

Michał LISOWSKI
 Politechnika Wroclawska
 Instytut Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii

WZORZEC STRATNOŚCI DIELEKTRYCZNEJ PRZY NISKICH CZĘSTOTLIWOŚCIACH

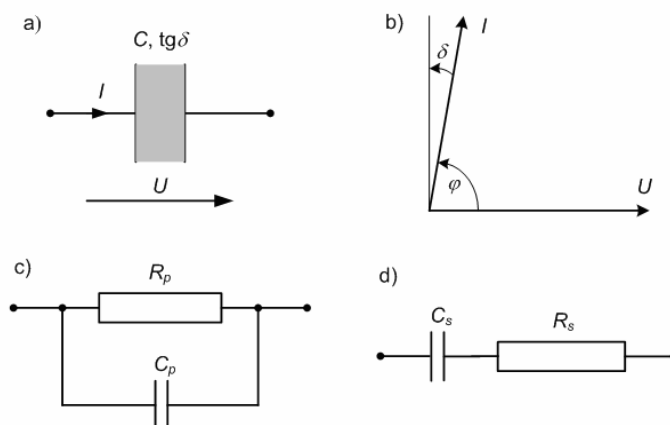
Wzorcowanie mierników pojemności elektrycznej C i współczynnika $\text{tg}\delta$, stosowanych do pomiarów przenikalności elektrycznej i współczynnika stratności dielektrycznej, jest utrudnione przez brak odpowiednio dokładnych wzorców $\text{tg}\delta$. Wzorce $\text{tg}\delta$ realizuje się poprzez szeregowe połączenie kondensatora z rezystorem o znanej wartości. Zasadniczą przyczyną niedokładności takiego wzorca są głównie parametry resztkowe rezystora. Opisany w tym artykule wzorec $\text{tg}\delta$ przy 50 Hz ma zakres pomiarowy $(0,1\div 10)\times 10^{-4}$ i niepewność wartości 10^{-5} .

DIALECTIC DISSIPATION FACTOR STANDARD AT LOW FREQUENCIES

Calibration of electric capacitance C and the $\text{tg}\delta$ factor of meters, used for permittivity and dielectric dissipation factor $\text{tg}\delta$ measurements, is difficult as there is no adequately accurate $\text{tg}\delta$ standards. Dielectric dissipation factor standards are made of series connection of known value capacitor and resistor. Main reason of inaccuracy this type of standard are mainly residual parameters of resistor. The standard $\text{tg}\delta$ described in this paper has at 50 Hz the range $(0.1\div 10)\times 10^{-4}$ and uncertainty of value 10^{-5} .

1. WSTĘP

Przenikalność elektryczna ε i współczynnik stratności dielektrycznej $\text{tg}\delta$ są podstawowymi parametrami materiałów elektroizolacyjnych. Dla określenia ich wartości badany materiał umieszcza się między elektrodami, które razem z dielektrykiem tworzą stratny kondensator (rys. 1a), i mierzy się jego pojemność C i współczynnik stratności dielektrycznej $\text{tg}\delta$. Jeżeli do elektrod tego kondensatora przyłożą się sinusoidalnie przemienne napięcie, to popłynie przez niego sinusoidalnie przemienny prąd, który wyprzedza napięcie o kąt $\varphi = \pi/2 - \delta$ (rys. 1b).



Rys. 1. Kondensator stratny (a) i jego wykres wskazowy (b) oraz schematy zastępcze: równoległy (c) i szeregowy (d)
 Fig. 1. The loss capacitor (a) and its vectorial graph (b) as well as supplementary diagrams: parallel (c) and serial (d)

Stanowi temu można przyporządkować schemat zastępczy równoległego połączenia idealnego kondensatora o pojemności C_r z idealnym rezystorem o rezystancji R_r (rys. 1c) lub szeregowego połączenia idealnego kondensatora o pojemności C_s z idealnym rezystorem o rezystancji R_s (rys. 1d). Obydwa układy są równoważne. Znając parametry jednego układu, np. szeregowego, można łatwo przeliczyć je na parametry układu równoległego korzystając z zależności [2]:

$$C_p = \frac{C_s}{1 + \operatorname{tg} \delta}, \quad (1)$$

$$R_p = \frac{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}{\operatorname{tg}^2 \delta} R_s, \quad (2)$$

w których:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{2\pi f R_p C_p} = 2\pi f C_s R_s, \quad (3)$$

gdzie f – częstotliwość.

Te uproszczone schematy są ekwiwalentne tylko dla jednej częstotliwości f . Nie odzwierciedlają one zjawisk dyspersji i absorpcji oraz mechanizmów relaksacji dipolowej, a także indukcyjności resztkowych kondensatora i jego doprowadzeń. Ale dla kondensatorów pracujących w obwodach prądu przemiennego niskiej częstotliwości są one praktycznie wystarczające [1]. Chociaż schemat z rys. 1c fizycznie bardziej poprawnie odpowiada rzeczywistemu kondensatorowi niż z rys. 1d, to ze względu na łatwość modelowania układu, częściej w praktyce stosowany jest schemat zastępczy z rys. 1d.

W zależności od zakresu częstotliwości, pomiary pojemności i współczynnika stratności dielektrycznej wykonuje się różnymi metodami i różną aparaturą pomiarową realizującą te metody [1]. W paśmie niskich częstotliwości stosuje się najczęściej mostki czteroramienne, między innymi z gałęzią Wagnera [1,2,3], z których najbardziej znany jest mostek Scheringa [3,4], oraz mostki transformatorowe [1,5]. Obecnie coraz powszechniej używane są przyrządy mikroprocesorowe oparte na pomiarze napięcia i prądu [1,6] oraz mikroprocesorowe „karty” pomiarowe, czyli tak zwane przyrządy wirtualne [7]. Przyrządy te powinny być w odpowiednich odstępach czasu wzorcowane w odniesieniu do wzorców państwowych lub międzynarodowych, tak ażeby umożliwiły wykonywanie pomiarów z odpowiednią niepewnością. Wzorcowanie tych przyrządów na zakresach pojemnościowych nie stwarza większych trudności. Wykonuje się je metodą bezpośrednią, podłączając w miejsce mierzonego kondensatora C_x kondensator wzorcowy C_n . Natomiast poważne trudności powstają przy wzorcowaniu tych przyrządów na zakresach $\operatorname{tg} \delta$, a to ze względu na problemy realizacji odpowiednio dokładnych wzorców współczynnika stratności dielektrycznej.

2. WZORCE WSPÓŁCZYNNIKA STRATNOŚCI DIELEKTRYCZNEJ

Wzorce współczynnika stratności dielektrycznej $\operatorname{tg} \delta_n$ o najwyższych dokładnościach najczęściej wzorcowane są pośrednio w odniesieniu do metody kalorymetrycznej [8,9], w której współczynnik stratności dielektrycznej określany jest z zależności:

$$\operatorname{tg} \delta_n = W_c / W_b, \quad (4)$$

w której W_c jest energią czynną traconą (rozproszoną) w postaci energii cieplnej podczas przepływu prądu przez stratny kondensator, a W_b jest energią bierną magazynowaną w polu elektrycznym w tym samym czasie, w którym mierzona jest energia czynna tracona w dielektryku. Metoda ta jest jednak trudna w praktycznej realizacji i rzadko stosowana.

Dla pomiarów mniej dokładnych wzorzec współczynnika stratności dielektrycznej tworzy się z równolegle (rys. 1c) lub szeregowo (rys. 1d) połączonego bezstratnego kondensatora z rezystorem o pomijalnie małych parametrach resztkowych. Układ równoległy jest trudniejszy do zrealizowania, gdyż wymaga zastosowania bardzo dużych rezystancji i w praktyce najczęściej stosuje się układ szeregowy (rys. 1d). Wartość wzorcową $\text{tg}\delta_n$ tego wzorca oblicza się ze wzoru:

$$\text{tg}\delta_n = \omega C_n R, \quad (5)$$

w którym: pulsacja $\omega=2\pi f$, C_n – pojemność wzorcowego kondensatora bezstratnego, R_n - rezystancja rezystora, o pomijalnie małych parametrach resztkowych.

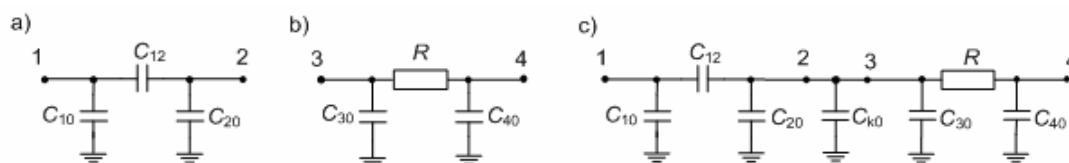
Budowie tego typu wzorców poświęcona jest obszerna literatura m.in. [9÷13]. Wzorce o parametrach skupionych odtwarzają w paśmie częstotliwości 50 Hz ÷ 10 kHz wartości wzorcowe $\text{tg}\delta_n$ w zakresie $(5\div 1000)\times 10^{-4}$ z niedokładnością $(2\div 10)$ %. Zasadniczą przyczyną ograniczenia dolnego zakresu pomiarowego i dokładności tego typu wzorców są niewyeliminowane pojemności sprzęgające.

Guzik i Miczulski zaproponowali oryginalną koncepcję budowy wzorca $\text{tg}\delta_n$ z wykorzystaniem kondensatora Thomsons-Lamparta [14]. Wymaga on jednak znajomości stratności ciekłego dielektryka, w którym zanurzone są prętowe elektrody kondensatora. Zaletą tego typu wzorca jest możliwość odtwarzania wartości wzorcowej $\text{tg}\delta$ w sposób ciągły.

Innym rozwiązaniem wzorca $\text{tg}\delta_n$ jest konstrukcja współosiowa wzorca, w której za pomocą współosiowych (koncentrycznych) złącz łączy się szeregowo kondensator wzorcowy z rezystorem, a ekran wykorzystywany jest jako przewód powrotny prądu [13]. Konstrukcja taka minimalizuje indukcyjności resztkowe, mające wpływ przy dużych częstotliwościach. Wzorce współosiowe odtwarzają $\text{tg}\delta$ w paśmie częstotliwości 10 kHz ÷ 100 MHz w zakresie wartości $(10 \div 1000)\times 10^{-4}$ z niedokładnością 5 %.

3. PROBLEMY BUDOWY WZORCÓW O PARAMETRACH SKUPIONYCH

Każdy kondensator i każdy rezystor ma jakieś parametry resztkowe. W zakresie niskich częstotliwości najistotniejszymi z nich są pojemności sprzęgające do masy (rys. 2). Składają się na nie głównie pojemności przepustów doprowadzeń zamocowanych w metalowych ekranach, a więc gniazd złącz koncentrycznych kondensatorów i przepustów zacisków rezystorów.



Rys. 2. Pojemności sprzęgające wzorcowego kondensatora (a) i rezystora (b) oraz ich szeregowego połączenia (c), C_{k0} – pojemność koncentrycznego kabla

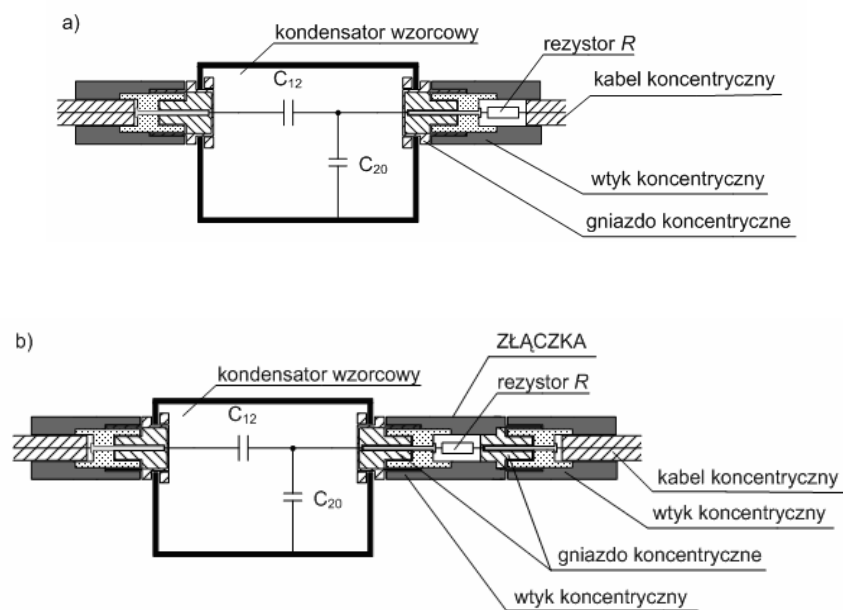
Fig. 2. The coupling capacity of the standards capacitor (a) and resistor (b) as well as theirs serial connection (c), C_{k0} - capacity of the concentric cable

Układy do pomiaru pojemności i współczynnika stratności dielektrycznej tak się konfigurują, aby skrajne pojemności nie miały wpływu na wynik pomiaru. Zatem, jeżeli do układu pomiarowego podłączy się kondensator z rys. 2a, to pojemności sprzęgające do masy C_{10} i C_{20} nie wpływają na wynik pomiaru pojemności C_{12} . Natomiast jeżeli w szereg (rys. 2c) z tym kondensatorem (rys. 2a) połączy się rezystor (rys. 2b), który ma również swoje pojemności sprzęgające do masy C_{30} i C_{40} , to z wyniku pomiaru można wyeliminować tylko pojemności C_{10} i C_{40} . Do pojemności C_{20} i C_{30} dodaje się jeszcze pojemność łączącego kabla koncentrycznego C_{k0} . Wpływ tych niepożądanych pojemności na wynik pomiaru uwidacznia się szczególnie przy pomiarach małych pojemności i małych współczynników stratności dielektrycznej.

Dla kondensatorów wzorcowych podaje się zarówno pojemność C_{12} jak i pojemności C_{10} i C_{20} . Natomiast dla rezystorów pojemności C_{30} i C_{40} na ogół nie są znane, a w przypadku zastosowania rezystora dekadowego, zmieniają się one wraz z nastawą tego rezystora. Można ewentualnie zmierzyć te pojemności i pojemność kabla koncentrycznego C_{k0} , ale ze względu na ich małe wartości pomiary są bardzo utrudnione, a wyniki pomiarów są obciążone bardzo dużymi niepewnościami. Ogranicza to możliwości stworzenia w ten sposób wzorców $\text{tg} \delta_n$ o wartościach poniżej 5×10^{-4} . Jak tę barierę pokonać? Najskuteczniejszym sposobem jest wyeliminowanie pojemności C_{30} i C_{k0} lub ich minimalizacja do wartości pomijalnie małych. Jak tego dokonać?

Problem ten autor rozwiązał umieszczając rezystor R bezpośrednio w koncentrycznym wtyku przyłączonym do gniazda koncentrycznego w kondensatorze (rys. 3a). W ten sposób została prawie całkowicie wyeliminowana pojemność sprzęgająca rezystora C_{30} i pojemność kabla koncentrycznego C_{k0} . Wymaga to jednak przeróbek kabli koncentrycznych.

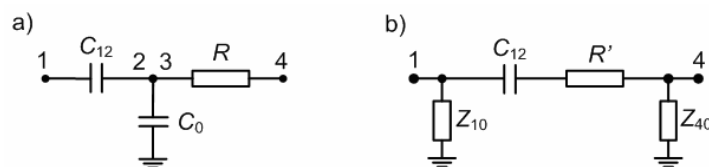
Innym rozwiązaniem jest umieszczenie rezystora R w specjalnej koncentrycznej złączce kablowej, która ma z jednej strony wtyk koncentryczny podłączony do gniazda kondensatora wzorcowego, a z drugiej strony ma gniazdo koncentryczne podłączone do wtyku koncentrycznego kabla (rys. 3b). To rozwiązanie umożliwia stosowanie firmowych kabli koncentrycznych bez ingerencji w ich złącza.



Rys. 3. Rozwiązanie konstrukcyjne wzorca $\text{tg} \delta_n$, w którym rezystor R umieszczono we wtyku kabla koncentrycznego (a) lub w specjalnej złączce kablowej (b)

Fig. 3. Constructional solution of the $\text{tg} \delta_n$ standard. The resistor R were placed in connector of the concentric cable (a) and in special cable connector (b)

W ten sposób wykonany wzorzec $\text{tg}\delta_n$ można przedstawić w postaci schematu pokazanego na rys. 4a. Przekształcając gwiazdę impedancji z rys. 4a w równoważny trójkąt otrzymuje się schemat zastępczy wzorca $\text{tg}\delta_n$ przedstawiony na rys. 4b.



Rys. 4. Schemat gwiazdowy wzorca $\text{tg}\delta$ (a) i równoważny mu schemat przekształcenia w trójkąt (b)
Fig. 4. The star diagram of the $\text{tg}\delta$ standard (a) and its equivalent diagram of transformation into triangle (b)

Składowa czynna impedancji między punktami 1-4 jest wyrażona zależnością:

$$R' = R \left(1 + \frac{C_{20}}{C_{12}} \right), \quad (6)$$

a wartość wzorcową współczynnika strat dielektrycznych oblicza się ze wzoru:

$$\text{tg}\delta_n = 2\pi f R' C_{12}. \quad (7)$$

Impedancje Z_{10} i Z_{40} mają charakter pojemnościowy i w odpowiednio skonfigurowanym układzie pomiarowym nie wpływają na wartość wzorca współczynnika stratności.

4. WYNIKI TESTUJĄCE OPISANEGO WZORCA $\text{tg}\delta$

Koncepcję opisanego wzorca $\text{tg}\delta$ przetestowano podczas wzorcowania mostka Scheringa firmy Tettex, typu 2821/ZK, pracującego przy częstotliwości sieciowej 50 Hz i napięciu 1000 V. Wzorzec ten wykonano w sposób opisany w poprzednim rozdziale (rys. 3a) z wzorców pojemności firmy Tettex, typu 3320, o wartościach nominalnych $C_1=100$ pF, $C_2=500$ pF i $C_3=1000$ pF oraz rezystorów o znanej rezystancji R . Kondensatory te miały ważne świadectwa wzorcowania wydane przez Główny Urząd Miar. Rezystancję rezystorów R zmierzono przy częstotliwości 50 Hz precyzyjnym mostkiem cyfrowym LCR, typu 1693, firmy Quad Tech, który też miał ważne świadectwo wzorcowania. Wyniki wzorcowania mostka Scheringa na zakresach $\text{tg}\delta$ podano w tabelach 1÷3, w których oznaczono przez:

- R - wartość poprawna rezystancji rezystora we wzorcu $\text{tg}\delta$,
- C_4 - wartość pojemności odczytana z wzorcowanego mostka,
- C_{20} - wartość pojemności kondensatora wzorcowego względem obudowy,
- $C_n=C_{12}$ - wartość poprawna pojemności kondensatora wzorcowego,
- R' - wartość rezystancji obliczona ze wzoru (6),
- $\text{tg}\delta_m$ - współczynnik strat dielektrycznych zmierzony przez wzorcowany mostek Scheringa,
- $\text{tg}\delta_n$ - wzorcowy współczynnik strat dielektrycznych obliczony ze wzoru (7),
- $\Delta\text{tg}\delta$ - błąd bezwzględny mierzonego mostkiem współczynnika strat dielektrycznych,
- $U(\Delta\text{tg}\delta)$ - niepewność rozszerzona bezwzględna wyznaczonej wartości błędu mierzonego współczynnika strat dielektrycznych, określana na poziomie ufności 0,95,

$\Delta_{\text{dop}}(\text{tg}\delta)$ - błąd dopuszczalny mierzonego współczynnika strat dielektrycznych, wynikający z błędu granicznego wzorcowanego przyrządu.

Tabela 1

Wyniki wzorcowania mostka z wykorzystaniem we wzorcu $\text{tg}\delta_n$ kondensatora wzorcowego o wartości nominalnej 100 pF

R	C_n	C_{20}	R'	$\text{tg}\delta_m$	$\text{tg}\delta_n$	$\Delta\text{tg}\delta$	$U(\Delta\text{tg}\delta)$	$\Delta_{\text{dop}}(\text{tg}\delta)$
k Ω	pF	pF	k Ω	-	-	-	-	-
1,7637	99,992	58,1	2,788	0,00008	0,00009	-0,00001	0,00001	$\pm 0,00002$
18,093			28,606	0,00089	0,00090	-0,00001	0,00001	$\pm 0,00002$
46,760			73,930	0,00234	0,00232	+0,00002	0,00001	$\pm 0,00003$
194,84			308,051	0,00974	0,00967	+0,00007	0,00001	$\pm 0,00007$
548,01			866,429	0,02734	0,02720	+0,00014	0,00001	$\pm 0,00016$

Tabela 2

Wyniki wzorcowania mostka z wykorzystaniem we wzorcu $\text{tg}\delta_n$ kondensatora wzorcowego o wartości nominalnej 500 pF

R	C_n	C_{20}	R'	$\text{tg}\delta_m$	$\text{tg}\delta_n$	$\Delta\text{tg}\delta$	$U(\Delta\text{tg}\delta)$	$\Delta_{\text{dop}}(\text{tg}\delta)$
k Ω	pF	pF	k Ω	-	-	-	-	-
1,7637	500,013	72,2	2,018	0,00031	0,00032	-0,00001	0,00001	$\pm 0,00002$
18,093			20,706	0,00321	0,00325	-0,00004	0,00001	$\pm 0,00004$
46,760			53,512	0,00834	0,00840	-0,00006	0,00001	$\pm 0,00006$
194,84			222,974	0,03496	0,03501	-0,00005	0,00001	$\pm 0,00019$
548,01			627,141	0,09834	0,09846	-0,00012	0,00001	$\pm 0,00051$

Tabela 3

Wyniki wzorcowania mostka z wykorzystaniem we wzorcu $\text{tg}\delta_n$ kondensatora wzorcowego o wartości nominalnej 1000 pF

R	C_n	C_{20}	R'	$\text{tg}\delta_m$	$\text{tg}\delta_n$	$\Delta\text{tg}\delta$	$U(\Delta\text{tg}\delta)$	$\Delta_{\text{dop}}(\text{tg}\delta)$
k Ω	pF	pF	k Ω	-	-	-	-	-
1,7637	1000,08	69,6	1,886	0,00058	0,00059	-0,00001	0,00001	$\pm 0,00002$
18,093			19,352	0,00604	0,00608	-0,00004	0,00001	$\pm 0,00005$
46,760			50,014	0,01572	0,01571	+0,00001	0,00001	$\pm 0,00010$
194,84			208,400	0,06571	0,06544	+0,00027	0,00001	$\pm 0,00035$
548,01			586,148	0,18498	0,18407	+0,00091	0,00001	$\pm 0,00094$

5. WNIOSKI

Opisany wzorzec współczynnika strat dielektrycznych ma przy 50 Hz zakres pomiarowy $(0,1 \div 10) \times 10^{-4}$, a więc poniżej zakresu znanych z literatury wzorców $\text{tg}\delta$ zbudowanych z elementów skupionych RC. Jego niepewność oszacowana na poziomie ufności 0,95 wynosi 10^{-5} . Umożliwia on wzorcowanie najdokładniejszych mostków do pomiarów pojemności i współczynnika stratności dielektrycznej, na przykład mostka Scheringa pracującego przy częstotliwości sieciowej, który ma rozdzielczość 1×10^{-5} i niedokładność w dolnym zakresie pomiarowym 2×10^{-5} . Badania testujące, wykonane dla mostka Scheringa firmy Tettex, model 2821/ZK, przy użyciu opisanego wzorca $\text{tg}\delta_n$, wykazały, że wszystkie błędy pomiaru $\text{tg}\delta$ tego mostka mieszczą w dopuszczalnych granicach, podanych przez producenta. Wcześniej nie udało się tego dowieść przy użyciu wzorców $\text{tg}\delta$ innej konstrukcji. Potwierdza to trafność zaproponowanej koncepcji realizacji wzorca $\text{tg}\delta_n$.

Praca zrealizowana w ramach badań statutowych w 2008 r., zlecenia nr 341 701.

LITERATURA

1. Lisowski M.: *Pomiary rezystywności i przenikalności elektrycznej dielektryków stałych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2004.
2. Siciński Z.: *Badanie materiałów elektroizolacyjnych*. WNT, Warszawa 1968.
3. Jellonek A. Karkowski Z.: *Miernictwo radiotechniczne*. WNT, Warszawa 1972.
4. Schwendinger W.: *Mostek firmy Tettex typu 2821 do pomiarów pojemności i współczynnika stratności $\text{tg}\delta$ dielektryków stałych i ciekłych*. TeTTex Information 3002, Febr. 1974.
5. Tettex Instruments – Heffely Tranch: *C & tg delta (power factor) masurement*. www.tettex.com .
6. Nitsch K.: *Zastosowanie spektroskopii impedancyjnej w badaniach materiałów elektronicznych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1999.
7. Cichy A., Skórkowski A.: *Wirtualny quasi-zrównoważony układ do pomiaru współczynnika strat dielektrycznych*. *Pomiary Automatyka Kontrola*, Vol.54 (2008), nr 2, s. 48-51.
8. Bierzan W.P. i inni: *Kalorymetrieskij metod opriedieljenija tangensa ugla poter vysokodobrotnych kondensatorov bolszoj jomosti*. *Elektrotechnika*, vol. 61 (1991), nr 4.
9. Guzik J.: *Wzorce współczynnika strat dielektrycznych $\text{tg}\delta$ - porównanie właściwości*. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej* 2001, Seria: Elektryka, z. 179, s. 159-169.
10. Jellonek A.: *Możliwości realizacji wzorców tangensa kąta strat kondensatorów*. *Rozprawy Elektrotechniczne*, tom VII (1961), z. 1, s.3-16.
11. Licznarski B.: *Wzorce tangensa strat dielektrycznych o parametrach RC skupionych i rozłożonych*. *Rozprawy Elektrotechniczne*, tom XIV (1968), z. 4, s. 609-627.
12. Muciek J.: *Wzorce współczynnika strat dielektrycznych kondensatorów – konstrukcja i parametry*. *Prace Nauk. Inst. Metrologii El. Politechniki Wrocławskiej* nr 29, Ser. Konferencje nr 13, Wrocław 1987, s. 78-82.
13. Skibiński A.: *Kontrolne wzorce współczynnika strat dielektrycznych*. *Normalizacja* 1980, nr 7.
14. Guzik J., Miczulski W.: *Koncepcja budowy wzorca współczynnika strat $\text{tg}\delta$ w oparciu o kondensator Thomsona-Lamparta*. *Materiały Krajowego Kongresu Metrologii*, t. 3, Gdańsk 1998, s. 242-249.

ABSTRACT

Calibration of electric capacitance C and the $\text{tg}\delta$ factor of meters, used for permittivity and dielectric dissipation factor $\text{tg}\delta$ measurements, is difficult as there is no adequately accurate $\text{tg}\delta$ standards. Dielectric dissipation factor standards are made of series connection of known value capacitor and resistor. Main reason of inaccuracy this type of standard are mainly residual parameters of resistor. In this paper the special construction of the standards $\text{tg}\delta$ is described and results of testing measurement are gives. The standard $\text{tg}\delta$ has at 50 Hz the range $(0.1\div 10)\times 10^{-4}$ and uncertainty of value 10^{-5} .