

Andrzej LEBIEDZKI

Politechnika Śląska

POMIARY WSPÓLCZYNNIKA STRAT DIELEKTRYCZNYCH ZA POMOCĄ MOSTKÓW AUTOMATYCZNYCH W BADANIACH DIAGNOSTYCZNYCH URZĄDZEŃ ELEKTROENERGETYCZNYCH

Streszczenie. W artykule opisane zostały wybrane układy automatycznych mostków wysokonapięciowych przystosowanych do cyfrowej rejestracji współczynnika strat dielektrycznych i pojemności w badaniach diagnostycznych urządzeń elektroenergetycznych.

DIELECTRIC LOSS FACTOR MEASUREMENT IN DIAGNOSTIC TESTING OF ENGINEERING EQUIPMENT BY MEANS OF AUTOMATIC BRIDGES

Summary. In the paper some chosen high voltage automatic bridges systems for digital registration of dielectric loss factor and capacity in diagnostic testing of electric equipment have been presented.

1. WPROWADZENIE

W badaniach diagnostycznych urządzeń elektroenergetycznych stosuje się trzy grupy wskaźników oceny stanu izolacji: wskaźniki typu rezystancyjnego, typu pojemnościowego oraz próby napięciowe. Do wskaźników typu pojemnościowego należą pomiary współczynnika strat dielektrycznych i pojemności badanego urządzenia. Pomiary współczynnika strat dielektrycznych $\tan\delta$ są jednym z istotnych badań określających stan izolacji urządzenia. Wzrost wartości $\tan\delta$ między kolejnymi badaniami okresowymi może sygnalizować procesy starzeniowe izolacji, jej zawilgocenie, powstawanie uszkodzeń mechanicznych i występowanie wyładowań niezupełnych. Do pomiaru i rejestracji współczynnika $\tan\delta$ mogą być stosowane miemostkowe metody bezpośredniego pomiaru $\tan\delta$ z zastosowaniem współczesnych elementów elektronicznych.

Do metod tych należą pomiary $tg\delta$ za pomocą elektronicznych układów mnożących dużej dokładności [1], układy wykorzystujące szybkie przetworniki A/C do rejestracji wartości chwilowych napięcia i prądu płynących przez badane urządzenie, a następnie cyfrowego obliczenia wartości $tg\delta$. Stosowane mogą być również układy fazomierzy cyfrowych z przesuwnikami fazowymi $\pi/2$ [2]. W badaniach obiektów wysokonapięciowych wszystkie powyższe układy wyposażone mogą być w wysokonapięciowe dzielniki napięcia i boczniki prądowe dostosowane do zakresu mierzonych pojemności badanych urządzeń. Okresowa kontrola poprawności działania tych mierników wymaga stosowania wysokonapięciowych wzorców pojemności i $tg\delta$ lub metod mostkowych. Metody mostkowe pomiaru $tg\delta$ należą do najdokładniejszych, ale przy stosowaniu mostków równoważonych ręcznie są kłopotliwe w badaniach eksploatacyjnych urządzeń. Nie pozwalają również na bezpośrednią współpracę z układem cyfrowej rejestracji wyników pomiaru. W artykule przedstawiono układy automatycznego mostka Scheringa i wybranych mostków transformatorowych przystosowanych do cyfrowej rejestracji $tg\delta$ i pojemności badanego obiektu.

2. AUTOMATYCZNY MOSTEK SCHERINGA

Schemat ideowy automatycznego mostka Scheringa przedstawia rys.1. Obiekt wysokonapięciowy jest niezziemiony, a jego schemat zastępczy stanowi szeregowe połączenie rezystancji R_X i pojemności C_X . Kondensator C_N jest wysokonapięciowym wzorcem pojemności, którego współczynnik strat dielektrycznych $tg\delta < 10^{-4}$ został pominięty w równaniach równowagi mostka.

Gałąź G_{3W} stanowi równoległe połączenie $n+1$ konduktancji $G_0 G_1 \dots$, której wartość końcową wyliczamy z zależności (1):

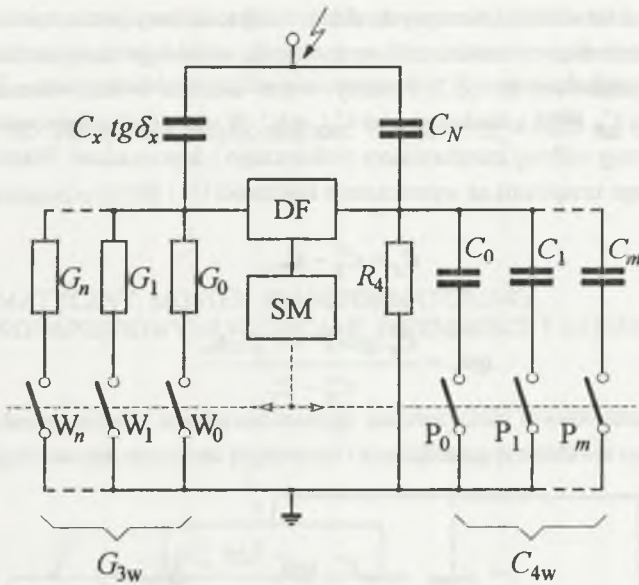
$$G_{3W} = G_0 \left(a_0 \cdot 1 + a_1 \frac{1}{2} + a_2 \frac{1}{2^2} + \dots + a_n \frac{1}{2^n} \right) = G_0 \sum_{i=0}^n a_i \frac{1}{2^i}, \quad (1)$$

gdzie $a_i = 0$ lub 1 określa wyłączenie lub włączenie wyłącznika W_i w stanie równowagi mostka.

W gałęzi Z_4 pojemność wypadkowa C_{4W} jest równoległym połączeniem $n+1$ pojemności o wartościach malejących w kodzie dwójkowym i wyliczana jest z zależności (2):

$$C_{4W} = C_0 \left(b_0 \cdot 1 + b_1 \frac{1}{2} + b_2 \frac{1}{2^2} + \dots + b_n \frac{1}{2^n} \right) = C_0 \sum_{k=0}^n b_k \frac{1}{2^k}, \quad (2)$$

gdzie $b_k = 0$ lub 1 określa włączenie lub wyłączenie wyłącznika P_K w stanie równowagi mostka.



Rys.1. Schemat ideowy automatycznego mostka Scheringa: DF — detektor fazoczuły, SM — sterownik mikroprocesorowy

Fig.1. Schematic diagram of automatic Schering bridge: DF — phase detector, SM — microprocessor controller

Procesem równoważenia mostka steruje mikroprocesorowy układ równoważenia SM mostka otrzymujący informacje o stanie równowagi mostka z detektora fazoczułego DF. Wartości $tg\delta_X$ i pojemności C_X badanego urządzenia są wyznaczone z zależności (3) i (4):

$$tg\delta_X = \omega R_4 C_0 \sum_{k=0}^{k=n} b_k \frac{1}{2^k}, \quad (3)$$

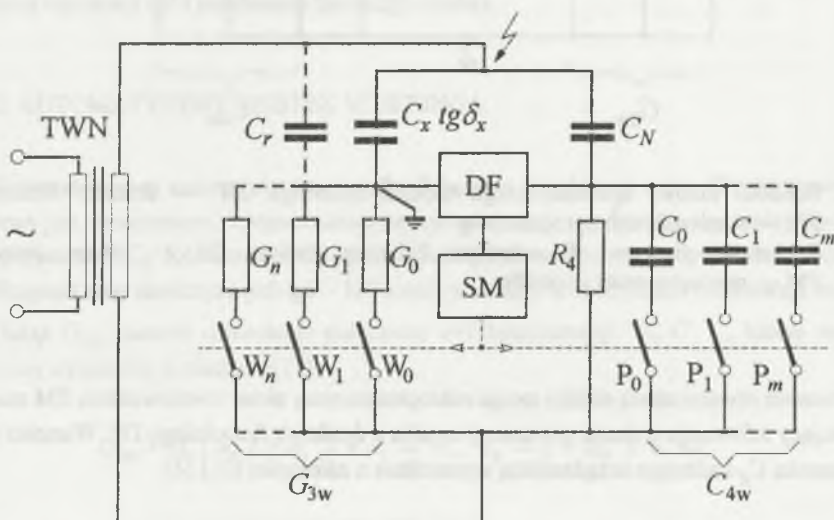
$$C_X = C_N R_4 G_0 \sum_{i=0}^{i=n} a_i \frac{1}{2^i}. \quad (4)$$

Stany 0 lub 1 wyłączników W_i i P_k odpowiadające stanowi równowagi mostka są rejestrowane w pamięci systemu mikroprocesorowego sterownika, a wyniki obliczeń wg zależności (3) i (4) wyświetlane na wyświetlaczu alfanumerycznym mostka lub przesyłane do systemu centralnej rejestracji danych pomiarowych.

W badaniach obiektów uziemionych układ mostka zasilany jest z transformatora probierczego o nieziemionym zacisku dolnym uzwojenia wysokiego napięcia. Schemat takiego układu jest przedstawiony na rys.2. Pomiary w tym układzie wykonywane są dwukrotnie: bez obiektu badań C_T , $tg\delta_T$ i z obiektem badań C_X , $tg\delta_X$. W ten sposób eliminowane z pomiarów są pojemności strony wtórnej transformatora probierczego i doprowadzeń. Wartość pojemności C_X i $tg\delta_X$ badanego urządzenia są wyznaczane z zależności (5) i (6):

$$C_X = C_X' - C_T, \quad (5)$$

$$tg\delta_X = \frac{C_X' tg\delta + X' - C_T tg\delta_T}{C_X' - C_T} \quad (6)$$



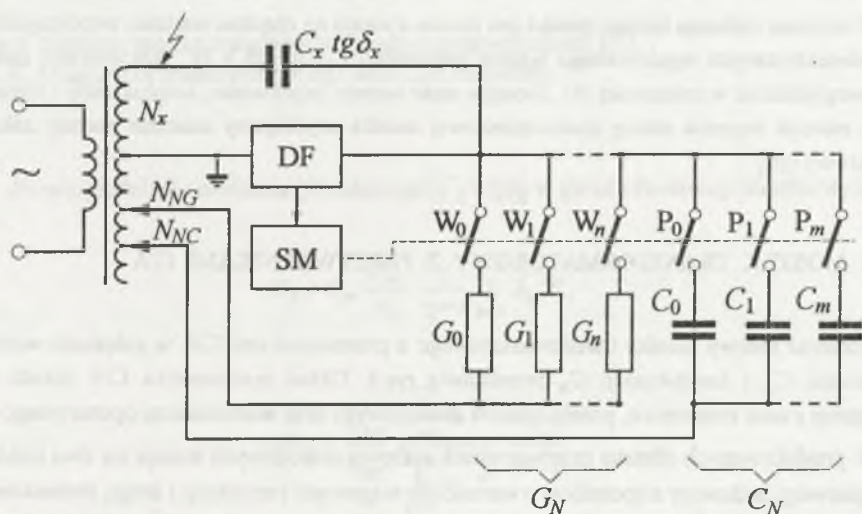
Rys.2. Schemat automatycznego mostka Scheringa do badania obiektów uziemionych
Fig.2. Schematic diagram of automatic Schering bridge in testing grounded objects

W przypadku badania kondensatorów i kabli o dużej pojemności C_X , których prądy pojemnościowe przekraczają dopuszczalną obciążalność prądową gałęzi G_{3w} , należy stosować dodatkowe boczniki prądowe. Celem zmniejszenia wpływu pojemności pasozytniczych w mostku należy stosować ekranowanie części niskonapięciowej mostka, jak to ma miejsce w mostkach Scheringa ręcznie równoważonych.

Niepewność wyznaczania wartości $tg\delta$ w przedstawionym układzie mostka automatycznego wynika w granicznej czułości detektora fazowego, klasy zastosowanych elementów biernych gałęzi Z_4 ; R_4 ; C_{4W} oraz niestałości częstotliwości pomiarowej. W badaniach diagnostycznych przy częstotliwości 50 Hz należy przyjąć wartość rezystora $R_4 = \frac{1000}{\pi}$ lub $R_4 = \frac{10^4}{\pi}$ celem uproszczenia zależności (3).

3. AUTOMATYCZNY MOSTEK TRANSFORMATOROWY Z NISKONAPIĘCIOWYMI WZORCAMI POJEMNOŚCI I KONDUKTANCJI

Schemat ideowy mostka transformatorowego automatycznie równoważonego z niskonapięciowymi regulowanymi wzorcami pojemności i konduktancji przedstawia rys.3.



Rys.3. Schemat mostka transformatorowego z niskonapięciowymi wzorcami pojemności i konduktancji

Fig.3. Diagram of transformer bridge with low voltage resistance and capacity standards

W układzie tym przyjęto równoległy schemat zastępczy badanego urządzenia $G_X C_X$. W stanie równowagi mostka C_X i $tg\delta_X$ wyliczane są z zależności (7) i (8):

$$C_X = C_N \frac{N_{NC}}{N_X} = \frac{N_{NC}}{N_X} C_0 \sum_{k=0}^{k=n} b_k \frac{1}{2^k}, \quad (7)$$

$$\text{tg} \delta_X = \frac{G_X}{\omega C_X} = \frac{N_{NG}}{\omega N_{NC}} \frac{G_0 \sum_{i=0}^{i=n} a_i \frac{1}{2^i}}{C_0 \sum_{k=0}^{k=n} b_k \frac{1}{2^k}}, \quad (8)$$

gdzie:

N_X — liczba zwojów uzwojenia wysokiego napięcia,

N_{NCN} — liczba zwojów uzwojenia wzorca pojemności C_N ,

N_{NG} — liczba zwojów uzwojenia wzorca konduktancji R_N ,

a_i, b_k — oznaczone podobnie jak w układzie mostka Scheringa przyjmują wartość 0 lub 1.

Praktyczna realizacja takiego mostka jest trudna z uwagi na znaczne wartości współczynnika strat dielektrycznych regulowanego wzorca pojemności C_N , tj. $\text{tg} \delta = 10^{-3}$ lub większy, czego nie uwzględniono w zależności (8). Stosując stałe wzorce pojemności, konduktancji i regulowaną wartość napięcia strony niskonapięciowej mostka uzyskujemy znacznie szerszy zakres pomiarowy $\text{tg} \delta_X$.

4. MOSTEK TRANSFORMATOROWY Z PRZETWORNIKAMI C/A

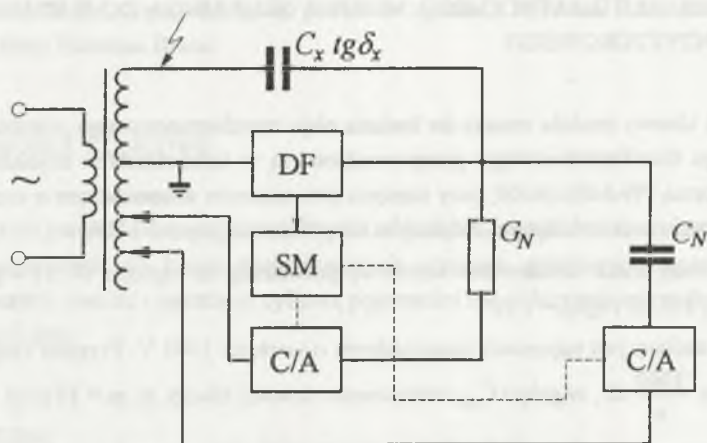
Schemat ideowy mostka transformatorowego z przetwornikami C/A w gałęziach wzorca pojemności C_N i konduktancji G_N przedstawia rys.4. Układ przetwornika C/A składa się najczęściej z sieci rezystorów, przełączników analogowych oraz wzmacniacza operacyjnego.

W produkowanych obecnie przetwornikach cyfrowo-analogowych stosuje się dwa rodzaje sieci: pierwszy, budowany z oporników o wartościach wagowych rezystancji i drugi, drabinkowy, oparty na układach R-2R. Dokładność przetworników wagowych zależy od dokładności zastosowanych rezystorów o najbardziej znaczących bitach, jak również od własności kluczy elektronicznych. W przetwornikach C/A w układzie drabinkowym, pracujących w kodzie dwójkowym, wystarczy stosować tylko rezystory o wartości R-2R [3].

Napięcie wyjściowe U_{wy} przetwornika niedociążonego w układzie drabinkowym jest określone zależnością (9):

$$U_{wy} = U_{we} \frac{1}{2^{n+1}} \sum_{i=1}^{i=n} a_i 2^i, \quad (9)$$

gdzie U_{we} — napięcie na wejściu przetwornika n-bitowego.



Rys.4. Schemat mostka transformatorowego z przetwornikami C/A

Fig.4. Diagram of transformer bridge with C/A converters

Po uwzględnieniu równania (9) zależności C_X i $tg\delta_X$ w stanie równowagi mostka wynoszą:

$$C_X = C_N \frac{N_{NC}}{N_X} \frac{1}{2^{n+1}} \sum_{k=1}^{k=n} b_k 2^k, \quad (10)$$

$$tg\delta_X = \frac{N_{NG}}{N_{NC}} \frac{\sum_{i=1}^{i=n} a_i 1^i}{\sum_{k=1}^{k=m} b_k 2^k} \frac{G_N}{\omega C_N}. \quad (11)$$

Klucze analogowe przetworników C/A mostka są sterowane z układu sterującego za pomocą napięć pochodzących z detektora fazowego mostka.

Niepewność pomiaru współczynnika strat dielektrycznych zależy od rozdzielczości zastosowanych przetworników i dokładności użytych wzorców C_N i R_N .

5. MODEL AUTOMATYCZNEGO MOSTKA SCHERINGA DO BADANIA OLEJU TRANZYSTOROWEGO

Schemat ideowy modelu mostka do badania oleju transformatorowego przedstawia rys.1. Pomiary oleju transformatorowego przeprowadzone są w kondensatorze trójelektrodowym, zgodnie z normą PN-84/E-04109, przy napięciu przemiennym sinusoidalnym o częstotliwości 50 Hz i natężeniu pola w badanym dielektryku nie przekraczającym 1 kV/mm.

Zastosowany został kondensator wzorcowy powietrzny na napięcie 10 kV i pojemności znamionowej 100 pF i $tg\delta_N = 1 \cdot 10^{-4}$.

Mostek zasilany jest napięciem sinusoidalnym o wartości 1000 V. Przyjęto rezystancję R_4 mostka równą $\frac{1000}{\pi} \Omega$, w gałęzi C_{4W} zastosowano dziesięć kluczy, tj. $m = 10$ przy założonym zakresie pomiarowym $tg\delta_X = 10^{-1} \div 10^{-4}$ i rozdzielczości $\Delta tg\delta_X = 10^{-4}$. Wartość pojemności kondensatora gałęzi Z_4 w stanie równowagi mostka wyliczona jest z zależności:

$$C_{4W} = 10^{-9} \sum_{k=0}^{k=9} b_k 2^k \text{ (F)}, \quad (12)$$

co odpowiada wartości $tg\delta_X$ równej:

$$tg\delta_X = 10^{-4} \sum_{k=0}^{k=9} b_k 2^k. \quad (13)$$

W gałęzi G_{3W} zastosowano 14 kluczy kontaktronowych, tj. $n = 13$ przy założonym zakresie mierzonych pojemności kondensatora $C_X = 150 - 400$ pF i rozdzielczości $\Delta C_X = 10^{-2}$ pF. Przyjęto największą konduktywność $G_0 = 10^{-2}$ S.

W stanie równowagi mostka G_{3W} określa zależność:

$$G_{3W} = 10^{-2} \sum_{i=0}^{i=13} a_i \frac{1}{2^i} \text{ (S)}. \quad (14)$$

Wartość pojemności C_X kondensatora określa równanie:

$$C_X = \frac{10^{-9}}{\pi} \sum_{i=0}^{i=13} a_i \frac{1}{2^i} \text{ (F)}. \quad (15)$$

W układzie tym wartość najmniej znaczącej gałęzi G_{3W} jest mniejsza od $10^6 \Omega$. Część niskonapięciowa mostka została umieszczona razem ze sterownikiem i detektorem fazoczułym w obudowie stalowej i oddzielona od części wysokonapięciowej ekranowanymi kablami. Układ wejściowy detektora fazoczułego posiada transformator separujący oraz filtry aktywne. Dla

częstotliwości 50 Hz otrzymano wyniki pomiarów zgodne z wynikami z fabrycznego mostka Scheringa firmy Hartman Braun.

6. WNIOSKI KOŃCOWE

W artykule przedstawiono analizę możliwości realizacji wybranych automatycznych mostków wysokonapięciowych do badań profilaktycznych urządzeń elektroenergetycznych umożliwiających szybki pomiar i rejestrację cyfrową pojemności i współczynnika strat dielektrycznych badanego obiektu.

LITERATURA

1. Lebiezki A.: Pomiary współczynnika strat dielektrycznych w badaniach diagnostycznych urządzeń elektroenergetycznych. ZN Pol. Śl., s. Elektryka, z. 156, Gliwice 1996.
2. Lebiezki A.: Pomiary współczynnika strat dielektrycznych w badaniach diagnostycznych elektroenergetycznych obiektów pojemnościowych. ZN Pol. Śl., s. Elektryka, z. 158, Gliwice 1996.
3. Chwaleba A., Poniński M., Siedlecki A.: Metrologia elektryczna. WNT, Warszawa 1994.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Danuta Turzeniecka

Wpłynęło do Redakcji dnia 10 kwietnia 1998 r.

Abstract

In the paper some chosen high voltage automatic bridges systems for digital registration of dielectric loss factor and capacity in diagnostic testing of electric equipment have been presented. Schematic diagram of automatic Schering bridge for ungrounded objects testing is presented in Fig.1. Microprocessor controls the balance process of the bridge. Dielectric loss factor and capacity are shown on alphanumeric display. Schematic diagrams of automatic transformer bridges with low voltage resistance and capacity standards are presented in Fig.3 and Fig.4. Uncertainty of dielectric loss factor measurements of transformer bridge in Fig.4 depends on resolution of applied C/A converters and standard resistor and capacity precision.