

Janusz GUZIK

OCENA ZAKRESU CZĘSTOTLIWOŚCI POPRAWNEJ PRACY AKTYWNEGO RÓWNONAPIĘCIOWEGO KOMPARATORA PRZEZNACZONEGO DO SZEROKOPASMOWYCH BADAŃ DIELEKTRYKÓW

Streszczenie. W artykule przeanalizowano wpływ poszczególnych parametrów układu na zakres częstotliwości poprawnej pracy aktywnego, równonapięciowego komparatora dielektryków o strukturze zaproponowanej w pracy [1]. Wskazano sposób oceny zakresu częstotliwości zgodny z procedurą samosprawdzania komparatora podaną w pracy [5].

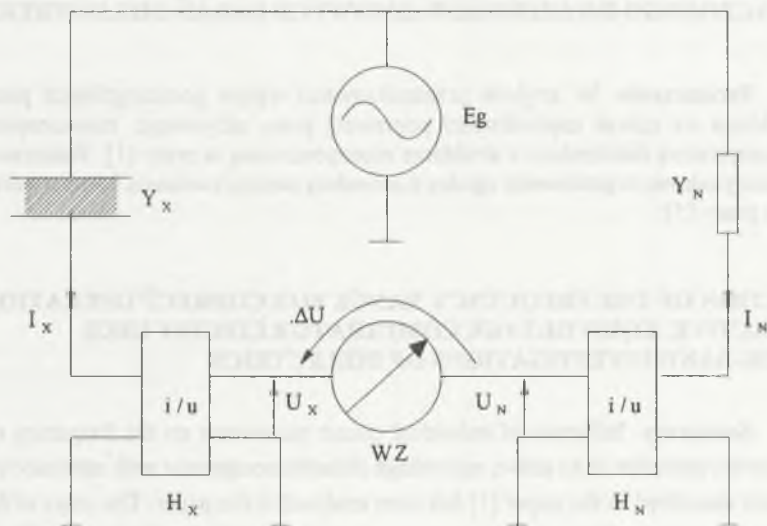
EVALUATION OF THE FREQUENCY RANGE FOR CORRECT OPERATION OF THE ACTIVE, EQUIVOLTAGE COMPARATOR CIRCUIT USED FOR WIDE-BAND INVESTIGATIONS OF DIELECTRICS

Summary. Influence of individual circuit parameters on the frequency range for correct operation of an active, equivoltage dielectric comparator with structure suggested and described in the paper [1] has been analysed in the paper. The ways of frequency range evaluation based on the comparator self-calibration procedure given in the paper [5] has been presented as well.

1. WPROWADZENIE

Rozwój współczesnych technologii wytwarzania dielektryków powoduje szczególne zainteresowanie doskonaleniem stosowanej do ich badań aparatury pomiarowej. Jednym z podstawowych parametrów określających przydatność aparatury do takich badań jest zakres możliwych do zastosowania częstotliwości pomiarowych. Pomiary względnej przenikalności elektrycznej lub współczynnika strat dielektrycznych badanego dielektryka w funkcji częstotliwości umożliwiają pełniejszą ocenę stanu badanego dielektryka w porównaniu z badaniami przeprowadzanymi przy jednej częstotliwości (np. 50 lub 1000 Hz).

Znajduje to również odbicie w aktualnie obowiązujących normach — i tak np. Polska Norma PN-86/E-04403 [3] zaleca do badań stałych materiałów elektroizolacyjnych przyjęcie częstotliwości w zakresie $(15-10^3)$ Hz, natomiast badanie ciekłych materiałów elektroizolacyjnych zgodnie z Polską Normą PN-86/E-04409 [4], powinno odbywać się w zakresie $(50-10^3)$ Hz. Z przeprowadzonego przeglądu literatury dotyczącej klasy komparatorów [1] i wyników zawartych w rozprawie [2] wynika, że najodpowiedniejszą klasą układów do szerokopasmowych badań dielektryków w zakresie od 10^{-3} do 10^6 Hz jest klasa aktywnych, równonapięciowych komparatorów admitancji o schemacie ideowym zamieszczonym na rys. 1.



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

Dla takiego układu równanie przetwarzania jest następujące [1, 2]

$$\Delta U = E_g (Y_x H_x - Y_N H_N), \quad (1)$$

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

$$Y_x = \frac{H_N}{H_x} Y_N, \quad (2)$$

gdzie: ΔU — sygnał wyjściowy komparatora,
 WZ — wskaźnik zera typu amplitudowego,
 E_g — źródło napięcia zasilającego układ komparatora,
 U_x, U_N — sygnały napięciowe podlegające kompensacji w obwodzie wskaźnika zera,
 Y_x, Y_N — admitancje badanego dielektryka i zastosowanego wzorca,
 H_x, H_N — transmitancje zastosowanych przetworników I/U o równaniach dających się sprowadzić do postaci:

$$H_x = H_x(j\omega) = \frac{H_{OX}}{1 + j \left(\frac{\omega}{\omega_{OX}} \right)}, \quad (3)$$

$$H_N = H_N(j\omega) = \frac{H_{ON}}{1 + j \left(\frac{\omega}{\omega_{ON}} \right)}, \quad (4)$$

przy czym: H_{OX}, H_{ON} — stałoprądowe transmitancje przetworników I/U,
 ω_{OX}, ω_{ON} — pulsacje dominującego bieguna transmitancji H_x i H_N opisujących właściwości częstotliwościowe analizowanych przetworników I/U,
 ω — pulsacja źródła napięcia zasilającego układ komparatora.

2. OCENA ZAKRESU CZĘSTOTLIWOŚCI POPRAWNEJ PRACY KOMPARATORA W UKŁADZIE SAMOSPRAWDZENIA

Procedura samosprawdzenia rzeczywistego komparatora admitancji [5] polega na analizie zmian sygnału wyjściowego $\Delta U'$ komparatora w sytuacji, gdy prądy I_x, I_N płynące w obwodach wejściowych przetworników H_x, H_N (por. rys. 1) są równe I_o , przy czym:

$$I_o = E_g G_o, \quad (5)$$

gdzie: G_o — wzorce konduktancji o tej samej wartości włączone w miejsce admitancji Y_x i Y_N na schemacie wg rys. 1.

Równanie przetwarzania (1) przybiera wówczas postać

$$\Delta U' = E_g G_o (H_x - H_N). \quad (6)$$

Wartość sygnału wyjściowego $\Delta U'$ rzeczywistego komparatora pracującego w układzie samosprawdzenia ($Y_X = Y_N = G_o$) reprezentuje tutaj błąd bezwzględny porównania odniesiony do obwodu wskaźnika zera WZ [6]. Wartość tego błędu jest, oczywiście, zależna od pulsacji ω źródła napięcia E_g zasilającego układ komparatora, tzn.

$$\Delta U'(j\omega) = E_g(j\omega) G_o [H_X(j\omega) - H_N(j\omega)]. \quad (7)$$

Ocenę zakresu częstotliwości poprawnej pracy komparatora można przeprowadzić analizując transmitancję $F(j\omega)$ zdefiniowaną następująco

$$F(j\omega)^{\text{def}} = \frac{\Delta U'(j\omega)}{E_g(j\omega) G_o} = H_X(j\omega) - H_N(j\omega). \quad (8)$$

Dla transmitancji $H_X(j\omega)$ i $H_N(j\omega)$ zastosowanych przetworników I/U opisanych równaniami postaci (3) i (4) transmitancję $F(j\omega)$ określa zależność

$$F(j\omega) = \frac{H_{OX}}{1 + j \left(\frac{\omega}{\omega_{OX}} \right)} - \frac{H_{ON}}{1 + j \left(\frac{\omega}{\omega_{ON}} \right)} = (H_{OX} - H_{ON}) \frac{1 + j\omega (H_{OX} - H_{ON})^{-1} \left(\frac{H_{OX}}{\omega_{ON}} - \frac{H_{ON}}{\omega_{OX}} \right)}{\left| 1 + j \left(\frac{\omega}{\omega_{OX}} \right) \right|^2 \left| 1 + j \left(\frac{\omega}{\omega_{ON}} \right) \right|^2}. \quad (9)$$

Charakterystyka amplitudowa $A(\omega)$ transmitancji $F(j\omega)$ opisana jest zależnością

$$A(\omega) = |F(j\omega)| = (H_{OX} - H_{ON}) \sqrt{\frac{1 + \omega^2 (H_{OX} - H_{ON})^{-2} \left(\frac{H_{OX}}{\omega_{ON}} - \frac{H_{ON}}{\omega_{OX}} \right)^2}{\left| 1 + j \left(\frac{\omega}{\omega_{OX}} \right) \right|^2 \left| 1 + j \left(\frac{\omega}{\omega_{ON}} \right) \right|^2}}. \quad (10)$$

natomiast charakterystykę fazową wyznacza się z zależności

$$\varphi(\omega) = \text{Arg } F(j\omega) = - \left[\arctg \left(\frac{\omega}{\omega_{OX}} \right) + \arctg \left(\frac{\omega}{\omega_{ON}} \right) - \arctg \left((H_{OX} - H_{ON})^{-1} \left(\frac{H_{OX}}{\omega_{ON}} - \frac{H_{ON}}{\omega_{OX}} \right) \right) \right]. \quad (11)$$

Graniczne wartości amplitudy $A(\omega)$ i fazy $\varphi(\omega)$ dla zmian pulsacji $0 < \omega < \infty$ są przy tym następujące:

$$A(0) = \lim_{\omega \rightarrow 0} A(\omega) = H_{OX} - H_{ON}, \quad (12)$$

$$\varphi(0) = \lim_{\omega \rightarrow 0} \varphi(\omega) = 0,$$

$$A(\infty) = \lim_{\omega \rightarrow \infty} A(\omega) = 0,$$

$$\varphi(\infty) = \lim_{\omega \rightarrow \infty} \varphi(\omega) = -\frac{\pi}{2}. \quad (13)$$

Oznacza to, że dla dolnego zakresu pulsacji ω ($\omega \rightarrow 0$) w opisie transmitancji $F(j\omega) = A(\omega) \exp [j\varphi(\omega)]$ dominuje składnik $A(\omega) \approx H_{OX} - H_{ON}$, natomiast dla górnego zakresu pulsacji ω ($\omega \rightarrow \infty$) — odpowiednio dominuje składnik $\varphi(\omega) \approx -\frac{\pi}{2}$ (rys.2).

Minimalną wartość pulsacji ω_{MIN} wyznaczony z relacji (por. rys.2a)

$$A(\omega_{MIN})^{(10)} = (H_{OX} - H_{ON}) \sqrt{\frac{1 + \omega^2 (H_{OX} - H_{ON})^{-2} \left(\frac{H_{OX}}{\omega_{ON}} - \frac{H_{ON}}{\omega_{OX}} \right)^2}{\left[1 + j \left(\frac{\omega}{\omega_{OX}} \right)^2 \right] \left[1 + j \left(\frac{\omega}{\omega_{ON}} \right)^2 \right]}} = A_{MAX}, \quad (14)$$

natomiast maksymalna wartość pulsacji ω_{MAX} określić można z relacji (por. rys.2b)

$$\varphi(\omega_{MAX})^{(11)} = - \left[\arctg \left(\frac{\omega}{\omega_{OX}} \right) + \arctg \left(\frac{\omega}{\omega_{ON}} \right) - \arctg \left((H_{OX} - H_{ON})^{-1} \left(\frac{H_{OX}}{\omega_{ON}} - \frac{H_{ON}}{\omega_{OX}} \right) \right) \right] = \varphi_{MAX}, \quad (15)$$

gdzie: A_{MAX} , φ_{MAX} — założone, maksymalne wartości amplitudy i fazy transmitancji $F(j\omega)$.

Z uwagi na obowiązujące z reguły nierówności:

$$\left(\frac{\omega_{MIN}}{\omega_{OX}} \right)^2 < 1, \quad (16a)$$

$$\left(\frac{\omega_{MIN}}{\omega_{ON}} \right)^2 < 1, \quad (16b)$$

$$\left(\frac{\omega_{MAX}}{\omega_{OX}} \right)^2 > 1, \quad (16c)$$

$$\left(\frac{\omega_{MAX}}{\omega_{ON}} \right)^2 > 1, \quad (16d)$$

relacje (14) i (15) upraszczają się do następujących postaci:

$$\sqrt{(H_{OX} - H_{ON})^2 + \omega_{MIN}^2 \left(\frac{H_{OX}}{\omega_{ON}} - \frac{H_{ON}}{\omega_{OX}} \right)^2} = A_{MAX}, \quad (17)$$

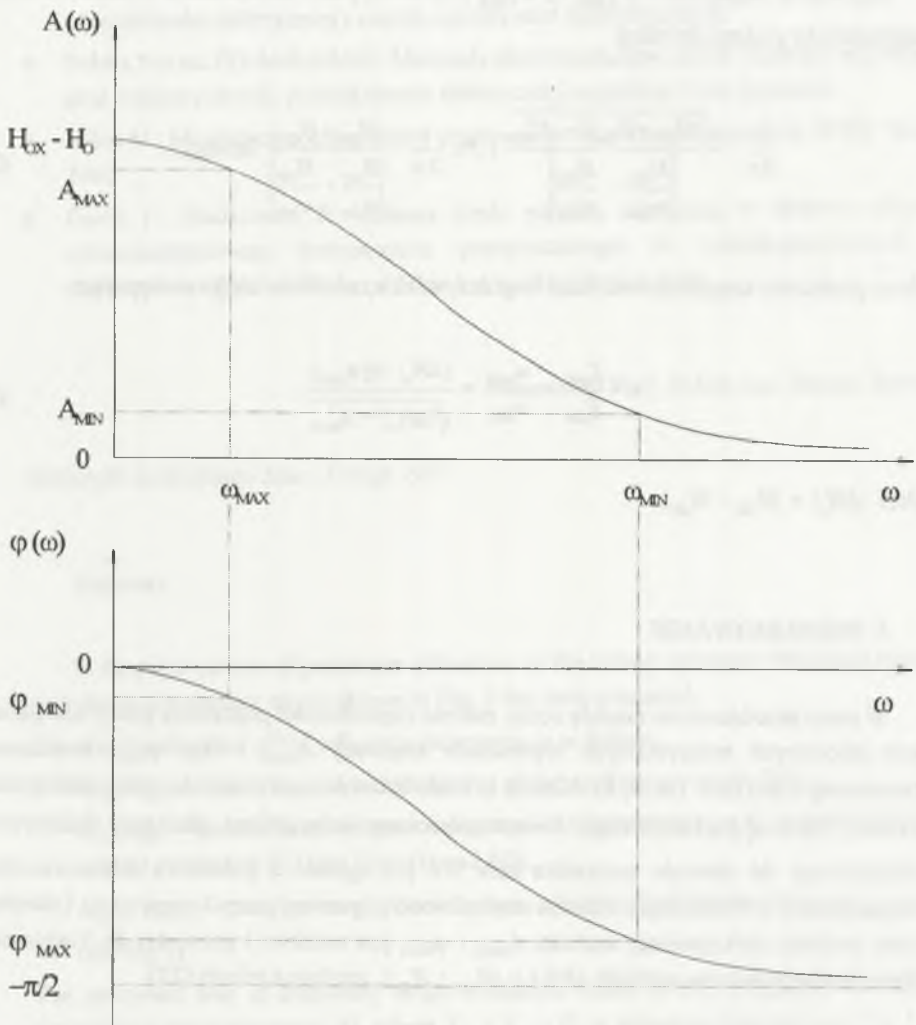
$$\arctg \omega_{MAX} \left(H \frac{X}{\omega_{ON}} - \frac{H_{ON}}{\omega_{OX}} \right) (H_{OX} - H_{ON})^{-1} - \pi = \varphi_{MAX}. \quad (18)$$

Stąd po wykonaniu odpowiednich przekształceń uzyskujemy wzory określające minimalną ω_{MIN} i maksymalną ω_{MAX} wartość pulsacji przy poprawnej pracy komparatora dla założonych wartości amplitudy A_{MAX} i fazy φ_{MAX} transmitancji $F(\omega)$:

$$\omega_{MIN} = \frac{\sqrt{(H_{OX} - H_{ON})^2 - A_{MAX}^2}}{\left| \frac{H_{OX}}{\omega_{ON}} - \frac{H_{ON}}{\omega_{OX}} \right|}, \quad (19)$$

$$\omega_{MAX} = \frac{|H_{OX} - H_{ON}|}{\left| \frac{H_{OX}}{\omega_{ON}} - \frac{H_{ON}}{\omega_{OX}} \right|} \cdot |\operatorname{tg} \varphi_{MAX}|, \quad (20)$$

gdzie: (H_{OX}, ω_{OX}) i (H_{ON}, ω_{ON}) — parametry zastosowanych przetworników I/U (por. równania (3) i (4)).



Rys.2. Amplitudowa (a) i fazowa (b) charakterystyka transmitancji $F(j\omega)$ zdefiniowanej równaniem (8); ω_{MIN} , ω_{MAX} — minimalna i maksymalna pulsacja przy poprawnej pracy komparatora odpowiadającej zmianom $A_{MIN} \leq A(\omega) \leq A_{MAX}$ i $\varphi_{MIN} \leq \varphi(\omega) \leq \varphi_{MAX}$

Fig.2. Amplitude (a) and phase (b) characteristics of the transmittance $F(j\omega)$ defined by the equation (8); ω_{MIN} , ω_{MAX} — minimal and maximal pulsations while correct comparator's operation adequate to changes $A_{MIN} \leq A(\omega) \leq A_{MAX}$ and $\varphi_{MIN} \leq \varphi(\omega) \leq \varphi_{MAX}$

Stąd zakres częstotliwości $f_{MIN} \leq f \leq f_{MAX}$ poprawnej pracy komparatora oszacować można ostatecznie na podstawie relacji

$$\frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\sqrt{(H_{OX} - H_{ON})^2 - A_{MAX}^2}}{\left| \frac{H_{OX}}{\omega_{ON}} - \frac{H_{ON}}{\omega_{OX}} \right|} \leq f \leq \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{|H_{OX} - H_{ON}|}{\left| \frac{H_{OX}}{\omega_{ON}} - \frac{H_{ON}}{\omega_{OX}} \right|} |\operatorname{tg} \varphi_{MAX}|, \quad (21)$$

lub na podstawie znajomości wartości współczynnika κ , zdefiniowanego następująco

$$\kappa = \frac{f_{MAX}}{f_{MIN}} = \frac{\omega_{MAX}}{\omega_{MIN}} = \frac{|\Delta H_o| |\operatorname{tg} \varphi_{MAX}|}{\sqrt{|\Delta H_o|^2 - A_{MAX}^2}}, \quad (22)$$

gdzie $|\Delta H_o| = |H_{OX} - H_{ON}|$.

3. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono metodę oceny zakresu częstotliwości poprawnej pracy komparatora przy założonych maksymalnych wartościach amplitudy A_{MAX} i fazy φ_{MAX} analizowanej transmitancji $F(j\omega)$ (por. rys.2a, b). Metoda ta może być wykorzystywana do oceny maksymalnej wartości błędu $\delta_x^*(j\omega)$ aktywnego, równonapięciowego komparatora admitancji dielektryków, odniesionego do obwodu wskaźnika zera WZ [6] zgodnie z procedurą samosprawdzenia komparatora [5]. Poszerzenie zakresu częstotliwości poprawnej pracy komparatora (określonej przez podanie maksymalnej wartości A_{MAX} i φ_{MAX} jest możliwe i prowadzi do konieczności odpowiedniego doboru wartości $|\Delta H_o| = |H_{OX} - H_{ON}|$, zgodnie z relacją (22).

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.: Szerokopasmowe układy pomiarowe do badania dielektryków. Rozprawa doktorska, Pol. Śl., Gliwice 1996.

3. Polska Norma PN-86/E-04403. Materiały elektroizolacyjne stałe. Metody pomiaru przenikalności elektrycznej i współczynnika strat dielektrycznych.
4. Polska Norma PN-84/E-04409. Materiały elektroizolacyjne ciekłe. Pomiar współczynnika strat dielektrycznych, przenikalności elektrycznej względnej i rezystywności.
5. Miłek M.: Magnetyczne komparatory prądów w pomiarach elektrycznych, WNT, Warszawa 1990.
6. Guzik J., Szadkowski B.: Analiza błędu pomiaru admitancji w układzie aktywnego, równonapięciowego komparatora przeznaczonego do szerokopasmowych badań dielektryków. ZN Pol. Śl., ser. Elektryka, z. 156, Gliwice 1996.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Danuta Turzeniecka

Wpłynęło do Redakcji dnia 15 maja 1997

Abstract

In the paper review of parameter influences on the correct operation frequency range in the wide-band comparator circuit shown in Fig. 1 has been presented.

General classification of the influence parameters is as follows:

- H_{OX}, H_{ON} — direct current transmittances of the applied converters I/U ,
- ω_{OX}, ω_{ON} — pulsations of the predominant poles of transmittances $H_X(j\omega)$ and $H_N(j\omega)$ of the applied converters I/U (see Eqs. (3) and (4)),
- A_{MAX}, φ_{MAX} — maximal amplitude and phase values in the frequency range $\omega_{MIN} = \omega \leq \omega_{MAX}$ (see Fig. 2).

The proposed way of frequency range evaluation based on the comparator self-calibration procedure given in the paper [5], where $Y_X = Y_N = G_o$ in schematic diagram (see Fig. 1 and Eq. (5)) has been described in the paper. The possibilities of maximisation of comparator correct operation frequency range given by Eqs. (21) and (22) have been also presented.