

Paweł ZDANOWICZ

## UKŁAD KOMPENSACYJNY DO POMIARU WSPÓLCZYNNIKA STRAT DIELEKTRYCZNYCH

**Streszczenie.** W pracy opisano nowy kompensator do pomiaru współczynnika strat dielektrycznych i pojemności izolacji maszyn elektrycznych. Nowość rozwiązania polega na zastąpieniu elementów pasywnych kompensatora elementami aktywnymi sterowanymi mikroprocesorem, przy jednoczesnym zachowaniu idealnego kompensatora napięć przemiennej o współrzędnych prostokątnych. Elementy aktywne zrealizowane zostały jako cyfrowe generatory napięć sinusoidalnych sterowane systemem mikroprocesorowym i synchronizowane fazą i modulem napięcia zasilającego układ pomiarowy. Opracowanie zawiera również podstawową analizę źródeł błędów w układach kompensacyjnych do pomiaru pojemności i tgδ oraz sposoby ich eliminacji poprzez zastosowanie systemu mikroprocesorowego.

### 1. Wstęp

Do parametrów określających stan izolacji maszyn elektrycznych pracujących przy wysokim napięciu, rzędu kV, zalicza się współczynnik strat dielektrycznych tgδ. Pomiar tgδ określa całkowite straty badanego dielektryka tzn. sumę strat przewodnościowych, polaryzacyjnych i jonizacyjnych. Uwzględniając uzyskane wyniki pomiarów, badane elementy maszyn elektrycznych kwalifikuje się do dalszej produkcji lub odrzuca jako niepełnosprawne, niespełniające odpowiednich obowiązujących norm.

Pomiary pojemności C i współczynnika strat dielektrycznych tgδ izolacji maszyn elektrycznych cechują się pewnymi specyficznymi właściwościami, do których należy zaliczyć:

- wysokie napięcie zasilania rzędu kV,
- duże wartości natężenia prądu płynącego przez badany obiekt, rzędu A,
- małe wartości mierzonej pojemności, rzędu pF,
- duże wartości pojemności pasożytniczych itp.,
- wymagana wysoka dokładność i czułość układu pomiarowego.

Wspomniana specyfika pomiaru oraz wysokie wymagania odnośnie dokładności pomiaru implikują konieczność stosowania metod zerowych. Najczęściej stosuje się dwa rozwiązania do pomiaru C i tgδ, są to:

- mostki Scheringa równoważone ręcznie i automatycznie, o dokładności pomiaru tgδ rzędu  $\pm 1\%$  i pojemności C  $\pm 0,1\%$  [1],

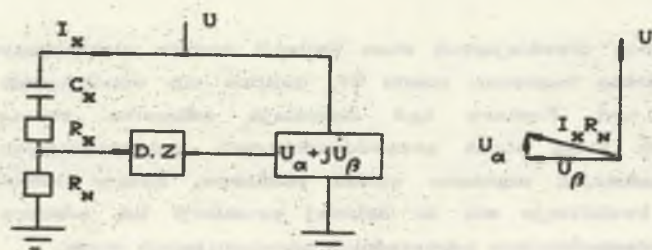
- magnetyczne komparatory prądów przemiennych, dokonujące pomiaru  $\text{tg} \delta$  z dokładnością  $\pm 1\%$  i pojemności z dokładnością  $\pm 0,1\%$  [2].

Oba wymienione układy realizują pomiar badanej izolacji metodą bezpośredniego porównania z wysokonapięciowym kondensatorem wzorcowym, którego  $\text{tg} \delta$  powinien być mniejszy lub równy  $10^{-5}$ . Konieczność stosowania wzorcowej pojemności stanowi znaczne utrudnienie w konstrukcji podobnych układów w Polsce. Wynika to z braku krajowych producentów takich wzorców i bardzo wysokiej ich ceny za granicą.

Układami alternatywnymi w stosunku do mostków Scheringa i komparatorów magnetycznych są układy kompensacyjne napięcia przemiennego. Niniejszy artykuł jest poświęcony zaprezentowaniu nowej koncepcji mikroprocesorowego kompensatora do pomiaru  $C$  i  $\text{tg} \delta$ , izolacji maszyn elektrycznych pracujących pod wysokim napięciem.

## 2. Układ kompensacyjny do pomiaru $C$ i $\text{tg} \delta$ przy wysokim napięciu

Zasada pomiaru pojemności  $C$  i współczynnika strat dielektrycznych  $\text{tg} \delta$  kompensatorem napięcia przemiennego o współrzędnych prostokątnych (rys.1) polega na porównaniu napięcia wywołanego prądem  $I_x$  na oporniku  $R_N$  z odpowiednio przetworzonym napięciem zasilającym układ pomiarowy [3].



Rys.1. Kompensator napięcia przemiennego do pomiaru  $C$  i  $\text{tg} \delta$  i wykres wektorowy napięć w stanie kompensacji  
 Fig.1. AC voltage potentiometer for measuring  $C$  and  $\text{tan} \delta$  and vector diagram of voltage in compensation state

Stan kompensacji opisuje równanie:

$$I_x R_N = U_\alpha + jU_\beta = lU + jsU, \quad (1)$$

gdzie:  $l$  i  $s$  są regulowanymi parametrami kompensatora umożliwiającymi uzyskanie stanu kompensacji.

Na podstawie równania (1) oraz wykresu wektorowego (rys.1) określić można

zależności na współczynnik stratności dielektrycznej  $\operatorname{tg} \delta$  i pojemności  $C$ :

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\operatorname{Re}(I_x)}{\operatorname{Im}(I_x)} = \frac{\operatorname{Re}(R_{N-x} I)}{\operatorname{Im}(R_{N-x} I)} = \frac{U_\alpha}{U_\beta} = \frac{1}{s}, \quad (2)$$

$$C = \frac{\operatorname{Im}(R_{N-x} I)}{R_N U \omega} = \frac{U_\beta}{R_N U \omega} = \frac{s}{R_N \omega}. \quad (3)$$

W praktycznych rozwiązaniach kompensatorów (napięć przemiennych o współrzędnych prostokątnych) do pomiaru  $C$  i  $\operatorname{tg} \delta$  [3] parametr  $s$  jest wprost proporcjonalny do częstotliwości napięcia zasilającego.

$$s = s' \omega. \quad (4)$$

Po uwzględnieniu równania (4) równania (2) i (3) przekształcają się do postaci:

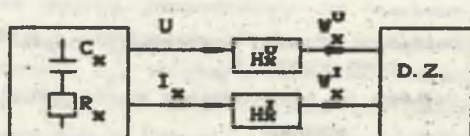
$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{s' \omega}, \quad (5)$$

$$C = \frac{s'}{R_N}. \quad (6)$$

W celu przeprowadzenia analizy źródeł błędów układu kompensatora autor proponuje zastosowanie modelu kompensatora uwzględniając uogólniony schemat strukturalny układów do pomiarów immitancji [4]. Na rys.2 przyjęto następującą konwencję oznaczeń:

$H_x^U, H_x^I$  - transmitancje przetworników w torach przetwarzania sygnałów,

$W_x^U, W_x^I$  - sygnały wyjściowe przetworników.



Rys.2. Schemat blokowy kompensatora do pomiaru  $C$  i  $\operatorname{tg} \delta$

Fig.2. Block scheme of potentiometer for measuring  $C$  and  $\operatorname{tg} \delta$

Dla omawianego kompensatora (rys.1) transmitancje przetworników opisuje się równaniami:

$$H_x^I = R_N, \quad (7)$$



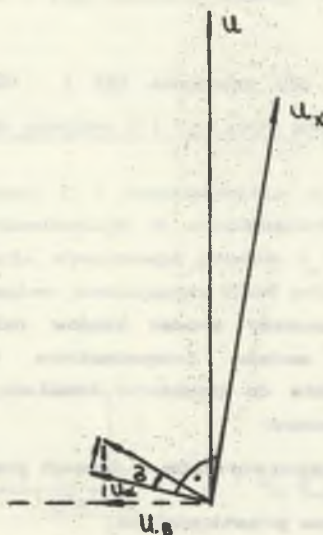
$$H_x^U = 1 + j\epsilon$$

(8)

Z zaprezentowanego modelu kompensatora oraz doświadczeń konstrukcyjnych wyróżnić można 3 grupy błędów kompensatora:

- 1) błędy przetworników  $H_x^I$  i  $H_x^U$ ,
- 2) błędy wynikające ze zmian częstotliwości napięcia zasilającego,
- 3) błędy wynikające ze znacznych pojemności pasozytniczych układu pomiarowego.

ad 1) Błąd przetwornika  $H_x^I$  wynika z wpływu rezystancji  $R_N$  na wartość mierzonego  $\text{tg}\delta$  (por. rys.3).



Rys.3. Wykres wektorowy napięć w stanie kompensacji napięć z uwzględnieniem wpływu  $R_N$

Fig.3. Vector diagram of voltage in compensation state with  $R_N$  taken into account

Wraz ze wzrostem wartości  $R_N$  wzrasta wartość błędu pomiaru  $\text{tg}\delta$  izolacji maszyny elektrycznej. Przy założeniu, iż wpływ rezystancji  $R_N$  nie powinien spowodować błędu pomiaru  $\text{tg}\delta$  większego od  $10^{-4}$  oraz przy założeniu szeregowego modelu mierzonej pojemności i pominięciu pojemności (około 0,5 pF) i indukcyjności (około 0,08  $\mu\text{H}$ ) rezystora  $R_N$  można określić jego dopuszczalną wartość.

$$\omega C_x(R_x + R_N) - \omega C_x R_x \leq 10^{-6};$$

(9)

$$R_N \leq \frac{10^{-6}}{314} \cdot \frac{1}{C_x}$$

Dla pojemności izolacji maszyn elektrycznych (rzędu 100 pF do 1000 pF dla generatorów) dopuszczalna wartość rezystora  $R_N$  nie powinna przekraczać 300  $\Omega$ .

Istnienie indukcyjności i pojemności rozproszenia w rezystorze  $R_N$  powoduje, że ze zmianą częstotliwości zmienia się wartość rezystancji  $R_N$ . Zmiany wartości rezystancji następują również na skutek zmian temperatury rezystora  $R_N$ . Zależność opisująca impedancję rezystora  $R_N$  jest wówczas następująca:

$$Z_R = R_N + \Delta R + j \omega \tau R_N, \quad (10)$$

gdzie:  $\Delta R$  - błąd bezwzględny rezystancji rezystora  $R_N$  wynikający z błędów wykonania rezystora  $R_N$  i zmian jego rezystancji od temperatury,

$\tau$  - stała czasowa rezystora  $R_N$ .

Błąd wynikający ze zmian temperatury i częstotliwości napięcia zasilającego określony jest zależnością [5]:

$$\delta R_N = \delta R_N + \delta R_{NT} + \frac{(\delta R_N + \delta R_{NT})^2}{2} + \frac{\omega^2 \tau^2}{2}, \quad (11)$$

gdzie:  $\delta R_N$  - błąd wykonania rezystora  $R_N$ ,

$\delta R_{NT}$  - błąd stabilności termicznej rezystora  $R_N$ .

Błąd  $\delta R_N$  nie wpływa bezpośrednio na wartość mierzonego tg $\delta$ , natomiast wpływa, zgodnie z zależnością (6) na mierzoną wartość pojemności.

Błąd przetwornika  $H_x^U$  wynika z nieprostokątności wektorów napięć  $U_\alpha$  i  $U_\beta$ . Brak kąta 90° jest następstwem elementów pasożytniczych w parametrach  $l$  i  $s$  kompensatora (np. pojemność... w indukcyjności wzajemnej).

Wraz ze zmianą częstotliwości napięcia zasilającego zmieniają się wartości elementów pasożytniczych, co w konsekwencji prowadzi do uchybów kątowych między wektorami  $U_\alpha$  i  $U_\beta$ . Błąd przetwornika  $H_x^U$  wynikający z nieprostokątności wektorów napięć kompensujących [6] określa zależność:

$$\delta_1 = \frac{\sin(90^\circ - \angle(u_\alpha, u_\beta))}{2}. \quad (12)$$

Na przykład, gdy nieprostokątność wektorów wynosi 10, to  $\delta_1 = 0,14 \%$

Na błąd przetwornika  $H_x^U$  wpływa również jakość wykonania elementów kom-

pensatora (dokładność określenia paramerów  $l$  i  $s$  kompensatora).

ad 2) Z zależności (5) i (6) wynika, iż zmiany częstotliwości zasilania wprowadzają błąd w wyznaczeniu rzeczywistej wartości  $\text{tg}\delta$ . Błąd ten określić można zależnością:

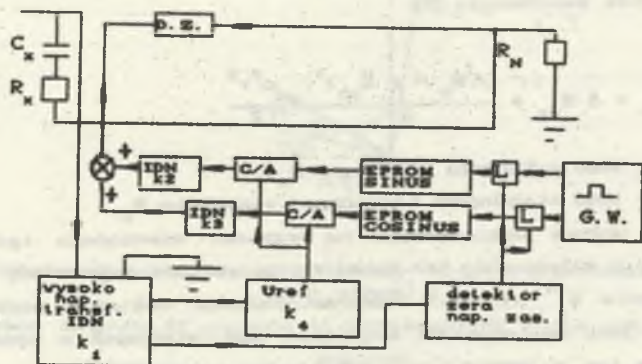
$$\delta_f = 1 - \frac{f}{f_0}, \quad (19)$$

gdzie  $f_0$  jest rzeczywistą częstotliwością napięcia zasilającego.

ad 3) Błędy wynikające ze znacznych pojemności pasozytniczych układu pomiarowego określić można dla konkretnego rozwiązania kompensatora na drodze empirycznej. Pomiar pojemności pasozytniczych dokonuje się w kompensatorze przy obniżonym napięciu zasilającym i zwartej izolacji maszyny elektrycznej.

### 3. Mikroprocesorowy kompensator napięcia przemiennego do pomiaru $C$ i $\text{tg}\delta$

Proponowane przez autora rozwiązanie mikroprocesorowego kompensatora do pomiaru  $C$  i  $\text{tg}\delta$  przedstawione jest na rys.4.



Rys.4. Schemat blokowy mikroprocesorowego kompensatora do pomiaru  $C$  i  $\text{tg}\delta$   
 Fig.4. Block scheme of microprocessor potentiometer for measuring  $C$  and  $\tan \delta$

Zasada działania układu polega na skompensowaniu napięcia na rezystorze  $R_N$ , wywołanym prądem  $I_x$ , sumą napięć  $U_\alpha$  i  $U_\beta$ . Napięcia te są wytwarzane przez sterowany mikroprocesorem układ cyfrowych generatorów napięć sinusoidalnych i są one związane z napięciem zasilającym  $U$  zależnościami:



$$U_{\alpha} = U k_1 k_2 k_4, \quad (14)$$

$$U_{\beta} = jU k_1 k_3 k_4, \quad (15)$$

przy czym  $l = k_1 k_2 k_3$  i  $s = k_1 k_3 k_4$ ;  $k_1$  - przekładnia napięciowa wysokonapięciowego transformatorowego dzielnika indukcyjnego,  $k_2, k_3$  - przekładnie wyjściowych indukcyjnych dzielników napięć w torach generatorów napięć  $U_{\alpha}$  i  $U_{\beta}$ ,  $k_4$  - stała przetwarzania układu prostownika i filtrów (rys.4).

Napięcia  $U_{\alpha}$  i  $U_{\beta}$  są proporcjonalne do napięcia zasilającego  $U$  i mogą być zmienione poprzez zastosowanie indukcyjnych dzielników o przekładniach  $k_2$  i  $k_3$ .

Częstotliwości generowanych napięć  $U_{\alpha}$  i  $U_{\beta}$  są ustalane poprzez odpowiednie zaprogramowanie liczników zliczających impulsy z generatora wzorcowego. Po zliczeniu liczby impulsów określonych wymaganą częstotliwością (równą aktualnej częstotliwości napięcia zasilającego) liczniki generują sygnały odczytu kolejnych wartości pamięci EPROM, które są podawane na wejścia przetworników C/A.

Faza napięcia  $U_{\alpha}$  jest synchronizowana fazą napięcia zasilającego  $U$ . Synchronizację tę uzyskuje się poprzez zastosowanie detektora zmiany znaku napięcia zasilającego  $U$  z wartości ujemnych na dodatnie.

Przesunięcie fazowe między napięciami  $U_{\alpha}$  i  $U_{\beta}$  uzyskuje się poprzez zastosowanie pamięci EPROM z wpisanymi funkcjami sinus i cosinus. Uwzględniając równania (14) i (15) w zależności (2) uzyskuje się:

$$\tan \delta = \frac{k_2}{k_3}, \quad (16)$$

a przy założeniu  $U_{\alpha} = 0$  (w rzeczywistości  $|U_{\alpha}| \ll |U_{\beta}|$ ) określić można mierzoną pojemność:

$$C = \frac{k_1 k_2 k_4}{R_n \omega}. \quad (17)$$

Zastosowanie systemu mikroprocesorowego i cyfrowych generatorów umożliwia:

- bezpośredni odczyt mierzonej pojemności i współczynnika stratności dielektrycznej,
- określenie rzeczywistej częstotliwości podstawowej harmonicznej napięcia zasilającego, co daje możliwość pominięcia błędu wynikającego ze zmian częstotliwości napięcia zasilającego,
- uzyskanie stabilnego przesunięcia fazowego między napięciami  $U_{\alpha}$  i  $U_{\beta}$  ( $\angle(U_{\alpha}, U_{\beta}) = 90^\circ$ ), co daje możliwość pominięcia błędu  $\delta_1$ ,
- prostej regulacji amplitud  $U_{\alpha}$  i  $U_{\beta}$ ,
- uwzględnienie poprawek na pojemności pasozytnicze i inne błędy systematyczne kompensatora.

## LITERATURA

- [1] TETTEX A.G.: Instrukcja obsługi automatycznego mostka Scheringa typ 2871.
- [2] TETTEX A.G.: Katalog firmowy, 1986.
- [3] Gotszalk R.: Pomiar strat jonizacji w izolacji generatorów wysokiego napięcia. Rozprawa doktorska. Politechnika Wrocławska, Wrocław 1962.
- [4] Szadkowski B.: Synteza metod pomiaru immitancji. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, z. 93, Gliwice 1984.
- [5] Miczułski W.: Analiza metrologiczna pomiaru  $|Z|$  w układach z mikroprocesorem i jej weryfikacja na przykładzie wilgotnościomierza absorpcyjnego. Rozprawa doktorska. Politechnika Wrocławska, Wrocław 1988.
- [6] Szczepaniak C.: Kompensatory prądu przemiennego. WNT, Warszawa 1976.

Recenzent: doc.dr hab. inż. Brunon Szadkowski

Wpłynęło do redakcji dnia 3 kwietnia 1990 r.

## КОМПЕНСАЦИОННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ

### Р е з ю м е

В работе представлен микропроцессорный компенсатор для измерения коэффициента диэлектрических потерь и емкости изоляции электрических машин. Новизна решения заключается в замене пассивных элементов компенсатора активными элементами управляемыми микропроцессорной системой. Одновременно сохранена идея компенсатора переменных напряжений прямоугольными координатами. Активные элементы реализованы в виде цифровых генераторов синусоидального сигнала управляемых микропроцессорной системой и синхронизированных фазой и амплитудой напряжения питания. Проведен основной анализ источников ошибок в компенсационных схемах для измерения емкости и  $\tan \delta$ , а также рассмотрены методы исключения ошибок при использовании микропроцессорной системы.



POTENCIOMETER NETWORK FOR MEASURING  
THE DIELECTRIC DISSIPATION FACTOR

Summary

New potentiometer network for measuring the capacitance and the dielectric dissipation factor on liquid and solid insulants, on cables capacitors, line transformers, etc. is described. Innovation of this solution is based on substituting passive component by active one. The active components have been built as digital generators of sinusoidal voltage. The active components are controlled by microcomputer, phase and amplitude power supply voltage being conserved. In this paper general sources of errors in potentiometer are described too.