

MGR INŻ. ZBIGNIEW TOROŃSKI
Katedra Maszyn Elektrycznych

MCSTKI SKOMPENSOWANE DO POMIARU
WSPÓŁCZYNNIKA STRAT DIELEKTRYCZNYCH
MASZYN I URZADZEŃ ELEKTRYCZNYCH

S t r e s z c z e n i e . W artykule podano próbę klasyfikacji mostków skompensowanych do pomiaru $tg \delta$. Przeanalizowano ponadto w sposób jednolity wpływ elementów oporowych i indukcyjnych tych układów na wynik pomiarów.

Jednym z parametrów charakteryzujących własności materiałów izolacyjnych jest współczynnik strat dielektrycznych ($tg \delta$). O dobroci izolacji świadczy nie tylko wartość tego współczynnika, ale też i jego zależność w funkcji napięcia, tj. $tg \delta = f(U)$. Zależność ta pozwala bowiem na wyciągnięcie wniosków o zmianach zachodzących przy wzroście napięcia.

Pomiary współczynnika strat dielektrycznych mają ważne znaczenie w energetyce i zalecane są przy badaniach izolacji maszyn i urządzeń elektrycznych.

Spośród wielu metod służących do pomiaru współczynnika strat dielektrycznych na wyróżnienie zasługuje metoda mostkowa (mostek Scheringa).

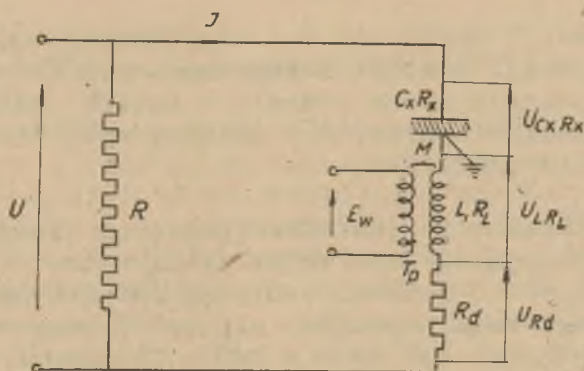
Poniżej rozpatrzemy układy pomiarowe, które w w miejsce elementów pojemnościowych jak w mostku Scheringa -

1/ Instrukcja do pomiaru kąta stratności mostkiem Rayzera. Zakład Badań i Pomiarów "Energopomiar" Dział Studiów, Gliwice 1953.

W. Fu li ń s k i, R. G o t s z a l i k, T. H a l a w a, Kompensator do pomiaru współczynników strat dielektrycznych maszyn i transformatorów wysokiego napięcia, Zeszyty Naukowe Politechniki Wrocławskiej nr 11 "Elektryka" zesz.VI, Wrocław 1955.

wyposażone są w elementy oporowe i indukcyjne. Układy te zaliczamy do mostków skompensowanych. Są one tanie, wygodne w użyciu, a ich dokładność jest wystarczająca dla celów przemysłowych.

Mostki skompensowane tego typu (rys. 1) składają się z transformatora powietrznego T_p , a niekiedy też z oporności czynnej R_d włączonej w szereg z obiektem badanym. Na napięcie zasilania załącza się opornik bezindukcyjny R . Układ powyższy uzupełniony wskaźnikiem równowagi np. elektrycznym lub galwanometrem wibracyjnym (pominiętym na rysunku) pozwala na wykonanie pomiaru współczynnika strat dielektrycznych.



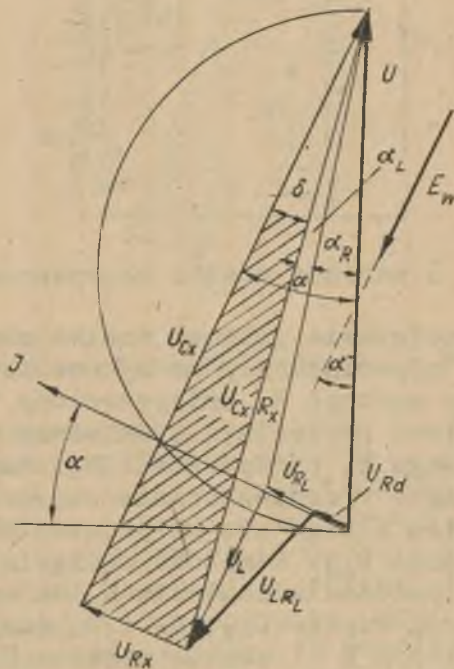
Rys. 1. Podstawowe elementy mostka skompensowanego

Powyższemu schematowi połączeń odpowiada wykres topograficzny podany na rysunku 2, przy założeniu, że badanemu obiektowi $C_x R_x$ odpowiada układ zastępczy, w którym pojemność C_x i oporność R_x połączone są szeregowo. Podobnie potraktowano oporność indukcyjną i czynną uzwojenia pierwotnego transformatora powietrznego. Dla przejrzystości zakreskowano ponadto trójkąt napięć przynależny badanemu obiektowi.

Z wykresu topograficznego wynika, że kąt α jest sumą kątów δ , α_R , α_L , tj.: $\alpha = \delta + \alpha_R + \alpha_L$, gdzie δ jest

c.d.i./ K. B i e l a Ń s k i, Metoda pomiaru kąta stratności ($\operatorname{tg} \delta$) za pomocą dwóch amperomierzy i galwanometru wibracyjnego, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, "Elektryka" zes. 2, Kraków 1956 oraz "Energetyka" zes. 2 (wrzesień-październik) 1957.

kątem stratności mierzonego obiektu, kąt α_R związany jest z opornością czynną ($R_L + R_d$) wprowadzoną w szereg z obiektem pomiarowym, a kąt α_L - z opornością indukcyjną (ωL) uzwojenia pierwotnego transformatora powietrznego. Natomiast α jest kątem mierzonym przez kompensator.

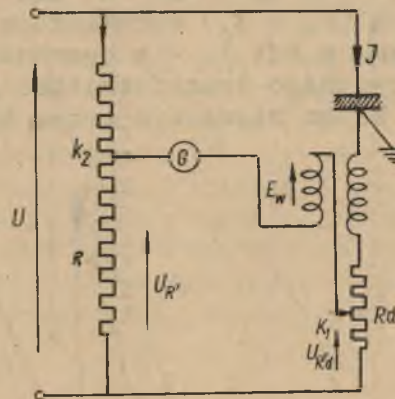


Rys. 2. Wykres topograficzny do rys. 1

Na wykresie topograficznym zaznaczono ponadto wektor SEM-nej indukcji wzajemnej E_w , który jest prostopadły do wektora prądu I , a tym samym z kierunkiem napięcia zasilającego U tworzy kąt α .

Wektor E_w odgrywa rolę podstawową w układach tego typu, a umiejscowienie jego końca wzdłuż wektorów napięć U_{RL} , U_{Rd} oraz U (zaznaczonych na rysunku liniami grubszymi) prowadzi do różnych układów i może być podstawą klasyfikacji tego typu mostków skompensowanych.

Rysunki 3, 5, 7 podają uproszczone rozwiązania tych układów, a rysunki 4, 6, 8 odpowiadające im wykresy topograficzne dla stanu przed osiągnięciem całkowitej kompensacji. Na wykresach zaznaczono ponadto podłączenia galvanometrów wibracyjnych.



Rys. 3. I wariant mostka skompensowanego

Rysunek 3 przedstawia schemat mostka skompensowanego, a rysunek 4 odpowiadający mu wykres topograficzny, na którym koniec wektora E_w umiejscowiony jest w dowolnym punkcie wektora napięcia U_{Rd} zależnie od położenia kontaktu ślizgowego K_1 na oporności R_d . Ruch kontaktu K_1 powoduje równoległe przemieszczanie się wektora E_w , który swym początkiem ślizga się po prostej AB równoległej do wektora napięcia U_{Rd} . Wielkość napięcia U_R regulujemy przez zmianę położenia kontaktu K_2 na oporze R . Całkowita kompensacja napięć U_{Rd} , U_R i E_w następuje wtedy, gdy początek wektora E i koniec wektora U_R zejdą się w punkcie S przecięcia się prostej AB z wektorem napięcia zasilającego U , co osiągamy przez odpowiednie ustawienie kontaktów K_1 i K_2 . Stan kompensacji poznajemy po galwanometrze wibracyjnym, który się wtedy nie wychyla.

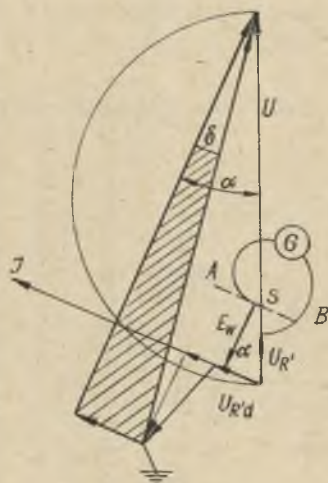
Z rysunku 4 zauważymy, że dla stanu kompensacji obowiązuje relacja

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{U_{R'd}}{E_w} = \frac{I \cdot R'd}{I \cdot \omega M} = \frac{R'd}{\omega M}$$

Dla $\omega M = \text{const}$ otrzymany

$$\operatorname{tg} \alpha = C \cdot R'd,$$

tj. $\operatorname{tg} \alpha$ jest proporcjonalny do $R'd$. Skali oporności $R'd$ możemy zatem przyporządkować skalę $\operatorname{tg} \alpha$.



Rys. 4. Wykres topograficzny do I wariantu

W mostku skompensowanym z rysunku 5 i 6 koniec wektora E_w umiejscowiony jest w punkcie O. Podobnie jak w układzie poprzednim tak i tu wielkość napięcia $U_{R'}$ regulujemy przez zmianę położenia kontaktu K_2 . Dla uzyskania kompensacji wprowadza się dodatkowy wektor E_k , którego faza i wartość pozostają w ścisłej zależności od fazy i wartości prądu I_k , dostarczanego z zewnątrz (np. z transformatora napięciowego) do uzwojenia pierwotnego transformatora powietrznego. Jeśli faza prądu I_k pokrywa się z fazą napięcia zasilającego U , to wektor E_k jest prostopadły do wektora U . Wówczas w chwili kompensacji (rys. 9) otrzymamy

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{E_k}{U_{R'}}$$

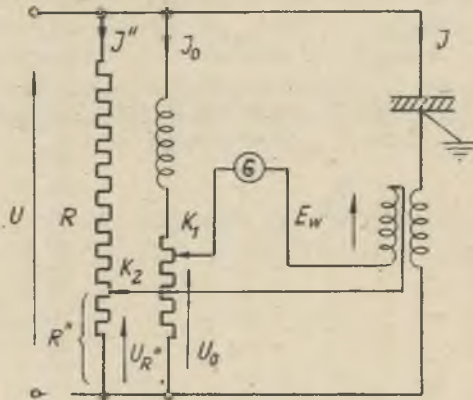
Uwzględniając, że:

$$E_k = I_k \cdot \omega M$$

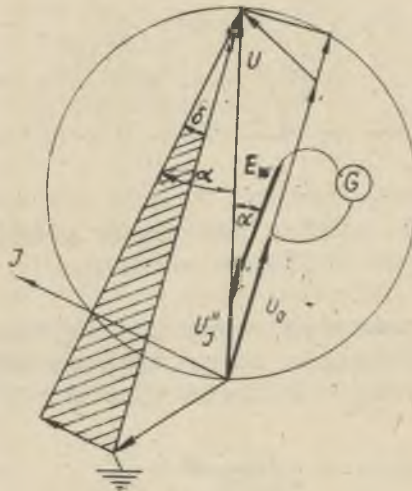
$$U_{R'} = \sqrt{E_w^2 - E_k^2} = \sqrt{(I \cdot \omega M)^2 - (I_k \cdot \omega M)^2}$$

$$I_T = \sqrt{I^2 - I_k^2}$$

na dodatkowej gałęzi złożonej z oporności czynnej i indukcyjnej, załączonej na napięcie zasilające U . Przesuwaniem kontaktów K_1 i K_2 regulujemy fazę i wielkość napięcia U_k .



Rys. 7. III wariant mostka skompensowanego



Rys.8. Wykres topograficzny do III wariantu

W chwili kompensacji $U_k = E_w$. Z rysunku 10, przedstawiającego rozkład napięć w momencie kompensacji, wynika, że

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{U_x}{U_y - U''_y}$$

Uwzględniając relacje:

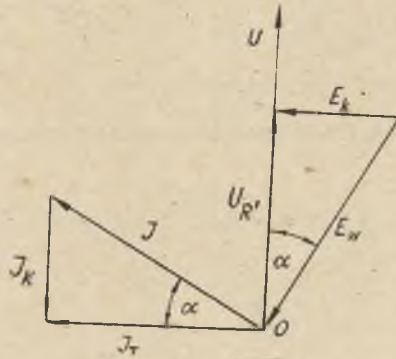
$$U_x = U_o \sin \alpha_k$$

$$U_y = U_o \cos \alpha_k$$

$$U''_y = I'' \cdot R''$$

oraz dobierając oporności czynne R tak, aby był spełniony warunek $I'' = I_o \cos \alpha_k$ otrzymamy

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{R_o}{R_o - R''} \operatorname{tg} \alpha_k$$



Rys. 9. Wykres wektorowy prądów, napięć i SEM do wariantu II

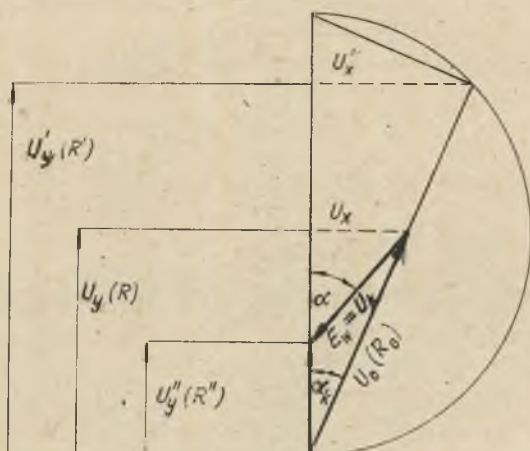
Dla prostoty liczenia dobieramy kąt α_k tak, aby $\operatorname{tg} \alpha_k = 0,001$ lub $0,01$ zależnie od wymaganego zakresu dla $\operatorname{tg} \alpha$. Wówczas np. dla $\operatorname{tg} \alpha_k = 0,01$ otrzymamy

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{R_o}{100(R_o - R'')}$$

Podane schematy mostków kompensacyjnych są schematami uproszczonymi. Układy te mogą być rozbudowane np. przez wprowadzenie transformatorów napięciowych w miejsce oporności czynnych R , transformatorów prądowych itp.

Pobieżna analiza wykresów topograficznych (rys. 2, 4, 6, 8) wskazuje, że pomiar $\operatorname{tg} \delta$ obarczony jest błędem. Już poprzednio wspomniano, że pomiędzy poszukiwanym

$\text{tg } \delta$ a mierzonym przez mostek skompensowany $\text{tg } \alpha$ zachodzi różnica. Różnica ta spowodowana jest nie tylko wprowadzeniem oporności czynnej i indukcyjnej w szereg z obiektem badanym, ale na nią mają też wpływ inne warunki pomiaru, jak np. niestałość częstotliwości, pasożytnicze prądy pojemnościowe, jakie wyraźniej wystąpić mogą przy pomiarach pod wysokim napięciem, lub też wprowadzenie do układu transformatorów napięciowych i prądowych. Różnica ta zależeć będzie też od czułości samego układu.



Rys. 10. Wykres wektorowy napięć do wariantu III

Dla przykładu omówimy jedynie wpływ oporności czynnych i indukcyjnych włączonych w szereg z obiektem badanym na wynik pomiarów.

Z wykresu topograficznego przedstawionego na rysunku 2 wynika, że

$$\text{tg } \delta = \frac{U_{Rx}}{U_{cx}}$$

Uwzględniając ponadto związki:

$$U_{Rx} = U \sin \alpha - (U_{RL} + U_{Rd}) = U \sin \alpha - I(R_L + R_d)$$

$$U_{cx} = U \cos \alpha + U_L = U \cos \alpha + I \cdot w \cdot L$$

otrzymamy po prostych przekształceniach:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\frac{U}{I} - \frac{R_L + R_d}{\sin \alpha}}{\frac{U}{I} + \frac{\omega L}{\cos \alpha}} \cdot \operatorname{tg} \alpha$$

Gdy w szereg z obiektem badanym będziemy mieli włączone oporności czynne i indukcyjne, to

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\frac{U}{I} - \frac{\Sigma(R)}{\sin \alpha}}{\frac{U}{I} + \frac{\Sigma(\omega L)}{\cos \alpha}} \cdot \operatorname{tg} \alpha$$

Powyzszą zależność napiszemy w postaci

$$\operatorname{tg} \delta = k \cdot \operatorname{tg} \alpha \quad (1)$$

gdzie współczynnikiem korekcyjnym będzie wyrażenie:

$$k = \frac{\frac{U}{I} - \frac{\Sigma(R)}{\sin \alpha}}{\frac{U}{I} + \frac{\Sigma(\omega L)}{\cos \alpha}} \quad (2)$$

Oznaczenia:

- $\Sigma(R)$ - suma wszystkich oporności czynnych włączonych w szereg z obiektem badanym,
- $\Sigma(\omega L)$ - suma wszystkich oporności indukcyjnych włączonych w szereg z obiektem badanym,
- U - napięcie zasilania,
- I - prąd obiektu badanego.

Z podanego wzoru wynika, że współczynnik korekcyjny k możemy każdorazowo z pomiaru obliczyć, jeśli zmierzemy napięcie zasilania U , prąd obiektu badanego I i obliczymy $\sin \alpha$ oraz $\cos \alpha$ ze zmierzonego $\operatorname{tg} \alpha$. Ponadto muszą być znane oporności czynne i indukcyjne włączone w szereg z obiektem badanym.

Przy projektowaniu mostków kompensacyjnych wygodniej jest posługiwać się wzorem na współczynnik korekcyjny w innej postaci. Uwzględniając bowiem (rys. 2), że

$$\frac{U}{I} \sin \alpha = Z \sin \alpha = R_{C_x} + \Sigma(R)$$

$$\frac{U}{I} \cos \alpha = Z \cos \alpha = \frac{1}{\omega C_x} - \Sigma(\omega L)$$

gdzie Z jest opornością pozorną układu pomiarowego łącznie z obiektem badanym, otrzymamy po prostym przekształceniu wzoru 2 następujące wyrażenie:

$$k = \frac{1 - \frac{\Sigma(R)}{R_{C_x} + \Sigma(R)}}{1 + \frac{\Sigma(\omega L)}{\frac{1}{\omega C_x} - \Sigma(\omega L)}} \quad (3)$$

Wzory na współczynnik korekcyjny k wskazują, że na jego wartość ma wpływ zarówno oporność czynna $\Sigma(R)$, jak i oporność indukcyjna $\Sigma(\omega L)$ włączona w szereg z obiektem badanym. Wzrost oporności czynnej ujawnia się zmniejszeniem licznika, a wzrost oporności indukcyjnej zwiększeniem mianownika. Oba te wpływy działają więc zgodnie w kierunku zmniejszenia współczynnika korekcyjnego ($k < 1$). We wzorach 2 i 3 drugi składnik mianownika jest zwykle do pominięcia tak, że współczynnik k przybiera postać

$$k \approx 1 - \frac{\Sigma(R)}{R_{C_x} + \Sigma(R)}$$

a na $\text{tg } \delta$ otrzymamy wtedy

$$\text{tg } \delta \approx \text{tg } \alpha - \omega C_x \cdot \Sigma(R)$$

W praktyce - dla prostoty pomiarów - tak się projektuje kompensatory, aby wpływ oporności $\Sigma(R)$ i $\Sigma(\omega L)$ był do pominięcia, tj. aby $k \approx 1$. Współczynnik strat dielektrycznych wynosi wtedy

$$\text{tg } \delta \approx \text{tg } \alpha$$

tj. poszukiwany $\text{tg } \delta$ będzie się równał praktycznie zmierzonemu $\text{tg } \alpha$.

Rozważania powyższe są ważne dla wszystkich mostków skompensowanych podanych poprzednio.

.Резюме

СКОМПЕНСИРОВАННЫЕ МОСТЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ
КОЭФФИЦИЕНТА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН И АППАРАТОВ

Делается попытка классификации скомпенсированных мостов для измерения $\text{tg } \delta$. Проведен анализ влияния активных и индукционных элементов этих схем на результаты измерения.

Résumé

LES DISPOSITIFS DES COMPENSATEURS POUR LA MESURE
DU COEFFICIENT DES PERTES DIELECTRIQUES
DANS LES MACHINES ET APPAREILS ELECTRIQUES

Tentative d'une classification des compensateurs pour la mesure de $\text{tg } \delta$. A titre d'exemple - une analyse de l'influence des éléments ohmiques et inductifs sur les résultats.