

Andrzej LEBIEDZKI

## POMIARY WSPÓŁCZYNNIKA STRAT DIELEKTRYCZNYCH W BADANIACH DIAGNOSTYCZNYCH URZĄDZEŃ ELEKTROENERGETYCZNYCH

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono metody wyznaczania współczynnika strat dielektrycznych za pomocą analogowego układu mnożącego dużej dokładności oraz szybkiego przetwornika A/C w pomiarach napięcia i prądu płynących przez badane urządzenie elektroenergetyczne.

## DIELECTRIC LOSS FACTOR MEASUREMENTS IN DIAGNOSTIC TESTING OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING EQUIPMENT

**Summary.** In the paper methods of determining dielectric loss factor by means of high accuracy analogue multiplier and fast a/d converter in measurements of voltage and current flowing through the tested equipment are described.

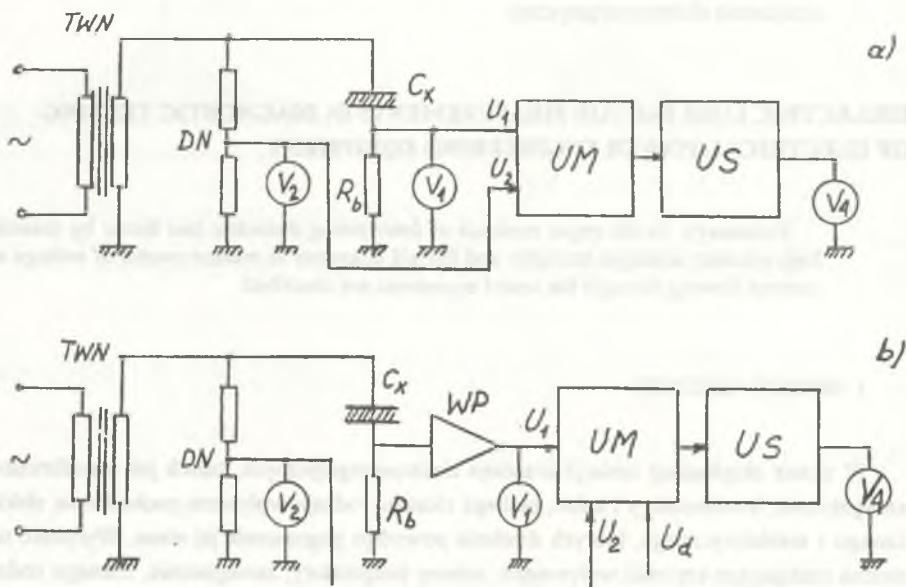
### 1. WPROWADZENIE

W czasie eksploatacji izolacja urządzeń elektroenergetycznych, takich jak transformatory energetyczne, kondensatory i kable, podlega różnego rodzaju wpływom pochodzenia elektrycznego i nieelektrycznego, których działanie powoduje pogorszenie jej stanu. Wyróżnić tutaj można następujące czynniki wpływające: zmiany temperatury, zawilgocenie, różnego rodzaju przepięcia lub przeciążenia, procesy starzeniowe. Z reguły występują łącznie działania kilku czynników, które powodują pogorszenie stanu izolacji i mogą doprowadzić do jej uszkodzenia. Do oceny stanu izolacji stosuje się wskaźniki typu rezystancyjnego, pomiary pojemności i współczynnika strat dielektrycznych oraz próby napięciowe. Pomiar współczynnika strat dielektrycznych badanego urządzenia ma na celu ocenę stanu izolacji. Szczególną wagę przywiązuje się do zmian czasowych wartości tg $\delta$  między kolejnymi pomiarami kontrolnymi. W ten sposób można wykryć zawilgocenie izolacji transformatorów energetycznych, występowanie wyładowań niezupełnych oraz określić intensywność procesu starzenia izolacji. Pomiary tg $\delta$  wykonuje się mostkiem Scheringa. Można też stosować metodę techniczną

z wykorzystaniem watomierza elektrodynamicznego o małym znamionowym współczynniku mocy, woltomierza i amperomierza dla obiektów o pojemnościach rzędu mikrofaradów. Stosując zamiast watomierza elektrodynamicznego analogowy układ mnożący dużej dokładności lub kartę pomiarową z szybkim przetwornikiem A/C można wyznaczyć współczynnik strat dielektrycznych w badaniach diagnostycznych urządzeń elektroenergetycznych.

## 2. POMIARY WSPÓLCZYNNIKA STRAT DIELEKTRYCZNYCH OBIEKTÓW NIEZIEMIANYCH Z ZASTOSOWANIEM UKŁADU MNOŻĄCEGO AD734

Schemat układu pomiarowego do wyznaczania współczynnika strat dielektrycznych dla obiektów niezemianych przedstawiono na rys.1.



Rys.1. Schemat układu do badania obiektów niezemianych: a) układ bez wzmacniacza pomiarowego, b) układ ze wzmacniaczem pomiarowym WP

Fig.1. Diagram of system for ungrounded objects testing: a) system without measuring amplifier, b) system with WP measuring amplifier

W układzie tym poprawnie mierzony jest prąd  $I_x$  płynący przez badaną pojemność  $C_x$ . Spadek napięcia  $U_1$  na boczniku  $R_b$  podawany jest na wejście 1 układu mnożącego UM typu AD734.

Napięcie  $U_2$  z rezystancyjnego dzielnika napięcia DN podawane jest na wejście 2 układu mnożącego. Zastosowany układ mnożący typu AD734 pozwala na mnożenie wartości chwilowych dwóch napięć zmiennych o częstotliwościach w zakresie  $10 \div 10^7$  Hz. Niedokładność układu mnożącego dla znamionowych wartości napięć na obu wejściach  $\pm 10$  V wynosi 0,1%. Układ mnożący realizuje funkcję mnożenia wartości chwilowych napięć  $u_1(t)$  i  $u_2(t)$  zgodnie z zależnością (1)

$$u_d(t) = \frac{u_1(t) u_2(t)}{u_3} + u_d, \quad (1)$$

gdzie:

- $u_d(t)$  — przebieg czasowy napięcia na wyjściu układu mnożącego,
- $u_3 = 10$  — napięcie stabilizatora wewnętrznego układu odniesienia,
- $u_d$  — napięcie stałe, które może być dodane do wyniku mnożenia.

W przypadku pomiaru dużych prądów płynących przez badany obiekt pojemnościowy, gdy  $u_1 < 10$  V, należy stosować wzmacniacz napięciowy WP między bocznikiem  $R_b$  i wejściem  $u_1$  układu mnożącego (rys. 1b). W tym przypadku występuje dodatkowy błąd pomiaru napięcia  $u_d$  związany z przesunięciem fazowym wprowadzonym przez wzmacniacz WP. Dla pomiarów wykonywanych przy stałej częstotliwości, np.  $f = 50$  Hz, błąd ten ma wartość stałą i może być uwzględniony przez podanie na układ mnożący UM dodatkowego napięcia  $u_d$  kompensującego ten błąd. Napięcie na wyjściu układu uśredniającego US zastosowanego za układem mnożącym, ma postać

$$u_{\text{śr}} = \frac{1}{T} \int_0^T u_d(t) dt + u_d = \frac{1}{u_3 T} \int_0^T u_1(t) u_2(t) dt + u_d. \quad (2)$$

Przy założeniu, że napięcia  $u_1(t)$  i  $u_2(t)$  mają przebiegi sinusoidalne przesunięte o kąt  $\varphi = \varphi_X$ ,  $u_1 = R_b I_X$ ,  $u_X > u_b$ ,  $u_d = 0$ ,  $u_X = k_w u_2$ , gdzie  $k_w$  — jest przekładnią napięciową dzielnika rezystancyjnego, wartość średnia napięcia na wyjściu układu ma postać

$$u_{\text{śr}} = \frac{R_b}{k_w u_3} \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{R_b}{k_w u_3} P_X, \quad (3)$$

gdzie  $P_X$  — straty mocy w badanym obiekcie.

Stąd

$$P_X = \frac{k_w u_3}{R_b} U_{\text{śr}}. \quad (4)$$

Średnia wartość napięcia na wyjściu układu mnożącego jest proporcjonalna do strat mocy w badanym obiekcie. Wzór powyższy wyprowadzono dla schematu przedstawionego na rys. 1a, tj. bez wzmacniacza WP. Mierząc równocześnie napięcia  $U_1$  i  $U_2$  można wyznaczyć wartość pojemności badanego obiektu zgodnie z zależnością

$$C_x = \frac{I_x}{\omega U_x} = \frac{U_1}{\omega R_b k_u U_2} \quad (5)$$

Przy założeniu, że  $\text{tg} \delta < 1$ , współczynnik strat dielektrycznych wyznaczyć można z zależności

$$\text{tg} \delta_x = \frac{P_x}{U_x I_x} = \frac{U_3 U_{4w}}{U_1 U_2} \quad (6)$$

Zakładając  $u_1 = \text{const}$ ,  $U_2 = \text{const}$ ,  $U_3 = \text{const}$ , woltomierz  $V_4$  mierzy  $\text{tg} \delta$ .

Na niedokładność wyznaczenia współczynnika strat dielektrycznych  $\Delta \text{tg} \delta_x$  mają więc wpływ niedokładności pomiaru napięć  $U_1$ ,  $U_2$ , niestałość napięcia  $U_3 = 10 \text{ V}$  i niedokładność pomiaru wartości średniej napięcia  $U_{4w}$  związana nie tylko z zastosowanym miliwoltomierzem, ale i niedokładnością samego układu mnożącego.

### 3. POMIAR WSPÓŁCZYNNIKA STRAT DIELEKTRYCZNYCH OBIEKTÓW UZIEMIANYCH

Schemat układu pomiarowego do wyznaczania współczynnika strat dielektrycznych obiektów uziemionych przedstawiono na rys.2. W układzie tym poprawnie mierzone jest napięcie, natomiast prąd płynący przez bocznik jest sumą prądu płynącego przez badany obiekt i rezystancyjny dzielnik napięcia.

$$I_b = I_x + I_{DN} \quad (7)$$

W układzie tym pomiary należy przeprowadzić dwukrotnie z włączonym obiektem badań i po jego odłączeniu od układu pomiarowego celem pomiaru mocy czynnej pobieranej przez dzielnik napięciowy DN.

Współczynnik strat dielektrycznych  $\text{tg} \delta_x$  badanego obiektu wyznaczony jest z zależności

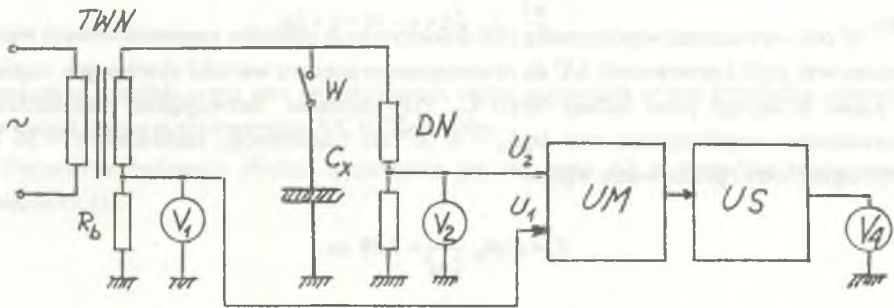
$$\text{tg} \delta_x = \frac{P_x}{U_x I_x} = \frac{U_3 (U_{4w}' - U_{4w}'')}{U_1 U_2} \quad (8)$$

gdzie:

$U_{4w}'$  — napięcie na wyjściu układu uśredniającego z włączonym obiektem badań,

$U_{4w}''$  — napięcie na wyjściu układu uśredniającego po odłączeniu obiektu badań.

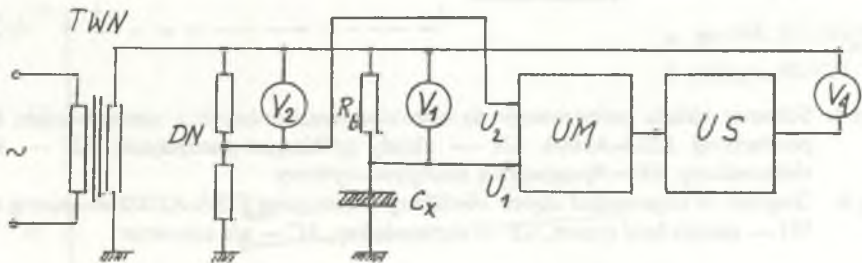
W układzie tym należy dobrać dzielnik napięciowy o takiej rezystancji, aby spełniony był warunek  $U_{4tr}' \geq 2 U_{4tr}''$ .



Rys.2. Schemat układu do badania obiektów uziemionych w metodzie poprawnie mierzonego napięcia

Fig.2. Diagram of system for grounded objects using correctly measurement voltage method

Dla obiektów uziemionych można zastosować również układ pomiarowy przedstawiony na rys.3.



Rys.3. Schemat układu do badania obiektów uziemionych w układzie poprawnie mierzonego prądu

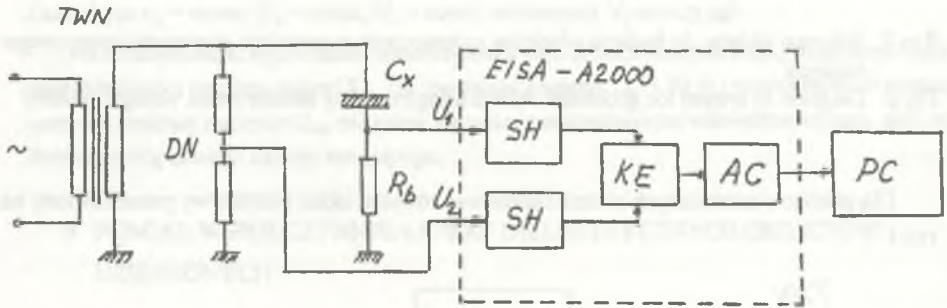
Fig.3. Diagram of system for grounded objects using correctly measured current method

W tym przypadku cały układ pomiarowy znajduje się na potencjale napięcia pomiarowego i wymaga zasilania za pomocą transformatora izolującego lub akumulatora. Odczyt woltmierz musi odbywać się z bezpiecznej dla obsługi odległości lub z zastosowaniem trzykanałowego rejestratora cyfrowego. W tym przypadku  $tg\delta$  wyznaczony jest z zależności (6).

#### 4. POMIAR WSPÓLCZYNNIKA STRAT DIELEKTRYCZNYCH Z WYKORZYSTANIEM PRZETWORNIKA A/C

W celu wyznaczenia współczynnika strat dielektrycznych obiektów pojemnościowych można zastosować szybki przetwornik A/C do równoczesnego pomiaru wartości chwilowych napięcia i prądu płynącego przez badany obiekt  $C_x$ . Przy założeniu bezwzględnej niedokładności wyznaczenia współczynnika strat  $\Delta \text{tg} \delta_x = \pm 10^{-3}$  dla częstotliwości technicznej  $f = 50 \text{ Hz}$ , wymagany okres próbkowania wynosi

$$T_r = \Delta \text{tg} \delta_x \frac{1}{2\pi f} = 3,28 \mu\text{s}.$$



Rys.4. Schemat układu pomiarowego do obiektów nieziemionych z zastosowaniem karty pomiarowej EISA-A2000. SH — układy próbkująco-pamiętające, KE — klucz elektroniczny, AC — przetwornik analogowo-cyfrowy

Fig.4. Diagram of ungrounded objects measuring system using EISA-A2000 measuring card. SH — sample hold system, KE — electronic key, AC — a/d converter

Rozdzielczość stosowanego przetwornika powinna być tego samego rzędu, tj.  $10^{-3}$  mierzonej wartości chwilowej napięcia lub prądu. Taką rozdzielczość zapewnia przetwornik 12-bitowy o pojemności części cyfrowej  $2^{12} - 1 = 4095$  bitów. Schemat układu pomiarowego do wyznaczenia współczynnika strat dielektrycznych z zastosowaniem karty pomiarowej EISA-A2000 firmy National Instruments przedstawiono na rys.4. Karta ta zawiera cztery wejścia analogowe dla równoczesnego pomiaru wartości chwilowych 4 napięć o wartościach znamionowych  $\pm 5 \text{ V}$ , układy próbkująco-pamiętające SH i 12-bitowy przetwornik A/C. Wykorzystując tylko dwa wejścia  $U_1$  i  $U_2$  czas potrzebny na pojedyncze przetwarzanie wynosi  $2 \mu\text{s}$ . Wyniki przetwarzania są gromadzone w pamięci komputera. Celem wyznaczenia współczynnika strat dielektrycznych

można określić przesunięcia czasowe  $t$  między rejestrowanymi przebiegami napięć  $U_1$  i  $U_2$  oraz okres  $T$ . Współczynnik strat dielektrycznych wyznacza się wówczas z zależności

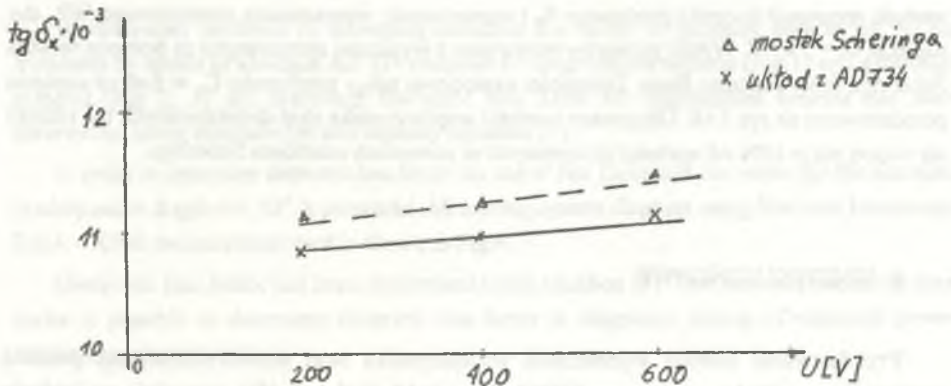
$$\operatorname{tg} \delta \approx \delta = 90 - \varphi = \left( \frac{T}{4} - t \right) \frac{2\pi}{T}. \quad (9)$$

Momentowi przejścia przez zero rejestrowanych napięć odpowiada w tym przypadku połowa pojemności cyfrowej przetwornika A/C tj. 2048 bitów.

Pojemność badanego obiektu wyznaczana jest tak samo jak w metodzie analogowej z zależności (5).

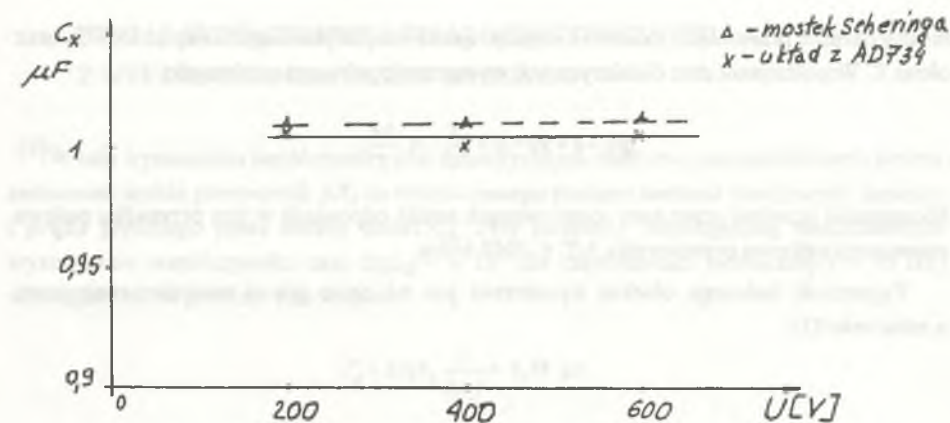
## 5. BADANIA LABORATORYJNE KONDENSATORÓW O IZOLACJI PAPIEROWO-OLEJOWEJ

Pomiary współczynnika strat dielektrycznych  $\operatorname{tg} \delta_x$  i pojemności  $C_x$  kondensatora typu KBG-P o znamionowej pojemności  $1 \mu\text{F} \pm 10\%$  i napięciu znamionowym 3 kV przeprowadzono w układzie pomiarowym z wykorzystaniem układu mnożącego AD734 AQ przedstawionym na rys. 1b.



Rys.5. Zależność  $\operatorname{tg} \delta$  badanego kondensatora w funkcji napięcia pomiarowego

Fig.5. Dielectric loss factor voltage dependence of tested capacitor



Rys. 6. Zależność pojemności badanego kondensatora w funkcji napięcia pomiarowego  
 Fig. 6. Capacity voltage dependence of tested capacitors

Do pomiaru napięć zastosowano multimetry cyfrowe typu V560 o zakresach znamionowych 10 V i 100 mV, kl. 0,5. Przekładnia napięciowa dzielnika napięcia DN była dobierana dla każdej wartości napięcia pomiarowego tak, aby napięcie  $U_2 = \frac{10}{\sqrt{2}} = 7,07 V$ . Podobnie dobierana była

wartość rezystancji bocznika prądowego  $R_0$  i wzmacnienie wzmacniacza pomiarowego WP, aby napięcie  $U_1 = 7,07 V$ . Wyniki pomiarów porównano z wynikami otrzymanymi za pomocą mostka Scheringa firmy Hartman Baun. Zależności napięciowe  $\text{tg}\delta_x$  i pojemności  $C_x$  w funkcji napięcia przedstawiono na rys. 5 i 6. Otrzymane wartości współczynnika strat dielektrycznych nie różniły się więcej niż o 10% od wartości otrzymanych w pomiarach mostkiem Scheringa.

## 6. WNIOSKI KOŃCOWE

Przedstawione metody wyznaczania współczynnika strat dielektrycznych za pomocą analogowego układu mnożącego AD734 dużej dokładności (0,1%) pozwalają na badania profilaktyczne izolacji urządzeń energetycznych z wystarczającą dla tych celów niedokładnością. Metoda ta jest znacznie ekonomiczniejsza od stosowanej metody za pomocą mostka Scheringa. Stosowanie szybkiego przetwornika A/C w zaproponowanej karcie pomiarowej pozwala na całkowitą komputeryzację procesu pomiarowego. Koszt tej metody jest kilkanaście razy wyższy od metody analogowej, ale jednak niższy od kosztów związanych z zakupem mostka Scheringa z wysokonapięciowym wzorcem pojemności.



## LITERATURA

1. Kuśmerek Z., Groszek S.: Technika pomiarów i badań urządzeń elektrotechnicznych. WNT, Warszawa 1993.
2. Kulka Z., Nadachowski M.: Zastosowanie wzmacniaczy operacyjnych. WNT, Warszawa 1986.
3. Analog Devices catalogue. 1995.
4. Instrumentation Reference and catalogue. Test and measurement Process Monitoring and Control National Instruments 1995.
5. Przepisy eksploatacji urządzeń elektroenergetycznych. COSIW SEP, Warszawa 1994.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Jerzy Jaskulski

Wpłynęło do Redakcji dnia 15 lutego 1996 r.

**Abstract**

In the paper methods of determining dielectric loss factor of capacity objects for 50 Hz frequency by means of analogue AD 734 multiplier for ungrounded systems (Fig. 1) and grounded systems (Fig 2, 3) are described. Dielectric loss factor for ungrounded systems has been determined using equation (6) and capacity equation (5).

In order to determine dielectric loss factor the use of fast 12-bit a/d converter for the assumed inadequacies  $\Delta \operatorname{tg} \delta = \pm 10^{-3}$  is presented. Measuring system diagram using National Instrument E/SA - A200 measurement card is shown in Fig.4.

Dielectric loss factor has been determined using equation (9). The methods presented here make it possible to determine dielectric loss factor in diagnostic testing of electrical power engineering equipment.