

Janusz GUZIK

Politechnika Śląska

Instytut Metrologii i Automatyki Elektrotechnicznej

## WZORCE WSPÓŁCZYNNIKA STRAT DIELEKTRYCZNYCH $\text{tg}\delta$ – PORÓWNANIE WŁAŚCIWOŚCI

**Streszczenie.** W artykule dokonano przeglądu opisanych w literaturze znanych rozwiązań wzorców współczynnika strat dielektrycznych  $\text{tg}\delta$ . Przedstawiono ich podstawowe dane techniczne oraz dokonano porównania ich właściwości. Wskazano na główne źródła błędów omawianych rozwiązań wzorców  $\text{tg}\delta$  oraz na kierunki dalszych badań.

## DIELECTRIC LOSS FACTOR $\text{tg}\delta$ STANDARDS – COMPARISON OF PROPERTIES

**Summary.** In the paper a review of the described in literature, well-known solutions of dielectric loss factor  $\text{tg}\delta$  standards is presented. The basic technical data of the analysed  $\text{tg}\delta$  standards and comparison of their properties are given too. The main sources of  $\text{tg}\delta$  standards errors and directions of further investigations are also suggested.

### 1. WSTĘP

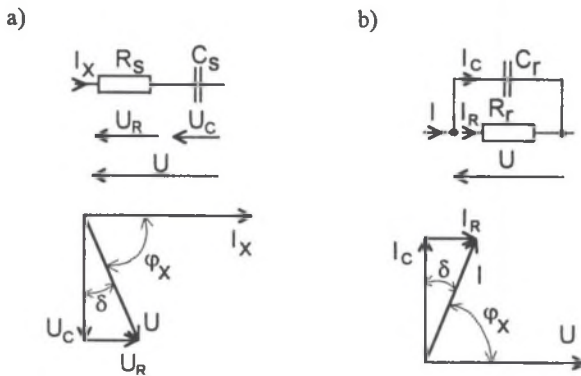
Jednym z parametrów pozwalającym określić właściwości dielektryka jest współczynnik strat dielektrycznych  $\text{tg}\delta$  [6, 7, 16]. Wartości  $\text{tg}\delta$  typowych dielektryków (podawane najczęściej w postaci wielokrotności liczby  $10^{-4}$ ) zawierają się np. w granicach  $0,1 \cdot 10^{-4} \leq \text{tg}\delta \leq 1000 \cdot 10^{-4}$  [6]. Istnieje zatem potrzeba konstrukcji wzorca  $\text{tg}\delta$ , odtwarzającego współczynnik strat dielektrycznych z określoną dokładnością [3, 6, 7, 10, 14, 16], przeznaczonego do sprawdzania narzędzi pomiarowych służących do pomiaru własności elektrycznych dielektryków, kondensatorów oraz elementów, których działanie oparte jest na własnościach dielektryków.

Do modelowania wartości współczynnika strat dielektrycznych  $\text{tg}\delta$  wykorzystuje się:

- definicję fizyczną, tj. stosunek energii czynnej, traconej (rozproszonej w postaci energii cieplnej  $W_c$ ) do energii magazynowanej w polu elektrycznym (nazywanej bierną  $W_b$ ) w określonym odcinku czasu  $\Delta t$ , przedstawiony za pomocą zależności:

$$\text{tg}\delta = \frac{W_c}{W_b}, \quad (1)$$

- definicję, nie bazującą na definicji energetycznej (1), ale opierającą się na napięciach lub prądach oraz wzajemnych zależnościach pomiędzy ich ortogonalnymi składowymi. Rzeczywiste dielektryki opisywane są bowiem zastępczą impedancją lub admitancją składającą się z idealnych elementów RC i mogą być przedstawiane za pomocą szeregowego lub równoległego schematu zastępczego (rys.1).



Rys. 1. Szeregowy (a) i równoległy (b) schemat zastępczy rzeczywistego dielektryka  
Fig. 1. Series (a) and parallel (b) equivalent circuits of a real dielectric

Współczynnik strat dielektrycznych  $\text{tg}\delta$  dla szeregowego schematu zastępczego dielektryka opisany jest zależnością:

$$\text{tg}\delta = \omega C_s R_s, \quad (2)$$

natomiast dla schematu równoległego wartość  $\text{tg}\delta$  określa się za pomocą wzoru:

$$\text{tg}\delta = \frac{1}{\omega C_r R_r}, \quad (3)$$

gdzie:  $\omega = 2\pi f$ .

Wzorce  $\text{tg}\delta$  wykonywane są jako:

- wzorce stałe - odtwarzające jedną wartość,
- wzorce regulowane skokowo przełącznikami albo regulowane w sposób ciągły - odtwarzające więcej niż jedną wartość.

Do podstawowych parametrów wzorców strat dielektrycznych zaliczyć można:

- nominalną wartość  $\text{tg}\delta_N$  (dla wzorców stałych) lub zakres wartości nominalnych  $\text{tg}\delta_{N\min} \dots \text{tg}\delta_{N\max}$  (dla wzorców odtwarzających więcej niż jedną wartość),
- częstotliwość nominalną  $f_N$  lub zakres częstotliwości nominalnych  $f_{N\min} \dots f_{N\max}$ , przy której możliwe jest jeszcze zastosowanie wzorca o wartości  $\text{tg}\delta$  lub o wartościach z zakresu  $\text{tg}\delta_{N\min} \dots \text{tg}\delta_{N\max}$ ,
- błąd podstawowy  $\delta_{\text{tg}\delta}$  zdefiniowany jako:

$$\delta_{\text{tg}\delta} = \frac{\text{tg}\delta_{rz} - \text{tg}\delta_N}{\text{tg}\delta_N} \cdot 100\%, \quad (4)$$

gdzie:  $\text{tg}\delta_{rz}$ ,  $\text{tg}\delta_N$  - rzeczywista i nominalna wartość wzorca  $\text{tg}\delta$ .

- maksymalną niestałość  $\pm \delta_r$  wartości współczynnika strat dielektrycznych  $\text{tg}\delta$  w ciągu jednego roku,
- niepewność  $\pm \delta_{\text{tg}\delta}$  odtworzenia wartości  $\text{tg}\delta_N$ , związaną z klasą dokładności wzorca,
- nominalną wartość napięcia  $U_N$  dopuszczalną dla danego typu wzorca.

## 2. ROZWIĄZANIA WYBRANYCH WZORCÓW $\text{tg}\delta$

Główne kryterium podziału wzorców zależy tutaj od wyboru wzoru definiującego współczynnik strat dielektrycznych  $\text{tg}\delta$ . Wówczas można mówić o wzorcach odtwarzających wartość  $\text{tg}\delta$  na podstawie definicji (1) metodami kalorymetrycznymi [1, 12, 17, 18] lub o wzorcach z odpowiednio zestawionych elementów RC (o parametrach skupionych [2-5, 8-11, 13, 14], lub rozłożonych [11, 15, 19]), opisanych wzorami (2) i (3).

Powyższą klasyfikację można w dalszym ciągu rozszerzyć o podział wzorców w zależności od ich przynależności do grupy wzorców:

- odniesienia,
- kontrolnych,
- użytkowych.

Niezależnie od rodzaju wzorca wszystkie wzorce  $\text{tg}\delta$  powinny być stosowane i przechowywane w ściśle określonych warunkach. Odpowiednie przepisy - poprzez analogię do przepisów metrologicznych o cewkach i kondensatorach wzorcowych (stałych i regulowanych) [20] - określają w sposób ścisły warunki dla wzorców o najwyższych dokładnościach (wzorców odniesienia), np. temperaturę  $(20,0 \pm 0,5)^\circ\text{C}$ , wilgotność względną  $(40 \div 75)\%$ , ciśnienie atmosferyczne  $(860 \div 1060)\text{hPa}$ ; dla wzorców kontrolnych i użytkowych warunki te określa na ogół dokumentacja ich wytwórcy.

Z przedstawionej powyżej klasyfikacji wzorców współczynnika strat dielektrycznych  $\text{tg}\delta$  i analizy stanu zagadnienia w literaturze wynika, że tylko wzorce działające na zasadzie kalorymetrycznej mogłyby - przy spełnieniu dodatkowych, szczegółowych warunków zależnych od ich konstrukcji - pełnić rolę wzorców odniesienia [18]. Pozostałe rodzaje

wzorców - będące odpowiednim zestawieniem elementów RC (o stałych skupionych [2-5, 8-11, 13, 14] lub rozłożonych [11, 15, 19]) - należy zaliczyć bądź to do grupy wzorców użytkowych, lub kontrolnych [6, 20].

Osobnego rozpatrzenia wymaga kwestia kryterium wyboru sposobu połączenia (szeregowego lub równoległego) elementów RC modelujących wartość odtwarzanej wartości  $tg\delta_N$ , zgodnie z relacją (2) lub (3). W praktyce do budowy wzorców częściej wykorzystuje się szeregowy schemat zastępczy wg rys.1a, a co za tym idzie - szeregowo połączenie elementów RC. Wynika to z faktu, że wówczas można zastosować rezystory R o małych wartościach. Przyjęcie zarówno modelu, jak i równoległego sposobu połączeń wg rys.1b przy odtwarzaniu tej samej wartości  $tg\delta_N$  (por. wzory (2) i (3)) oznacza konieczność zastosowania kosztownych, wysookomowych rezystorów o dużej stabilności czasowej i temperaturowej [3, 5, 8, 11, 13]. Z tego też względu w dalszej części pracy rozważania dotyczące wzorców RC ograniczone zostaną do omówienia wzorców o szeregowym sposobie połączeń elementów RC.

Wzorce  $tg\delta$  mogą być przy tym budowane jako:

- niskonapięciowe (o wartościach napięć nominalnych  $U_N$  do około 100 V [3, 4, 8, 11, 13]),
- wysokonapięciowe (o wartościach napięć nominalnych  $U_N$  do około 10 kV [9]).

Obowiązywanie - w idealnym przypadku - definicyjnej zależności (2) współczynnika strat dielektrycznych  $tg\delta$  powoduje z kolei podział wzorców RC na [11]:

- wzorce RC, dla których wartość rezystancji  $R = \text{const}$  (tj.  $R_s = \text{const}$ ) [8, 11],
- wzorce RC, dla których wartość pojemności  $C = \text{const}$  (tj.  $C_s = \text{const}$ ) [8, 9, 11, 13].

Następnym kryterium podziału może być wartość częstotliwości nominalnej  $f_N$  lub zakres częstotliwości  $f_{N\min} \dots f_{N\max}$ , przy której wzorec może być stosowany, np.  $f_N = 50 \text{ Hz}$  [9] lub  $f_N = 1 \text{ kHz} \dots 100 \text{ MHz}$  [15]. W praktyce częściej wykonuje się wzorce o jednej częstotliwości nominalnej  $f_N$  [2], co związane jest z mniejszą wartością osiąganych wówczas błędów podstawowych  $\delta_{tg\delta}$  zdefiniowanych wzorem (4).

### 2.1. Wzorce $tg\delta$ o zasadzie kalorymetrycznej

Mogące pełnić funkcję wzorców odniesienia, kalorymetryczne wzorce  $tg\delta$ , o zasadzie działania przedstawionej schematycznie na rys.2 [2], do zamodelowania wartości  $tg\delta$  wykorzystują definicję fizyczną (1) współczynnika strat dielektrycznych, określoną za pomocą następującej zależności [1, 12, 17, 18]:

$$tg\delta = \frac{W_c}{W_b} = \frac{W_c}{U^2 \omega C \Delta t}, \quad (5)$$

gdzie:  $W_c$  - energia czynna, rozpraszana w danym dielektryku pod postacią energii cieplnej,  $W_b = U^2 \omega C \Delta t$  - energia bierna kondensatora (wypełnionego danym dielektrykiem) o pojemności C (umieszczonego w osłonie - ekranie cieplnym E), zasilanego ze źródła o napięciu  $U$  i pulsacji  $\omega$  w czasie  $\Delta t$ .

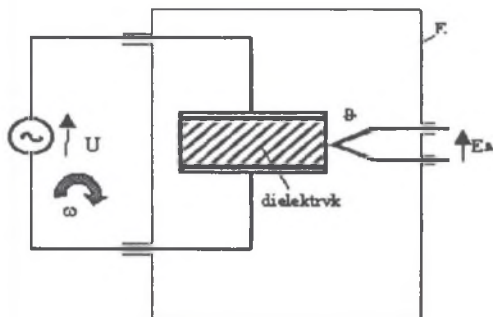
Wartość  $\text{tg}\delta$  wyznacza się wówczas pośrednio, wykorzystując zależność (6) na straty ciepłe w danym dielektryku  $W_c$  [17]:

$$W_c = c_w m \Delta\vartheta = c_w m c_g \Delta E_g = c_w m c_g [E_g(T) - E_g(T + \Delta\vartheta)], \quad (6)$$

gdzie:  $c_w$ ,  $m$  - odpowiednio - ciepło właściwe i masa dielektryka wypełniającego kondensator o pojemności  $C$ ,

$\Delta\vartheta$  - przyrost temperatury dielektryka od wartości  $T$  do wartości  $T + \Delta\vartheta$  w czasie  $\Delta t$ , wyznaczony pośrednio za pomocą pomiaru różnicy sygnałów wyjściowych,

$\Delta E_g = [E_g(T) - E_g(T + \Delta\vartheta)] = \frac{\Delta\vartheta}{c_g}$  przetwornika termometrycznego o stałej przetwarzania  $c_g$ .



Rys.2. Zasada działania kalometrycznego wzorca współczynnika strat dielektrycznych  $\text{tg}\delta$   
Fig.2. Calorimetric dielectric loss factor  $\text{tg}\delta$  standard

Na ogół wartość iloczynu  $c_w \cdot m$  występującego we wzorze (6) nie jest znana i wyznacza się ją w sposób pośredni [17, 18], określając odcinek czasu  $\Delta t_R$  poboru mocy elektrycznej  $P_R = I^2 \cdot R \cdot \Delta t_R$  przez grzejnik elektryczny (umieszczony po obu stronach elektrod kondensatora wypełnionego danym dielektrykiem) o rezystancji  $R$  i zasilany prądem stałym o wartości  $I$ , po którym temperatura dielektryka ponownie wzrośnie od wartości  $T$  do wartości  $T + \Delta\vartheta$ . Wtedy na podstawie wzoru (6) można zapisać równość:

$$c_w m \Delta\vartheta = I^2 R \Delta t_R \Rightarrow c_w m = \frac{I^2 R \Delta t_R}{\Delta\vartheta}, \quad (7)$$

a stąd wartość współczynnika strat dielektrycznych  $\text{tg}\delta$  określa ostatecznie następująca zależność:

$$\text{tg}\delta = \frac{W_c}{W_b} = \frac{W_c}{U^2 \omega C \Delta t} = \frac{I^2 R \Delta t_R}{U^2 \omega C \Delta t}. \quad (8)$$

O niepewności  $\pm \delta_{tg\delta}$  odtworzenia wartości  $tg\delta$  decyduje tutaj głównie niepewność wyznaczenia tej samej wartości różnicy temperatur  $\Delta\vartheta$ ;

$$\Delta\vartheta = c_g \Delta E_g = [E_g(T) - E_g(T + \Delta\vartheta)].$$

Przykładowo, autor pracy [17] podaje dane tak zbudowanego układu wzorca  $tg\delta$ : klasa 1;

$$tg\delta_N = (2,34 \pm 0,02) \cdot 10^{-6}; \omega_N = 10^4 \text{ rad/s}, U_N = 30 \text{ V}.$$

Zastosowanym dielektrykiem była mika, a cały kondensator umieszczony był w temperaturze 4,2 K.

Wadą kalometrycznych wzorców  $tg\delta$  jest ich skomplikowana budowa i ograniczenie nominalnej dopuszczalnej wartości napięcia  $U_N$  wzorca do około 100 V, powyżej której znacznie zwiększa się maksymalna niestałość czasowa  $\pm \delta$ , wartości współczynnika strat dielektrycznych  $tg\delta$ .

Niezaprzeczalnymi zaletami tych wzorców jest niezależność odtwarzanej wartości  $tg\delta$  od wartości pulsacji  $\omega$  i rodzaju (kształtu) napięcia  $U$  przyłożonego do okładek kondensatora.

## 2.2. Wzorce $tg\delta$ o parametrach skupionych RC

Wzorce  $tg\delta$  o parametrach skupionych RC stanowią dotychczas najliczniejszą grupę konstruowanych wzorców współczynnika strat dielektrycznych [2-5, 8-11, 13, 14].

Jednym z pierwszych wzorców modelujących wartość  $tg\delta$  za pomocą szeregowego połączenia elementów RC był wzorec o schemacie jak na rys.3 [5, 8].

Wzorec ten zbudowany był w postaci zestawu wymiennych rezystorów o wartości  $R_N$  przyłączanych do kondensatora wzorcowego o stałej pojemności  $C_N$ . Rzeczywistą, odtwarzaną przez ten wzorec wartość  $tg\delta'_N$  określa się za pomocą wzoru [5]:

$$tg\delta'_N = \frac{tg\delta_N}{\frac{C_{12}}{C_N} \left[ 1 + tg^2\delta_N \left( 1 + \frac{C_{R_N}}{C_N} \right)^2 \right] + \left[ 1 + tg^2\delta_N \frac{C_{R_N}^2}{C_N} \left( 1 + \frac{C_{R_N}}{C_N} \right) \right]}, \quad (9)$$

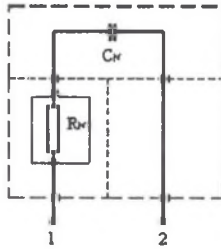
gdzie:  $tg\delta_N = \omega R_N C_N$ ,

$C_{12}$ ,  $C_{R_N}$  - wartości pojemności (nie zaznaczone na rys.2), bocznikujących (odpowiednio) punkty 1-2 i rezystor  $R_N$ .

Zaletą tego typu wzorca  $tg\delta$  jest jego nieskomplikowana budowa i prostota konstrukcji mechanicznej; wadą natomiast ograniczenie od dołu (wskutek istnienia pojemności  $C_{12}$  i  $C_{R_N}$ ) nominalnej wartości współczynnika strat dielektrycznych  $tg\delta_N$ ,  $tg\delta_N \geq 10 \cdot 10^{-4}$ . Niepewność  $\pm \delta_{tg\delta}$  odtworzenia wartości  $tg\delta_N$  jest rzędu  $\pm \delta_{tg\delta} = \pm 2\%$ , a częstotliwość nominalna  $f_N \in [0,4; 10]$  kHz. Również przynależność tego typu wzorca  $tg\delta$  na ogół do niskonapięciowych czy też wysokonapięciowych wzorców zależy tu głównie od



wytrzymałości elektrycznej izolacji (wykonanej najczęściej w postaci odpowiednich przekładek teflonowych) zastosowanego powietrznego kondensatora wzorcowego o pojemności  $C_N$ .



Rys.3. Wzorec współczynnika strat dielektrycznych  $\text{tg}\delta$  o  $C_N = \text{const}$

Fig.3. Dielectric loss factor  $\tan \delta$  standard with  $C_N = \text{const}$

Wysokonapięciową wersję tego typu wzorca  $\text{tg}\delta$  o stałej pojemności  $C_N$  i o schemacie połączeń jak na rys.4 opisano w pracy [9].

Rzeczywistą, odtwarzaną przez ten wzorec wartość  $\text{tg}\delta'_N$  określa się za pomocą następującej zależności [9]:

$$\text{tg}\delta'_N = \text{tg}\delta_{KN} \left( 1 + \frac{C_{P0}}{C_N} \right), \quad (10)$$

gdzie:  $\text{tg}\delta_{KN} = \omega C_N \sum_{i=1}^K R_{iN}$ ;  $1 \leq i \leq 5$ ,

$C_{P0}$  - wartość pojemności doziemnej (por. rys.4) pomiędzy punktem P a ziemią.

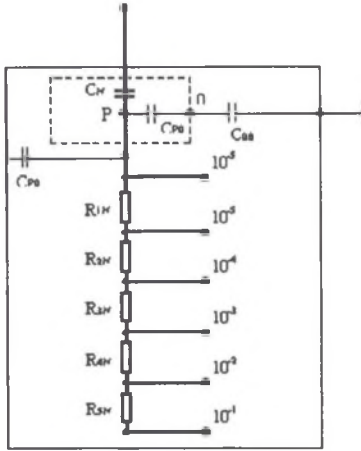
Parametry tego wzorca są następujące:  $1 \cdot 10^{-5} \leq \text{tg}\delta_N \leq 1 \cdot 10^{-1}$ ;  $f_N = 50 \text{ Hz}$ ;  $U_N \leq 10 \text{ kV}$ .  
Inne przyjęte rozwiązania [3, 8, 10, 11, 13, 14] budowy wzorców o stałych skupionych RC, odtwarzających również w sposób skokowy (nieciągły) wartość współczynnika strat dielektrycznych  $\text{tg}\delta$ , różnią się od omówionych powyżej tylko innym rozkładem pojemności pasozytniczych (doziemnych), zależnych głównie od ich mechanicznej konstrukcji, przy czym ich parametry metrologiczne są na ogół zbliżone.

Wyjątkiem jest tu praca [4], w której autorzy zaproponowali koncepcję budowy nastawnego wzorca współczynnika strat dielektrycznych  $\text{tg}\delta$ , bazującą na kondensatorze Thompsona-Lamparda (rys.5).

Rzeczywistą, odtwarzaną przez ten wzorec wartość  $\text{tg}\delta'_N$  określa się za pomocą następującej zależności [4]:

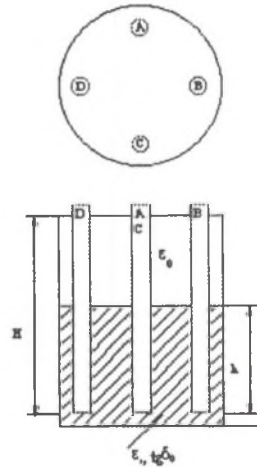
$$\text{tg}\delta'_N = \text{tg}\delta_{N0} + \frac{\epsilon_r \text{tg}\delta_0 h}{H + h(\epsilon_r - 1)}, \quad (11)$$

gdzie:  $\operatorname{tg} \delta_{N0}$  - własny współczynnik strat dielektrycznych kondensatora z dielektrykiem powietrznym;  $\operatorname{tg} \delta_{N0} = (1-2) \cdot 10^{-5}$ ,  $\epsilon_r$ ,  $\operatorname{tg} \delta_0$  - względna przenikalność elektryczna i współczynnik strat dielektrycznych cieplego dielektryka,  $h$  - głębokość zanurzenia elektrod A i C lub B i D w cieplem dielektryku,  $H$  - długość elektrod A,B,C,D (por. rys.4).



Rys.4. Wysokonapięciowy ( $U_N \leq 10 \text{ kV}$ ) wzorec współczynnika strat dielektrycznych  $\operatorname{tg} \delta$  o  $C_N = \text{const}$

Fig.4. High voltage ( $U_N \leq 10 \text{ kV}$ ) dielectric loss factor  $\tan \delta$  standard with  $C_N = \text{const}$



Rys.5. Wzorec współczynnika strat dielektrycznych  $\operatorname{tg} \delta$  z wykorzystaniem kondensatora Thompsona-Lamparda

Fig.5. Dielectric loss factor  $\tan \delta$  standard with use of Thompson-Lampard capacitor

Zwróćmy uwagę, że dla  $0 \leq h \leq H$  zakres zmian odtwarzanych wartości  $\operatorname{tg} \delta_N^*$  jest następujący:

$$\operatorname{tg} \delta_{N0} \leq \operatorname{tg} \delta_N^* \leq \operatorname{tg} \delta_{N0} + \operatorname{tg} \delta_0. \quad (12)$$

Przykładowo, dla cieplego dielektryka będącego olejem transformatorowym o parametrach [4]:  $\epsilon_r = 2,0$  i  $\operatorname{tg} \delta_{N0} = 0,0001$ ,  $H = 1000 \text{ mm}$  i  $h = (0 \dots 100) \text{ mm}$  zakres zmian odtwarzanej przez wzorec wartości  $\operatorname{tg} \delta_N^*$  jest następujący:

$$\operatorname{tg} \delta_{N0} \leq \operatorname{tg} \delta_N^* \leq \operatorname{tg} \delta_{N0} + 0,000018.$$

Z kolei niepewność  $\pm \delta_{\operatorname{tg} \delta}$  odtworzenia wartości  $\operatorname{tg} \delta_N$  określa wzór:  $\pm \delta_{\operatorname{tg} \delta} = \pm \delta_{\operatorname{tg} \delta_0}$  [4].



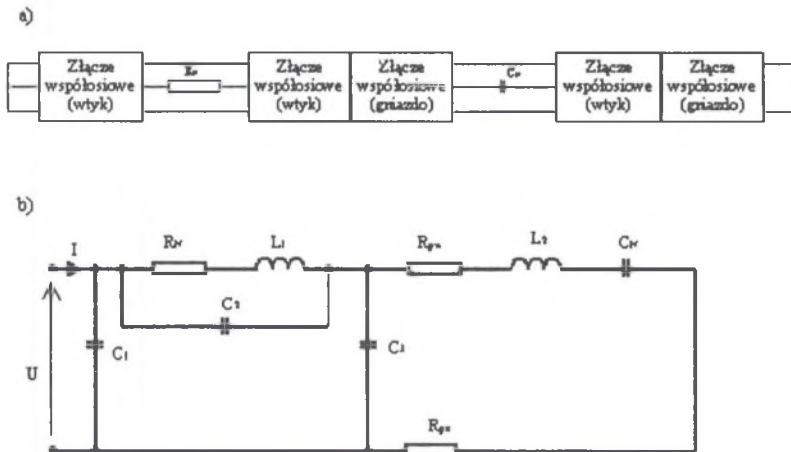
Wynika stąd, że o niepewności  $\pm \delta_{tg\delta}$  odtworzenia zadanej wartości  $tg\delta$  decyduje w głównej mierze niepewność wyznaczenia wartości  $\pm \delta_{tg\delta_0}$  ciekłego dielektryka, która może być wyznaczona z dużą dokładnością innymi metodami, np. metodą kalorymetryczną (por. prace [1, 12, 17, 18]).

Podstawową zaletą nastawnego wzorca  $tg\delta$  zbudowanego w oparciu o kondensator liczalny Thompsona-Lamparda jest możliwość odtwarzania w sposób ciągły wartości współczynnika strat dielektrycznych  $tg\delta$  porównywalnych z wartością współczynnika strat własnych kondensatora Thompsona-Lamparda  $tg\delta_{N0}$  o wartościach z zakresu:

$$tg\delta_{N0} = (1 - 2) \cdot 10^{-5}.$$

### 2.3. Współosiowe wzorce $tg\delta$

Współosiowe wzorce współczynnika strat dielektrycznych  $tg\delta$  wykonuje się najczęściej w postaci pokazanej jak na rys.6 [15].



Rys.6. a) Budowa współosiowego wzorca współczynnika strat dielektrycznych  $tg\delta$ ,

b) Schemat zastępczy współosiowego wzorca współczynnika strat dielektrycznych  $tg\delta$

Fig.6. a) Structure of coaxial dielectric loss factor  $\tan \delta$  standard, b) An equivalent circuit of coaxial dielectric loss factor  $\tan \delta$  standard

Rozwiązanie to polega na rozdzieleniu wzorca na część R i C, przy czym możliwa jest zmiana nastawy wartości  $tg\delta$  poprzez (na ogół) odpowiednią podmianę części R.

Wzorce współosiowe pozwalają odtwarzać wartości  $tg\delta$  z zakresu  $10 \cdot 10^{-4} \leq tg\delta \leq 1000 \cdot 10^{-4}$  z niepewnością odtworzenia zadanej wartości  $tg\delta$  równą:  $\pm \delta_{tg\delta} \leq \pm 5\%$ .

Przyjęty sposób konstrukcji wzorca i odpowiedni dobór elementów RC o znanych wartościach pasywnych (por. rys.6b) umożliwia osiągnięcie szerokiego zakresu częstotliwości poprawnej pracy wzorca, w zakresie od 10 kHz do 100 MHz.

### 3. PODSUMOWANIE

Jednym z celów niniejszego opracowania jest zarówno porównanie wybranych parametrów omawianych wzorców współczynnika strat dielektrycznych  $tg\delta$ , jak również wskazanie nowych kierunków badań prowadzących do budowy wzorców  $tg\delta$  o jakościowo lepszych parametrach.

Mając to na uwadze, w tablicy 1 zawarto porównanie przykładowych, wybranych parametrów wcześniej omówionych wzorców współczynnika strat dielektrycznych  $tg\delta$ .

Tablica 1

Zestawienie wybranych parametrów wzorców współczynnika strat dielektrycznych  $tg\delta$

Typ wzorca $tg\delta$	$tg\delta_N$	$\pm\delta_{tg\delta}$	$f_N$	$U_N$	Uwagi
Kalorymetryczne [1,2,12,17,18]	$\geq 2 \cdot 10^{-6}$	$\geq \pm 1\%$ $\leq \pm 2\%$	50-2000 Hz	30-100V	temperatura $\vartheta = 4,2K$ [17]
RC o parametrach skupionych [2, 3, 5, 8-11, 13, 14]	$\geq 5 \cdot 10^{-4}$ $\leq 1000 \cdot 10^{-4}$	$\geq \pm 2\%$ $\leq \pm 10\%$	$50 - 10^4$ Hz	$\leq 100V$ ( $\leq 10kV$ [9])	wzorce powstałe z szeregowego połączenia elementów RC
RC na bazie kondensatora Thompsona-Lamparda [4]	$\geq tg\delta_{N0}$ $\leq tg\delta_0$	$\pm \delta_{tg\delta_0}$	brak danych	brak danych	$tg\delta_{N0}$ , $tg\delta_0$ - współczynnik strat własnych wzorca i ciekłego dielektryka
RC współosiowe [15, 19]	$\geq 10 \cdot 10^{-4}$ $\leq 1000 \cdot 10^{-4}$	$\leq \pm 5\%$	$\geq 10kHz$ $\leq 100MHz$	brak danych	możliwość niezależnego pomiaru wartości parametrów RC

Z analizy zestawionych celem porównania w tablicy 1 wybranych parametrów wzorców  $tg\delta$  wynika, że wzorce kalorymetryczne umożliwiają odtworzenie stosunkowo najmniejszych wartości współczynnika strat dielektrycznych  $tg\delta$ , a zatem mogą one służyć do budowy wzorców odniesienia. Dodatkową zaletą tego typu wzorców jest niezależność odtwarzanej wartości  $tg\delta$  od wartości częstotliwości  $f_N$  i rodzaju (kształtu) napięcia  $U_N$  przyłożonego do

zacisków wzorca, wadą natomiast - odpowiednio wysoki koszt wymuszony koniecznością odpowiedniej termostatacji układu.

Do budowy z kolei wzorców kontrolnych można polecić współosiowe wzorce RC, których niezaprzeczną zaletą jest stosunkowo szeroki zakres częstotliwości nominalnych wzorca; wzorce użytkowe natomiast mogą być wykonywane w postaci stosunkowo prostych układowo szeregowych połączeń elementów RC.

Przedstawione w niniejszym opracowaniu odpowiednie porównania wskazują jednak możliwość budowy nowych jakościowo wzorców  $tg\delta$ .

Możliwe są tutaj dwa kierunki dalszych badań:

- pierwszy kierunek ten obejmuje rozważania dotyczące wzorców bazujących na kondensatorze Thomsona-Lamparda wypełnionego ciekłym dielektrykiem o znanych a priori parametrach ( $\epsilon_r$ ,  $tg\delta_0$ ) [4]. Zaletą tego typu wzorców jest możliwość wykorzystania zalet samego kondensatora Thompsona-Lamparda, tj. możliwość budowy liczalnego wzorca  $tg\delta$ ,
- drugi kierunek dalszych badań związany jest z możliwościami modyfikacji klasycznych rozwiązań wzorców  $tg\delta$  bazujących na szeregowym połączeniu elementów RC [2, 3, 5, 8, 9, 10, 11, 13, 14]; odtwarzana wartość  $tg\delta_N$  jest tu na ogół określana na podstawie odpowiedniego schematu zastępczego [13, 14] wzorca (por. np. wzory (9) i (10)). Istotną nowość może w tym przypadku polegać na odpowiednim wcześniejszym wyznaczeniu wartości elementów tego schematu, przez co odpowiednie techniki wzorcowania [7, 16] układów pomiarowych do pomiaru współczynnika strat dielektrycznych  $tg\delta$  mogą ulec dalszemu uproszczeniu.

## LITERATURA

1. Bierzan W.P., Rimskij W.K., Miezienin O.L., Klionskij M.D.: Kalorimetrieskij metod opredelenija tangensa ugła poter vysokodobrotnych kondensatorov bolszoj jomkosti. Elektrotechnika, vol.61, nr 4, 1991.
2. Chrzan B.: Analiza porównawcza właściwości metrologicznych wybranych struktur wzorców  $tg\delta$ , Praca dyplomowa inżynierska (w przygotowaniu), Instytut Metrologii i Automatyki Elektrotechnicznej, Politechnika Śląska, Gliwice, 2000.
3. Guszina T.M., Klionskij M.D., Miazdrikov O.A., Gurjanov W.C., Siemienov J. P., Mazina G.M., Tichomirova L.A.: Gosudarstvennyj pervicnyj etalon edinicy ugła poter. Izmeritielnaja Tiechnika, vol.48, Nr 3, 1987.
4. Guzik J., Miczulski W.: Koncepcja budowy wzorca współczynnika strat  $tg\delta$  w oparciu o kondensator Thomsona-Lamparda. Materiały Krajowego Kongresu Metrologii, tom 3, Gdańsk, 15-18 września 1998.
5. Hoyer H.: Verlustwinkelnormale und Verlustwinkelwariatoren, Archiv fur Elektrotechnik. Band XLI, Heft 6, 1954.

6. Instrukcja Nr 8 Prezesa Polskiego Komitetu Normalizacji i Miar z dnia 3 sierpnia 1978 r. o sprawdzaniu kontrolnych wzorców współczynnika strat dielektrycznych tg $\delta$  dielektryków w zakresie częstotliwości do 1 MHz. Dziennik Normalizacji i Miar Nr 15, Warszawa 1978.
7. Jellonek A.: Możliwości pomiaru bardzo małych kątów stratności kondensatorów przy pomocy mostka prądu zmiennego typu Scheringa. Rozprawy Elektrotechniczne, tom. IV, z.1, 1958.
8. Jellonek A.: Możliwości realizacji wzorców tangensa kąta strat kondensatorów. Rozprawy Elektrotechniczne, tom. VII, z.1, 1961.
9. Kagler S.: Konstruktion eines tan  $\delta$  - Normals zur Überprüfung und Eichung von HochspannungsVerlustfaktor-Messbrücken. ATM, Oktober, 1962.
10. Klionskij M.D., Vierbickij C.W.: Standarizacija metoda izmierienija ugła poter varikapov. Izmieritielnaja Tiechnika, vol.52, Nr 8, 1991.
11. Licznarski B.: Wzorce tangensa kąta strat kondensatorów o parametrach RC skupionych i rozłożonych. Rozprawy Elektrotechniczne, tom. XIV-, z.4, 1968.
12. Mihai A., Antoniu E., Salceanu A.: A new measuring approach for tan  $\delta$  of the power ceramic capacitors. Conference on Precision Electromagnetic Measurements CPEM '92, Paris, 7-9 June, 1992.
13. Muciek J.: Wzorce współczynnika strat dielektrycznych kondensatorów - konstrukcja i parametry. Prace Naukowe IME Pol. Wr. Nr 29, Ser. Konferencje Nr 13, Wrocław 1987.
14. Simmon E.D., FitzPatrick G.J., Petersons O.: Calibration of dissipation factor standards, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol.48, No. 2, April, 1999.
15. Skibiński A.: Kontrolne wzorce współczynnika strat dielektrycznych. Normalizacja, Nr 7, 1980.
16. Szadkowska T., Szadkowski B.: Wzorcowanie mostków przeznaczonych do pomiaru współczynnika strat dielektrycznych. ZN Pol. Śl., ser. Elektryka, z.128, Gliwice 1992.
17. Thoma P.: Absolute calorimetric determination of dielectric loss factor at  $\omega = 10^4 \text{ s}^{-1}$  and 4,2 K and application to the measurement of loss factors of standard capacitors at room temperature. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol.29, No. 4, December, 1980.
18. Vincett P.S.: Calorimetric measurement of very low dielectric loss at low temperatures. British Journal of Applied Physics (J.Phys.D), ser.2, vol.2, 1969.
19. Współosiowy wzorzec tg $\delta$ . Opis patentowy Nr 135 186, Warszawa 1987.
20. Załącznik do Zarządzenia Nr 145 Prezesa Głównego Urzędu Miar z dnia 14 sierpnia 1996. Przepisy metrologiczne o cewkach i kondensatorach wzorcowych (stałych i regulowanych), Dziennik Urzędowy Miar i Probiernictwa Nr 25, Warszawa 1996.

Recenzent: Dr hab. inż. Jerzy Jaskulski  
prof. Politechniki Zielonogórskiej

## Abstract

The paper presents a review of the described in literature, well-known solutions of dielectric loss factor  $\text{tg}\delta$  standards.

From the analysis performed in order to compare the selected parameters of the described standards  $\text{tg}\delta$  (see Table 1) it follows that the calorimetric standards  $\text{tg}\delta$  make it possible to reproduce comparatively little values of the coefficient of dielectric losses  $\text{tg}\delta$ , and so they can be used for construction of the reference standards. The additional advantage of this type of standards  $\text{tg}\delta$  is independence of the reproduced values of the frequency  $f_N$  values and the kind of a voltage  $U_N$  applied to the standard terminals, with disadvantage instead - high cost caused by the necessity of suitable termostatisation of the system.

For construction of supervisory standards the coaxial RC standards can be proposed, their undeniable advantage is comparatively wide range of frequency  $f_N$ .

The presented comparisons (see Table 1) show the possibility of building new qualitative standards  $\text{tg}\delta$ .

Two directions of further investigations are possible here:

- First direction includes considerations dealing with standards based on Thompson-Lampard capacitor filled with liquid dielectric of priori known parameters [4]. The advantage this type of standards is possibility of utilization of Thompson-Lampard capacitor, (possibility of construction of a calculable standard  $\text{tg}\delta$ ),
- Second direction of further investigations is connected with possibilities of modification of classical solutions of standards  $\text{tg}\delta$  basing on series connection of RC elements [2, 3, 5, 8, 9, 10, 11, 13, 14]; the reproduced value  $\text{tg}\delta_N$  is determined basing on the suitable equivalent circuit [13, 14] of a standard (see eqs. (9) and (10)). The essential new approach to this problem is earlier determination of the value of the equivalent circuit elements. Therefore suitable procedures [16] of calibration of the of  $\text{tg}\delta$  measuring systems can be further simplified.