

Ocena wpływu parametrów przetworników I/U na błąd pomiaru $tg\delta$ metodą PKPF

Włodzimierz Kulesza,
Wiesław Miczulski *

Wstęp

Współczynnik strat dielektrycznych $tg\delta$ jest jednym z podstawowych wskaźników stosowanych do oceny stanu izolacji elektrycznych. Jest on fizycznie interpretowany jako stosunek energii czynnej (rozproszonej w postaci energii cieplnej W_c) do energii magazynowanej w polu elektrycznym (nazywanej bierną W_b) w określonym odcinku czasu i dany zależnością

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

Stosowane w praktyce metody pomiarowe nie bazują na definicji energetycznej $tg\delta$ wg wzoru (1), ale opierają się na napięciach lub prądach oraz wzajemnych zależnościach między ich ortogonalnymi składowymi. W pracach [1, 2] wykazano możliwość pomiaru $tg\delta$ metodą pomiaru kątów przesunięć fazowych (PKPF). Schemat strukturalny układu do pomiaru $tg\delta$ metodą PKPF przedstawia rys. 1a, wykres wskazowy napięcia i prądów w układzie przedstawia rys. 1b.

Mierzony kąt przesunięcia fazowego γ , pomiędzy prądami I_X i I_N , umożliwia obliczenie wprost kąta strat dielektrycznych δ z zależności

$$\delta = \frac{\pi}{2} - \varphi_X = \frac{\pi}{2} - (\gamma + \varphi_N) \quad (2)$$

gdzie: φ_X - wartość argumentu mierzonej impedancji, φ_N - wartość argumentu impedancji wzorcowej.

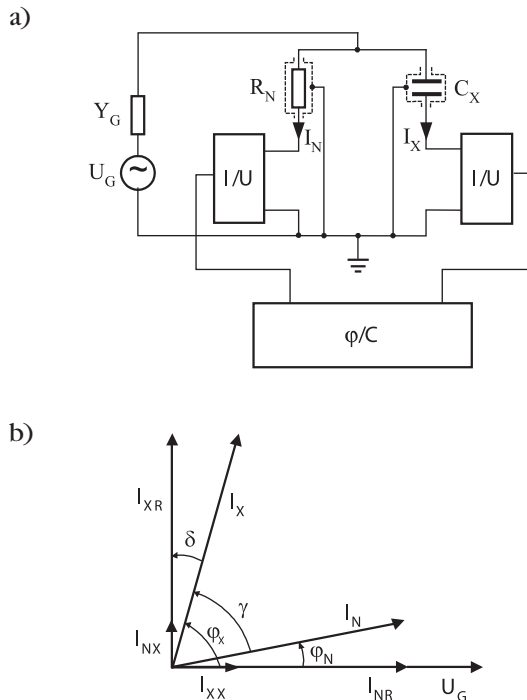
Układy przetworników I/U

Pomiar $tg\delta$ metodą PKPF wymaga zastosowania przetworników prądu na napięcie (I/U), ponieważ przetwornik kąta na cyfry φ/C wymaga sygnałów napięciowych. Przetworniki takie mogą być realizowane jako układy zawierające wzmacniacze operacyjne. Dwa podstawowe układy tego typu przedstawiono na rys. 2 i 3.

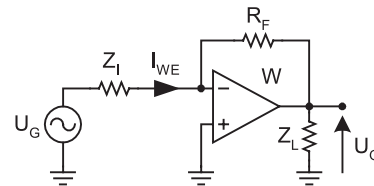
Wartość napięcia wyjściowego U_0 w układzie aktywnego przetwornika I/U jest określona wzorem (3)

$$U_0 = -I_{WE} R_F = -\frac{U_G}{Z_I} R_F \quad (3)$$

Amplituda sygnału wyjściowego aktywnego przetwornika I/U może być ustalona za pomocą amplitudy



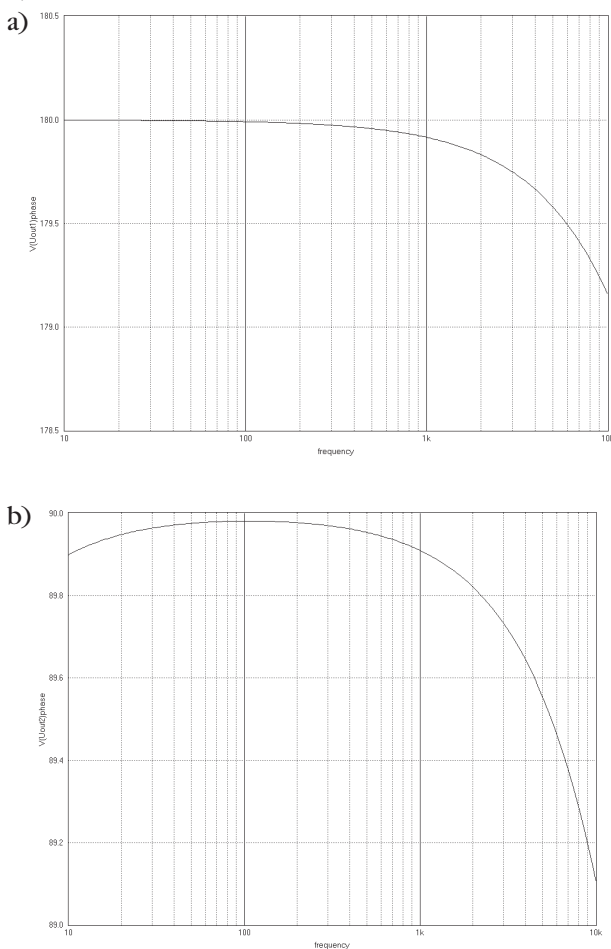
Rys. 1. a) Uproszczony schemat strukturalny układu pomiarowego, b) wykres wskazowy napięcia i prądów w układzie



Rys. 2. Układ aktywnego przetwornika I/U

* Dr inż. Włodzimierz Kulesza, dr hab. inż. Wiesław Miczulski - Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Metrologii Elektrycznej

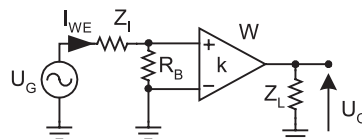
napięcia U_G lub rezystora R_F o odpowiedniej wartości. Ograniczeniem maksymalnej wartości amplitudy napięcia U_G jest napięcie zasilania wzmacniacza operacyjnego (zwykle nie większe niż 15 V), zatem pomiar impedancji Z_I o dużej wartości modułu wymaga dużej wartości rezystancji R_F . Aktywny przetwornik I/U charakteryzuje się bardzo małą impedancją wejściową, co jest bardzo korzystną własnością w odniesieniu do pomiaru $tg\delta$ metodą PKPF [4]. Układ aktywnego przetwornika U/I umożliwia przetwarzanie bardzo małych prądów, jeśli wzmacniacz operacyjny charakteryzuje się znikomo małym prądem polaryzacji, np. wzmacniacz z tranzystorami wejściowymi typu FET. W układzie modelowym zastosowano wzmacniacz operacyjny AD 711 firmy Analog Devices z tranzystorami typu Bi-FET o prądzie polaryzacji <15 pA. Zasadniczą wadą aktywnego przetwornika I/U w zastosowaniu do pomiaru $tg\delta$ metodą PKPF jest przesunięcie fazowe zależne od wartości elementów tworzących przetwornik I/U (rys. 3). Przesunięcie to nie może być zmierzone, gdyż wejście nieodwracające wzmacniacza operacyjnego jest na potencjale masy pozornej bliskiej potencjałowi masy.



Rys. 3. Charakterystyki fazowe przetwornika I/U z rys. 2 przy różnych wartościach Z_I oraz R_F : a) $Z_I = 10\text{ M}\Omega$, $R_F = 10\text{ M}\Omega$, b) $Z_I = -j 10\text{ M}\Omega$, $R_F = 10\text{ M}\Omega$,

Drugim rodzajem przetwornika I/U, który może być zastosowany w układzie do pomiaru $tg\delta$ metodą

PKPF jest przetwornik działający na zasadzie przetwarzania spadku napięcia wymuszonego przez prąd IWE płynący przez rezystor pomiarowy R_B , zbudowany wg schematu przedstawionego na rys. 4.



Rys. 4. Układ przetwornika I/U z bocznikiem i wzmacniaczem pomiarowym

Wartość napięcia wyjściowego U_0 w układzie przetwornika I/U z rys. 4 jest określona wzorem

$$U_0 = I_{WE} R_B k = \frac{U_G}{Z_I} R_B k \quad (4)$$

Układ z przetwarzaniem spadku napięcia na rezystorze pomiarowym jest układem, który umożliwia przetwarzanie sygnałów ze źródła o większym napięciu wyjściowym, gdyż impedancja Z_I wraz z rezystorem R_B tworzy dzielnik napięcia, stąd zastosowanie odpowiednio małej wartości rezystora R_B umożliwia utrzymanie napięcia wejściowego wzmacniacza na poziomie bezpiecznym dla wzmacniacza pomiarowego, umożliwiając jednocześnie zastosowanie elementów zabezpieczających wejście wzmacniacza w stanach przejściowych podczas załączenia wysokiego napięcia U_G . Jako elementy zabezpieczające mogą być zastosowane szybkie diody półprzewodnikowe. Cenną właściwością układu przetwornika z rys. 4 jest brak zależności pasożytniczego przesunięcia fazowego wprowadzanego przez układ od wartości elementów układu (rys. 5). Ponadto przy założeniu odpowiednio dużego napięcia na rezystorze pomiarowym istnieje możliwość pomiaru przesunięcia fazowego między wejściem i wyjściem wzmacniacza. Pewną wadą omawianego układu jest większa od zera impedancja wejściowa, ale nie sprawia specjalnych trudności technicznych zapewnienie odpowiednio dużego ($>10^4$) stosunku impedancji mierzonej do rezystancji wejściowej przetwornika I/U [4].

W modelowym układzie do pomiaru $tg\delta$ zastosowano precyzyjny wzmacniacz pomiarowy z programowo ustalonym wzmocnieniem typu AD 624 firmy Analog Devices.

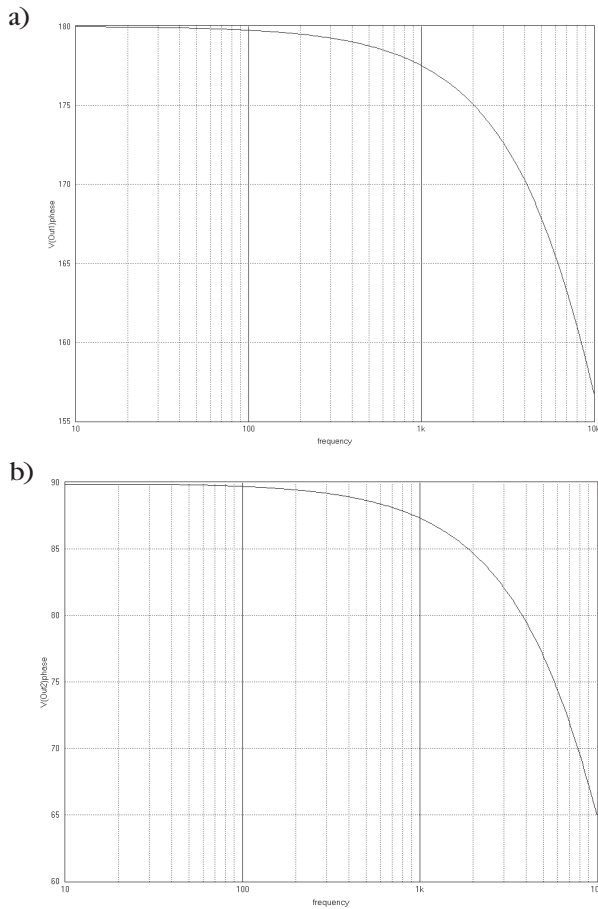
W tablicy 1 przedstawiono porównanie właściwości analizowanych przetworników I/U.

System pomiarowy do badań doświadczalnych

Schemat strukturalny systemu pomiarowego do pomiaru $tg\delta$ metodą PKPF przedstawia rys. 6.

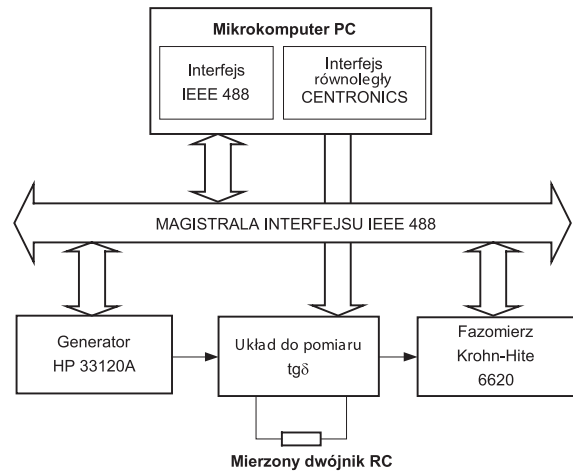
System pomiarowy do pomiaru $tg\delta$ wykonano w dwóch wariantach:

- aktywne przetworniki I/U, generator sygnałowy typu HP33120A firmy Hewlett-Packard
- przetworniki I/U zbudowane z bocznika i wzmacniacza pomiarowego, generator sygnałowy PO-27.



Rys. 5. Charakterystyki fazowe przetwornika I/U z rys. 4 przy różnych wartościach Z_1 : a) $Z_1 = 10 \text{ M}\Omega$, b) $Z_1 = -j 10 \text{ M}\Omega$

Generator sygnałowy dostarcza do układu pomiarowego sinusoidalny sygnał napięciowy o regulowanej amplitudzie i zadanej częstotliwości (dla modelu przyjęto częstotliwość 50 Hz), zniekształcenia harmoniczne przebiegu są mniejsze od 0,04 %. Konieczność stosowania różnych typów generatorów jest podyktowana różnymi zakresami napięć wyjściowych wymaganymi do wymuszenia określonego prądu w układzie pomiarowym. Generator HP33120A umożliwił uzyskanie sygnału o amplitudzie do 10 V, natomiast generator xxx sygnałów o amplitudzie do 100 V. Kąt



Rys. 6. Schemat strukturalny systemu pomiarowego do badania właściwości metrologicznych układów do pomiaru $tg\delta$ metodą PKPF

przesunięcia fazowego między prądami I_N i I_X (rys. 1b) mierzy precyzyjny fazomierz Krohn-Hite 6620, umożliwiający pomiar kąta przesunięcia fazowego między dwoma przebiegami sinusoidalnymi z rozdzielczością 0,01°. Największa dokładność pomiaru przesunięcia fazowego wynosi 0,02° dla sygnałów sinusoidalnych o amplitudzie 0,5 V w zakresie częstotliwości 30 Hz – 40 kHz. Możliwość ustawienia amplitudy sygnału wyjściowego generatora oraz wyboru wzmocnienia przetworników I/U umożliwia dobór sygnału pomiarowego zapewniającego najlepsze warunki pomiaru przez fazomierz. W komputerze PC, na podstawie zmierzonego przesunięcia fazowego, obliczana jest wartość kąta δ ze wzoru (2) (przy założeniu $\varphi_N = 0$) oraz $tg\delta$.

Generator funkcyjny HP33120A i fazomierz są sterowane za pośrednictwem interfejsu IEEE 488. Rolę kontrolera systemu pełni komputer PC wyposażony w kartę interfejsu GPIB firmy National Instruments. Model układu do pomiaru $tg\delta$ jest sterowany za pośrednictwem standardowego interfejsu równoległego CENTRONICS komputera PC.

System pomiarowy jest zarządzany przez program sterujący napisany w środowisku programowym Lab- Windows/CVI firmy National Instruments. Program

Tablica 1. Porównanie jakościowe właściwości przetworników I/U

Rodzaj przetwornika	Przetwornik aktywny	Przetwornik z bocznikiem
Układ przetwornika		
Impedancja wejściowa	bardzo mała	mała
Możliwość pomiaru przesunięcia fazowego między wejściem a wyjściem	nie ma	jest
Napięcie źródła sygnału	małe	wysokie
Symetria układu w układzie do pomiaru $tg\delta$ metodą PKPF	mała	duża

sterujący umożliwia pełną automatyzację procesu pomiarowego przy zadanych parametrach napięcia i częstotliwości sygnału pomiarowego.

Badania doświadczalne

Badania doświadczalne polegały na pomiarze kąta δ dwójników RC złożonych z połączonych równolegle elementów dobranych w taki sposób, by uzyskać kąt δ ok. 10° . Elementy R i C tworzące dwójnik zmierzono precyzyjnym miernikiem RLC typ HP 4284A firmy Hewlett-Packard. Wyniki pomiarów przedstawiono w tab. 2.

Porównanie wyników pomiarów kąta δ oraz $tg\delta$ wykonanych metodą PKPF w układach z różnymi wariantami realizacji przetwornika I/U pokazuje, że wartości kąta δ i $tg\delta$ zmierzone w układzie z przetwornikami I/U opartymi na boczniku i wzmacniaczu pomiarowym są bardzo zbliżone do wartości obliczonych teoretycznie na podstawie wartości elementów tworzących mierzony dwójnik RC. Fakt ten jest zbieżny z wnioskami wynikającymi z analizy właściwości układów przetworników I/U.

Wnioski

W wyniku rozważań teoretycznych i wykonanych badań doświadczalnych można uznać, że jest możliwa realizacja układu do pomiaru $tg\delta$ metodą PKPF. Spośród dwóch analizowanych układów przetworników I/U zdecydowanie lepszymi własnościami charakteryzuje się układ oparty na boczniku i wzmacniaczu pomiarowym. Układ ten umożliwia pomiar $tg\delta$ przy wysokim napięciu sygnału z generatora. Dalsze prace nad tym układem będą ukierunkowane na wykazanie możliwości pomiaru $tg\delta$ w szerokim paśmie częstotliwości.

Bibliografia

- [1] Guzik J., Miczulski W.: Pomiar $tg\delta$ metodą przetwarzania kątów przesunięć fazowych, *Krajowy Kongres Metrologii - KKM*, 98, Politechnika Gdańska (1998), T. 3, s. 242-249
- [2] Kulesza W., Miczulski W.: Właściwości metrologiczne układu do pomiaru $tg\delta$ metodą przetwarzania kątów przesunięć fazowych, *XXXV Międzyuczelniana Konferencja Metrologów - MKM 2003*, Wydawnictwo Katedry Metrologii AGH (2003), s. 27-32
- [3] Kulesza W., Miczulski W.: Badania symulacyjne właściwości fazowych przetworników I/U, *Modelowanie i symulacja systemów pomiarowych: Materiały XII Sympozjum*, Wydawnictwo Zakładu Metrologii AGH (2002), s. 169-174
- [4] Kulesza W., Miczulski W.: Wpływ admitancji pasozytniczych na błąd pomiaru $tg\delta$ metodą przetwarzania kątów przesunięć fazowych w układzie porównania prądów, *Modelowanie i symulacja systemów pomiarowych: Materiały XI Sympozjum*, Wydawnictwo Zakładu Metrologii AGH (2001), s. 49-56.

Tabela 2. Wyniki pomiarów $tg\delta_p$ i δ_p metodą PKPF z zastosowaniem różnych rodzajów przetworników I/U

C R		Wartości obliczone*		Przetworniki aktywne		Przetworniki z bocznikiem	
C_p (nF)	R_p (k Ω)	$tg\delta_p$	δ_p ($^\circ$)	$tg\delta$	δ ($^\circ$)	$tg\delta$	δ ($^\circ$)
5,10	3617	0,1726	9,79	0,1166±0,0005	6,65±0,03	0,1679±0,0005	9,53±0,03
9,78	1809	0,1799	10,20	0,1118±0,0005	6,38±0,03	0,1788±0,0005	10,14±0,03
24,76	723,4	0,1777	10,07	0,1030±0,0005	5,88±0,03	0,1776±0,0005	10,07±0,03
96,06	188,4	0,1759	9,97	0,1055±0,0005	6,02±0,03	0,1754±0,0005	9,95±0,03
469,43	38,48	0,1762	9,99	0,1033±0,0005	5,90±0,03	0,1773±0,0005	10,05±0,03
915,10	19,24	0,1808	10,25	0,1025±0,0004	5,85±0,02	0,1806±0,0004	10,23±0,02
1883,0	9,52	0,1776	10,07	0,1033±0,0004	5,90±0,02	0,1784±0,0004	10,12±0,02

* Wartości obliczone ze wzorów: $tg\delta_p = \frac{1}{\omega C_p R_p}$ oraz $\delta_p = \arctan tg\delta_p$