

Teresa SZADKOWSKA  
Brunon SZADKOWSKI

## EKRANOWANIE I ADIUSTACJA MOSTKA de SAUTY'EGO-WIENA

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono system ekranowania i sposób adiustacji mostka przeznaczonego do badania dielektrycznych właściwości wazeliny kondensatorowej. Proponowane rozwiązanie oparto na znanej strukturze mostka de Sauty'ego-Wiena, której dotychczas nie stosowano do pomiarów niskostratnych dielektryków o współczynniku tangens delta mniejszym niż  $10^{-2}$ . Przeprowadzo szczegółową analizę błędów wnoszonych przez zaproponowany system ekranów oraz sformułowano warunki minimalizacji tych błędów. Przedstawiono również (i uzasadniono) procedurę adiustacji mostka, zapewniającą możliwość poprawnego odczytu mierzonych parametrów bezpośrednio ze skal elementów nastawnych mostka. Określono równania do obliczania poprawek, które należy uwzględnić przy dokładniejszych pomiarach współczynnika strat dielektrycznych, zwłaszcza o małej wartości ( $< 10^{-2}$ ). Wskazano warunki, przy których poprawki mają wartości pomijalnie małe i mogą być zaniedbane przy bezpośrednim odczycie mierzonych wielkości.

### 1. Wprowadzenie

Mostek de Sauty'ego-Wiena jest jednym z wielu mostków umożliwiających wyznaczenie pojemności  $C_x$  i współczynnika strat dielektrycznych  $\tan \delta_x$  kondensatorów [1], [2]. Schemat ideowy tego mostka przedstawiono na rys.1, na którym badany kondensator reprezentują pojemność  $C_x$  i rezystancja  $R_x$  połączone szeregowo.

Stan równowagi przedstawionego mostka opisują równania:

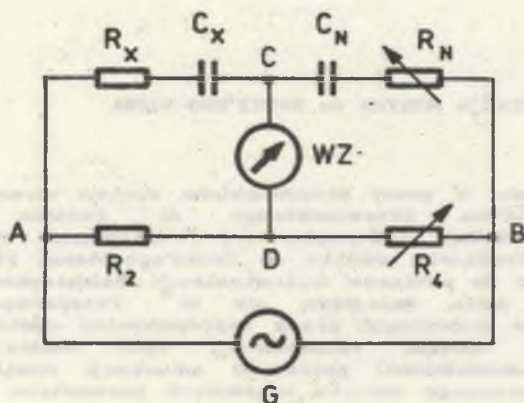
$$R_x = R_N \frac{R_2}{R_4}, \quad (1)$$

$$C_x = C_N \frac{R_4}{R_2}. \quad (2)$$

oraz:

$$\operatorname{tg} \delta_x = \omega C_x R_x = \omega C_N R_N, \quad (3)$$

gdzie  $R_2$ ,  $R_4$ ,  $R_N$ ,  $C_N$  są elementami pozostałych ramion mostka, natomiast  $\omega$  oznacza pulsację.



Rys.1. Schemat ideowy mostka de Sauty'ego-Wiena; WZ - wskaźnik zera, G - generator napięcia sinusoidalnie zmiennego  
Fig.1. Diagram of de Sauty-Wien bridge; WZ - zero indicator, G - generator of sinusoidal alternating voltage

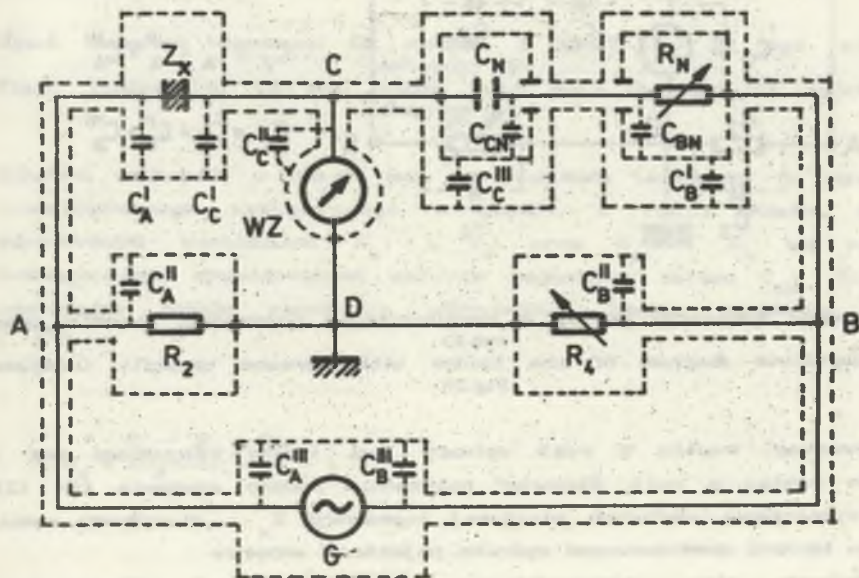
Jeśli mostek ma być przeznaczony do pomiarów pojemności  $C_x$  i współczynnika strat dielektrycznych  $\operatorname{tg} \delta_x$ , wówczas najkorzystniej jest przyjąć, że elementami nastawnymi są rezystory  $R_4$  i  $R_N$ . W takim przypadku, przy stałych  $R_2$  i  $C_N$  oraz stałej częstotliwości - wyznaczone wielkości  $C_x$  i  $\operatorname{tg} \delta_x$  są liniowymi i wzajemnie niezależnymi funkcjami  $R_4$  lub  $R_N$ , co umożliwia łatwą realizację bezpośredniego odczytu i równie łatwe równoważenie mostka. Korzystną cechą omawianego rozwiązania jest także zastosowanie stałego wzorca pojemności  $C_N$ , dokładniejszego i tańszego niż odpowiedni wzorec zmienny.

Znane konstrukcje mostków de Sauty'ego-Wiena stosowane są przede wszystkim w uniwersalnych mostkach RLC, jako jeden z kilku mostków zawartych w przełączalnym zestawie [3], [4]. W takich mostkach - pomiar współczynnika strat dielektrycznych jest traktowany drugorzędnie, tzn. odpowiednie wartości określane są szacunkowo i w zakresie ograniczonym do wartości nie mniejszych niż  $10^{-2}$  (ew.  $10^{-3}$ ). Do pomiarów niskostratnych kondensatorów, np. o wartościach  $\operatorname{tg} \delta_x = 10^{-4} \dots 10^{-2}$ , nie stwierdzono w dostępnej literaturze rozwiązań opartych na strukturze mostka de Sauty'ego-Wiena.

Biorąc pod uwagę wcześniej wymienione, ogólne zalety mostka de Sauty'ego-Wiena, a przede wszystkim stosunkowo niskie koszty wzorców i ich dostępność na rynku krajowym - autorzy podjęli próbę wykonania odpowiedniego mostka, przeznaczonego do kontroli jakości niskostratnej wazeliny kondensatorowej, wypełniającej specjalny kondensator pomiarowy. W wykonanym prototypie mostka uzyskano właściwości metrologiczne zgodne z wymaganiami normy PN-84/E-04409 "Materiały elektroizolacyjne ciekłe. Pomiar współczynnika strat dielektrycznych, przenikalności elektrycznej względnej i rezystywności". Do ważniejszych zagadnień decydujących o osiągnięciu zadowalających właściwości mostka należały: właściwe ekranowanie układu mostkowego oraz skompensowanie wpływów pojemności ekranów i wielkości resztkowych wzorców (adjustacja). Zagadnienia te przedstawiono w dalszym ciągu rozważań.

## 2. Ekranowanie i analiza wnoszonych błędów

W proponowanym rozwiązaniu systemu ekranów mostka, przyjęto źródło zasilania  $G$  o wyjściu symetrycznym oraz wskaźnik zera  $WZ$  o wejściu niesymetrycznym (względem potencjału ziemi). Schemat ekranowania mostka z rys.1 przedstawiono na rys.2.

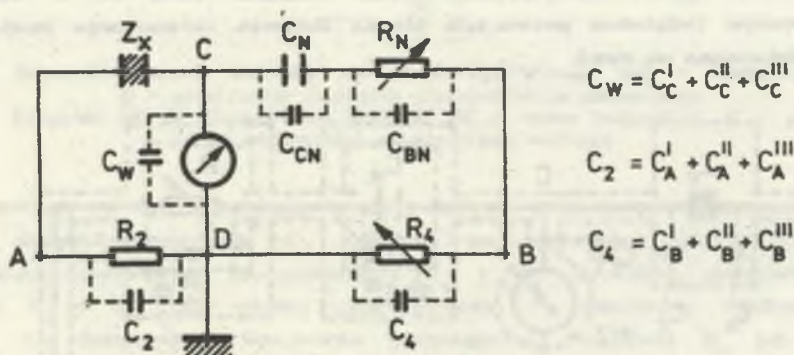


Rys.2. Schemat ekranowania mostka de Sauty'ego-Wiena  
Fig.2. Diagram of de Sauty-Wien bridge screening

Ekrany poszczególnych elementów mostka oznaczono linią przerywaną, natomiast pojemności ekranów względem węzłowych punktów A, B, C mostka oznaczono symbolami  $C_A^I, C_A^{II}, C_A^{III}, C_B^I, C_B^{II}, C_B^{III}, C_C^I, C_C^{II}, C_C^{III}$  oraz  $C_{CN}$  i  $C_{BN}$ . Punkt węzłowy D jest uziemiony. Większość ekranów (za wyjątkiem wewnętrznych ekranów elementów  $C_N$  i  $R_N$ ) jest również uziemiona, co dla przejrzystości rysunku przedstawiono oznaczając te ekrany wspólną linią przerywaną, przyłączoną galwanicznie do uziemionego punktu D.

W znanych rozwiązaniach systemów ekranowań układów mostkowych największe trudności sprawia zaekranowanie dwóch szeregowo połączonych elementów występujących w tym samym ramieniu mostka. W takich przypadkach trudne jest wyeliminowanie wpływu pojemności ekranów względem przewodu łączącego szeregowo zestawiane elementy. W rozważanym mostku (rys.2) - szeregowo połączone elementy  $C_N$  i  $R_N$  wyposażone zostały w podwójne ekrany, a przewód łączący  $C_N$  i  $R_N$  jest na tyle krótki, że jego pojemność względem własnego ekranu jest pomijalnie mała w porównaniu z pojemnościami ekranów:  $C_{CN}, C_C^{III}, C_{BN}, C_B^{III}$ .

Schemat z rys.2 można sprowadzić do schematu zastępczego przedstawionego na rys.3, gdzie liniami przerywanymi zaznaczono wypadkowe pojemności wnoszone przez system ekranów.

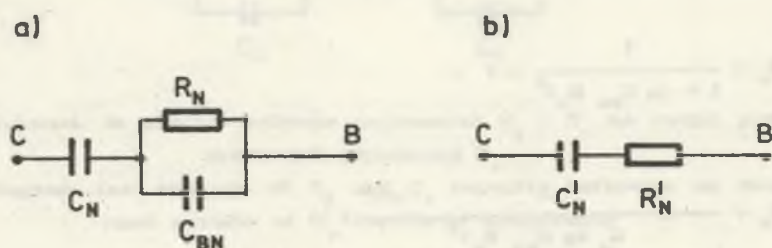


Rys.3. Schemat zastępczy mostka z uwzględnieniem pojemności ekranów (por. rys.2)  
 Fig.3. Substitute diagram of the bridge with screens capacity (compare Fig.2)

Stan równowagi mostka z rys.3 opisany jest innymi równaniami niż w przypadku mostka z rys.1. Stosując poprzednio podane równania (1), (2), (3) do wyznaczenia sładowych mierzonej impedancji  $Z_x$  - otrzymamy wyniki obarczone błędami spowodowanymi wpływem pojemności ekranów.

W dalszym ciągu przeanalizujemy kolejno wpływy poszczególnych pojemności wnoszonych przez ekrany.

- a) Pojemność  $C_V$  nie wpływa na warunki równowagi mostka, natomiast powoduje zmniejszenie czułości prądowej wskaźnika zera. Stosując czulszy wskaźnik można pominąć wpływ  $C_V$  na błąd pomiaru.
- b) Pojemność  $C_{GN}$  bocznikuje kondensator wzorcowy  $C_N$  i może być traktowana, jako stały składnik zwiększający pojemność kondensatora wzorcowego. W dalszych rozważaniach przyjmiemy, że pojemność kondensatora wzorcowego z ekranem ( $C_N + C_{GN}$ ) będzie oznaczona dotychczasowym symbolem:  $C_N$ .
- c) Wpływ pojemności  $C_{BN}$  można określić analizując schemat ramienia CB mostka z rys.3. Przy zachowaniu symbolu  $C_N$  dla oznaczenia pojemności kondensatora wzorcowego z ekranem (por. p. b), schemat ramienia CB wraz z odpowiednim schematem zastępczym przedstawiono na rys.4.



Rys.4. Schemat ramienia CB mostka z rys.3 (a) i jego schemat zastępczy (b)  
 Fig.4. Diagram of CB arm bridge from Fig.3 (a) and its substitute diagram (b)

Schemat zastępczy z rys.4b jest strukturalnie identyczny do schematu wyidealizowanego występującego w mostku z rys.1. Różnice między odpowiednimi wartościami  $R'_N$  i  $R_N$  oraz  $C'_N$  i  $C_N$  są błędami bezwzględnymi, spowodowanymi wpływem pojemności ekranu  $C_{BN}$ . Bardziej miarodajne będzie określenie odpowiednich błędów względnych  $\delta^{\circ}R_N$  i  $\delta^{\circ}C_N$ :

$$\delta^{\circ}R_N = \frac{R'_N - R_N}{R_N} = \frac{R'_N}{R_N} - 1 \quad (4)$$

$$\delta^{\circ}C_N = \frac{C'_N - C_N}{C_N} = \frac{C'_N}{C_N} - 1 \quad (5)$$

Wartości parametrów schematu zastępczego z rys.4b określone są zależnościami:

$$R'_N = \frac{R_N}{1 + (\omega C_{BN} R_N)^2} \quad (6)$$

$$C'_N = \frac{C_N}{1 + \frac{C_N (\omega C_{BN} R_N)^2}{C_{BN} [1 + (\omega C_{BN} R_N)^2]}} \quad (7)$$

Po podstawieniu zależności (6) i (7) do równań (4) i (5) otrzymujemy:

$$\delta^{\circ} R_N = \frac{1}{1 + (\omega C_{BN} R_N)^2} - 1 \quad (8)$$

$$\delta^{\circ} C_N = \frac{1}{1 + \frac{C_N (\omega C_{BN} R_N)^2}{C_{BN} [1 + (\omega C_{BN} R_N)^2]}} - 1 \quad (9)$$

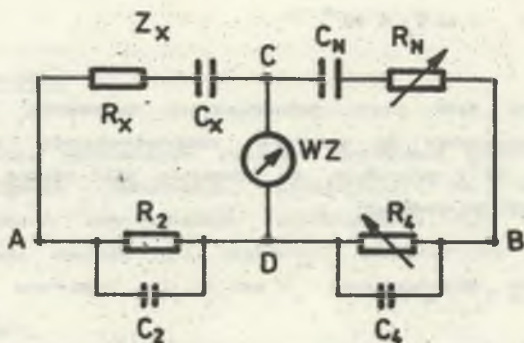
Z równań (8) i (9) wynika, że błędy  $\delta^{\circ} R_N$  i  $\delta^{\circ} C_N$  można zminimalizować przez odpowiedni dobór wartości wyrażenia  $\omega C_{BN} R_N$ . Na przykład wystarczy spełnić warunek:

$$\omega C_{BN} R_N \leq 10^{-2} \quad (10)$$

aby błędy  $\delta^{\circ} R_N$  i  $\delta^{\circ} C_N$  były nie większe niż  $10^{-3}$ . Wówczas można przyjąć, że ramię CB mostka ekranowanego (rys.3) może być z dobrym przybliżeniem reprezentowane szeregowym połączeniem wyidealizowanych elementów  $R_N$  i  $C_N$  (jak w mostku z rys. 1).

W wykonanym przez autorów mostku pracującym przy częstotliwości 1000 Hz i maksymalnej wartości rezystora nastawnego  $R_{N \max} \approx 10^{-4} \Omega$ , obliczona z warunku (10) dopuszczalna największa wartość pojemności ekranu  $C_{BN}$  nie powinna przekraczać 160 pF. Podane wymaganie zostało spełnione w odpowiedniej konstrukcji wewnętrznego ekranu dekadowego rezystora  $R_N$ .

d) Wpływ pojemności  $C_2$  i  $C_4$  w mostku z rys.3 określimy przy założeniu, że w ramieniu CB mostka spełniono wymagania opisane w p. c), tzn. że można zaniedbać wpływ pojemności  $C_{BN}$  oraz  $C_{CN}$  (co uwzględniono w zwiększonej wartości  $C_N$ ). Odpowiedni schemat do analizy przedstawiono na rys.5.



Rys.5. Schemat do analizy wpływów pojemności  $C_2$  i  $C_4$  na wyniki pomiarów składowych impedancji  $Z_x$

Fig.5. Diagram for analysis of  $C_2$  and  $C_4$  capacity influence on measurement results of  $Z_x$  impedance components

Ograniczymy się do rozważenia wpływów pojemności  $C_2$  i  $C_4$  na wyniki pomiarów pojemności  $C_x$  oraz współczynnika strat dielektrycznych  $\operatorname{tg} \delta_x = \omega C_x R_x$ . Odpowiednie warunki równowagi mostka z rys.5 opisują równania:

$$C_x = C_N \frac{R_4}{R_2} \cdot \frac{\operatorname{tg} \delta_x + \omega T_2}{\operatorname{tg} \delta_N + \omega T_4}, \quad (11)$$

$$\operatorname{tg} \delta_x = \frac{\operatorname{tg} \delta_N + \omega T_4 - \omega T_2 (1 - \omega T_4 \operatorname{tg} \delta_N)}{1 - \omega T_4 \operatorname{tg} \delta_N + \omega T_2 (\operatorname{tg} \delta_N + \omega T_4)} \quad (12)$$

gdzie:  $\operatorname{tg} \delta_N = \omega C_N R_N$  - współczynnik strat dielektrycznych zestawu elementów wzorcowych  $C_N$  i  $R_N$  w ramieniu CB mostka

$T_2 = C_2 R_2$  - stała czasowa ramienia AD mostka

$T_4 = C_4 R_4$  - stała czasowa ramienia DB mostka

Interesujące nas wpływy pojemności  $C_2$  i  $C_4$  w równaniach (11) i (12) ujawniają się w występujących w nich stałych czasowych  $T_2$  i  $T_4$ .

Minimalizacja tych wpływów jest możliwa przy wprowadzeniu pewnych ograniczeń dla wartości  $T_2$  i  $T_4$ , a następnie - skompensowaniu pozostałych wpływów. Przyjmijmy następujące warunki ograniczające dobór wartości  $T_2$  i  $T_4$ :

$$\omega T_2 \leq 10^{-2} \quad \text{i} \quad \omega T_4 \leq 10^{-2} \quad (13)$$

Spełnienie warunków (13) przy jednoczesnym założeniu, że omawiany mostek jest przeznaczony do pomiaru niskostratnych kondensatorów ( $\text{tg } \delta_x \approx \text{tg } \delta_N \leq 10^{-4}$ ) powoduje, że równanie (12) można z pomijalnie małym błędem uprościć do postaci:

$$\text{tg } \delta_x = \text{tg } \delta_N + \omega T_4 - \omega T_2 \quad (14)$$

Zauważmy z kolei, że gdy spełnione jest równanie (14) wówczas równanie (11) sprowadza się do zależności:

$$C_x = C_N \frac{R_4}{R_2} \quad (15)$$

Równania (14) i (15) są równaniami równowagi mostka z rys.5 obowiązującymi przy doborze stałych czasowych  $T_2$  i  $T_4$  według warunków (13). W tych warunkach pojemności  $C_2$  i  $C_4$  nie wpływają na wynik pomiaru pojemności  $C_x$  (równ. 15), natomiast wpływają tylko na wynik pomiaru  $\text{tg } \delta_x$  (równ. 14).

W wykonanym układzie mostkowym (1000 Hz,  $R_2 = 1592 \Omega$ ,  $R_{\text{max}} = 2000 \Omega$ ) dopuszczalne, największe wartości pojemności  $C_2$  i  $C_4$  obliczone z warunków (13) wynoszą:  $C_2 = 1000 \text{ pF}$  i  $C_4 = 800 \text{ pF}$ . W konstrukcji ekranów osiągnięto wartości  $C_2 \approx 520 \text{ pF}$  i  $C_4 \approx 620 \text{ pF}$ , a więc znacznie mniejsze niż dopuszczalne, co pozwala na stosowanie dodatkowych kondensatorów "dopasowujących" pojemności  $C_2$  i  $C_4$ , jak również na stosowanie dłuższych kabli łączących mostek z obiektem badanym  $Z_x$ .

"Dopasowanie" pojemności  $C_2$  i  $C_4$  może być wykorzystane do skompensowania wpływów  $C_2$  i  $C_4$  na wynik pomiaru  $\text{tg } \delta_x$ . Z równania (14) wynika, że przy odpowiednim doborze  $C_2$  i  $C_4$  można uzyskać  $\omega T_4 \approx \omega T_2$  i wówczas  $\text{tg } \delta_x \approx \text{tg } \delta_N$ . Całkowite skompensowanie omawianych wpływów jest możliwe tylko w przypadku, gdy  $T_2$  i  $T_4$  nie będą zmieniały swoich wartości. Jednak w rozważanym układzie mostkowym jednym z elementów nastawnych jest rezystor  $R_4$  i tym samym w toku pomiarów ulega zmianie



wartość  $T$ . W takim przypadku można uzyskać tylko częściową kompensację wpływów pojemności  $C_2$  i  $C_4$  oraz wyznaczyć odpowiednie poprawki dla dokładniejszego ustalenia wyniku pomiaru  $\text{tg } \delta_x$ . Bliższe omówienie tych zagadnień przedstawiono w dalszej części rozważań, dotyczącej adiustacji mostka.

### 3. Adiustacja mostka

W celu uzyskania poprawnych wskazań narzędzia pomiarowego niezbędne jest przeprowadzenie adiustacji, polegającej na doborze wartości niektórych elementów, czynnościach regulacyjnych itp. W odniesieniu do rozważanego układu mostkowego czynności adiustacyjne powinny zapewnić poprawny odczyt wartości  $C_x$  i  $\text{tg } \delta_x$  bezpośrednio ze skal elementów nastawnych  $R_4$  i  $R_N$ .

W mostku wyidealizowanym przedstawionym na rys.1 (bez uwzględnienia wpływów ekranów oraz wielkości resztkowych), dla zapewnienia bezpośredniego odczytu  $C_x$  i  $\text{tg } \delta_x$  wystarczy tak dobrać wartości stałych wzorców  $C_N$  i  $R_2$ , aby równania (2) i (3) można sprowadzić do postaci:

$$C_x = C_N \frac{R_4}{R_2} = 10^{-k} R_4 \text{ [pF]} , \quad (16)$$

$$\text{tg } \delta_x = \omega C_N R_N = 10^{-n} R_N , \quad (17)$$

gdzie:  $k, n$  - liczby całkowite.

Przy częstotliwości pomiarowej 1000 Hz oraz założonych zakresach pomiarowych (kondensator pomiarowy wypełniony badanym dielektrykiem:  $C_N = 120$  140 pF,  $\text{tg } \delta_x = 10^{-4} \dots 10^{-2}$ ) dobrano następujące wartości:

$$C_N = 159,2 \text{ pF} \quad \text{ i } \quad R_2 = 1592 \text{ } \Omega \quad (18)$$

uzyskując zgodnie z relacjami (16) i (17) równania, które spełniają warunki bezpośredniego odczytu:

$$C_x = 10^{-1} R_4 \text{ [pF]} , \quad (19)$$

$$\text{tg } \delta_x = 10^{-6} R_N , \quad (20)$$

gdzie:  $R_4, R_N$  - rezystancje nastawne o wartościach wyrażonych w omach; zastosowano dekady:  $R_4 = 10 \times (10^3; 10^2; 10^1; 10^0; 10^{-1}) \Omega$  oraz  $R_N = 10 \times (10^3; 10^2; 10^1; 10^0) \Omega$ .

Kolejnymi czynnościami adiustacyjnymi, odnoszącymi się do mostka z systemem ekranów wykonanych według rys.2 - są zabiegi konstrukcyjne dla spełnienia warunków określonych w p. 2b, c, d (równ. 10 i 13). Zabiegi te polegają między innymi na uzupełniającej obróbce mechanicznej wykonanych osłon ekranujących poszczególne elementy, doborze długości ekranowanych przewodów i doświadczalnej kontroli występujących pojemności  $C_2, C_4, C_{BN}$  (rys.3).

W wyniku przeprowadzenia omówionych czynności - w mostku zae ekranowanym (por. zależności (14) i (15)) obowiązywać będą równania:

$$\operatorname{tg} \delta_x = \operatorname{tg} \delta_N + \omega T_4 - \omega T_2 = 10^{-6} R_N + \omega C_4 R_4 - \omega C_2 R_2 \quad (21)$$

oraz

$$C_x = C_N \frac{R_4}{R_2} = 10^{-4} R_4 \text{ [pF]}, \quad (22)$$

gdzie:  $R_4$  - wyrażone w omach.

Zwróćmy uwagę, że wpływ reszkowych pojemności występujących we wzorcach rezystancji  $R_N, R_2, R_4$  jest uwzględniony w zastępczych pojemnościach  $C_{BN}, C_2, C_4$  przedstawionych na rys.3. Tym samym adiustacja ekranów odnosi się również do wspomnianych pojemności reszkowych i tak należy interpretować równania (21) i (22).

W przedstawionych warunkach uzyskujemy możliwość bezpośredniego odczytu wartości  $C_x$  ze skali nastawnego rezystora  $R_4$  (równ. (22)), natomiast bezpośredni odczyt wartości  $\operatorname{tg} \delta_x$  ze skali rezystora  $R_N$  zakłócony jest wpływami stałych czasowych  $T_2 = C_2 R_2$  i  $T_4 = C_4 R_4$  (równ. (21)).

Dodatkowego wyjaśnienia wymaga jeszcze wpływ własnych strat dielektrycznych kondensatora wzorcowego  $C_N$ , który nie został uwzględniony w rozważaniach przeprowadzonych w p. 2 i nie jest uwzględniony w równaniu (21). Wpływ ten można uwzględnić zastępując w równaniu (21) wyrażenie  $\operatorname{tg} \delta_N = \omega C_N R_N$  przez wyrażenie:

$$\omega C_N (R_N + r) = \operatorname{tg} \delta_N + \operatorname{tg} \delta_r, \quad (23)$$

gdzie:  $\operatorname{tg} \delta_r = \omega C_N r$  - współczynnik własnych strat dielektrycznych kondensatora wzorcowego  $C_N$ , reprezentowanego schema-

tem zastępczym o szeregowo połączonych parametrach

$C_N$  i  $r$ .

Otrzymamy wówczas równanie:

$$\operatorname{tg} \delta_x = \operatorname{tg} \delta_N + \operatorname{tg} \delta_r + \omega T_4 - \omega T_2, \quad (24)$$

które uwzględnia wszystkie wielkości wpływowe występujące w mostku z ekranami wykonanymi według rys.2 i spełniającymi warunki (10) i (13).

Ostatnim etapem adiustacji mostka jest minimalizacja wartości wyrażenia:

$$\varepsilon = \operatorname{tg} \delta_r + \omega T_4 - \omega T_2, \quad (25)$$

które w równaniu (24) reprezentuje wielkości zakłócające bezpośredni odczyt wartości  $\operatorname{tg} \delta_x$ . W tym celu należy do jednego z rezystorów  $R_2$  lub  $R_4$  przyłączyć równoległe dodatkowy kondensator (trymer) o regulowanej pojemności  $C_1$ , którym można będzie tak zmienić stałą czasową  $T_2$  lub  $T_4$ , nie naruszając warunków (13), aby uzyskać  $\varepsilon = 0$  i tym samym bezpośredni odczyt wartości  $\operatorname{tg} \delta_x = \operatorname{tg} \delta_N$  (por. równ. (25) i (24)). Wykonanie opisanej adiustacji trymerem  $C_1$  wymaga dysponowania wzorcowym obiektem badanym (o znanych wartościach  $\operatorname{tg} \delta_x$  i  $C_x$ ) oraz postępowania według następującej procedury:

1° przed zrównoważeniem mostka - nastawić na dekadzie  $R_N$  wartość odpowiadającą znanej wartości  $\operatorname{tg} \delta_x$  (tzn. aby  $\operatorname{tg} \delta_N = \omega C_N R_N = 10^{-\sigma} R_N = \operatorname{tg} \delta_x$ ),

2° zrównoważyć mostek regulując dekadą  $R_4$  (odpowiedzialną za zrównoważenie składowej  $C_x$  według równ. (22)) oraz trymerem  $C_1$ .

Wykonanie czynności 1° i 2° powoduje, że równanie (24) sprowadza się do postaci  $\operatorname{tg} \delta_x = \operatorname{tg} \delta_N$ , która obowiązuje przy stałych wartościach  $\omega$ ,  $\operatorname{tg} \delta_r$ ,  $T_2$  i  $T_4$ . W rozpatrywanym mostku zachowane są tylko stałe wartości  $\omega$ ,  $\operatorname{tg} \delta_r$  i  $T_2$ , natomiast wartość  $T_4 = C_4 R_4$  ulega zmianie wraz ze zmianą mierzonej pojemności  $C_x = 10^{-1} R_4$ . Jeśli nastąpi zmiana pojemności  $\Delta C_x$  (w porównaniu z wartością  $C_x$  przyjętą w toku adiustacji), wówczas obowiązywać będzie równanie:

$$\operatorname{tg} \delta_x = \operatorname{tg} \delta_N + \Delta \varepsilon, \quad (26)$$

gdzie  $\Delta \varepsilon$  jest zmianą wyrażenia  $\varepsilon$  (równ. (25)) od wartości  $\varepsilon = 0$  uzyskanej w wyniku adiustacji i określona jest zależnością:

$$\Delta \varepsilon = \omega \Delta T_4 = \omega C_4 \Delta R_4 = 10 \omega C_4 \Delta C_x, \quad (26a)$$

przy czym wartość  $C_4$  jest wyrażona w F, natomiast  $\Delta C_x$  w pF (por. równ. (22)).

W wykonanym układzie mostkowym (1000 Hz,  $C_4 \approx 620$  pF) zależność (26a) przyjmuje postać:

$$\Delta \varepsilon \approx 38,6 \Delta C_x \cdot 10^{-6} = 38,6 (C_x - C_{x_0}) \cdot 10^{-6}, \quad (26b)$$

gdzie:  $C_x$  [pF] - pojemność badanego kondensatora;

$C_{x_0}$  [pF] - pojemność, przy której przeprowadzono adiustację stosując wzorec  $\operatorname{tg} \delta_x$  o pojemności  $C_x = C_{x_0} - p \cdot 1^\circ$  i  $2^\circ$ .

Mostek ten przeznaczony jest do badania wazelinny kondensatorowej odznaczającej się niewielką zmiennością względnej przenikalności elektrycznej (2,1 ... 2,2), co powoduje, że zmiany pojemności kondensatora pomiarowego są też niewielkie i zawierają się w granicach  $C_x = 126$  - 132 pF. Przy adiustacji wykonanej dla  $C_{x_0} = 129$  pF, maksymalna zmiana pojemności jest równa  $\Delta C_{x \max} = \pm 3$  pF i tym samym maksymalna zmiana  $\Delta \varepsilon_{\max}$  (równ. (26b)) przyjmuje wartość:

$$\Delta \varepsilon_{\max} \approx \pm 11,6 \cdot 10^{-5}. \quad (26c)$$

Uwzględniając otrzymaną wartość  $\Delta \varepsilon_{\max}$  w równaniu (26) można przyjąć, że dla  $\operatorname{tg} \delta_x$  zawartych w zakresie  $10^{-4}$  -  $10^{-3}$  jest to wartość pomijalnie mała i wówczas zamiast równania (26) można z dobrym przybliżeniem stosować równanie:

$$\operatorname{tg} \delta_x \approx \operatorname{tg} \delta_{R_N} = 10^{-6} R_N. \quad (27)$$

W celu dokładnego określenia wyniku  $\operatorname{tg} \delta_x$ , zwłaszcza przy  $\operatorname{tg} \delta_x < 10^{-3}$ , można do wartości wyznaczonej z równ. (27) dodać poprawkę (obliczoną z równania (26b) przy  $C_{x_0} = 129$  pF):

$$\Delta \varepsilon \approx 38,6 (C_x - 129) \cdot 10^{-6}. \quad (27a)$$

Ostatecznie w wyniku opisanej adiustacji i przy zachowaniu podanych parametrów wykonanego mostka, osiągnięta została możliwość poprawnego odczytu wartości  $C_x$  i  $\operatorname{tg} \delta_x$  bezpośrednio ze skal elementów nastawnych  $R_N$ .

i  $R_N$  - zgodnie z równaniami (22) i (27), które powtórnie przytoczono poniżej:

$$C_x = 10^{-1} R_4 \text{ [pF]}$$

$$\text{tg } \delta_x \approx 10^{-6} R_N$$

przy czym  $R_4$  i  $R_N$  - wyrażone w omach.

#### 4. Uwagi i wnioski końcowe

W ostatnim etapie adiustacji mostka, związanym z wyeliminowaniem zakłócających wpływów  $\varepsilon$  w równaniu (24), niezbędne było zastosowanie wzorcowego obiektu badanego o znanych wartościach  $\text{tg } \delta_x$  i  $C_x$ , z możliwością dobierania pojemności  $C_x = C_{xa}$ . W praktyce na ogół nie dysponuje się "wzorcem tangensa delta" o dowolnej (dobieranej) pojemności. Dla wzorca o pojemności  $C_0 \neq C_{xa}$  adiustację można przeprowadzić stosując inne nastawy dekady  $R_N$  niż podane w p. 2 (procedura adiustacji - 1° i 2°). Bliższe wyjaśnienie tego przypadku przedstawimy korzystając z równania (24) zapisanego w postaci:

$$\text{tg } \delta_x = \text{tg } \delta_N + \text{tg } \delta_T + \omega C_4 R_4 - \omega T_2 \quad (28)$$

lub po uwzględnieniu zależności  $R_4 = 10 \cdot C_x$  (por. równ. (22)):

$$\text{tg } \delta_x = \text{tg } \delta_N + \text{tg } \delta_T + 10 \omega C_4 C_x - \omega T_2 \quad (28a)$$

Jeśli zamierzamy przeprowadzić adiustację przy założonej wartości  $C_x = C_{xa}$ , a dysponujemy wzorcem tangensa delta o innej pojemności:  $C_0 \neq C_{xa}$ , wówczas można skorzystać z następującego przekształcenia równania (28a):

$$\text{tg } \delta_x = (\text{tg } \delta_N)' + \text{tg } \delta_T + 10 \omega C_4 C_0 - \omega T_2, \quad (28b)$$

gdzie:

$$(\text{tg } \delta_N)' = \text{tg } \delta_N + 10 \omega C_4 (C_{xa} - C_0),$$

skąd wynikają następujące wymagania dla przeprowadzenia zamierzonej adiustacji:

- (1) - przed zrównoważeniem mostka, należy nastawić na dekadzie  $R_N$  wartość odpowiadającą wyrażeniu  $(\operatorname{tg} \delta_N)' = \operatorname{tg} \delta_N + 10 \omega C_4 (C_{x_a} - C_0)$ , gdzie  $\operatorname{tg} \delta_N$  i  $C_0$  są parametrami zastosowanego wzorca;
- (2) - równoważenie mostka należy przeprowadzić regulując dekadą  $R_4$  (stan równowagi:  $R_4 = 10 \cdot C_0$ ) oraz trymerem  $C_1$  (przyłączonym wg opisu podanego w p. 3).

Po wykonaniu czynności (1) i (2) spełniona jest zależność:

$$\operatorname{tg} \delta_x = (\operatorname{tg} \delta_N)' = \operatorname{tg} \delta_N + 10 \omega C_4 (C_{x_a} - C_0), \quad (29)$$

z której wynika, że dla obiektu badanego o pojemności  $C_0 \approx C_{x_a}$  obowiązywać będzie zależność identyczna do równania (27), tzn:

$$\operatorname{tg} \delta_x \approx \operatorname{tg} \delta_N \quad (29a)$$

Podany sposób adiustacji sprawdzono stosując jako wzorzec tangensa delta kondensator pomiarowy (powietrzny) firmy Tettex, typ 2903, w którym  $\operatorname{tg} \delta_N = 10^{-5}$  oraz  $C_0 = 60$  pF. Ten sam kondensator po wypełnieniu badaną wazeliną kondensatorową zwiększał swoją pojemność do wartości  $C_{x_a} = 129 \pm 3$  [pF].

Opisany system ekranowania i adiustacji umożliwił przystosowanie układu mostkowego de Sauty'ego-Wiena do pomiarów niskostratnej wazeliny kondensatorowej przy częstotliwości 1000 Hz, w warunkach wymaganych przez odpowiednie normy dotyczące badań materiałów elektroizolacyjnych, ciekłych. W porównaniu z innymi układami mostkowymi przeznaczonymi do tego samego celu (różne warianty mostków Scheringa lub tzw. mostki czteropojemnościowe [2]) - głównymi zaletami opracowanego rozwiązania są znacznie mniejsze koszty wykonania przy zachowaniu porównywalnej dokładności pomiarów. Przede wszystkim nie jest wymagane stosowanie kosztownego, zmiennego wzorca pojemności, którego rolę w mostku de Sauty'ego-Wiena spełnia zmienny wzorzec rezystancji  $R_N$ . Ponadto w odniesieniu do stałego wzorca pojemności  $C_N$  - nie jest konieczne wymaganie skrajnie małych strat ( $\operatorname{tg} \delta_r$ ), gdyż są one kompensowane w procesie adiustacji.

Spełnienie warunków bezpośredniego odczytu mierzonej pojemności  $C_x$  jest w omawianym rozwiązaniu mostka łatwiejsze niż spełnienie odpowiednich warunków bezpośredniego odczytu  $\operatorname{tg} \delta_x$ . W przypadku pomiaru  $C_x$  wystarczy spełnienie mniej ostrych wymagań przy doborze stałych czasowych  $T_2$  i  $T_4$ .

(por. relacje (13) oraz równ. (15) i (22)), natomiast w przypadku pomiaru małych wartości  $\tan \delta_x$  - należy liczyć się z koniecznością uwzględniania poprawki  $\Delta \epsilon = 10 \omega C_4 \Delta C_x$  (por. równ. (26) i (26a)), jeśli jej wartość nie może być pominięta w porównaniu z wartością mierzoną  $\tan \delta_x$ . Konieczność uwzględniania poprawek przy dokładniejszych pomiarach małych wartości  $\tan \delta$  występuje również w mostkach dostępnych w handlu (typu Scheringa lub innych). Należy zwrócić uwagę, że w przykładowo wykonanym mostku de Sauty'ego-Wiena przeznaczonym do badań wazeliny kondensatorowej, zmiany  $\Delta C_x$  są małe ( $\pm 3$  pF) i dlatego można było dopuścić stosunkowo dużą pojemność ekranów  $C_4 \approx 620$  pF zachowując przy tym wystarczająco małe wartości poprawek  $\Delta \epsilon$ . Dalsze zmniejszenie  $\Delta \epsilon$  można uzyskać zmniejszając pojemność ekranów  $C_4$  (np. realne jest osiągnięcie  $C_4 \approx 60$  pF), a jeśli pomiary będą wykonywane przy częstotliwości 50 Hz (zamiast poprzednio zakładanej 1000 Hz), wówczas  $\Delta \epsilon$  zmniejsza się 200 razy.

#### LITERATURA

- [1] Marcyniuk A., Pasecki E., Pluciński M., Szadkowski B.: Podstawy metrologii elektrycznej. WNT, Warszawa 1984 r.
- [2] Siciński Z.: Badanie materiałów elektroizolacyjnych. WNT, Warszawa 1968 r.
- [3] Uniwersalny mostek RLC, Katalog firmy Rhode-Schwarz, 1975 r.
- [4] Półautomatyczny mostek RLC, typ E-914, ZZEAP "Meratronik", Szczecin 1976 r.

Recenzent: doc. dr hab. inż. Zygmunt Kuśmierk

Wpłynęło do redakcji dnia 3 kwietnia 1990 r.

## Резюме

В статье представлены система экранирования и метод юстировки моста предназначенного для исследования диэлектрических свойств конденсаторного вазелина. Решение опирается на известной структуре моста Де'Сауты-Вина, который до сих пор не применялся в измерениях диэлектриков с низкими потерями и с коэффициентом  $\tan \delta$  меньше 0.01. В работе проведен подробный анализ погрешностей вводимых предложенной системой экранировки. Сформулированы условия для минимизации этих погрешностей. Представлена и доказана процедура юстировки моста, которая дает возможность правильного отсчета измеряемых параметров непосредственно на шкалах установочных элементов моста. Определены уравнения расчета поправок, которые надо учитывать при точных измерениях коэффициента диэлектрических потерь, а особенно при малых значениях ( $< 0.01$ ). Указаны условия, когда поправки имеют значения очень малые и можно их не учитывать при непосредственном отсчете измеряемых величин.

## SCREENING AND ADJUSTMENT OF de SAUTY-WIEN BRIDGE

## Summary

In the paper the system of screening and adjustment of the bridge designed for testing condenser vaseline dielectric properties has been described. The system has been based on the well-known structure of de Sauty-Wien bridge which has not been applied before for the measurements of low-loss dielectrics with tangent delta less than  $10^{-2}$ . A detailed analysis of errors in the suggested system of screens has been carried out and conditions of minimization of such errors has been formulated. Adjustment procedure of the bridge has been presented and justified. Such procedure ensures the possibility of correct readings of the measured parameters direct from the scale of bridge regulating elements. Equations for corrections calculations have been defined which have to be taken into account while in more precise measurements of dielectric loss coefficient mainly of low value ( $< 10^{-2}$ ). Conditions have been pointed out in which corrections have negligibly small values and may be omitted in direct reading of the measured values.