1996 Nr kol, 1329

Janusz GUZIK Brunon SZADKOWSKI

ANALIZA CZUŁOŚCI AKTYWNYCH, RÓWNONAPIĘCIOWYCH KOMPARATORÓW ADMITANCJI PRZEZNACZONYCH DO BADAŃ DIELEKTRYKÓW W ZAKRESIE INFRANISKICH CZĘSTOTLIWOŚCI (10³ - 10) Hz

Streszczenie. Przedstawiona analiza obejmuje rozważenie wpływów poszczególnych parametrów wymienionych w tytule komparatorów na ich czułość. Określono kryteria doboru tych parametrów w celu osiagnięcia zadowalającej czułości w założonym zakresie częstotliwości (10⁻³ - 10) Hz.

SENSITIVITY ANALYSIS OF ACTIVE, EQUIVOLTAGE ADMITTANCE COMPARATORS USED FOR DIELECTRIC INVESTIGATIONS IN ULTRA-LOW FREQUENCY RANGE (10³ - 10) Hz

Summary. Analysis presented in the paper deals with influence of the indyvidual parameters of active, equivoltage admittance comparators on sensivity of these comparators. Criteria of selection of the parameters to obtain sufficient sensitivity of comparators in the assumed frequency range $(10^{-3} - 10)$ Hz have been determined.

Infraniskoczęstotliwościowe badania dielektryków, prowadzone w zakresie częstotliwości od 10⁻³ do 10 Hz, stwarzają możliwości ujawnienia makroskopowych zmian struktury dielektryka spowodowanych różnorodnymi czynnikami fizycznymi (np. temperaturą, zawilgoceniem) ze znacznie większą czułością niż w innych zakresach częstotliwości [1, 2, 3]. W pracy [4] przeanalizowano typowe rozwiązania układów pomiarowych do badania dielektryków prądem przemiennym o infraniskiej częstotliwości. Wynikiem tej analizy było wskazanie pewnej klasy aktywnych, równonapięciowych komparatorów admitancji — jako klasy układów najlepiej nadających się do badań dielektryków w zakresie infraniskich częstotliwości (10⁻³ - 10) Hz. Ogólny schemat wskazanej klasy komparatorów przedstawiono na rys. 1.



- Rys.1. Ogólny schemat aktywnych, równonapięciowych komparatorów admitancji przeznaczonych do badań dielektryków
- Fig.1. General diagram of active, equivoltage admittance comparators used for dielectric investigations

Oznaczenia przyjęte na rys. 1 są następujące:

- Y_x admitancja badanego dielektryka,
- Y_N admitancja zastosowanego wzorca,
- I/W przetwornik sygnału prądowego I na sygnał wyjściowy W (prądowy lub napięciowy), przy czym: $w_x = I_x H_x$ i $w_y = I_y H_y$,
- H_x, H_N transmitancje zastosowanych przetworników I/W w torach prądów I_x i I_N płynących przez komparowane admitancje Y_x i Y_N,

 $\Delta w = w_x - w_n$ - sygnał nierównowagi komparatora,

- E. źródło napięcia zasilającego komparator,
- WZ wskaźnik zera.

Równanie przetwarzania układu z rys.1 jest określone w ogólnym przypadku zależnością

$$\Delta w = w_{x} - w_{y} = E_{a} (Y_{x} H_{x} - Y_{y} H_{y}), \qquad (1)$$

natomiast czułość względną S, przedstawionego układu wyznaczamy korzystając z definicji

$$S_{w} = T_{x} \frac{\partial \Delta w}{\partial T_{x}}$$
(2)

Po obliczeniu pochodnej $\frac{\partial \Delta w}{\partial T_x}$ z równania (1), równanie (2) przyjmuje postać

$$S_{w} = Y_{X}E_{g}H_{X}.$$
 (2a)

W dalszym ciągu przedstawiona zostanie analiza czułości omawianych komparatorów przy uwzględnieniu różnych wielkości występujących w układach rzeczywistych — jak to pokazano na rys.2.



- Rys.2. Schemat ideowy rzeczywistego, aktywnego, równonapięciowego komparatora admitancji dielektryków z kompensacją napięć w_x' i w_n'
- Fig.2. Schematic diagram of the active, equivoltage admittance comparator with compensation of voltages w_x and w_y

Symbole przyjęte na rys.2 oznaczają:

- $w_x', w_{N'}$ sygnały wyjściowe rzeczywistych przetworników I/w umieszczonych w torach prądów I'_, i I'_,
- H_x', H_N' transmitancje rzeczywistych przetworników I/w umieszczonych w torach prądów I_x' i I_N',
- $Y_{X1}, Y_{X2}, Y_{N1}, Y_{N2}$ admitancje upływnościowe, bocznikujące (odpowiednio) obiekt pomiaru (dielektryk) i zastosowany wzorzec admitancji Y_N ,
- $Y_{DX}, Y_{DN}, Y_{0X}, Y_{0N}$ odpowiednio: admitancje wejściowe i wyjściowe zastosowanych przetworników I/w,

 $E_{g}' - \acute{z}$ ródło napięcia zasilającego komparator o admitancji wewnętrznej Y_{g} ,

Ywz – admitancja wejściowa zastosowanego wskaźnika zera WZ.

Dla układu z rys.2 równanie przetwarzania (1) przyjmuje postać

$$\Delta w' = w_{\chi}' - w_{N}' = \frac{H_{\chi}' I_{\chi}' - H_{N}' I_{N}'}{1 + Y_{ver} \left(\frac{1}{Y_{ox}} + \frac{1}{Y_{oN}}\right)},$$
(3)

przy czym

$$I'_{X} = E'_{z} \frac{Y_{X}Y_{X}}{Y_{X} + Y_{X} + Y_{X}}, \qquad (4)$$

$$I'_{M} = E'_{g} \frac{Y_{M} Y_{IN}}{Y_{g} + Y_{IN} + Y_{NI}}.$$
 (5)

Podstawiając równania (4) i (5) do równania (3) otrzymujemy

$$\Delta w' = E_g' \left(Y_X H_X' \frac{Y_{IX}}{Y_X + Y_{IX} + Y_{XI}} - Y_N H_N' \frac{Y_{IN}}{Y_N + Y_{IN} + Y_{NI}} \right) \left| \frac{1}{1 + Y_{\omega} \left(\frac{1}{Y_{\omega x}} + \frac{1}{Y_{\omega N}} \right)} \right|. \tag{6}$$

Stąd względna czułość rzeczywistego układu komparatora S_w' obliczona na podstawie równania (2) przyjmuje postać

$$S'_{w} = Y_{\chi} E'_{g} H'_{\chi} \frac{1}{1 + Y_{ug}} \left(\frac{1}{Y_{u\chi}} + \frac{1}{Y_{u\chi}} \right) \cdot \frac{Y_{I\chi} (Y_{I\chi} + Y_{\chi I})}{(Y_{\chi} + Y_{\chi I} + Y_{\chi I})^{2}}.$$
 (7)

Dla przejrzystości dalszych rozważań korzystne jest wprowadzenie pewnego współczynnika K, zdefiniowanego następująco

$$K = \frac{S'_{\varphi}}{S_{\varphi}}.$$
 (8)

Współczynnik K określa zmianę względnej czułości rzeczywistego układu komparatora S_w' (z rys.2) w porównaniu do czułości S_w układu wyidealizowanego (z rys.1). Wartość współczynnika K możemy obliczyć podstawiając równania (2a) i (7) do równania (8)

$$K = \frac{E_{g}^{\prime}}{E_{g}} \frac{1}{1 + \Upsilon_{wr}} \left(\frac{1}{\Upsilon_{ox}} + \frac{1}{\Upsilon_{ow}}\right) - \frac{\Upsilon_{II} \left(\Upsilon_{II} + \Upsilon_{II}\right)}{\left(\Upsilon_{II} + \Upsilon_{II} + \Upsilon_{II}\right)^{2}} \cdot \frac{H_{X}^{\prime}}{H_{X}}.$$
(8a)

Zauważmy, że wartość współczynnika K jest zależna od:

- a) parametrów źródła napięcia zasilającego komparator (tzn. siły elektromotorycznej E_g, admitancji wewnętrznej Y_g i pulsacji ω),
- b) parametrów obwodu wskaźnika zera WZ oraz obwodów wyjściowych przetworników I/W (tzn. admitancji Y_{w2}, Y_{0X} i Y_{0N}),
- c) admitancji Y_x (badanego dielektryka i admitancji upływnościowej Y_{x1} oraz admitancji wejściowej Y_{IX} przetwornika I/W,
- d) transmitancji H_x' i H_x rzeczywistego i wyidealizowanego przetwornika I/W umieszczonego w torze prądu (odpowiednio) — I_x' i I_x.

ad a), b). W praktyce na ogół spełnione są następujące relacje (por. rys.2):

$$|Y_{g}| > |Y_{\chi_{2}}|, |Y_{\chi_{2}}|$$
 (9)

$$|Y_{ws}| < |Y_{0x}|, |Y_{0y}|. \tag{10}$$

Uwzględnienie relacji (9) i (10) w analizowanym równaniu (8a) prowadzi do uproszczonej jego postaci

$$K = \frac{Y_{IX} (U_{IX} + Y_{XI})}{(Y_X + Y_{IY} + Y_{YI})^2} \cdot \frac{H'_X}{H_X}.$$
 (11)

Oznacza to praktycznie wyeliminowanie wpływu parametrów źródła zasilającego komparator (tzn. admitancji Y_g i sem E_g) i parametrów obwodu wskaźnika zera WZ (tzn. admitancji Y_{wz} Y_{0X} i Y_{0N}) pod warunkiem zachowania relacji (9) i (10). Wpływ pulsacji ω źródła zasilającego komparator zostanie uwzględniony później, przy omawianiu wpływów parametrów wg pkt. c) i d).

ad c). Przy analizie wpływu admitancji upływnościowej Y_{X1} , bocznikującej obiekt pomiaru (dielektryk o admitancji Y_x), jak również admitancji wejściowej Y_{1x} zastosowanego przetwornika I/W (por. rys.2) załóżmy dwie graniczne wartości mierzonej admitancji Y_x :

1)
$$Y_x = 0$$

2)
$$Y_x = Y_{x1}$$

Wówczas zakres zmian współczynnika |K| obliczonego według równania (11) dla $\frac{H'_x}{H_x} = 1$

określa relacja

$$\frac{Y_{IX}(Y_{IX} + Y_{IX})}{(Y_{IX} + 2Y_{IX})^2} \leq |K| \leq \frac{Y_{IX}}{|Y_{IX} + Y_{XI}|}.$$
(12)

Przyjmijmy, że warunkiem zadowalającej czułości komparatora w całym analizowanym zakresie infraniskich częstotliwości (10⁻³ - 10) Hz jest spełnienie relacji

$$S_u \ge S_{vmin}$$
, (13)

gdzie: S_{mmin} — zakładana, minimalna wartość czułości względnej komparatora.

Dla rzeczywistego układu komparatora według rys.2 odpowiednia relacja przyjmuje postać

$$S'_{w} = S_{w} |K| \ge S'_{wasta} \tag{13a}$$

lub

$$|K| \ge \frac{S_{\text{min}}}{S_{\text{min}}}.$$
 (13b)

Wówczas na podstawie relacji (12) i (13b) można określić kryterium doboru admitancji Y_{IX} i Y_{X1}

$$\frac{Y_{ZZ}(Y_{ZZ} + Y_{XJ})}{(Y_{ZZ} + 2Y_{XJ})^2} \geq \frac{S_{waite}}{S_w}.$$
(14)

Kryterium doboru (14) powinno uwzględniać wpływ pulsacji ω źródła napięcia zasilającego komparator, przy czym dla $2\pi \cdot 10^{-3} \le \omega \le 2\pi \cdot 10^{1}$ rad/s

$$\left| \frac{Y_{IX}(j\omega) \left[Y_{IX}(j\omega) + Y_{XI}(j\omega)\right]}{\left[Y_{IX}(j\omega) + 2Y_{XI}(j\omega)\right]^2} \right|_{z=2n+10^{-2} \frac{z-z}{z}} \geq \frac{S_{z=2n}}{S_{z}}.$$
 (15)

Obowiązywanie relacji (15) oznacza łatwiejsze uzyskanie zadowalającej czułości dla zakresu pulsacji wyższych od $\omega = 2\pi \cdot 10^{-3} \frac{rad}{s}$, co spowodowane jest wzrostem wartości analizowanych admitancji Y_{DX} (j ω) i Y_{X1} (j ω).

ad d). Przy analizie wpływu transmitancji H_x' rzeczywistego przetwornika I/W (por. rys.2) przyjmiemy do rozważań równanie (11) przy założeniu braku wpływu admitancji Y_{DX} i Y_{X1}. Wówczas dla Y_{DX} > Y_{X1}, Y_x równanie (11) przyjmuje postać

$$K = \frac{H'_X}{H_X}.$$
 (16)

Jeżeli dodatkowo założyć, że moduł transmitancji H_x' rzeczywistego przetwornika I/W opisuje zależność

$$H_{X}^{\prime} = \frac{H_{X}}{\sqrt{1 + (\frac{\omega}{\omega_{0X}})^{2}}}$$
(17)

gdzie: ω_{0X} — pulsacja dominującego bieguna transmitancji H_X', to relację (13b) można zapisać w postaci

$$\left[1 + \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{tar}}}\right)\right]^{\frac{1}{2}} \geq \frac{S_{\text{winder}}}{S_{\text{w}}}.$$
(18)

Zatem maksymalną wartość pulsacji ω_{max} dla której jeszcze jest spełniona relacja (18), można po przekształceniach określić następująco

$$2\pi \cdot 10^{1} \frac{rad}{s} \le \omega_{max} \le \omega_{0x} \sqrt{\left(\frac{S_{w}}{S_{wath}}\right)^{2} - 1} = \omega_{0x} \cdot \left(\frac{S_{w}}{S_{wath}}\right).$$
 (19)

Wykorzystując do szczegółowych projektów komparatorów relacje (15) i (19), spełnione jednocześnie, można zapewnić uzyskanie zadowalającej czułości w całym zakładanym paśmie infraniskich częstotliwości (10⁻³ - 10) Hz. Celem doświadczalnego sprawdzenia niektórych wyników rozważań zbudowano odpowiedni układ komparatora z aktywnym przetwornikiem I/U, zbudowanym na wzmacniaczu operacyjnym LF 356 [5]. Przykładowo

na rys.3 zamieszczono częstotliwościową charakterystykę zmian współczynnika $K = \frac{S_{a}}{S_{a}}$

dla różnych wartości częstotliwości f, wybranych z górnego podzakresu infraniskich częstotliwości od 2 do 100 Hz. Jako wartość czułości względnej odniesienia S_w przyjęto $S_w \approx S_w'$ (f = 2 Hz).





Stwierdzony doświadczalnie spadek wartości współczynnika K w miarę wzrostu częstotliwości f (pulsacji ω) pozwala stwierdzić, że dominującym parametrem decydującym o czułości komparatora jest odpowiedni dobór wartości pulsacji ω_{0X} , zgodnie z relacją (19). Dla dolnego zakresu infraniskich częstotliwości ($\omega = 2\pi \cdot 10^{-3}$ rad/s) ważniejsze jest jednak kryterium (15) doboru wartości admitancji Y_{DD} Y_{X1} — przy czym obserwowany spadek wartości współczynnika K dopiero dla $\omega > 2\pi \cdot 5$ rad/s (por. rys.3) świadczy o tym, że spełnienie tego kryterium nie jest szczególnie trudne. Wpływ parametrów obwodu wskaźnika zera WZ, jak i źródła napięcia E_g zasilającego komparatora na wartość współczynnika K jest do pominięcia, a zwiększenie czułości S_w drogą zwiększania wartości napięcia E_g (por. równanie (2a)) jest mniej efektywne niż odpowiedni dobór parametrów transmitancji H_x' (ω_{0x}).

LITERATURA

- Pluciński M., Szadkowska T., Szadkowski B.: O pewnych praktycznych aspektach mikroczęstotliwościowych badań warstwowych materiałów elektroizolacyjnych. ZN Pol. Śl., ser. Elektryka, z. 27, Gliwice 1970, s. 95 - 111.
- Bak W. i inni: Low Frequency Admittance Measurements of Polycrystalline Sodium Niobate. Acta Univesitatis Wratislaviensis, Nº 1084, Wrocław 1988, pp. 177-184.
- 3. Janik M. (red.): Fizyka chemiczna. PWN, Warszawa 1989.
- Guzik J., Szadkowski B.: Układy pomiarowe do badania dielektryków prądem przemiennym o infraniskiej częstotliwości. ZN Pol. Śl., ser. Elektryka, z. 144, Gliwice 1995, s. 25 - 36.

 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, s. 41 - 51.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Zygmunt Kuśmierek

Wpłynęło do Redakcji dnia 15 lutego 1996 r.

Abstract

The paper presents the sensitivity analysis of active, equivoltage admittance comparators shown in Fig.1. The adequate detailed comparator circuit (with compensation of voltages w_X' and w_N'), suitable for sensitivity calculations, is shown in Fig.2.

Factor K whose definition is as follows

$$K = \frac{S'_{w}}{S_{w}},$$

where: S.,' - sensitivity of the real comparator circuit,

S_w — sensitivity of the ideal comparator circuit,

has been introducted in the paper. In general case it is described by Eq.(8a).

The relation determing sensitivity in the ultra-low frequency range $(10^{-3} \div 10)$ Hz has been given. This relation has been obtained basing on the criterion of selection for sufficient sensitivity of comparators (see Egs. (13a), (13b)).