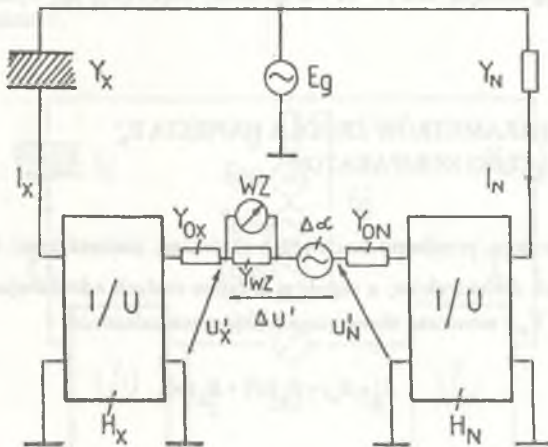
WZ na przebieg błędu $(\delta_{YX}^0)_{WZ}$ jest określony za pomocą wzoru

$$(\delta_{YX}^0)_{WZ} = \pm \frac{\Delta\alpha}{E_g H_N Y_N}. \tag{14}$$

Z kolei błąd pobudliwości δ_p^0 komparatora określa zależność

$$\delta_p^0 = \frac{\Delta\alpha}{S_w}, \tag{15}$$

gdzie: $S_w = E_g Y_X H_X$ [4] jest względną czułością komparatora.



Rys.4. Wpływ parametrów $(\Delta\alpha, Y_{WZ})$ wskaźnika zera WZ na przebieg błędu $(\delta_{YX}^0)_{WZ}$; Y_{OX}, Y_{ON} — admittancej wyjściowe przetworników I/U o transmittancjach odpowiednio równych H_X i H_N

Fig.4. Influence of $(\Delta\alpha, Y_{WZ})$ null indicator WZ parameters on the error response $(\delta_{YX}^0)_{WZ}$; Y_{OX}, Y_{ON} — output admittances of I/U converters with transmittances equal to H_X and H_N , respectively

Wstawiając zależność (15) do wzoru (14) uzyskuje się po przekształceniach

$$(\delta_{rx}^0)_{WZ} = \pm \frac{\Delta\alpha}{E_g H_x Y_x} \frac{H_x Y_x}{H_N Y_N} = \pm \delta_p^0 \frac{H_x Y_N}{H_N Y_x}. \quad (16)$$

Dla stanu komparacji (por. równanie (1)) zachodzi $H_x Y_x = H_N Y_N$, a zatem

$$(\delta_{rx}^0)_{WZ} = \pm \delta_p^0. \quad (17)$$

Z uwagi na kryterium

$$|\delta_p^0| \leq 0,1 |\Delta_{rx}^0|, \quad (18)$$

gdzie: $|\Delta_{rx}^0|$ jest założoną niedokładnością wyznaczenia admitancji Y_x w analizowanym układzie komparatora

$$(\delta_{rx}^0)_{WZ} \leq 0,1 |\Delta_{rx}^0|. \quad (19)$$

W praktyce błąd pobudliwości δ_p^0 , a tym samym $(\delta_{rx}^0)_{WZ}$ jest dominujący dla zakresu infraniskich częstotliwości ($f \leq 10$ Hz), gdyż wówczas $Y_x \rightarrow 0$, a zatem zgodnie z równaniem (15), δ_p^0 wykazuje tendencję rosnącą. Dla $f > 10$ Hz do oceny błędu $(\delta_{rx}^0)_{WZ}$ wystarczy posługiwać się równaniem (19).

5. WPLYW PARAMETRÓW ŹRÓDŁA NAPIĘCIA E_g' ZASILAJĄCEGO KOMPARATOR

Układ komparatora, przydatny do dalszych rozważań, zamieszczono na rys. 5.

Przy badaniach dielektryków, z reguły o skrajnie małych admitancjach, na ogół zachodzi warunek $Y_g > Y_x, Y_N$ i wówczas obowiązuje następująca zależność

$$E_g' = E_{g0} + E_g(\omega') + E_g(\omega), \quad (20)$$

gdzie:

E_{g0} — wartość składowej stałej występującej w napięciu E_g' ,

$E_g(\omega')$ — wartość napięcia zasilającego układ komparatora o pulsacjach $\omega' > \omega$,

$E_g(\omega)$ — wartość napięcia zasilającego komparator o pulsacji ω .

Wartość wypadkowego, sprowadzonego do wyjścia przetworników I/U bezwzględnego błędu δ_{Eg} od analizowanych wielkości wpływowych można zapisać w postaci

$$\delta_{Eg} = [E_g'(\omega) - E_g(\omega)] (H_x Y_x - H_N Y_N). \quad (21)$$

a stąd (por. równanie (5))

$$(\delta_{YX}^0)_{E_g} = \pm \frac{\delta_{E_g}}{E_0 Y_N H_N} \quad (22)$$

Dla stanu bliskiego stanowi komparacji $H_X Y_X - H_N Y_N = 0$ i wtedy wartość błęd $\delta_{E_g} = 0$, a co za tym idzie, $(\delta_{YX}^0)_{E_g} = 0$. W praktyce wartość błęd $(\delta_{YX}^0)_{E_g}$ zaczyna dominować w zakresie infranickich częstotliwości ($10^{-3} - 10$) Hz. Składowa stała E_{g0} powoduje nasycenie zastosowanych w przetwornikach I/U wzmacniaczy operacyjnych, będących w rzeczywistości układami typu całkującego [3, 5, 7], co powoduje konieczność zastosowania odpowiednich układów eliminujących. Z drugiej strony zasilanie układu komparatora napięciem $E_g(\omega')$, $\omega' > \omega$ powoduje powstanie na wyjściu zastosowanych przetworników I/U dodatkowych składowych $U_X(\omega')$ i $U_N(\omega')$:

$$U'_X = U_{X0} t + U_X(\omega) + U_N(\omega'), \quad (23)$$

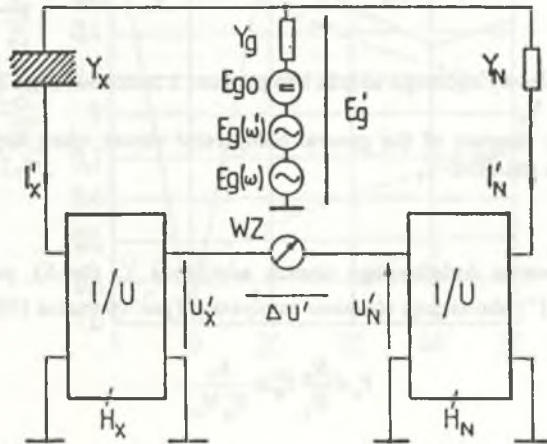
i

$$U'_N = U_{N0} t + U_N(\omega) + U_N(\omega'), \quad (24)$$

gdzie:

U_{X0}, U_{N0} — odpowiedź przetworników I/U na składową stałą E_{g0} napięcia zasilającego komparator,

t — czas.

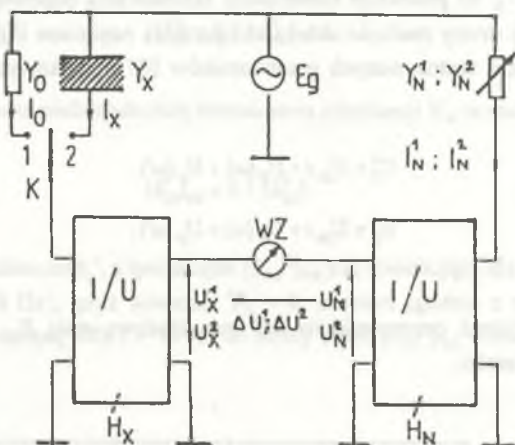


Rys.5. Wpływ parametrów ($Y_g, E_{g0}, E_g(\omega')$), $E_g(\omega)$ źródła napięcia E_g' zasilającego komparator; $\omega' > \omega$

Fig.5. Influence of the parameters ($Y_g, E_{g0}, E_g(\omega')$), $E_g(\omega)$ of the voltage source E_g' supplying the comparator

Eliminacja składowych $U_X(\omega)$ i $U_N(\omega)$ sygnałów U_X' i U_N' prowadzi do konieczności zastosowania odpowiednio selektywnych wskaźników zera WZ, co nie jest trudne dla $f > 10$ Hz. W zakresie infraniskich częstotliwości można wykorzystać wskaźnik zera WZ z zastosowaniem przetwornika typu ilorazowego [8].

6. SPOSÓB WZORCOWANIA KOMPARATORA



Rys.6. Schemat ideowy ogólnego układu komparatora z zastosowaniem dodatkowego wzorca admittancji Y_0

Fig.6. Schematic diagram of the general comparator circuit when applying the additional admittance standard Y_0

Przy zastosowaniu dodatkowego wzorca admittancji Y_0 (rys.6), podczas wzorcowania (klucz K w poz. „1”) obowiązuje równanie komparacji (por. równanie (4))

$$Y_0 = \frac{H_N}{H_X} Y_N^1 \pm \frac{\delta_U}{E_g H_X}, \quad (25)$$

natomiast podczas pomiaru (klucz K w poz. „2”)

$$Y_X = \frac{H_N}{H_X} Y_N^2 \pm \frac{\delta_U}{E_g H_X}, \quad (26)$$

gdzie:

Y_0 — admitancja dodatkowego wzorca umieszczanego w torze wejściowym przetwornika H_X ,

Y_N^1, Y_N^2 — nastawy wzorca admitancji Y_N podczas wzorcowania (Y_N^1) i pomiaru (Y_N^2),

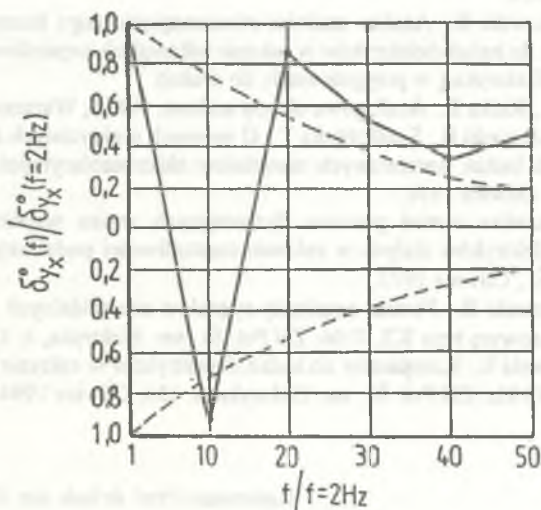
δ_U — wartość sygnału wyjściowego komparatora reprezentująca błąd komparatora.

Całkowity błąd pomiaru admitancji δ_{YX}^0 można wówczas wyznaczyć na podstawie równania (5)

$$\delta_{YX}^0 = \pm \frac{\delta_U}{E_\epsilon Y_N^2 H_N} = \pm \left(Y_0 - \frac{H_N}{H_X} Y_N^1 \right) \frac{H_X}{H_N Y_N^2} \quad (27)$$

7. WYNIKI BADAŃ I WNIOSKI KOŃCOWE

Dla zbudowanego modelu komparatora [9] uzyskano częstotliwościową charakterystykę unormowanego błędów δ_{YX}^0 jak na rys.7.



Rys.7. Unormowana częstotliwościowa charakterystyka błędów pomiaru admitancji dielektryka dla zbudowanego modelu komparatora

Fig.7. Normalized frequency characteristic of the admittance measuring error for the constructed comparator model

Linia przerywaną (rys.7) zaznaczono teoretyczną granicę obszaru możliwości wystąpienia błędu δ_{yx}^0 obliczoną dla konkretnych parametrów komparatora [9]. Stwierdzono zmniejszanie się wartości błędu δ_{yx}^0 pomiaru admitancji w miarę wzrostu częstotliwości f , co jest zgodne z wynikami przedstawionych wcześniej analiz poszczególnych składowych błędu δ_{yx}^0 . Zaproponowano procedurę wzorcowania komparatora pozwalającą na ocenę błędu pomiaru admitancji δ_{yx}^0 oraz wskazano sposoby minimalizacji poszczególnych składowych tego błędu. Prace nad udoskonaleniem zbudowanego modelu komparatora będą dalej kontynuowane.

LITERATURA

1. Guzik J., Szadkowski B.: Analiza aktywnych, równonapięciowych komparatorów admitancji z punktu widzenia ich przydatności do szerokopasmowych badań dielektryków. ZN Pol. Śl., ser. Elektryka, z. 144, Gliwice 1995.
2. Guzik J., Szadkowski B.: Układy pomiarowe do badania dielektryków prądem przemiennym o infraniskiej częstotliwości. ZN Pol. Śl., ser. Elektryka, z.144, Gliwice 1995.
3. Guzik J., Szadkowski B.: Analiza błędów konwertera prąd-napięcie przy przetwarzaniu skrajnie małych prądów o infraniskiej częstotliwości (10^{-3} - 10) Hz. ZN Pol. Śl., ser. Elektryka, z.108, Gliwice 1989.
4. Guzik J., Szadkowski B.: Analiza czułości równonapięciowego komparatora admitancji z przeznaczeniem do badań dielektryków w zakresie infraniskich częstotliwości (10^{-3} - 10) Hz. ZN Pol. Śl., ser. Elektryka (w przygotowaniu do druku).
5. Nadachowski M., Kulka Z.: Analogowe układy scalone. WKiŁ, Warszawa 1983.
6. Pluciński M., Szadkowski B., Szadkowska T.: O pewnych praktycznych aspektach niskoczęstotliwościowych badań warstwowych materiałów elektroizolacyjnych. ZN Pol. Śl., ser. Elektryka, z. 27, Gliwice 1970.
7. Zieleźnik L.: Analiza metod pomiaru dyspersyjnych zmian współczynnika stratności i pojemności dielektryków stałych w zakresie częstotliwości podakustycznych. Rozprawa doktorska, Pol. Śl., Gliwice 1977.
8. Guzik J., Szadkowski B.: Pomiar amplitudy sygnałów sinusoidalnych w układzie z przetwornikiem ilorazowym typu ICL 7106. ZN Pol. Śl., ser. Elektryka, z. 136, Gliwice 1994.
9. Guzik J., Szadkowski B.: Komparator do badań dielektryków w zakresie infraniskich częstotliwości (10^{-3} - 10) Hz. ZN Pol. Śl., ser. Elektryka, z. 136, Gliwice 1994.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Zygmunt Kuśmierek

Wpłynęło do Redakcji dnia 15 lutego 1996 r.

Abstract

In the paper the review of parameter influences on the admittance measuring error in the wide-band ($10^3 - 10^6$) Hz comparator circuit has been presented. General classification of the influence parameters is as follows:

- parameters of the real I/U converters (errors $\delta_{I/U}^{ax}$ and $\delta_{I/U}^{ay}$),
- standard admittance error δ_{YN} and shunt admittances ($Y_{X1}, Y_{X2}, Y_{N1}, Y_{N2}$),
- null indicator WZ parameters ($\Delta\alpha, Y_{WZ}$),
- voltage source E_s^* parameters $E_{g0}, E_g(\omega'), E_g(\omega)$.

The proposed error analysis has been made basing on the adequate real comparator circuits (see Fig.2 ÷ Fig.6). The calibration procedure, chosen plots of the comparator circuit error characteristic, and error minimalization ways, have been also presented.