ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1992
Seria: ELEKTRYKA z. 128 Nr kol. 1174

Teresa SZADKOWSKA
Brunon SZADKOWSKI

# WZORCOWANIE MOSTKÓW PRZEZNACZONYCH DO POMIARU WSPÓŁCZYNNIKA STRAT DIELEKTRYCZNYCH

Streszczenie. W artykule przedstawiono problemy wzorcowania różnych typów mostków do pomiaru współczynnika strat dielektrycznych (tg $\delta$) w zakresie $10^{-4}$ - $10^{-1}$. Wykazano, że w różnych typach mostków ten sam wzorzec tg $\delta$ może wykazywać inną wartość zależną od sposobu przyłączenia do mostka oraz od systemu ekranów i uziemień w układzie mostkowym.

# CALIBRATION OF BRIDGES DESIGNED FOR DIELECTRIC LOSS FACTOR MEASUREMENT

Summary. The paper presents some problems of different type bridges calibration designed for dielectric loss factor measurement (tg $\delta$) in range $10^{-4}$ - $10^{-1}$. It has been shown that the same tg $\delta$ standard can differ in value for the different bridge types. That value depends on standard to bridge connection method, shields system and earthing system in the bridge.

# КАЛИБРОВКА МОСТОВ ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ КОЭФФИЦИЕНТА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ

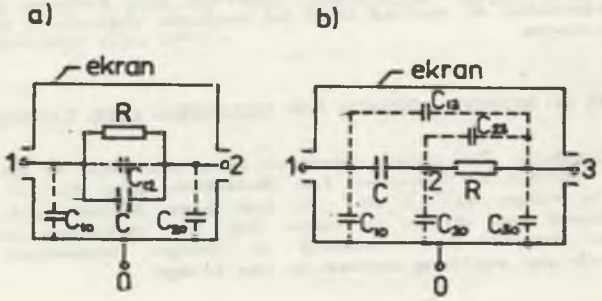
Резюме. Представлены проблемы калибровки разных типов мостков дляизмерении коэффициента диэлектрических потерь (tg $\delta$) в диапазоне $10^{-4}$ - $10^{-1}$. Доказано, что в разных типах мостов - тоже самый эталон tg $\delta$ может иметь другое значение, которое зависит от способа присоединения эталона к мосту, а также от системы экранов и заземлений в схеме мостка.

## 1. Wprowadzenie

Jednym z podstawowych parametrów określających stan i jakość materiałów elektroizolacyjnych jest współczynnik strat dielektrycznych (tg $\delta$). Typowe wartości tg $\delta$ materiałów elektroizolacyjnych stosowanych w transformatorach, maszynach elektrycznych i wielu innych urządzeniach są małe ($10^{-4}$ - $10^{-1}$) i powinny być mierzone z dokładnością określaną przez odpowiednie normy. Do takich pomiarów stosowane są przede wszystkim specjalne układy mostkowe, odznaczające się dużą czułością i zadowalającą dokładnością.

Wzorcowanie mostków jest niezbędne bezpośrednio po ich wyprodukowaniu, jak również w toku eksploatacji (przepisy wymagają okresowego sprawdzania aparatury kontrolno-pomiarowej). Najczęściej stosowaną metodą wzorcowania jest wykonanie pomiarów, w których obiektami mierzonymi są wzorce. Wzorcem współczynnika strat dielektrycznych nie może być kondensator z dielektrykiem, gdyż właściwości dielektryków nie zapewniałyby wymaganej od wzorców czasowej i temepraturowej stabilności parametrów. Dlatego stosuje się wzorce złożone z równolegle lub szeregowo połączonych wzorców pojemności C i rezystancji R [1 - 4].

Wzorce tg $\delta$ nie są prostymi, dwuelementowymi strukturami RC. Wobec konieczności ekranowania wzorców mamy do czynienia z bardziej złożonymi strukturami, w których występują dodatkowe pojemności względem ekranu oraz inne. Na rys. 1 przedstawiono znane w literaturze schematy równoległego (a) i szeregowego (b) połączenia wzorców tg $\delta$ z ekranami [4].




Rys.1. Schematy równoległego (a) i szeregowego (b) połączenia wzorców tg $\delta$ (wg [4]) z uwzględnieniem pojemności do ekranów ($C_{10}$; $C_{20}$; $C_{30}$) i pojemności dodatkowych ($C_{12}$; $C_{13}$; $C_{23}$)

Fig.1. Circuit diagram of (a) the parallel and (b) the series loss tangent standard (according to [4]) including capacitances to shields ($C_{10}$; $C_{20}$; $C_{30}$) and additional capacitances ($C_{12}$; $C_{13}$; $C_{23}$)

Wartości tg $\delta$ wzorców przedstawionych na rys. 1 są złożonymi funkcjami wszystkich występujących w schemacie wielkości C i R. Dokładność omawianych wzorców zależy nie tylko od dokładności, z jaką znane są poszczególne wartości C i R, lecz przede wszystkim od zgodności przyjętego modelu (schematu) ze stanem rzeczywistym. Osiągnięcie zadowalającej zgodności wymaga stosowania bezstratnych wzorców pojemności C (kondensatorów powietrznych), wzorców rezystancji R o małych stałych czasowych, a ponadto odpowiedniej konstrukcji całego układu (o pomijalnie małych upływnościach izolacyjnych do ekranu, optymalnych wymiarach geometrycznych itp).

Bezpośrednie wykorzystanie opisanych w literaturze wzorców wymaga bliższego wyjaśnienia, gdyż może prowadzić do całkowicie błędnych wyników. Odnosi się to przede wszystkim do sytuacji, gdy wzorcowaniem objęte są różne typy mostków (o różnych systemach ekranowania) oraz gdy sprawdzane są podzakresy o najmniejszych wartościach tg $\delta$.

Przyłączenie wzorca do układu mostkowego odbywa się w sposób narzucony: do dostępnych zacisków mostka doprowadza się trzy przewody wzorca, z których jeden (0) jest połączeniem ekranów wzorca i mostka. Zależnie od systemu ekranowania mostka wynik pomiaru tg $\delta$ tego samego wzorca jest inny. Nie można więc w każdym mostku stosować podanych w literaturze [1, 3, 4] zależności, które odnoszą się tylko do wybranego typu mostka, zazwyczaj mostka Scheringa. Przy małych wartościach tg $\delta$ (poniżej $10^{-3}$) należy liczyć się z błędami wzorców, spowodowanymi wpływem strat własnych kondensatorów (dla kondensatorów powietrznych zawierają się one w granicach $1...5 \cdot 10^{-5}$) oraz wpływem upływności izolacyjnych do ekranu. Wymienionych wpływów nie uwzględnia się w schematach podanych na rys. 1 i innych [1 - 4].

Przedstawione uwagi wskazują, że poprawne przeprowadzenie wzorcowania mostków różnych typów (Scheringa, de Sauty'ego-Wiena i in., przy uwzględnieniu różnych systemów ekranowania) wymaga każdorazowo indywidualnego przeanalizowania schematów zarówno układów mostkowych, jak i wzorców tg $\delta$. Bliższe wyjaśnienie tych zagadnień, zwłaszcza dla wzorcowania mostków na podzakresach o małych wartościach tg $\delta$ ($10^{-4}$ - $10^{-1}$), jest przedmiotem dalszych rozważań.

## 2. Model zastosowanego wzorca tg $\delta$

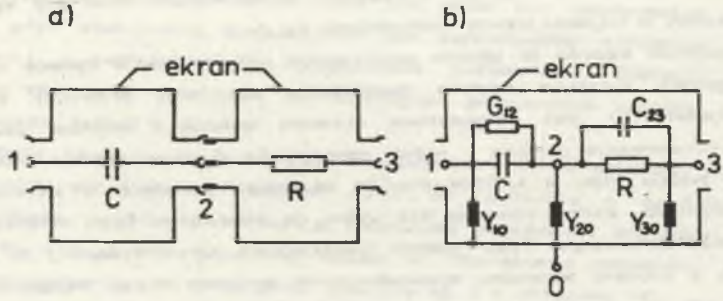
Dla małych wartości tg $\delta$ ($10^{-4}$ - $10^{-1}$) znacznie korzystniejsze jest stosowanie wzorców o szeregowej strukturze RC, gdyż nie wymaga się tutaj nadmiernie dużych rezystancji R. Schemat zastosowanego wzorca przedstawiono na rys. 2a, natomiast odpowiadający mu schemat zastępczy na rys. 2b.

W porównaniu z zalecanym w literaturze schematem z rys. 1b, w przyjętym na rys. 2b schemacie występują pewne różnice, a mianowicie:

- uwzględniono dodatkowo konduktancję $G_{12}$ reprezentującą straty własne kondensatora wzorcowego C;
- uwzględniono dodatkowo upływności izolacyjne $G_{10}$, $G_{20}$ i $G_{30}$ do ekranu, które wraz z odpowiednimi pojemnościami $C_{10}$, $C_{20}$ oraz $C_{30}$ oznaczono na schemacie jako admitancje:

$$\left.\begin{aligned} Y_{10} &= G_{10} + j\omega C_{10} \\ Y_{20} &= G_{20} + j\omega C_{20} \\ Y_{30} &= G_{30} + j\omega C_{30} \end{aligned}\right\} , \qquad (1)$$

- pominięto pojemność $C_{13}$, gdyż przy oddzielnym ekranowaniu elementów C, R (rys.2a) pojemność taka nie występuje.




Rys.2. Zastosowany szeregowy wzorzec tg $\delta$ (a) i jego schemat zastępczy (b)

Fig.2. The series lass tangent standard used by the author (a) and its equivalent diagram (b)

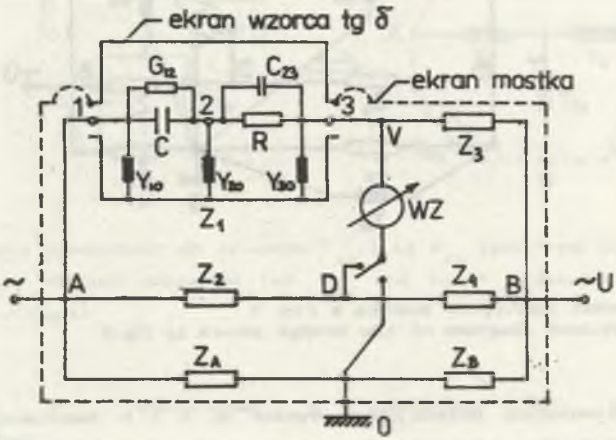
Wszystkie parametry schematu z rys. 2b powinny być znane co do wartości (np. wyznaczone doświadczalnie), aby można było określić wartość tg $\delta$ rozważanego wzorca. Należy jednak zwrócić uwagę, że parametry reprezentujące straty własne kondensatora C oraz upływności izolacyjne mogą ulegać zmianom w funkcji różnych czynników (czasu, temperatury, zawilgocenia itp). Zmiany te powinny być oszacowane i uwzględnione przy ocenie błędu wzorca tg $\delta$.

Wyznaczenie wartości tg $\delta$ wzorca reprezentowanego schematem z rys. 2b polega na obliczeniu składowych zastępczej impedancji (lub admitancji) "widzianej" z zacisków 1 i 3 wzorca, przy czym zależnie od miejsca przyłączenia zacisku 0 ekranu wartość tg $\delta$ jest inna. Zazwyczaj ekran wzorca łączony jest z zaciskami 1 lub 3 [4], co jednak nie zawsze może być stosowane w przypadku sprawdzania mostków. Wzorzec powinien być przyłączony do sprawdzanego mostka tak, jak obiekt badany, czyli ekran wzorca powinien być przyłączony do ekranu mostka. Oznacza to, że zależnie od typu mostka i zastosowanego w nim systemu ekranowania ten sam wzorzec może reprezentować różne wartości tg $\delta$.

W dalszym ciągu przeanalizowane zostaną możliwości zastosowania wzorców o strukturze przedstawionej na rys. 2 do sprawdzania mostków o różnych systemach ekranowania.

## 3. Mostki symetryczne względem ziemi (z ramionami pomocniczymi)

Na rys. 3 przedstawiono ogólny schemat mostka symetrycznego względem ziemi, z ramionami pomocniczymi o impedancjach $Z_A$ i $Z_B$ oraz wzorcem tg $\delta$ przyłączonym do zacisków A, V i 0. Impedancje $Z_A$ i $Z_B$ reprezentują doziemne upływności węzłów A i B mostka wraz z równolegle dołączonymi do tych węzłów impedancjami nastawnymi, umożliwiającymi dokonywanie zmian $Z_A$ i $Z_B$.



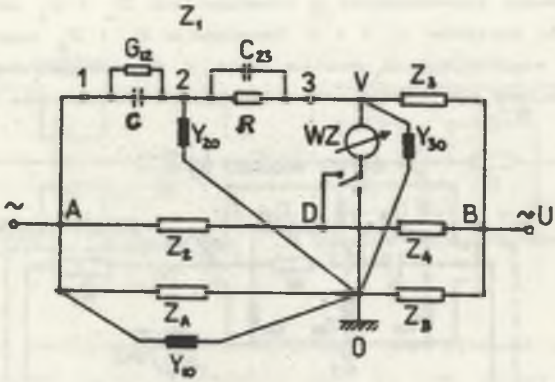

Rys.3. Ogólny schemat mostka z ramionami pomocniczymi $Z_A$ i $Z_B$ ($Z_1$ - impedancja wzorca tg $\delta$, $Z_2$, $Z_3$, $Z_4$ - impedancje ramion podstawowych, WZ - wskaźnik zera).

Fig.3. General circuit diagram of the bridge with auxiliary arms $Z_A$ and $Z_B$ ($Z_1$ - impedance of the loss tangent standard, $Z_2$, $Z_3$, $Z_4$ - impedances of basic arms, WZ - balance (null) indicator)

Przypomnijmy, że zastosowanie ramion pomocniczych (nastawnych) umożliwia wyrównanie potencjału uziemionych ekranów mostka i wzorca (0) z potencjałem węzła V mostka i tym samym wyeliminowanie wpływów doziemnych upływności węzłów ABVD mostka w stanie równowagi [5].

W nowoczesnych konstrukcjach mostków Scheringa (np. firmy Tettex) wyrównanie odpowiednich potencjałów 0 i V realizowane jest automatycznie za pomocą specjalnych obwodów elektronicznych (wówczas ramiona pomocnicze $Z_A$ i $Z_B$ reprezentują tylko upływności doziemne i nie zawierają równolegle przyłączonych elementów nastawnych). Zasada eliminacji wpływów doziemnych upływności takiego mostka pozostaje jednak ta sama i w dalszej analizie można korzystać ze schematu przedstawionego na rys. 3.

W celu wyznaczenia wartości tg $\delta$ wzorca przyłączonego do węzłów A, V, 0 rozważanego mostka wygodniej jest posłużyć się schematem zastępczym, podanym na rys. 4.




Rys.4. Schemat zastępczy mostka z rys. 3
Fig.4. Equivalent diagram of the bridge shown in fig.3

Przy wyrównanych potencjałach węzłów 0, V i D immitancje $Z_A$, $Y_{10}$, $Z_B$, $Y_{30}$ nie występują w równaniu równowagi mostka podstawowego, które przybiera postać:

$$Z_{AV} Z_4 = Z_2 Z_3 , \tag{2}$$

przy czym $Z_{AV}$ oznacza impedancję ramienia AV mostka, którą określamy stosując w odniesieniu do impedancji $Z_1$ transfiguracje "gwiazda/trójkąt". Zauważmy, że otrzymane w wyniku transfiguracji pozostałe impedancje $Z_{A0}$ i $Z_{V0}$ również nie występują w równaniu równowagi (2). Zmierzoną za pomocą mostka wartością tg $\delta$ wzorca jest zatem wartość określona przez stosunek składowych $Z_{AV}$.

Zamiast obliczania składowych $Z_{AV}$ wygodniej jest obliczyć admitancję:

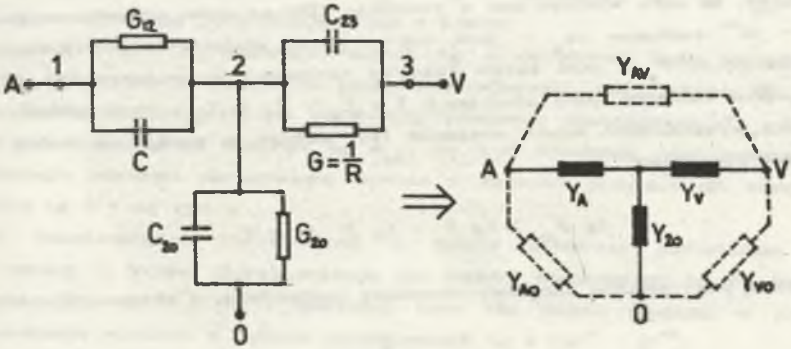
$$Y_{AV} = \frac{1}{Z_{AV}} , \tag{3}$$

oraz odpowiedni kąt fazowy $\varphi_{AV}$ tej admitancji, który pozostaje w prostym związku z interesującą nas wartością kąta strat $\delta_{AV}$ wzorca i jego tangensa (równaniami 4 i 5).

$$\delta_{AV} = \frac{\pi}{2} - \varphi_{AV} , \tag{4}$$

$$\mathrm{tg}\, \delta_{AV} = \mathrm{ctg}\, \varphi_{AV} . \tag{5}$$

W celu ułatwienia dalszych obliczeń tg $\delta_{AV}$ według podanej koncepcji posłużymy się schematami i oznaczeniami podanymi na rys. 5 ilustrującymi "gwiazdę" admitancji między węzłami A, V, 0 rozpatrywanego mostka.




Rys.5. Schematy pomocnicze do obliczeń $Y_{AV}$ i tg $\delta_{AV}$ (por. rys. 4)

Fig.5. Auxiliary circuit diagrams for $Y_{AV}$ and tg $\delta_{AV}$ determination (compare to fig.4)

Admitancję $Y_{AV}$ wyznaczymy z zależności dla transfiguracji "gwiazda/trójkąt":

$$Y_{AV} = \frac{Y_A \, Y_V}{Y_A + Y_V + Y_{20}} = \frac{Y_A \, Y_V}{Y} , \tag{6}$$

przy czym:

$$Y_A = G_{12} + j\omega C , \tag{7}$$

$$Y_V = G + j\omega C_{23} , \tag{8}$$

$$Y = (G_{12} + G + G_{20}) + j\omega(C + C_{23} + C_{20}) . \tag{9}$$

Kąty fazowe admitancji występujących w równaniu (6) związane są relacją wynikającą z równania (6):

$$\varphi_{AV} = \varphi_A + \varphi_V - \varphi . \tag{10}$$

Podstawiając zależność (4) do równania (10), otrzymujemy:

$$\frac{\pi}{2} - \delta_{AV} = \varphi_A + \varphi_V - \varphi \tag{11}$$

Kąt $\varphi_A$ wygodniej jest wyrazić dopełnieniem $\delta_A$ do kąta $\pi/2$, tzn.:

$$\varphi_A = \frac{\pi}{2} - \delta_A \tag{12}$$

Po uwzględnieniu relacji (12) w równaniu (11) otrzymujemy:

$$\delta_{AV} = \delta_A - \varphi_V + \varphi \tag{13}$$

Zauważmy, że kąty występujące w równaniu (13) są małe, zawarte w granicach $10^{-5}$ - $10^{-4}$ radianów ($\delta_A$ - jest kątem strat dielektrycznych kondensatora wzorcowego C; $\varphi_V$ - jest kątem fazowym rezystora wzorcowego $R = 1/G$; $\varphi$ - jest kątem fazowym sumy admitancji $Y = Y_A + Y_V + Y_{20}$). Przy podanych wartościach wymienionych kątów równanie (13) możemy z pomijalnie małym błędem zastąpić równaniem:

$$tg\ \delta_{AV} \cong tg\ \delta_A - tg\ \varphi_V + tg\ \varphi\ , \tag{14}$$

przy czym poszczególne tangensy określimy korzystając z równań (7 - 9):

$$tg\ \delta_A = \frac{G_{12}}{\omega C}\ , \tag{15}$$

$$tg\ \varphi_V = \frac{\omega C_{23}}{G}\ , \tag{16}$$

$$tg\ \varphi = \omega \frac{C + C_{23} + C_{20}}{G_{12} + G + G_{20}} \cong \omega \frac{C + C_{23} + C_{20}}{G}\ . \tag{17}$$

W równaniu (17) zastosowano przybliżenie polegające na pominięciu konduktancji $G_{12}$ i $G_{20}$ (reprezentujących straty dielektryczne kondensatora C oraz upływności izolacji do ekranu) w porównaniu z konduktancją G rezystora wzorcowego, której wartość jest co najmniej $10^4$ razy większa. Ostatecznie, po podstawieniu równań (15 - 17) do zależności (14) otrzymujemy interesującą nas wartość $tg\ \delta$ wzorca zastosowanego w rozważanym mostku:

$$tg\ \delta_{AV} \cong \omega R\ (C + C_{20}) + tg\ \delta_A\ , \tag{18}$$

gdzie: $R = \frac{1}{G}$ - rezystancja rezystora wzorcowego zastosowanego w szeregowym wzorcu $tg\ \delta$;

$C$ - pojemność kondensatora wzorcowego zastosowanego w szeregowym wzorcu $tg\ \delta$;

$C_{20}$ - pojemność wzorca $tg\ \delta$ względem ekranu (między węzłami 2 - 0);

$tg\ \delta_A = \frac{G_{12}}{\omega C}$ - współczynnik strat dielektrycznych kondensatora wzorcowego C.

Błąd obliczeń wartości tg $\delta_{AV}$ według równania (18) wynikający z zastosowanych przybliżeń nie przekracza wartości ± 0,3% dla górnej granicy założonego zakresu, tj. dla tg $\delta_{AV} = 10^{-1}$, natomiast dla tg $\delta_{AV} = 10^{-2} - 10^{-4}$ odpowiedni błąd jest mniejszy niż ± 0,003%.

O dokładności rozważanego wzorca tg $\delta$ decydować będą dokładności, z jakimi znane są poszczególne parametry schematu zastępczego ($G$, $C$, $C_{20}$, $G_{12}$). Zauważmy, że niektóre parametry schematu zastępczego ($C_{23}$, $G_{20}$, $Y_{10}$, $Y_{30}$) nie wpływają na wartość tg $\delta_{AV}$, co jest wyłącznie właściwością rozpatrywanego systemu ekranowania mostka i sposobu przyłączenia szeregowego wzorca tg $\delta$ - wg rys. 3.

W konstrukcjach wzorców tg $\delta$ należy stosować powietrzne wzorce pojemności $C$, które charakteryzują się małymi wartościami tg $\delta_A$ zawartymi w granicach (1...5) $\cdot 10^{-5}$. Wartości tych nie można pominąć w przypadku sprawdzania mostków w dolnych podzakresach tg $\delta$ ($10^{-4} - 10^{-3}$).

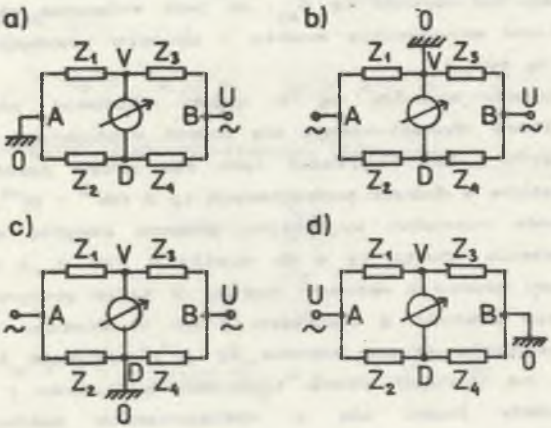
Na zakończenie rozważań wyjaśnijmy jeszcze kwestię możliwości innego sposobu przyłączenia wzorca tg $\delta$ do mostka z rys. 3, a mianowicie - bez połączenia ekranu wzorca z ekranem mostka. W takim przypadku ekran wzorca (zacisk 0) należy zewrzeć z zaciskiem 1 lub 3. Wówczas nie wolno jednak dopuścić do połączenia ekranu wzorca tg $\delta$ z ekranami kabli łączących z mostkiem. Mogą tu wystąpić pewne trudności montażowe i zależnie od ich rozwiązania należy liczyć się z występowaniem zakłóceń w procesie równoważenia mostka. Nie można również korzystać z zależności (18) do określenia wartości tg $\delta$ wzorca. Odpowiednie obliczenia wymagają uwzględnienia zmian w schemacie zastępczym wzorca tg $\delta$ (por. rys. 2b), wynikających ze zwarcia zacisku ekranu (0) z zaciskiem 1 lub 3. Omówiony przypadek wzorca z ekranem zwartym z jednym z zacisków (1 lub 3) nie jest korzystny w zastosowaniu do rozważanych mostków symetrycznych względem ziemi. Natomiast w mostkach niesymetrycznych względem ziemi taki przypadek jest koniecznością i jego bliższe wyjaśnienie przedstawiono w następnym punkcie rozważań

## 4. Mostki niesymetryczne względem ziemi

Schematy mostków niesymetrycznych względem ziemi przedstawiono na rys. 6. Poszczególne mostki (rys. 6) reprezentują różne rozwiązania układowe, np. wysokonapięciowe i niskonapięciowe, według Scheringa, De Sauty'ego-Wiena i in. - zależnie od charakteru i struktury impedancji ramion $Z_2$, $Z_3$, $Z_4$ [5].

Do rozważenia interesującego nas zagadnienia wzorcowania mostków za pomocą trójzaciskowego wzorca tg $\delta$ istotne jest przede wszystkim ustalenie miejsc przyłączenia wzorca do mostka. Zakładamy, że wzorzec tg $\delta$ przyłączany jest tak samo jak obiekt badany ($Z_1$), a więc do dostępnych

z zewnątrz zacisków A i V, natomiast ekran wzorca połączony jest z uziemionym zaciskiem mostka, którym jest jeden z zacisków A, V, B, D - zależnie od rodzaju mostka (rys. 6). Wynika stąd, że w każdym z przedstawionych na rys.6 schematów będziemy mieli do czynienia z innymi impedancjami $Z_1$ mimo przyłączania w miejsce $Z_1$ tego samego wzorca tg $\delta$ wg rys. 2b. Odpowiednie wartości tg $\delta$, zmierzone przy zastosowaniu tego samego wzorca będą inne w każdym z przedstawionych mostków.



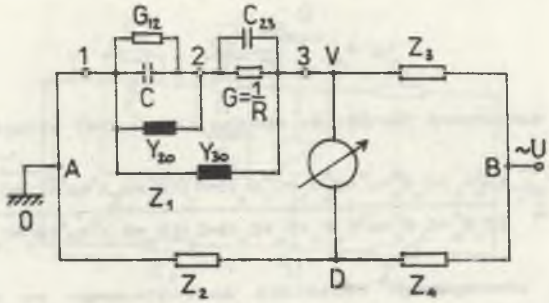

Rys.6. Schematy mostków niesymetrycznych względem ziemi. a, b - układy z uziemionym obiektem badanym $Z_1$; c, d - układy z nieuziemionym obiektem badanym $Z_1$

Fig.6. Diagrams of the bridges unsymmetrical to the ground. a, b - systems with grounded tested object $Z_1$; c, d - systems with ungrounded tested object $Z_1$

Rozważmy mostek z rys. 6a. Po przyłączeniu wzorca tg $\delta$ (por. schemat z rys. 2b) do zacisków A, V mostka i połączeniu ekranu wzorca z uziemionym zaciskiem A (0) otrzymujemy schemat podany na rys. 7. Stan równowagi mostka z rys. 7 określa równanie:

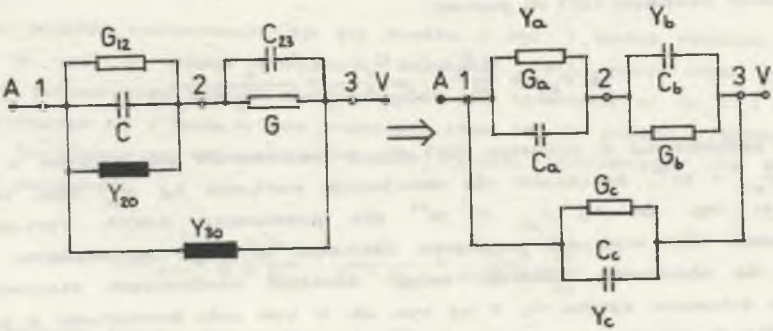
$$Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3 , \tag{19}$$

przy czym $Z_1$ jest impedancją wzorca tg $\delta$ przyłączonego do zacisków A, V mostka. Wyznaczając składowe impedancji $Z_1$, możemy określić wartość tg $\delta$ wzorca w sprawdzanym mostku. Do obliczeń wygodniej jest posłużyć się schematami przedstawionymi na rys. 8, gdzie rozpatrywany wzorzec tg $\delta$ przedstawiono za pomocą schematu zawierającego admitancje $Y_a$, $Y_b$, $Y_c$.




Rys.7. Schemat mostka z rys. 6a z przyłączonym wzorcem tg $\delta$ ($Z_s$)

Fig.7. Circuit diagram of the bridge shown in fig.6a with connected loss tangent standard ($Z_s$)




Rys.8. Schematy pomocnicze do obliczeń tg $\delta$ wzorca w układzie mostkowym z rys. 7

Fig.8. Auxiliary circuit diagrams for loss tangent standard determination in bridge system shown in fig.7

Poszczególne admitancje oznaczone na rys. 8 określone są zależnościami:

$$Y_a = G_a + j\omega C_a = G_{12} + G_{20} + j\omega (C + C_{20}) , \tag{20}$$

$$Y_b = G_b + j\omega C_b = G + j\omega C_{23} , \tag{21}$$

$$Y_c = G_c + j\omega C_c = G_{30} + j\omega C_{30} . \tag{22}$$

Natomiast wypadkowa admitancja $Y_{AV}$, będąca odwrotnością impedancji $Z_s$ (rys.7), określona jest równaniem:

$$Y_{AV} = \frac{Y_a Y_b}{Y_a + Y_b} + Y_c . \tag{23}$$

Interesującą nas wartość $tg\ \delta_{AV}$ wyznaczymy obliczając składowe rzeczywistą $Re\ Y_{AV}$ i urojoną $Im\ Y_{AV}$, a następnie stosując równanie definicyjne:

$$tg\ \delta_{AV} = \frac{Re\ Y_{AV}}{Im\ Y_{AV}} \tag{24}$$

Po podstawieniu zależności (20-22) do równań (23) i (24) otrzymujemy:

$$tg\ \delta_{AV} = \frac{1}{\omega} \cdot \frac{[G_a^2 G_b + G_a G_b^2 + \omega^2 (C_a^2 G_b + C_b^2 G_a)] + G_c [(G_a + G_b)^2 + \omega^2 (C_a + C_b)^2]}{[C_a G_b^2 + C_b G_a^2 + \omega^2 C_a C_b (C_a + C_b)] + C_c [(G_a + G_b)^2 + \omega^2 (C_a + C_b)^2]} \tag{25}$$

Konduktancja $G_b$ szeregowego rezystora zastosowanego we wzorcu $tg\ \delta$ o wartości ($10^{-4}$... $10^{-1}$) jest co najmniej $10^4$ razy większa od pozostałych konduktancji ($G_a$, $G_c$) oraz co najmniej 10 razy większa od susceptancji $\omega C_a$, $\omega C_b$, $\omega C_c$. Uwzględniając podane relacje, można z dobrym przybliżeniem uprościć równanie (25) do postaci:

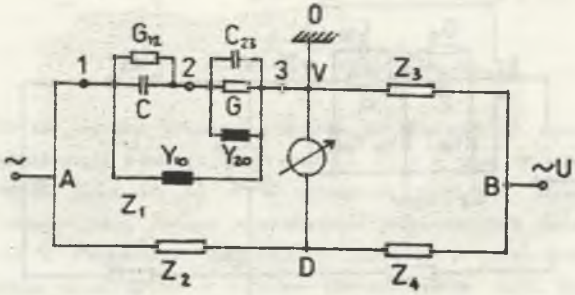
$$tg\ \delta_{AV} \cong \frac{\omega\ C_a}{G_b} \cdot \frac{C_a}{C_a + C_c} + \frac{G_a + G_c}{\omega\ (C_a + C_c)} \tag{26}$$

Błąd przybliżenia w równaniu (26) nie przekracza 1% dla wzorców o wartości $tg\ \delta_{AV} = 10^{-1}$, natomiast dla mniejszych wartości $tg\ \delta_{AV}$ błąd ten silnie maleje (np. dla $tg\ \delta_{AV} \leq 10^{-2}$ nie przekracza 0,01%). Występujące w równaniu (26) wielkości oznaczone indeksami a, b, c (wprowadzone pomocniczo dla ułatwienia obliczeń) należy zastąpić wielkościami stosowanymi do opisu schematu wzorca $tg\ \delta$ wg rys. 2b. W tym celu korzystamy z zależności (20-22) i otrzymujemy ostatecznie zależność obowiązującą w mostku z rys. 7:

$$tg\ \delta_{AV} \cong \frac{\omega\ (C + C_{20})}{G} \cdot \frac{(C + C_{20})}{(C + C_{20} + C_{90})} + \frac{G_{12} + G_{20} + G_{90}}{\omega\ (C + C_{20} + C_{90})} \tag{27}$$

Wzór (27) różni się od odpowiednich wzorów podawanych w literaturze [3, 4] tym, że uwzględnia wpływy konduktancji $G_{12}$, $G_{20}$, $G_{90}$, które w cytowanych publikacjach były pomijane (por. rys. 1). Wpływów tych nie można pomijać przy sprawdzaniu mostków w dolnych podzakresach $tg\ \delta$ ($10^{-4}$ - $10^{-9}$).

Na rys. 9 przedstawiono następny schemat mostka (z rys. 6b) z przyłączonym wzorcem $tg\ \delta$.




Rys.9. Schemat mostka z rys. 6b z przyłączonym wzorcem tg $\delta$ ($Z_4$)

Fig.9. Circuit diagram of the bridge shown in fig.6b with connected loss tangent standard ($Z_4$)

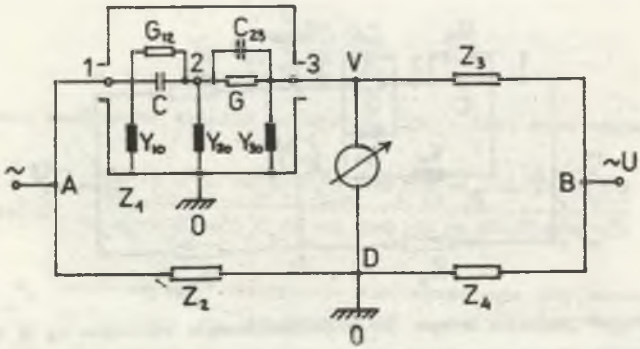
Stosując podobne rozumowanie jak dla mostka z rys. 7, można wykazać, że w mostku z rys. 9 nadal obowiązuje zależność (26), przy czym relacje pomiedzy parametrami pomocniczymi oznaczonymi indeksami a, b; c i parametrami wzorca tg $\delta$ będą w tym przypadku inne, niż to podano w równaniach (20-22). Uwzględniając odpowiednie zmiany relacji, otrzymujemy dla mostka z rys. 9 zależność:

$$\mathrm{tg}\,\delta_{AV} \cong \frac{\omega C}{G + G_{20}} \cdot \frac{C}{C + C_{10}} + \frac{G_{12} + G_{10}}{\omega (C + C_{10})} \qquad (28)$$

Należy zwrócić uwagę, że równania (27) i (28) wyprowadzono zakładając takie przyłączenie wzorców tg $\delta$ do mostków, jak to przedstawiono na rys. 7 i 9, tzn. połączone są zaciski 1 - A oraz 3 - V. W przypadku odwrotnego przyłączenia (tzn. 1 - V oraz 3 - A) przy niezmienionym połączeniu ekranu wzorca z uziemionym zaciskiem mostka można łatwo wykazać, że wówczas w mostku z rys. 7 obowiązywać będzie równanie (28), a w mostku z rys. 9 - równanie (27).

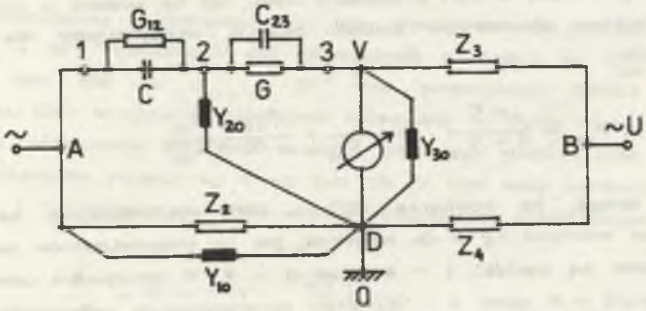
Rozważmy kolejny schemat mostka z rys. 6c z przyłączonym wzorcem tg $\delta$. Odpowiedni schemat przedstawiono na rys. 10.

Występujące w mostku z rys. 10 admitancje $Y_{10}$, $Y_{20}$, $Y_{30}$ (por. rys. 2b i równanie 1) można sprowadzić do konfiguracji podanej na rys. 11.




Rys.10. Schemat mostka z rys. 6c z przyłączonym wzorcem tg $\delta$ ($Z_1$)

Fig.10. Circuit diagram of the bridge shown in fig.6c with connected loss tangent standard ($Z_1$)




Rys.11. Schemat zastępczy mostka z rys. 10

Fig.11. Equivalent diagram of the bridge shown in fig.10

Po dokonaniu transfiguracji "gwiazda-trójkąt" w węzłach A, V, 0 mostka z rys. 11 otrzymujemy schemat przedstawiony na rys. 12.

Korzystając z rys. 12, możemy zapisać warunek równowagi rozpatrywanego mostka w postaci:

$$Y_{AV} = Y'_2 \cdot \frac{Y_3}{Y_4}, \tag{29}$$

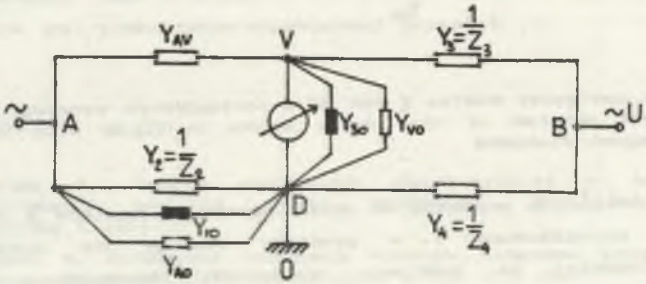
gdzie

$$Y'_2 = Y_2 + Y_{10} + Y_{A0}, \tag{30}$$

$$Y_{AV} = \frac{Y_A \cdot Y_V}{Y} \quad \text{(por. rys. 5 i równania 6-9)}, \tag{31}$$

$$Y_{AO} = \frac{Y_A \cdot Y_{20}}{Y} \quad \text{(por. rys. 5)}. \tag{32}$$

Z równań (29-32) wynika istotny wniosek, że parametry wzorca tg $\delta$ wpływają na zmianę admitancji ramienia AD mostka ($Y_2$) i tym samym powodują błąd w ustaleniu wyniku pomiaru tg $\delta$ z odczytów wartości elementów nastawnych mostka. Konieczne jest zatem wyznaczenie odpowiednich poprawek do wartości odczytywanych z elementów nastawnych mostka w równowadze. Do obliczenia poprawek można skorzystać z równań (29-32), przy czym niezbędna jest znajomość składowych admitancji poszczególnych ramion mostka $Y_2$, $Y_3$, $Y_4$. Wartość tg $\delta_{AV}$ odpowiadającą admitancji $Y_{AV}$ obliczamy podobnie jak w mostku z rys. 3 - korzystając z wyprowadzonego wcześniej równania (18).




Rys.12. Schemat zastępczy mostka z rys. 11
Fig.12. Equivalent diagram of the bridge shown in fig.11

Ostatnim do rozważenia przypadkiem jest mostek z rys. 6d, ze wzorcem tg $\delta$ przyłączonym do ramienia AV. Jest to przypadek podobny do poprzednio rozważanego mostka z rys. 6c (lub rys. 10) z tą różnicą, że uziemiony jest węzeł B. Po dokonaniu analogicznych przekształceń schematu mostka i uwzględnieniu podanej różnicy otrzymujemy schemat zastępczy podany na rys. 13.

Warunek równowagi mostka z rys. 13 przyjmuje postać:

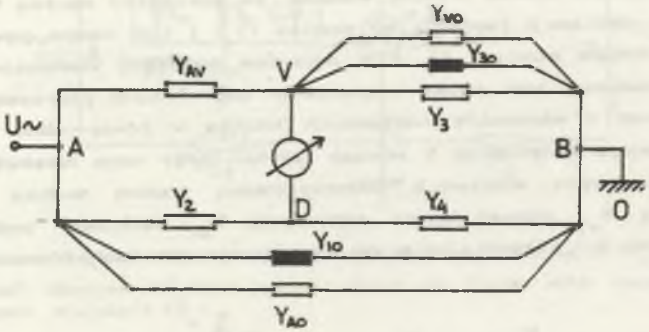
$$Y_{AV} = Y_2 \cdot \frac{Y'_3}{Y_4}, \tag{33}$$

gdzie

$$Y'_3 = Y_3 + Y_{30} + Y_{VO}, \tag{34}$$

$$Y_{vo} = \frac{Y_v \, Y_{20}}{Y} \quad \text{(por. rys. 5).} \tag{35}$$

Wnioski wynikające z równań (33-35) są analogiczne do wniosków sformułowanych wcześniej dla równań (29-32). Również wartość tg $\delta_{AV}$ określona jest zależnością (18).




Rys.13. Schemat zastępczy mostka z rys. 6d z przyłączonym wzorcem tg $\delta$
Fig.13. Equivalent diagram of the bridge shown in fig.6d with connected loss tangent standard

Obliczenie odpowiednich poprawek do stanu równowagi mostków z rys. 12 i 13 jest dość skomplikowane i w praktyce stosuje się uproszczenia polegające najczęściej na pomijaniu niektórych parametrów schematu zastępczego wzorca tg $\delta$ [3]. Takie uproszczenia są jednak dyskusyjne, zwłaszcza przy wzorcowaniu mostków na małych podzakresach tg $\delta$ ($10^{-4}$ - $10^{-3}$). Zamiast pomijania niektórych parametrów schematu zastępczego wzorca tg $\delta$ można sprawdzić, czy w badanym mostku możliwe jest uproszczenie zależności (30) lub (34) polegające na pominięciu admitancji "zakłócających" $Y_{10}$, $Y_{AO}$, $Y_{30}$, $Y_{VO}$. Na ogół w mostkach typu Scheringa admitancje "zakłócające" bocznikują ramiona zawierające tylko opornik o stosunkowo dużej konduktancji, co pozwala na pominięcie konduktancji bocznikujących.

## 5 Wnioski

W przedstawionym opracowaniu założono, że wzorcowanie mostków odbywać się będzie w zakresie małych wartości tg $\delta$ ($10^{-4}$ - $10^{-1}$) i do tego celu korzystniejsze jest stosowanie wzorców tg $\delta$ o strukturze szeregowej. Zaproponowano przyjęcie innego niż w literaturze modelu wzorca tg $\delta$ (rys. 2), w którym uwzględniono dodatkowo upływności izolacyjne występujące

w konstrukcji wzorca. Wpływu upływności izolacyjnych nie można pomijać przy budowie wzorców o skrajnie małych wartościach tg $\delta$.

Z przeprowadzonych rozważań wynikają następujące ważniejsze wnioski:

a) O wartości liczbowej wzorca tg $\delta$ stosowanego do sprawdzania mostków decyduje sposób przyłączenia wzorca do mostka oraz system ekranowania i uziemienia zastosowany w mostku. W różnych typach mostków ten sam wzorzec może wykazywać inną wartość.

b) W mostkach symetrycznych względem ziemi, wyposażonych w ramiona pomocnicze zostaje praktycznie wyeliminowany wpływ większości parametrów dodatkowych schematu zastępczego wzorca ($Y_{10}$, $Y_{30}$, $G_{20}$, $C_{29}$ - por. rys. 2).

c) W mostkach niesymetrycznych względem ziemi należy liczyć się z pewnymi trudnościami w procesie wzorcowania, jeśli uziemionym węzłem mostka nie jest żaden z węzłów, do których przyłączony jest wzorzec tg $\delta$. Wówczas stan równowagi mostka jest "zakłócony" wpływami parametrów wzorca tg $\delta$ i występuje błąd w odczycie ze skal elementów nastawnych mostka. Konieczne jest wyznaczanie odpowiednich poprawek.

## LITERATURA


[1] Jellonek A.: Wzorce stratności dielektrycznej w zastosowaniu do sprawdzania mostków prądu zmiennego. Z.N. Pol. Wrocławskiej, Elektryka V, 1954/55.

[2] Jellonek A.: Możliwości realizacji wzorców tangensa kąta strat kondensatorów. Rozprawy Elektrotechniczne, t. VII, z. 1. 1961.

[3] Kägler S.: Konstruktion einer tan $\delta$ - Noramls zur Überprüfung und Eichung von Hochspannungs Verlustfaktor-Messbrücken. Arch. fur Techn. Mess., 10/1962.

[4] Licznerski B.: Wzorce tangensa kąta strat kondensatorów o parametrach RC skupionych i rozłożonych. Rozprawy Elektrotechniczne, t. XIV, z. 4, 1968.

[5] Marcyniuk A., Pasecki E., Pluciński M., Szadkowski B.: Podstawy metrologii elektrycznej. WNT, Warszawa 1984.



Recenzent: Prof. dr hab. inż. Zygmunt Kuśmierek

Wpłynęło do Redakcji dnia 15 stycznia 1992 r.

CALIBRATION OF BRIDGES DESIGNED FOR DIELECTRIC LOSS FACTOR MEASUREMENT

A b s t r a c t

The paper presents some problems of different type bridges calibration designed for dielectric loss factor measurement (loss tangent measurement) in range $10^{-4}$ - $10^{-1}$.

The application of the tg $\delta$ standard model with series structure has been suggested. Additionally insulating leakage conductances, which are present in model construction, are included in this model (fig.2).

The following bridge systems have been analysed: bridges symmetrical (fig.3) and uansymmetrical (fig.6) to the ground, different solutions of bridges such as Schering, de Sauty-Wien etc., high voltage and low voltage bridges. Adequate equations (18), (27), (28), determining tg $\delta$ standard value for each bridge system have been derived. It has been shown that the same tg $\delta$ standard can differ in value for different bridge types. That value depends on standard to bridge connection method, shields system and earthing system in the bridge.