

doi:10.15199/48.2022.11.42

Pomiar współczynnika strat dielektrycznych metodą dwóch woltmierz

Streszczenie. W pracy przedstawiono możliwość zastosowania tzw. metody dwóch woltmierz do pomiaru współczynnika strat dielektrycznych kondensatora stratnego. Metoda została zaproponowana wiele lat temu, jednak ówczesna technika pomiarowa praktycznie uniemożliwiała budowę układu do wykorzystania w praktyce. Zastosowanie współczesnych narzędzi pomiarowych, w tym cyfrowego przetwarzania sygnałów pomiarowych umożliwiło budowę i przetestowanie wirtualnego przyrządu pomiarowego realizującego omawianą metodę.

Abstract. The paper presents the possibility of using the so-called two voltmeter methods for measuring the dielectric loss factor. The method was proposed many years ago, but the measuring technique of that time made it practically impossible to build a circuit for practical use. The use of modern measurement tools, including digital processing of measurement signals, made it possible to build and test a virtual measuring instrument implementing the discussed method. **Measuring of the dielectric loss factor using two voltmeters method.**

Słowa kluczowe: pomiar $\tan \delta$, mostki prądu przemiennego, przyrząd wirtualny, LabView.

Keywords: loss factor measuring, AC Bridges, virtual instruments, LabView.

Wprowadzenie

Od początku historii pomiarów do współczesności opracowywane są coraz nowsze metody pomiarowe różnych wielkości. Wiele z tych metod przy ówczesnym stanie techniki było trudnych w realizacji, a często ich właściwości metrologiczne były niesatysfakcjonujące. Niektóre metody pomiarowe (jak na przykład metody mostkowe) wykorzystuje się do dzisiaj, inne zostały zapomniane. Rozwój techniki pomiarowej i informatyki sprawiły, że starsze metody pomiarowe, będące kiedyś trudne lub zbyt kosztowne w implementacji, mogą być skutecznie realizowane. Przykładem takiej metody jest przedstawiona poniżej metoda dwóch woltmierz przeznaczona do pomiaru współczynnika strat dielektrycznych [1]. Została ona opracowana ponad pół wieku temu.

Współczynnik strat dielektrycznych i jego pomiary

Współczesna technika w znacznej mierze wymaga zasilania i przetwarzania sygnałów elektrycznych, przy czym niezbędne jest wzajemne izolowanie części znajdujących się pod napięciem i przewodzących prąd. Izolacja wszelkiego rodzaju instalacji i urządzeń elektrycznych i elektronicznych jest ich istotną częścią. Znajomość stanu technicznego izolacji jest konieczna do właściwej pracy urządzeń oraz do zapewnienia bezpieczeństwa ich użytkowania. Pogarszanie się jakości izolacji wynika z oddziaływania czynników chemicznych, fizycznych i biologicznych, takich jak np. zawilgocenie, obecność cząstek przewodzących czy uszkodzeń mechanicznych ciągłości izolacji.

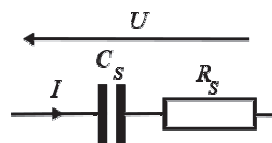
Degradacja materiału elektroizolacyjnego (dielektryka) skutkuje pojawieniem się strat energii związanych z przepływem prądu czynnego. Do najważniejszych wskaźników opisujących procesy starzeniowe izolacji zalicza się współczynnik strat dielektrycznych $\tan \delta$. Jest on definiowany jako stosunek energii czynnej E_r , wydzielonej w badanym materiale do energii biernej E_p , w nim zmagazynowanej. Omawiany współczynnik jest również relacją mocy czynnej P_r do mocy biernej P_p

$$(1) \quad \tan \delta = \frac{E_r}{E_p} = \frac{P_r}{P_p}$$

Tak zdefiniowany współczynnik strat elektrycznych jest wielkością bezwymiarową, przyjmującą zwykle w zakresie

częstotliwości sieciowych wartości $0 \dots 1$, najczęściej rzędu $10^{-2} \dots 10^{-4}$. Jego wartość nie zależy od wymiarów geometrycznych materiału, a zatem jest on stałą materiałową.

Model elektryczny dielektryka we wspomnianym zakresie częstotliwości można w uproszczony sposób przedstawić jako równoległe lub szeregowe połączenie RC. Model ten nie uwzględnia np. zjawiska absorpcji, jednak w praktyce takie uproszczenie jest dopuszczalne. Model może mieć konfigurację szeregową lub równoległą. Najczęściej wykorzystuje się model szeregowy, przedstawiony na rysunku 1.



Rys. 1. Uproszczony model elektryczny dielektryka

Dla przedstawionego modelu relacja mocy czynnej wydzielanej na rezystorze R_S do mocy biernej zgromadzonej na kondensatorze C_S opisuje równanie zawierające wyłącznie parametry RC dwójnika:

$$(2) \quad \tan \delta = \omega R_S C_S$$

Powszechnie stosowany symbol „ $\tan \delta$ ” wynika z analizy wykresu wskazowego modelu elektrycznego. Kąt przesunięcia fazowego pomiędzy prądem i napięciem dwójnika, ze względu na obecność rezystancji R_S , jest mniejszy od kąta $\pi/2$ o niewielki kąt δ . Tangens tego kąta jest relacją mocy czynnej do mocy biernej.

Współczynnik strat dielektrycznych może być mierzony różnymi metodami. W diagnostyce izolacji wykorzystuje się najczęściej metody pracujące przy częstotliwościach $0,01 \dots 1000$ Hz. Najdokładniejszymi, znanymi od wielu lat, stosowanymi wyłącznie jako metody laboratoryjne, są metody kalorymetryczne [2]. Polegają one na pomiarze strat cieplnych badanego materiału. Inną grupę metod stanowią metody mostkowe, polegające na pomiarze relacji składowych impedancji. Najczęściej stosowanym mostkiem jest mostek Scheringa. Od wielu lat do pomiaru współczynnika wykorzystuje się również metody algorytmiczne [3], [4], [5].

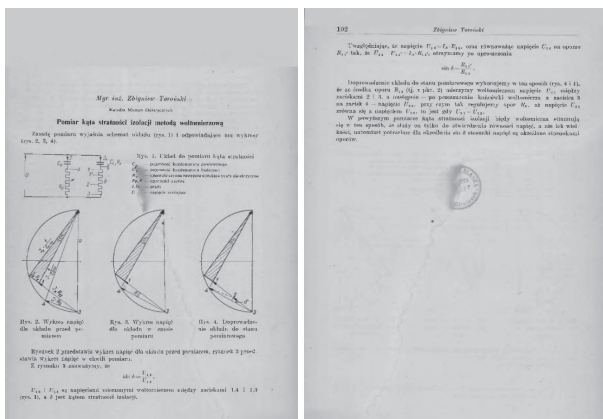
Bezpośredni pomiar współczynnika strat dielektrycznych, polegający na pomiarze kąta fazowego δ , dla typowych częstotliwości może być trudny. Wartość mierzonego współczynnika $\text{tg } \delta$ jest rzędu $10^{-3} \dots 10^{-5}$, co oznacza, że kąt δ w mierze łukowej również jest tego rzędu. Odpowiadające takiemu kątowi przesunięcie czasowe Δt sygnałów prądu i napięcia o okresie T wyniesie:

$$(3) \quad \Delta t = \delta \frac{T}{2\pi}$$

Dla sygnału o okresie 20 ms i $\text{tg } \delta$ rzędu 10^{-3} czas ten będzie rzędu 3 μs . Przy założeniu błędu rozdzielczości pomiaru $\text{tg } \delta$ na poziomie 1%, odstęp czasu powinien być mierzony z rozdzielczością 30 ns. Jeżeli pomiar wymagałby wykrycia chwil przejścia sygnałów pomiarowych przez zero, detekcji podlegałyby sygnały o wartościach na poziomie sumów.

Metoda dwóch woltmierzów

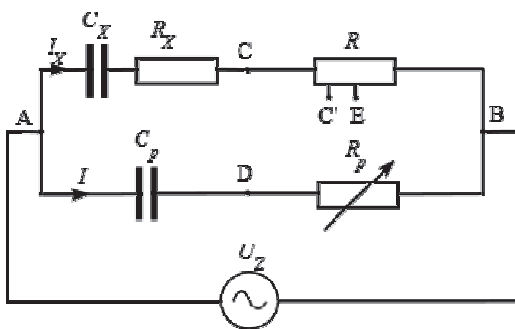
Koncepcja omawianej metody została przedstawiona (rys. 1) w pracy [1] w roku 1956.



Rys. 1. Oryginalna publikacja [1]

Autor artykułu [1] bardzo lapidarnie przedstawił koncepcję układu pomiarowego oraz wyprowadził równanie przetwarzania, dlatego też poniżej przedstawiony zostanie schemat układu i jego zasada działania.

Układ pomiarowy przedstawiono na rysunku 2. Jest to układ mostka czteroramiennego, zasilanego napięciem sinusoidalnie przemiennym.

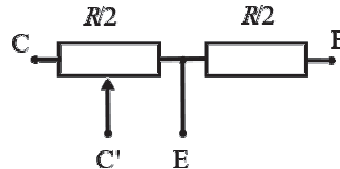


Rys. 2. Schemat układu pomiarowego

Można zauważyć, że mostek o takiej strukturze nie może zostać zrównoważony z punktu widzenia przekątnej CD, tzn. potencjały punktów C i D nie mogą być równe.

W ramieniu AC mostka znajduje się badany kondensator, opisany szeregowym modelem zastępczym złożonym z pojemności C_X oraz rezystancji R_X . W ramieniu

AD jest umieszczony kondensator C_p o znikomych stratach. Ramię DB zawiera rezystor nastawny R_p a ramię CB – rezystor nastawny R . Przykładowa konstrukcja rezystora R została przedstawiona na rysunku 3. Rezystor ten składa się z rezystora o rezystancji $R/2$ oraz potencjometru o takiej samej rezystancji, połączonych w punkcie E. Punkt C' jest dołączony do suwaka potencjometru. I oraz I_X są prądami płynącymi przez gałęzie mostka, U_Z jest napięciem zasilającym układ.



Rys. 3. Przykładowa konstrukcja rezystora nastawnego R

Autor pracy [1] opisał zasadę działania układu analizując wykresy wskazowe. Rysunek 4a przedstawia wykres wskazowy napięć dla układu z rysunku 2 przed pomiarem. Rysunek 4b przedstawia wykres napięć w chwili pomiaru. W pierwszym kroku, poprzez zmianę nastaw rezystora R_p układ jest doprowadzany do stanu, w którym wartość skuteczna napięcia U_{EB} pomiędzy między zaciskami E i B, (punkt E jest środkiem rezystora R) będzie równe wartości skutecznej napięcia U_{ED} między zaciskami E i D. Z rysunku 4b można wówczas odczytać, że:

$$(4) \quad \sin \delta = \frac{U_{CD}}{U_{CB}}$$

gdzie U_{CD} i U_{CB} są odpowiednio wartościami skutecznymi napięć mierzonymi woltmierzem między zaciskami CB i CD (rys. 2), a δ jest kątem stratności kondensatora badanego.

W następnym kroku zmieniając wartość rezystancji R_{CC} doprowadza się układ do stanu pomiarowego (rys. 4c), w którym napięcie U_{CC} na rezystorze R_{CC} jest równe napięciu U_{CD}

$$(5) \quad U_{CD} = U_{CC} = I_X R_{CC}$$

Uwzględniając, że napięcie U_{CB} jest równe

$$(6) \quad U_{CB} = I_X R$$

równanie (4) można zapisać następująco:

$$(7) \quad \sin \delta = \frac{R_{11}}{R_{13}}$$

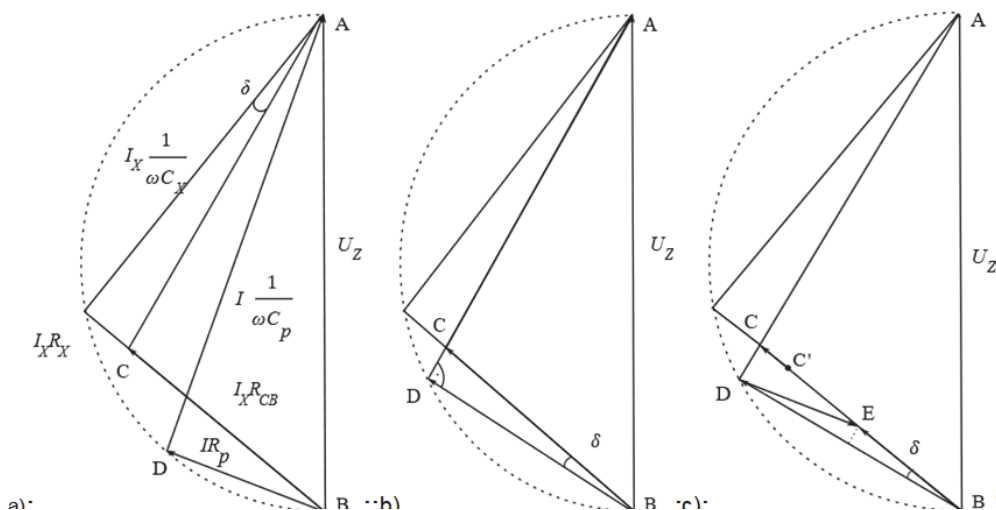
Mierzony współczynnik strat dielektrycznych można wyznaczyć z poniższego równania:

$$(8) \quad \text{tg } \delta = \frac{\sin \delta}{\cos \delta} = \frac{\sin \delta}{\sqrt{1 - (\sin \delta)^2}}$$

Ocena właściwości i możliwości realizacji układu

Można wykazać, że przedstawiony rysunku 2 mostek nie może zostać zrównoważony z punktu widzenia przekątnej CD, to znaczy, że potencjały punktów C i D nie mogą być sobie równe. Iloczyn impedancji Z_X (złożonej z kondensatora C_X i rezystora R_X) oraz rezystancji R_p , wynoszący

$$(9) \quad Z_X R_p = R_X R_p + j \frac{R_p}{\omega C_X}$$



Rys. 4. Wykres napięć dla układu: a) przed pomiarem; b) w czasie pomiaru; c) doprowadzenie układu do stanu pomiarowego

nie może być równy iloczynowi impedancji Z_p kondensatora C_p oraz rezystancji R :

$$(10) \quad Z_p R = j \frac{R}{\omega C_p}$$

co oznacza, że warunek równowagi mostka nie może być nigdy spełniony.

Układ wymaga sprowadzenia do dwóch wybranych stanów, które można potraktować jako stany zerowe. W pierwszym kroku jest to równość wartości skutecznych napięć U_{EB} i U_{ED} , a zatem zerowa ich różnica. W drugim kroku jest to równość (zerowa różnica) napięć $U_{CC'}$ i U_{CD} . Jednocześnie można zauważyć, że stany te oznaczają także osiągnięcie wybranych stanów fazowych: w pierwszym kroku zerowego kąta przesunięcia fazowego pomiędzy napięciami U_{AC} i U_{AD} oraz innych od stanów zerowych, a zatem można go potraktować jako układ quasi-równoważony z podwójnym quasi-równoważeniem [6].

Jeżeli do stwierdzenia równości napięć zostanie wykorzystany ten sam woltomierz wówczas błąd związany z niedoskonałym wykryciem stanu równości napięć, wynikający z błędów systematycznych woltomierza, jest zerowy.

Prezentowany układ został zrealizowany i wstępnie sprawdzony [7].

Układ pomiarowy został wykonany jako przyrząd wirtualny. Układ był zasilany z generatora RIGOL DG1011, do budowy wykorzystano rezystory dekadowe OD 06 oraz DR 6-16, kondensatory dekadowe DK 50, kartę pomiarową NI USB-6009 oraz komputer osobisty z oprogramowaniem LabView. Napięcia niezbędne do sprowadzenia układu do stanu pomiarowego dołączono do wejść karty pomiarowej na stałe.

Istotnym problemem w badaniach układów do pomiaru współczynnika strat dielektrycznych jest brak odpowiednio dokładnych wzorców tego parametru. Sprawdzanie układów pomiarowych można realizować praktycznie poprzez porównania wyników pomiarów uzyskanych z przyrządu badanego z wynikami z przyrządu o lepszej dokładności. Jako przyrząd odniesienia wykorzystano mostek LCR MT4090.

Porównano wskazania zrealizowanego przyrządu dla trzech wartości pojemności badanego kondensatora C_x : 0,01; 0,1 oraz 1 μF przy częstotliwościach napięcia zasilającego $f = 100 \text{ Hz}$, 1 kHz oraz 10 kHz.

Obliczono błędy bezwzględne ε pomiaru zgodnie z zależnością:

$$(11) \quad \varepsilon = \text{tg } \delta_x - \text{tg } \delta_o$$

oraz błędy względne ε_r

$$(12) \quad \varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\text{tg } \delta_x} 100\%$$

gdzie: $\text{tg } \delta_x$ oznacza wartość zmierzona badanym układem, $\text{tg } \delta_o$ oznacza wartość zmierzona przy użyciu przyrządu odniesienia.

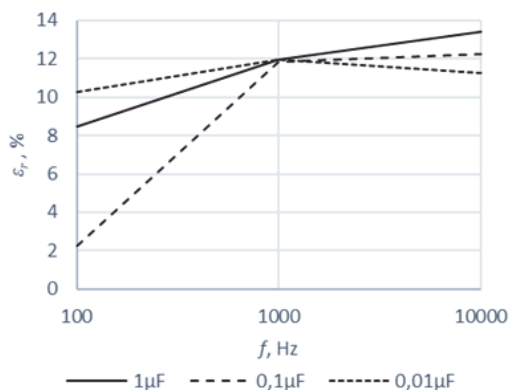
Wyniki pomiarów wraz z obliczonymi błędami przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wyniki porównania wskazań przyrządów

| $C_x = 1 \mu\text{F}$ | | | | |
|--------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|---------------------|
| f [Hz] | $\text{tg } \delta_x$ | $\text{tg } \delta_o$ | ε | ε_r [%] |
| 100 | $5,40 \cdot 10^{-3}$ | $5,90 \cdot 10^{-3}$ | $5,0 \cdot 10^{-4}$ | 8,5 |
| 1000 | $6,91 \cdot 10^{-2}$ | $6,17 \cdot 10^{-2}$ | $7,4 \cdot 10^{-3}$ | 12,0 |
| 10000 | $4,33 \cdot 10^{-1}$ | $3,82 \cdot 10^{-1}$ | $5,2 \cdot 10^{-2}$ | 13,5 |
| $C_x = 0,1 \mu\text{F}$ | | | | |
| f [Hz] | $\text{tg } \delta_x$ | $\text{tg } \delta_o$ | ε | ε_r [%] |
| 100 | $3,81 \cdot 10^{-3}$ | $3,90 \cdot 10^{-3}$ | $9,0 \cdot 10^{-5}$ | 2,3 |
| 1000 | 0,0573 | 0,0512 | $6,1 \cdot 10^{-3}$ | 11,9 |
| 10000 | 0,313 | 0,357 | $4,4 \cdot 10^{-3}$ | 12,3 |
| $C_x = 0,01 \mu\text{F}$ | | | | |
| f [Hz] | $\text{tg } \delta_x$ | $\text{tg } \delta_o$ | ε | ε_r [%] |
| 100 | 0,50 | 0,65 | 0,15 | 10,26 |
| 1000 | 0,30 | 0,34 | 0,04 | 11,93 |
| 10000 | 1,72 | 1,49 | 0,23 | 15,73 |

Na podstawie wykonanych pomiarów wykreślono zależność błędu względnego ε_r od częstotliwości napięcia zasilającego.

Przedstawiony układ charakteryzuje się stosunkowo dużymi błędami, jednak celem prac było sprawdzenie koncepcji i potwierdzenie przydatności układu. Przyczynami błędów mogą być pojemności pasozytne obecne w układzie, stratność kondensatora C_p oraz impedancje wejść karty pomiarowej.



Rys. 5. Wykres błędu względnego w funkcji częstotliwości

Podsumowanie

W pracy przedstawiona została metoda dwóch woltomierzy, przeznaczona do pomiaru współczynnika strat dielektrycznych ($\text{tg } \delta$). Metoda ta została opracowana latach 50-tych ubiegłego wieku i przy stanie ówczesnej techniki była trudna w realizacji. W tym czasie do pomiaru napięć przemiennych najpowszechniej stosowane były woltomierze elektromagnetyczne o małej impedancji wewnętrznej. Brakowało przyrządów napięcia przemiennego o niskich zakresach pomiarowych. Nie istniały wówczas łatwo dostępne układy cyfrowego przetwarzania sygnałów pomiarowych. Przy obecnym stanie techniki przedstawiona metoda jest prosta i łatwo poddaje się automatyzacji i wirtualizacji.

Układ pomiarowy realizujący omawianą metodę jest, z punktu widzenia przekątnej CD, układem mostka niezrównoważonego. Z uwagi na konieczność sprowadzenia układu do wyróżnionych stanów zerowych można jednak omawiany układ zaliczyć do klasy metod zerowych. Układ wymaga zastosowania dwóch elementów regulacyjnych. Niewątpliwą zaletą układu jest stałe maksymalna zbieżność. Do zrównoważenia układu wystarczą dwa ruchy elementami nastawnymi.

Zaprezentowana metoda została zrealizowana jako układ wirtualny. Uzyskane wyniki pomiarów charakteryzują

się błędami, które w kolejnych rozwiązaniach układu powinny zostać istotnie zmniejszone. Omawiana metoda nie jest z założenia metodą laboratoryjną, a metodą do zastosowań praktycznych, gdzie nie jest wymagana duża dokładność.

Przedstawiona metoda pomiaru współczynnika strat dielektrycznych $\text{tg } \delta$ może być przydatna w diagnostyce izolacji. Jest łatwa w realizacji a pomiary mogą być w prosty sposób zautomatyzowane. Dalsze prace należy skupić na poprawie dokładności układu.

Autor: dr hab. inż. Adam Cichy, Politechnika Śląska, Katedra Metrologii, Elektroniki i Automatyki, ul. Bolesława Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, E-mail: adam.cichy@polsl.pl.

LITERATURA

- [1] Toroński Z, Pomiar kąta stratności izolacji metodą woltomierzową. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Elektryka*. Z. 3, nr 8, (1956). Wydawnictwo Politechniki Śląskiej Gliwice, 101-102.
- [2] Vincett P. S., Calorimetric measurement of very low dielectric loss at low temperatures. *British Journal of Physics D: Applied Physics*, ser. 2, vol. 2. (1969) 699 - 710.
- [3] Li J.M., Teng Z.S. et al., Dielectric Loss Factor Measurement in Power Systems Based on Sampling Sequence Reconstruction Approach. *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 6, (2016), 4766 – 4775.
- [4] Wang K., Z.S. Teng, et al. : Fast Measurement of Dielectric Loss Angle With Time-Domain Quasi-Synchronous Algorithm. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 64, no. 4, (2015), 935–942.
- [5] Cichy A., Kampik M., Quasi-balanced method of measuring the dielectric loss factor. In *Proc. CPEM 2020*, (2020) Denver, USA.
- [6] Cichy A.: Non-bridge circuit with double quasi-balancing for measurement of dielectric loss factor. *IET Science, Measuring and Technology*, no. 7, (2013), 274 – 279.
- [7] Zawalonka J.: Układ do pomiaru współczynnika strat elektrycznych $\text{tg } \delta$, realizujący metodę dwóch woltomierzy. Praca dyplomowa inżynierska, (2017) Promotor: A. Cichy. Gliwice.