

Janusz GUZIK

Brunon SZADKOWSKI

KOMPARATOR DO BADAŃ DIELEKTRYKÓW W ZAKRESIE INFRANISKICH
CZĘSTOTLIWOŚCI (10^{-3} - 10) Hz

Streszczenie. W artykule przedstawiono koncepcję budowy równonapięciowego komparatora immitancji z wykorzystaniem aktywnego przetwornika i/i (i/u) w torze pomiarowym komparatora. Przeprowadzono weryfikację doświadczalną na zbudowanym modelu komparatora oraz podano przedziały możliwych do osiągnięcia w omawianym układzie zakresów mierzonych wielkości.

COMPARATOR FOR DIELECTRIC INVESTIGATIONS IN ULTRA-LOW FREQUENCY
RANGE (10^{-3} - 10) Hz

Summary. The paper presents the idea of a equivoltage immitance comparator with use an active i/i (i/u) converter in measuring comparator's channel. The experimental verification based on the constructed comparator model and intervals possible measured values' ranges have been presented.

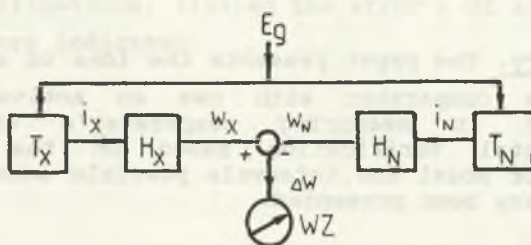
КОМПАРАТОР ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИКОВ В ОБЛАСТИ ИНФРАНИЗКИХ
ЧАСТОТ (10^{-3} - 10) Гц

Резюме. В статье представлена концепция построения эквивалентного компаратора иммитанса с применением активного преобразователя ток-ток (ток - напряжение) в измерительном канале компаратора. Представлена экспериментальная верификация построенной модели компаратора и приведено пределы возможных получаемых измеряемых величин.

1. WPROWADZENIE

Metody badań dielektryków w zakresie infraniskich częstotliwości pozwalają na uzyskanie z reguły większej czułości wykrywania makroskopowych zmian struktury dielektryka w porównaniu z metodami pomiarowymi stosowanymi w innych zakresach (np. [1], [2]). Dotychczas znane układy pomiarowe do badań dielektryków były z reguły układami wychyleniowymi [3], co z kolei nie zapewniało możliwości osiągnięcia wystarczającej dokładności, a zastosowanie układów mostkowych (po odpowiednich modyfikacjach) było nie do przyjęcia z uwagi na stosunkowo długi czas równoważenia. W dalszym ciągu zwrócono uwagę na możliwość budowy równonapięciowego komparatora immitancji dielektryków z aktywnym przetwornikiem i/i (i/u) umieszczonym w torze wielkości mierzonej i wzorcowej komparatora.

Metoda komparacyjna pomiaru immitancji T_x badanych dielektryków polega na jej porównaniu z immitancją wzorcową T_N wg schematu blokowego pokazanego na rys.1. [4], [5].



Rys.1. Schemat blokowy komparacyjnej metody pomiaru immitancji
Fig.1. Block diagram of comparator admittance measurement method

Komparowane immitancje T_x i T_N zostają przetworzone na odpowiadające im sygnały prądowe i_x i i_N , które z kolei są przetwarzane za pomocą aktywnych przetworników prądu typu i/w o transmitancjach odpowiednio równych H_x i H_N na proporcjonalne sygnały w_x i w_N tego samego rodzaju (prądowe lub napięciowe) [4].

Dla stanu komparacji $\Delta W = 0$ obowiązuje zależność:

$$T_X = T_N \frac{H_N}{H_X}, \quad (1)$$

gdzie odpowiednie immitancje $T_{X,N}$ są admitancjami $Y_{X,N}$ lub impedancjami $Z_{X,N}$, przy czym

$$T_{X,N} \equiv Y_{X,N}, \quad (2)$$

lub

$$T_{X,N}^{-1} \equiv Z_{X,N}. \quad (3)$$

Przyjmując jednostkową wartość transmitancji H_N toru wielkości wzorcowej, tj. $H_N \equiv 1$, równanie komparacji (1) upraszcza się do postaci:

$$T_X = \frac{T_N}{H_X}. \quad (4)$$

Wówczas zagadnienie pomiaru immitancji dielektryka można sprowadzić do zagadnienia wyznaczania odpowiedniej impedancji:

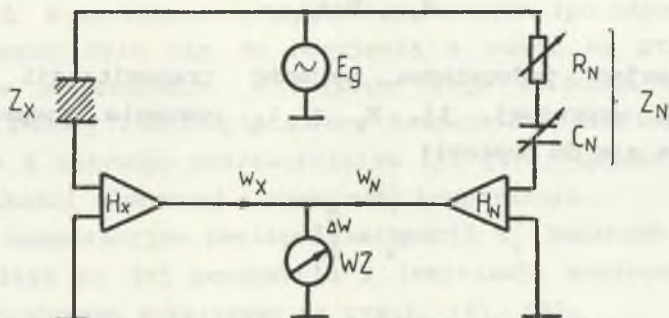
$$Z_X = H_X Z_N. \quad (5)$$

Interpretacja metrologiczna równania (5) pozwala na wysunięcie przypuszczenia, że w takim układzie pomiarowym, jakim jest równonapięciowy komparator (o schemacie blokowym wg rys.1), możliwy jest pomiar impedancji H_X - razy większej od będącej do dyspozycji wartości impedancji wzorcowej Z_N , co może mieć decydujące znaczenie przy badaniach dielektryków, z reguły o impedancjach $|Z_X| > 10^{+8} \Omega$. Bliższe omówienie analizowanego układu komparatora przedstawiono w p.2.

2. RÓWNONAPIĘCIOWY KOMPARATOR IMPEDANCJI Z PRĄDOWYM WSKAŹNIKIEM ZERA

Równanie komparacji (1) obowiązuje zarówno dla przypadku, kiedy sygnały wyjściowe z przetworników i/w: w_X i w_N są

sygnałami prądowymi (zastosowano przetwornik typu i/i) lub napięciowymi (zastosowano przetwornik typu i/u), przy czym dla tego ostatniego przypadku wyniki odpowiedniej weryfikacji doświadczalnej zamieszczono w pracy [6]. Pozostał do rozpatrzenia przypadek równonapięciowej komparacji impedancji poprzez komparację odpowiednich sygnałów prądowych. W tym celu przyjęto pokazany na rys.2. schemat ideowy rozważanego komparatora impedancji.



Rys.2. Schemat ideowy równonapięciowego komparatora impedancji dielektryków z komparacją prądów w_X i w_N

Fig.2. Schematic diagram of equivalent voltage dielectric impedance comparator with currents w_X and w_N comparison

Równanie komparacji (1) dla analizowanego układu komparatora dla poszczególnych składowych mierzonej impedancji Z_X przyjmuje następującą postać:

$$R_X = \frac{R_N (ac + bd) + \frac{1}{\omega C_N} (bc - ad)}{c^2 + d^2}, \quad (6)$$

$$C_X = \frac{C_N (c^2 + d^2)}{ac + bd + \omega R_N C_N (ad - bc)}, \quad (7)$$

gdzie: $Z_X = R_X + \frac{1}{j\omega C_X}$, $Z_N = R_N + \frac{1}{j\omega C_N}$, a transmitancje odpowiednich przetworników (tu: typu i/i) H_X , H_N wyrażały się liczbami zespolonymi postaci: $H_X = a + jb$ i $H_N = c + jd$.

Warunkiem bezpośredniego odczytu mierzonych składowych jest spełnienie zależności:

a) $b = 0$ i $d = 0$, lub

b) $\frac{b}{a} = \frac{d}{c}$,

przy czym przypadek (a) występuje, gdy transmitancje H_X , H_N przetworników nie posiadają składowych urojonych, natomiast przypadek (b) oznacza, że przesunięcia fazowe φ_X , φ_N wnoszone przez odpowiednie przetworniki są sobie równe, tj. $\varphi_X = \varphi_N$, przy czym: $\varphi_X = \arctg(b/a)$ i $\varphi_N = \arctg(d/c)$.

Równania komparacji (6) i (7) wyrażają się wówczas prostymi zależnościami:

$$R_X = R_N \frac{a}{c}, \quad (8)$$

$$C_X = C_N \frac{c}{a}. \quad (9)$$

Względną niedokładność skrajną pomiaru składowych R_X , C_X mierzonej impedancji Z_X oblicza się (dla przypadku bezpośredniego odczytu) wg wzorów:

$$\Delta_{R_X}^{\circ} = \pm [|\Delta_{R_N}^{\circ}| + |\Delta_a^{\circ}| + |\Delta_c^{\circ}|], \quad (10)$$

$$\Delta_{C_X}^{\circ} = \pm [|\Delta_{C_N}^{\circ}| + |\Delta_a^{\circ}| + |\Delta_c^{\circ}|] \quad (11)$$

gdzie: $|\Delta_{R_N}^{\circ}|$, $|\Delta_{C_N}^{\circ}|$ - niedokładności składowych R_N , C_N zastosowanego wzorca impedancji Z_N ,

$|\Delta_a^{\circ}|$, $|\Delta_c^{\circ}|$ - niedokładności składowych czynnych a , c transmitancji H_X i H_N .

Zapewniając odpowiedni dobór niedokładności (odchyłek) $|\Delta_a^{\circ}|$ i $|\Delta_c^{\circ}|$, np. wg procedury podanej w pracy [7], osiągnąć niedokładności pomiaru składowych $\Delta_{R_X}^{\circ}$, $\Delta_{C_X}^{\circ}$ mogą być porównywalne z niedokładnościami składowych $|\Delta_{R_N}^{\circ}|$, $|\Delta_{C_N}^{\circ}|$ zastosowanego wzorca impedancji: $\Delta_{R_X}^{\circ} \approx \pm |\Delta_{R_N}^{\circ}|$ i $\Delta_{C_X}^{\circ} \approx \pm |\Delta_{C_N}^{\circ}|$.

Z drugiej strony, całkowitą względną czułość S_C pomiaru impedancji Z_X przy użyciu komparatora można ocenić na podstawie zależności:

$$S_c = S_{wz} \left| z_x \frac{d(\Delta w)}{dz_x} \right| = S_{wz} \left| z_x \frac{d(w_x - w_N)}{dz_x} \right| =$$

$$= S_{wz} z_x \frac{d}{dz_x} \left(\frac{H_x}{z_x} - \frac{H_N}{z_N} \right) E_g \left| = S_{wz} |E_g| |H_x| \frac{1}{|z_x|}, \quad (12)$$

gdzie: S_{wz} - czułość zastosowanego wskaźnika zera.

Ewentualny spadek czułości S_c spowodowany zbyt dużym wzrostem wartości $|z_x|$ (np. dla $\omega \rightarrow 0$ można łatwo skompensować, dobierając zarówno wartość napięcia zasilającego komparator $|E_g|$, jak i zwiększając wartość transmitancji $|H_x|$, przy założeniu, że w obydwu przypadkach czułość zastosowanego wskaźnika zera jest taka sama.

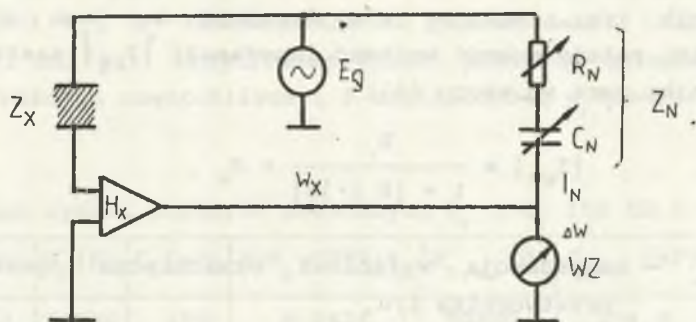
3. WARIANT UKŁADU KOMPARATORA O TRANSMITANCJI $H_N = 1$

Jednym ze sposobów minimalizacji niedokładności pomiaru składowych immitancji z_x (por. równania (10) i (11)) jest wyeliminowanie przetwornika o transmitancji H_N umieszczonego w torze wielkości wzorcowej i zastąpienie go gałęzią wzorcową (zawierającą przy tym impedancję wzorcową z_N) zbudowaną z elementów biernych, z reguły o wyższej dokładności. Dla komparatora sygnałów napięciowych w_x i w_N rolę tę pełni odpowiednio zestawiony dzielnik napięcia [6], natomiast dla przypadku komparacji sygnałów prądowych w_x i w_N - odpowiedni schemat zamieszczono na rys.3.

Odpowiada on w pełni schematowi komparatora wg rys.2, gdy transmitancja $H_N = 1$, natomiast jedyna różnica to zmiana kierunku sygnału nierównowagi: $\Delta w = - (w_x - w_N)$ wynika z faktu zastosowania odwracającego przetwornika prądu i/w o transmitancji H_x . Odpowiednie równania komparacji (dla przypadku bezpośredniego odczytu) (8) i (9) przybierają postać ($c = 1$):

$$R_x = R_N \quad a, \quad (13)$$

$$C_x = C_N \frac{1}{a}. \quad (14)$$



Rys.3. Schemat ideowy układu komparatora wg rys.2 dla $H_N = 1$
 Fig.3. Schematic diagram of a comparator according to Fig.2 for $H_N = 1$

Oznacza to możliwość pomiaru impedancji (a właściwie jej modułu - $|Z_x|$) a - razy większej od będącej do dyspozycji wartości impedancji wzorca (odpowiednio - $|Z_N|$), co ma znaczenie przy pomiarach impedancji, zwłaszcza dielektryków. Z drugiej strony wartość współczynnika strat dielektrycznych $\text{tg}\delta_x$ mierzonego obiektu (o impedancji Z_x): $\text{tg}\delta_x = \omega R_x C_x$, po uwzględnieniu równań (13) i (14) jest jednocześnie równa:

$$\text{tg}\delta_x = \omega R_x C_x = \omega(aR_N) \cdot \left(C_N \frac{1}{a}\right) = \omega R_N C_N = \text{tg}\delta_N, \quad (15)$$

co predystynuje układ komparatora wg rys.3 do komparacji impedancji dielektryków o zbliżonych wartościach współczynnika stratności: $\text{tg}\delta_x \approx \text{tg}\delta_N$. Dodatkowo, mając na uwadze fakt, że równania komparacji (13) i (14) są wzajemnie zależne - wzrostowi wartości nastawy, np. R_N , musi odpowiadać spadek wartości nastawy C_N , tak aby zadość uczynić równości (15): celowe wydaje się przystosowanie układu do pomiaru jednej z dwóch składowych mierzonej impedancji, np. R_x lub współczynnika stratności $\text{tg}\delta_x$. W pierwszym przypadku pozwala to analizować układ komparatora w kategoriach omomierza [5] z wbudowanym wzorcem R_N , natomiast drugi przypadek - to układ komparatora współczynnika stratności $\text{tg}\delta_x$ z bezpośrednim odczytem.

Do budowy układu komparatora wg rys.3 można także zastosować przetwornik i/u , lecz by nie dopuścić do jego zbyt dużego obciążenia, należy dobrać wartość impedancji $|Z_{wz}|$ zastosowanego wskaźnika zera wg wzoru [8]:

$$|Z_{wz}| \geq \frac{R_o}{1 + |K_o| \cdot |\beta|} \approx R_o, \quad (16)$$

gdzie: R_o - rezystancja wyjściowa wzmacniacza operacyjnego przetwornika i/u ,

$|K_o|$ - współczynnik wzmocnienia napięciowego wzmacniacza operacyjnego przetwornika i/u dla $\omega \rightarrow 0$,

$|K_o| \rightarrow \infty$,

$|\beta|$ - współczynnik sprzężenia zwrotnego,

$$|\beta| = \frac{1}{1 + \frac{R_f}{|Z_x|}}$$

przy czym: R_f - rezystancja obwodu sprzężenia zwrotnego przetwornika i/u ,

co nie jest trudne, zważywszy, że dla większości typowych wzmacniaczy operacyjnych (stosowanych w przetwornikach i/u): $R_o \approx (50 + 100) \Omega$ [8].

Możliwy do uzyskania w tym układzie zakres mierzonych wielkości uzależniony jest praktycznie od składowej czynnej a transmitancji H_x i wynosi:

$$R_{Nmin} a_{min} \leq R_x \leq R_{Nmax} a_{max}, \quad (17)$$

$$C_{Nmin} \frac{1}{a_{max}} \leq C_x \leq C_{Nmax} \frac{1}{a_{min}}, \quad (18)$$

przy czym zwykle $10^3 \text{ V/A} \leq a \leq 10^8 \text{ V/A}$ [4], [6].

4. WYNIKI BADAŃ

Celem weryfikacji niektórych wyników rozważań teoretycznych zamieszczonych w pkt. 2 i 3 zbudowano układ komparatora wg rys.3 z aktywnym przetwornikiem typu i/u zbudowanym na wzma-

zniaczu operacyjnym typu LF356. Wartości rezystancji R_x , R_N i pojemności C_x , C_N zamodelowano za pomocą dekad (odpowiednio) DR6-16 i DK5/50). Przykładowe wyniki pomiarów składowych R_x i C_x dla różnych częstotliwości f zamieszczono w tabeli 1.

Tabela 1

Wybrane wyniki pomiarów składowych R_x i C_x (50 k Ω + 100 nF)

Lp	f [Hz]	R_x [Ω]	C_x [nF]	$\text{tg}\delta_x = 2\pi f R_x C_x$	$R_{x_{obl}}$ [Ω]	$C_{x_{obl}}$ [nF]	$\text{tg}\delta_{x_{obl}}$
1	2	50000	100	0,0628	50850	104,5	0,0667
2	3	50000	100	0,0942	50649	96,8	0,0924
3	4	50000	100	0,1256	50795	104,0	0,1327
4	5	50000	100	0,1570	50603	103,6	0,1646
5	6	50000	100	0,1884	50452	103,4	0,1966
6	7	50000	100	0,2198	50639	103,7	0,2308
7	8	50000	100	0,2512	50694	96,9	0,2468
8	9	50000	100	0,2826	50810	96,3	0,2766
9	10	50000	100	0,3140	50492	103,3	0,3276
10	100	50000	100	3,140	51847	108,2	3,523

Lp.	f [Hz]	$\delta_{R_x}^\circ$ [%]	$\delta_{C_x}^\circ$ [%]	$\delta_{\text{tg}\delta_x}^\circ$ [%]
1	2	+ 1,7	+ 4,5	+ 6,2
2	3	+ 1,3	- 3,2	- 1,9
3	4	+ 1,6	+ 4,0	+ 5,6
4	5	+ 1,2	+ 3,6	+ 4,8
5	6	+ 0,9	+ 3,4	+ 4,4
6	7	+ 1,3	+ 3,7	+ 5,0
7	8	+ 1,4	- 3,1	- 1,8
8	9	+ 1,6	- 3,7	- 2,1
9	10	+ 1,1	+ 3,3	+ 4,3
10	100	+ 3,7	+ 8,2	+ 12,2

Wartości $R_{x_{obl}}$ i $C_{x_{obl}}$ uzyskano posługując się zależnościami (13) i (14), przy czym: $\text{tg}\delta_{x_{obl}} = 2\pi f R_{x_{obl}} C_{x_{obl}}$.

5. WNIOSKI

Przeprowadzone badania na modelu komparatora wykazały jego przydatność do pracy przy infraniskich częstotliwościach, przy czym stwierdzono, że dokładność pomiaru odpowiednich składowych maleje w miarę wzrostu częstotliwości. Można temu zapobiec odpowiednio kształtując charakterystykę częstotliwościową przetwornika i/u (i/i). Dokładność pomiaru składowej czynnej R_x mierzonej impedancji Z_x jest w przybliżeniu o rząd lepsza, co pozwala sądzić, że analizowany komparator lepiej nadaje się do pomiarów rezystancji obiektów o ustabilizowanej pojemności.

LITERATURA

1. Wiła W.: Model matematyczno-fizyczny stanu izolacji okrętowych maszyn elektrycznych. Prace Instytutu Elektrotechniki, z. 122, Warszawa 1982, s.59-77.
2. Esposti G.G., Tommasini D.: A Model for the Simulation of Relaxation Phenomena in Dielectrics IEEE Transactions on Electrical Insulation, vol. 25, Nr 4, August, 1990, p. 617-621.
3. Burnley H.G., Exon J.L.T.: Diagnostic Measurement Based on Bridge Out-of-Balance Signals, IEEE Transactions on Electrical Insulation, vol. 26, Nr 2, April, 1991, p. 200-209.
4. Szadkowski B.:Pomiary immitancji dielektryków w zakresie infraniskich częstotliwości. Raport z pracy BK-323/RE-2/91. Instytut Metrologii i Automatyki Elektrotechnicznej, Pol. Śl., Gliwice, grudzień 1991.
5. Szadkowski B.: Synteza metod pomiaru immitancji. ZN Pol. Śl., ser. Elektryka, z. 93, Gliwice 1984.
6. Guzik J.:Aktywny, równonapięciowy komparator admitancji do badań dielektryków. Raport z pracy BW-455/RE-2/92. Instytut Metrologii i Automatyki Elektrotechnicznej, Pol. Śl., Gliwice, grudzień 1992.
7. Sawicki J.: Dobór odchyłek elementów urządzenia pomiarowego jako prosty sposób zwiększenia dokładności. Pomiary, Automatyka, Kontrola, 1989, nr 7, s. 178-179.

8. Nadachowski M., Kulka Z.: Analogowe układy scalone. WKiŁ, Warszawa 1983, s. 120-121.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Zygmunt Kuśmieriek

Wpłynęło do Redakcji 15 marca 1994

Abstract

The paper presents the idea of a equivoltage immitance comparator with use an active i/u or i/i converter in measuring comparator channel by the way as on Fig.1. Compared immitances T_x and T_N are here transformed into current signals w_x and w_N , respectively undergo right comparison. The state of comparison $\Delta W = W_x - W_N = 0$ generated the dependence (1): $T_x = T_N \frac{H_N}{H_x}$, on the basis the seeking immitance value T_x is calculated. The direct reading conditions are defined by the relation $b = 0$ and $d = 0$, relatively $b/a - d/c$ and then the dependence (1) assumed the form (8) and (9). Considerable reduction of a comparators structure is obtained for $H_N \equiv 1$ (see Fig.3) and then exists the possibility to measure the impedance Z_x a - time greater as to be on the hand the standards impedance Z_N . The experimental verification based on the constructed comparator model (for $H_N \equiv 1$) have been presented.