

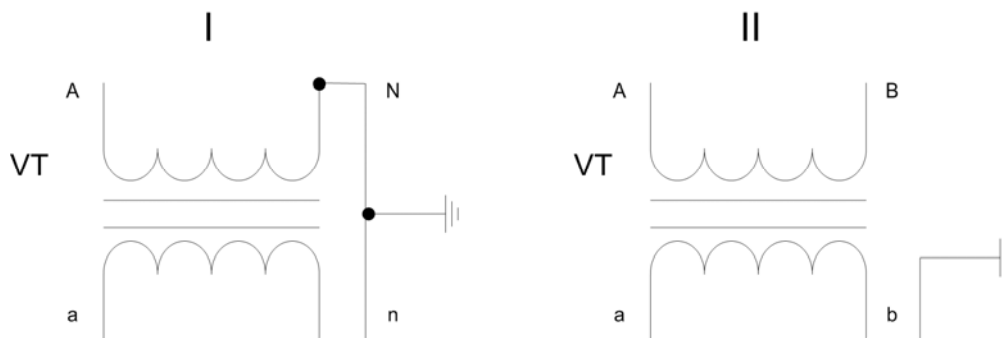
1. Cel ćwiczenia

Poznanie metody sprawdzania dokładności indukcyjnych przekładników napięciowych. Wyznaczenie wartości błędu napięciowego i kąтового przy różnych wartościach skutecznych napięcia pierwotnego oraz obciążenia obwodu wtórnego (moc pozorna i współczynnik mocy). Wyjaśnienie przyczyn zmian wartości błędów na podstawie schematu zastępczego i wykresu wskazowego. Określenie klasy dokładności badanego indukcyjnego przekładnika napięciowego zgodnie z normą PN-EN 61869-3.

2. Podstawy teoretyczne

Przekładnik napięciowy jest to transformator pomiarowy, pracujący w warunkach zbliżonych do stanu jałowego. Stosowany jest, już przy napięciach liniowych od 400 V, w stacjach elektroenergetycznych, podstacjach sieci rozdzielczych, rozdzielniach zakładowych, laboratoriach wysokiego napięcia oraz jako transformator zasilający lub probierczy. Przekładnik zapewnia z zadaną klasą dokładności transformację napięć o wysokich wartościach na napięcia o wartościach dostosowanych do obwodów pomiarowych \ zabezpieczeniowych niskiego napięcia przyłączonych do strony wtórnej (100 V lub 110V ewentualnie 200 V) dla przekładników pomiarowych włączonych na napięcie międzyprzewodowe lub $100/\sqrt{3}$ V lub $110/\sqrt{3}$ V dla przekładników włączonych na napięcie fazowe w układach trójfazowych, jeżeli znamionowe napięcie pierwotne jest liczbą podzieloną przez $\sqrt{3}$. Przekładnik napięciowy zapewnia również separację galwaniczną, przyłączonych urządzeń pomiarowych lub zabezpieczeniowych, od sieci elektroenergetycznej. Zabezpiecza przed wystąpieniem zbyt wysokich napięć w obwodzie wtórnym (zadziałanie bezpiecznika w obwodzie pierwotnym lub zniszczenie izolacji uzwojenia).

Układy pracy jednofazowych przekładników napięciowych (VT) przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Układy pracy jednofazowych przekładników napięciowych

Układ I nazywamy jednobiegunowym ze względu na uziemienie zacisku N uzwojenia pierwotnego. Układ II nazywamy dwubiegunowym, ponieważ oba zaciski A i B uzwojenia pierwotnego nie są uziemione. W obydwu układach jeden z zacisków uzwojenia wtórnego (n lub b) pozostaje uziemiony. W związku z tym, w przypadku przekładników napięciowych przeznaczonych do pomiaru napięć międzyprzewodowych (układ II) w sieciach z izolowanym punktem neutralnym, izolacja każdego zacisku pierwotnego względem ziemi musi być dostosowana do napięcia międzyprzewodowego sieci, a nie do napięcia fazowego (układ I). Stosowanie przekładników przewidzianych do pracy w układzie II nie jest

wskazane do połączenia w układzie I ze względu na zbyt małą indukcję magnetyczną w rdzeniu tego przekładnika przy napięciu fazowym i w związku z tym pogorszenie się jego właściwości metrologicznych.

W literaturze stosowany jest również podział przekładników napięciowych ze względu na zasadę działania. Przekładniki indukcyjne i pojemnościowe nazywane są konwencjonalnymi, natomiast przekładniki wykorzystujące inne zjawiska fizyczne, w których sygnał wtórny jest proporcjonalny do napięcia lub prądu pierwotnego nazywane są niekonwencjonalnymi.

2.1. Wielkości charakteryzujące przekładniki napięciowe

Podstawowe wielkości charakteryzujące przekładniki napięciowe są ustalone przez normę PN-EN 61869-3. Według tej normy są to przede wszystkim: napięcie znamionowe pierwotne i wtórne, moc znamionowa, wartości graniczne błędów i klasa dokładności, wytrzymałość elektryczna izolacji, dopuszczalne przyrosty temperatur uzwojeń. Znamionowy poziom izolacji przekładnika określany jest jako kombinacja trzech znormalizowanych napięć (najwyższego roboczego, probierczego o częstotliwości sieciowej i probierczego udarowego), charakteryzujących izolację przekładnika pod względem jej wytrzymałości dielektrycznej. Najwyższe napięcie robocze U_m , określa największą wartość skuteczną napięcia międzyprzewodowego, które może występować w normalnych warunkach pracy i dla którego została zaprojektowana izolacja przekładnika. Wartości napięć probierczych są określone w normie PN-EN 61869-1 dla najwyższego napięcia roboczego. Przykładowo, jeżeli napięcie znamionowe przekładnika wynosi 220 kV to jego znamionowy poziom izolacji wynosi 245 kV / 460 kV / 1050 kV. Istotnym parametrem przekładników napięciowych, także zdefiniowanym w normie, jest współczynnik napięciowy, którego wartość określają przewidywane ustalone przepięcia o częstotliwości sieciowej. Znamionowy współczynnik napięciowy może mieć wartości: 1,2, 1,5 lub 1,9 zależnie od sposobu przyłączenia uzwojenia pierwotnego w sieci oraz sposobu uziemienia jej punktu neutralnego. Ponadto, przekładnik powinien zachować wymaganą wytrzymałość cieplną w określonym czasie podanym na tabliczce znamionowej, przy napięciu pierwotnym wynikającym z pomnożenia znamionowego napięcia przez znamionowy współczynnik napięciowy. Nie powinny wówczas zostać przekroczone dopuszczalne przyrosty temperatur uzwojeń, co warunkuje graniczną wartość natężenia prądu przepływającego przez uzwojenia. Na podstawie iloczynu granicznej wartości natężenia prądu przepływającego przez uzwojenie pierwotne przekładnika napięciowego oraz znamionowego napięcia tego uzwojenia określana jest moc graniczna przekładnika. Moc znamionowa określana jest natomiast jako wartość graniczna obciążenia, przy którym przekładnik napięciowy pracujący w warunkach znamionowych (napięcie, częstotliwość) zachowuje swoje właściwości metrologiczne wynikające z klasy dokładności.

Ponadto, w normie PN-EN 61869-3 zdefiniowana jest także znamionowa przekładnia K_{Un} określana jako stosunek znamionowego napięcia pierwotnego U_{1n} do znamionowego napięcia wtórnego U_{2n} :

$$K_{Un} = \frac{U_{1n}}{U_{2n}} \quad (1)$$

Rzeczywista przekładnia K_U wyznacza stosunek rzeczywistej wartości skutecznej napięcia pierwotnego U_1 do rzeczywistej wartości skutecznej napięcia wtórnego U_2 :

$$K_U = \frac{U_1}{U_2} \quad (2)$$

Zwojowa przekładnia przekładnika określa stosunek liczby zwojów uzwojenia pierwotnego z_1 do liczby zwojów uzwojenia wtórnego z_2 :

$$K_z = \frac{z_1}{z_2} \quad (3)$$

Klasa dokładności przekładnika napięciowego warunkuje, dopuszczalne według normy, graniczne wartości błędów napięciowego ΔU (ozn. w normie ε) i kąтового δ_U (ozn. w normie $\Delta\varphi$). Błąd napięciowy wynika z różnicy między przekładnią znamionową, a przekładnią rzeczywistą przekładnika napięciowego. Obliczany jest na podstawie zależności (3), jako procentowa różnica wartości skutecznych napięcia wtórnego, pomnożonego przez znamionową przekładnię przekładnika napięciowego, i napięcia pierwotnego, odniesiona do napięcia pierwotnego.

$$(\varepsilon) \Delta U = \frac{K_{un} U_2 - U_1}{U_1} \cdot 100\% \quad (4)$$

W przekładnikach niekorygowanych, w których zwojowa przekładnia jest równa znamionowej przekładni napięciowej, błąd napięciowy jest zawsze ujemny. Błąd napięciowy może zostać zmniejszony (przesunięty w kierunku wartości dodatnich) po przez zastosowanie poprawki zwojowej Δz_1 polegającej na zmniejszeniu liczby zwojów z_1 uzwojenia pierwotnego. Procentowa poprawka zwojowa Δk może zostać obliczona z zależności:

$$\Delta k = \frac{\Delta z_1 \cdot 100}{z_1} [\%] \quad (5)$$

Błąd kątowy jest to kąt między wektorem napięcia pierwotnego o przesunięciu fazowym φ_1 względem początku układu współrzędnych i odwróconym o 180° wektorem napięcia wtórnego o przesunięciu fazowym φ_2 , wyrażony w minutach lub centyradianach. Błąd kątowy jest dodatni, jeśli odwrócony o 180° wektor napięcia wtórnego wyprzedza wektor napięcia pierwotnego.

$$(\Delta\varphi) \delta_U = \varphi_2 - \varphi_1 \quad (6)$$

Znormalizowanymi klasami dokładności przekładników do pomiarów są klasy: 0,1 – 0,2 – 0,5 – 1,0 – 3,0 a przekładników do zabezpieczeń – klasy 3P i 6P.

Tabela 1: Klasy dokładności indukcyjnych przekładników napięciowych pomiarowych według normy PN-EN 61869-3

Klasa dokładności	Procentowy błąd napięciowy (przekładni) \pm	Błąd kątowy \pm	
		minuty	centyradiany
0.1	0,1	5	0,15
0.2	0,2	10	0,3
0.5	0,5	20	0,6
1.0	1,0	40	1,2
3.0	3,0	nie określa się	nie określa się

Tabela 2: Klasy dokładności indukcyjnych przekładników napięciowych zabezpieczeniowych według normy PN-EN 61869-3

Klasa	Procentowy błąd napięciowy(przekładni) + albo -	Błąd kątowy + lub -	
		minuty	centyradiany
3P	3,0	120	3,5
6P	6,0	240	7,0

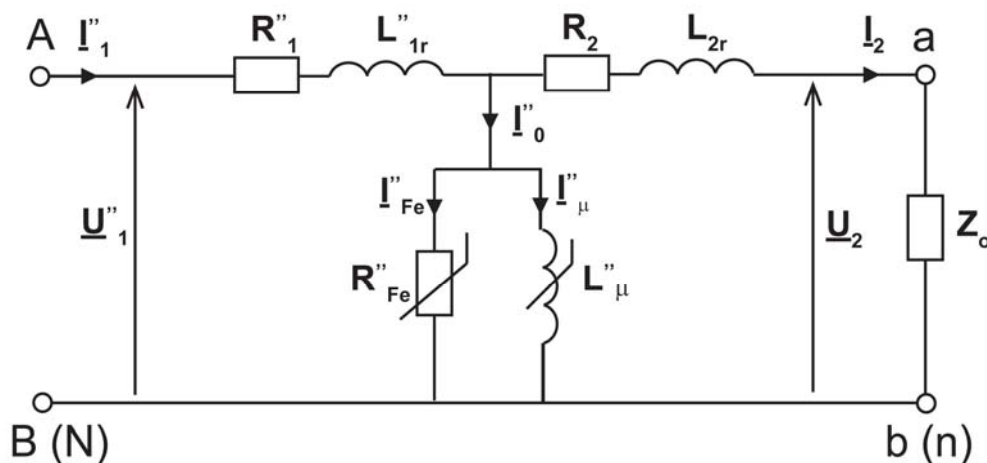
Podczas badań dokładności indukcyjnych przekładników napięciowych napięcie pierwotne, dla przekładników do pomiarów wynosi od 80% do wartości wynikającej ze znamionowego współczynnika napięciowego danego przekładnika (120% lub 150% lub 190%).

Dla przekładników do zabezpieczeń pomiary wykonuje się przy 5% (2%) napięcia znamionowego oraz przy napięciu o wartości wynikającej ze znamionowego współczynnika napięciowego danego przekładnika (120% lub 150% lub 190%).

W przypadku znamionowych obciążeń uzwojeń wtórnych indukcyjnych przekładników napięciowych o wartości mocy pozornej od 10 VA do 100 VA współczynnik mocy podczas badań dokładności wynosi 0,8 ind., a wykonuje się je przy obciążeniu znamionowym przekładnika oraz dla obciążenia o wartości 25% obciążenia znamionowego. W przypadku obciążeń o wartości mocy pozornej od 1 VA do 10 VA współczynnik mocy wynosi 1, a badania dokładności wykonuje się przy obciążeniu znamionowym oraz bez obciążenia.

2.2. Schemat zastępczy i jego parametry

Klasyczny schemat zastępczy przekładnika napięciowego przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat zastępczy przekładnika napięciowego

Na schemacie tym zastosowano następujące oznaczenia (symbole z dwiema kreskami (bis) oznaczają wielkości sprowadzone do obwodu wtórnego): \underline{U}''_1 – napięcie pierwotne przeliczone na stronę wtórną, \underline{I}''_1 – prąd pierwotny przeliczony na stronę wtórną, R''_1 – rezystancja uzwojenia pierwotnego przeliczona na stronę wtórną, L''_{1r} – indukcyjność rozproszenia uzwojenia pierwotnego przeliczona na stronę wtórną, R''_{Fe} – rezystancja odwzorowująca straty w rdzeniu przeliczona na stronę wtórną, \underline{I}''_{Fe} – prąd odwzorowujący

straty w rdzeniu przeliczony na stronę wtórną, L''_{μ} - indukcyjność główna przeliczona na stronę wtórną, \underline{I}''_{μ} - prąd magnesujący przeliczony na stronę wtórną, L_{2r} - indukcyjność rozproszenia uzwojenia wtórnego, R_2 - rezystancja uzwojenia wtórnego, \underline{U}_2 - napięcie wtórne, \underline{I}''_2 - prąd wtórny, Z_0 - impedancja obciążenia.

Impedancje uzwojeń przekładnika:

$$\underline{Z}_1'' = R_1'' + jX_1'' \quad (7)$$

$$\underline{Z}_2 = R_2 + jX_2 \quad (8)$$

a impedancja obciążenia:

$$\underline{Z}_0 = R_0 + jX_0 \quad (9)$$

Na podstawie II Prawa Kirchhoffa dla schematu zastępczego z rysunku 2 można zapisać:

$$\underline{U}_1'' = \underline{I}_1''(R_1'' + jX_1'') + \underline{I}_2(R_2 + jX_2) + \underline{U}_2 \quad (10)$$

Natomiast na podstawie I Prawa Kirchhoffa:

$$\underline{I}_1'' = \underline{I}_2 + \underline{I}_0'' \quad (11)$$

$$\underline{I}_0'' = \underline{I}_{Fe}'' + \underline{I}_{\mu}'' \quad (12)$$

Parametry schematu zastępczego umożliwiają obliczenie wartości skutecznych prądu strony pierwotnej I_1 , prądu strony wtórnej I_2 , prądu jałowego I_0 i jego składowych: czynnej I_{Fe} oraz biernej I_{μ} . Wartość prądu I_{Fe} jest wyznaczona dla zadanej wartości indukcji w rdzeniu przekładnika na podstawie dostarczanej przez producentów materiałów magnetycznych charakterystyki strat mocy czynnej materiału rdzeniowego wykreślonej w funkcji indukcji. Wartość prądu I_{μ} jest obliczana na podstawie charakterystyki magnesowania rdzenia przekładnika, dla zadanej indukcji odczytywana jest wartość maksymalna natężenia pola magnetycznego w rdzeniu.

$$I_{Fe}'' = \frac{P_{Fe}}{U_2} \quad (13)$$

$$I_{\mu}'' = \frac{H_m I_{Fe}}{\sqrt{2} z_2} \quad (14)$$

$$I_0'' = \sqrt{I_{\mu}''^2 + I_{Fe}''^2} \quad (15)$$

$$I_2 = \frac{S_n}{U_2} \quad (16)$$

przy czym: P_{Fe} - straty mocy czynnej w rdzeniu przekładnika napięciowego; H_m - amplituda natężenia pola magnetycznego w rdzeniu; l_{Fe} - średnia długość drogi strumienia w rdzeniu; S_n - znamionowa moc pozorna uzwojenia wtórnego przekładnika napięciowego.

Na podstawie II Prawa Kirchhoffa dla schematu zastępczego z rysunku 2, przy założeniu, że $I_2 \approx I_1''$:

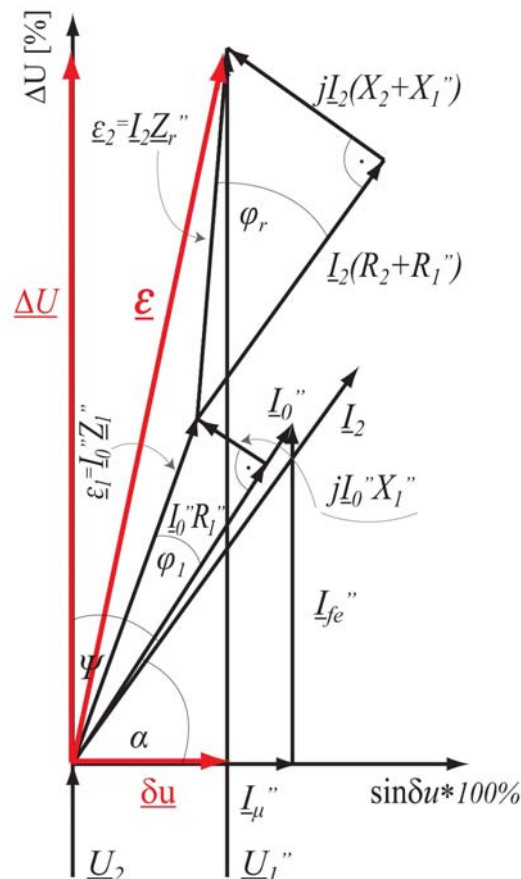
$$I_1'' \approx \frac{U_1''}{\sqrt{(R_1'' + R_2 + R_0)^2 + (X_1'' + X_2 + X_0)^2}} \quad (17)$$

2.3. Wykres wskazowy

Na podstawie równań (10) i (11) napięcie pierwotne może zostać wyrażone zależnością:

$$\underline{U}_1'' = \underline{I}_0''(R_1'' + jX_1'') + \underline{I}_2(R_1'' + R_2) + j\underline{I}_2(X_1'' + X_2) + \underline{U}_2 \quad (18)$$

Powyższe równanie przedstawione za pomocą wykresu wskazowego (wektorowego) z rysunku 3 umożliwia dla schematu zastępczego z rysunku 2 graficznie wyznaczenie napięcia \underline{U}_1'' oraz określenie wartości błędów prądowego, kąтового i całkowitego.



Rys. 3. Wykres wskazowy przekładnika napięciowego 2000 V / 100 V przy obciążeniu uzwojenia wtórnego mocą znamionową 25 VA o współczynniku mocy $\cos \psi = 0,8$

Wartość i charakter zmian błędów przekładnika są ściśle uzależnione od czterech kątów: φ_r , φ_1 , ψ , α . Kąty te dla wykresu wskazowego z rysunku 3 zostały opisane zależnościami:

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{I_{Fe}''}{I_{\mu}''} \quad (19)$$

$$\varphi_r = \operatorname{arctg} \frac{X_2 + X_1''}{R_2 + R_1''} \quad (20)$$

$$\varphi_1 = \operatorname{arctg} \frac{X_1''}{R_1''} \quad (21)$$

$$\psi = \operatorname{arctg} \frac{X_0}{R_0} \quad (22)$$

Kąt α jest kątem strat materiału ferromagnetycznego, kąt φ_r - charakteryzuje stosunek reaktancji obu uzwojeń do ich rezystancji, natomiast φ_1 - stosunek reaktancji uzwojenia pierwotnego do jego rezystancji a kąt ψ określa charakter obciążenia przyłączonego do zacisków wtórnych przekładnika (w przedstawionym przypadku $\cos\psi = 0,8$).

Wykres wskazowy z rysunku 3 umożliwi wyprowadzenie zależności określających składowe błędów napięciowego i kąтового przekładnika napięciowego:

$$\Delta U_1 = - \frac{I_0' Z_1' \sin(\varphi_1 + \alpha)}{U_2} 100 \% \quad (23)$$

$$\Delta U_2 = - \frac{I_2 Z_r' \cos(\psi - \varphi_r)}{U_2} 100 \% \quad (24)$$

$$\delta_{U1} = \frac{I_0' Z_1' \cos(\varphi_1 + \alpha)}{U_2} 3440 \text{ min} \quad (25)$$

$$\delta_{U2} = \frac{I_2 Z_r' \sin(\psi - \varphi_r)}{U_2} 3440 \text{ min} \quad (26)$$

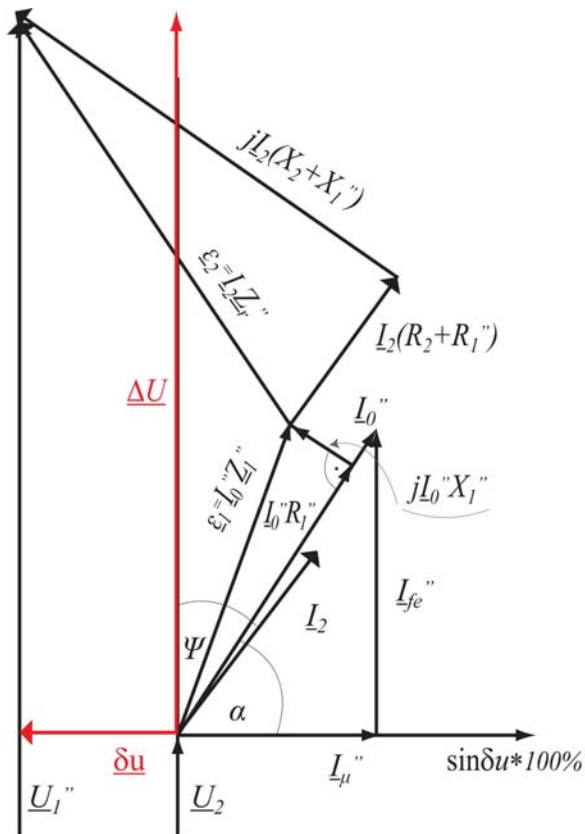
ΔU_1 - składowa nekorygowanego błędu napięciowego spowodowana tylko prądem jałowym przekładnika, ΔU_2 - składowa nekorygowanego błędu napięciowego spowodowana tylko prądem obciążenia przekładnika, δ_{U1} - składowa błędu kąтового spowodowana tylko prądem jałowym, δ_{U2} - składowa błędu kąтового spowodowana tylko prądem obciążenia.

Wypadkowe błędy przy obciążeniu są sumą błędów: jałowych i obciążeniowych, czyli:

$$\Delta U = \Delta U_1 + \Delta U_2 \quad (27)$$

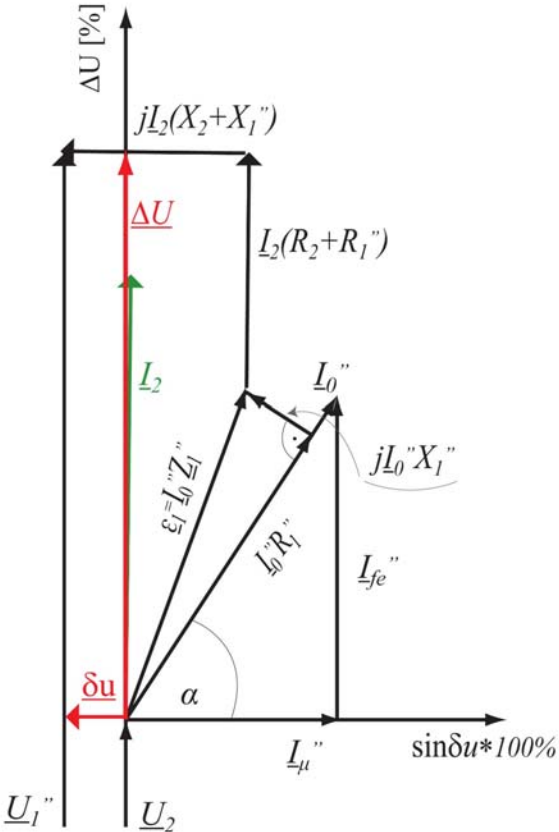
$$\delta_U = \delta_{U1} + \delta_{U2} \quad (28)$$

Na rysunku 4 przedstawiono przykładowy wykres wskazowy wykonany dla indukcyjnego przekładnika napięciowego o przekładni 15 kV \ 100 V przy obciążeniu uzwojenia wtórnego mocą znamionową 25 VA o współczynniku mocy $\cos\psi = 0,8$.



Rys. 4. Wykres wskazowy wykonany dla indukcyjnego przekładnika napięciowego o przekładni 15 kV / 100 V

Na rysunku 5 przedstawiono wykres wskazowy przekładnika napięciowego 2000 V \ 100 V w przypadku obciążenia uzwojenia wtórnego mocą znamionową 25 W.

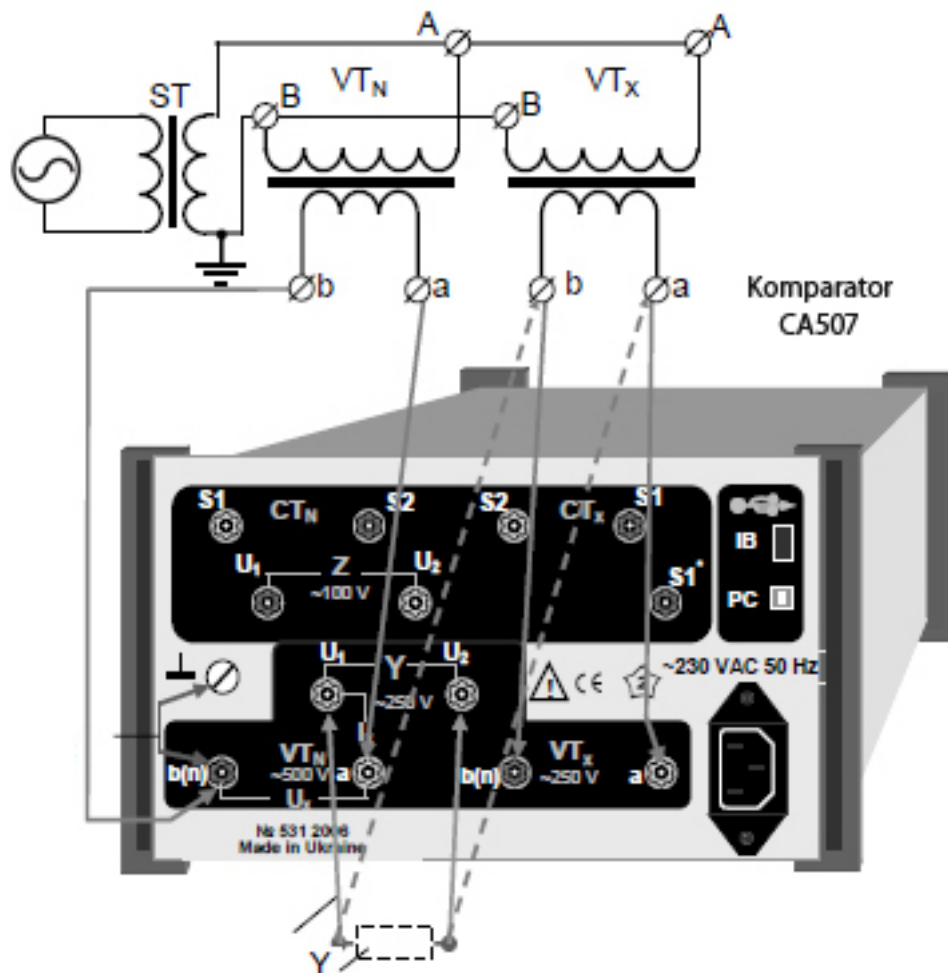


Rys. 5. Wykres wskazowy przekładnika napięciowego 2000 V / 100 V przy obciążeniu uzwojenia wtórnego mocą znamionową o współczynniku mocy $\cos\psi = 1$

3. Badania laboratoryjne

3.1. Układ pomiarowy

Schematu połączeń mostka typu CA507 przygotowanego do sprawdzania dokładności przekładników napięciowych.



VT_N - przekładnik wzorcowy, VT_X - przekładnik badany, ST - transformator zasilający, Y - obciążenie uzwojenia wtórnego badanego przekładnika.

3.2. Badany indukcyjny przekładnik napięciowy

Zapisać dane znamionowe badanego przekładnika i przekładnika wzorcowego.

3.3. Wyniki badań

Wyznaczyć błąd napięciowy i kątowy badanego indukcyjnego przekładnika napięciowego dla przewidzianych według normy wartości napięcia, obciążenia i współczynnika mocy w obwodzie wtórnym. Wyniki zamieścić w poniższych tabelach.

Przekładnik						Data:
MOC	BŁĘDY	U ₁ /U _{1n}				
cosβ		120%	100%	80%	40%	
	ΔU [%]					
	δU [min]					
	ΔU [%]					
	δU [min]					

Przekładnik						Data:
MOC	BŁĘDY	U ₁ /U _{1n}				
cosβ		120%	100%	80%	40%	
	ΔU [%]					
	δU [min]					
	ΔU [%]					
	δU [min]					

Przekładnik						Data:
MOC	BŁĘDY	U ₁ /U _{1n}				
cosβ		120%	100%	80%	40%	
	ΔU [%]					
	δU [min]					
	ΔU [%]					
	δU [min]					

Przekładnik						Data:
MOC	BŁĘDY	U ₁ /U _{1n}				
cosβ		120%	100%	80%	40%	
	ΔU [%]					
	δU [min]					
	ΔU [%]					
	δU [min]					

Przekładnik						Data:
MOC	BŁĘDY	U ₁ /U _{1n}				
cosβ		120%	100%	80%	40%	
	ΔU [%]					
	δU [min]					
	ΔU [%]					
	δU [min]					

Przekładnik						Data:
MOC	BŁĘDY	U ₁ /U _{1n}				
cosβ		120%	100%	80%	40%	
	ΔU [%]					
	δU [min]					
	ΔU [%]					
	δU [min]					

4. Opracowanie wyników pomiarowych

Na podstawie wykonanych pomiarów wykonać wykresy zmian błędów napięciowego i kąтового badanego indukcyjnego przekładnika napięciowego w funkcji procentowej wartości pierwotnego napięcia znamionowego i obciążenia uzwojenia wtórnego. W oparciu o schemat zastępczy i wykres wskazowy wyjaśnić przyczyny zmian wartości błędów. Zgodnie z normą PN-EN 61869-3 określić klasy dokładności badanego przekładnika.