

5. Badanie transformatora jednofazowego

Celem ćwiczenia jest poznanie budowy i zasady działania transformatora jednofazowego, jego metod badania i podstawowych charakterystyk.

5.1. Wiadomości ogólne

5.1.1. Budowa i zasada działania

5.1.2. Stan jałowy

5.1.3. Stan zwarcia pomiarowego

5.1.4. Stan obciążenia

5.2. Badania laboratoryjne

5.2.1. Oględziny i dane znamionowe

5.2.2. Pomiar rezystancji uzwojeń

5.2.3. Pomiar przekładni

5.2.4. Próba stanu jałowego

5.2.5. Próba zwarcia pomiarowego

5.2.6. Wyznaczenie charakterystyki zewnętrznej

5.2.7. Określenie sprawności metodą strat poszczególnych

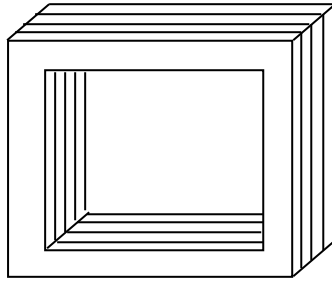
5.3. Uwagi i wnioski

5.1. Wiadomości ogólne

5.1.1. Budowa i zasada działania

Transformatorem nazywamy urządzenie służące do zmiany wartości napięć i natężeń prądów przemiennych dzięki indukcji elektromagnetycznej, bez udziału ruchu mechanicznego.

Transformator składa się z rdzenia i co najmniej dwóch uzwojeń: pierwotnego, które pobiera energię elektryczną ze źródła (np. z sieci) i wtórnego, które oddaje energię elektryczną (np. odbiornikom). Rdzenie transformatorów wykonane są z materiałów ferromagnetycznych i posiadają zwykle konstrukcję ramkową przykładowo przedstawioną na rys. 5.1.



Rys. 5.1. Ramkowy rdzeń transformatora jednofazowego.

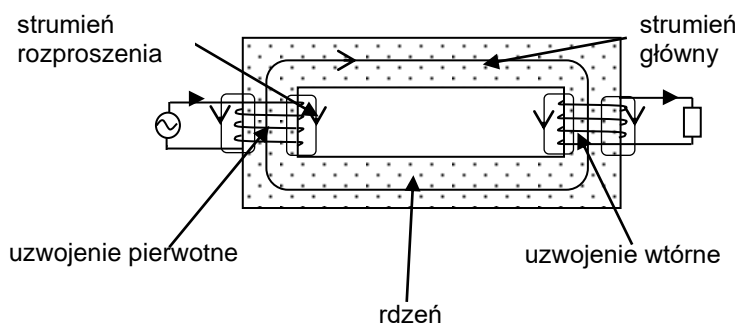
Uzwojenia transformatora, pokazane na rys. 5.2., wykonane są z miedzi elektrolitycznej (niekiedy z aluminium). Uzwojenia górnego (wyższego) napięcia nawijane są drutem okrągłym w izolacji emaliowanej (lub bawełnianej) lub profilowym w izolacji papierowej, a uzwojenia dolnego (niższego) napięcia nawijane są najczęściej drutem profilowym w izolacji papierowej. Konstrukcja uzwojeń powinna zapewniać bardzo dobrą wytrzymałość dielektryczną izolacji oraz bardzo dobrą wytrzymałość zwarciovą.

Transformatory olejowe, w których olej spełnia rolę czynnika izolującego i chłodzącego, posiadają wymuszony lub sterowany przepływ oleju i wyposażone są w chłodnice powietrzne lub wodne. Regulacja napięcia w zakresie kilku lub kilkunastu procent napięcia znamionowego, może odbywać się po stronie górnej za pomocą przełącznika zaczepów, umieszczonego w kadzi transformatora. Regulacja ta może odbywać się pod obciążeniem lub bez obciążenia, tzn. po uprzednim odłączeniu transformatora spod napięcia.

Na każdym transformatorze musi być umieszczona tabliczka znamionowa, na której podane są następujące wielkości znamionowe:

1. moc w kVA
2. napięcie pierwotne i wtórne w V lub kV
3. prądy pierwotny i wtórny w A
4. straty jałowe i obciążeniowe w W
5. napięcie zwarcia w %
6. rodzaj pracy (ciągła, dorywcza, przerywana)
7. rodzaj chłodzenia

Na rys. 5.2 przedstawiono uproszczony schemat transformatora. W rzeczywistym transformatorze obydwie uzwojenia umieszczone są przeważnie na tej samej kolumnie.



Rys. 5.2. Uproszczony schemat transformatora

Pod wpływem przyłożonego napięcia przemiennego w uzwojeniu pierwotnym płynie prąd przemienny $i_1(t)$. Prąd ten wywołuje w rdzeniu transformatora o przenikalności magnetycznej μ , przemienny strumień magnetyczny $\Phi(t)$ zwany strumieniem głównym. Strumień ten jest skojarzony z obydwoma uzwojeniami. Poza tym strumieniem występują też strumienie rozproszenia, które są skojarzone tylko z jednym uzwojeniem; pierwotnym lub wtórnym. Na ogół w transformatorach strumienie rozproszenia stanowią kilka procent strumienia głównego. W najnowszych transformatorach obwód magnetyczny jest prawie idealny i dlatego strumień rozproszenia jest niewielki, czyli można przyjąć, że cały strumień $\Phi(t)$ skojarzony jest z obu uzwojeniami. Przemienny strumień magnetyczny wznica w uzwojeniach siły elektromotoryczne:

$$e_1 = -z_1 \frac{d\Phi(t)}{dt} \quad (5.1)$$

$$e_2 = -z_2 \frac{d\Phi(t)}{dt} \quad (5.2)$$

gdzie: z_1 – liczba zwojów uzwojenia pierwotnego, z_2 – liczba zwojów uzwojenia wtórnego

Przekształcając powyższe wzory do wartości skutecznych, otrzymamy:

$$E_1 = 4,44fz_1\Phi_m \quad (5.3)$$

$$E_2 = 4,44fz_2\Phi_m, \quad (5.4)$$

gdzie Φ_m - amplituda strumienia magnetycznego, f - częstotliwość napięcia zasilającego.

Dzieląc powyższe równania stronami, otrzymamy:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{z_1}{z_2} = \mathfrak{G}. \quad (5.5)$$

Stosunek ten nazywamy przekładnią transformatora.

5.1.2. Stan jałowy

Stanem jałowym nazywamy taki stan transformatora, w którym jedno z uzwojeń, np. uzwojenie górnego tzn. wyższego napięcia, zasilane jest napięciem, o wartości znamionowej, a uzwojenie drugie, dolnego tzn. niższego napięcia jest rozwarne (czyli $I_2=0$). Prąd I_0 pobierany w stanie jałowym przy znamionowym napięciu w transformatorach 1-fazowych, wynosi najczęściej (5...10)% I_{1zn} .

W stanie jałowym $E_1 \approx U_{10}$, $E_2 = U_{20}$ więc przekładnia transformatora równa jest z dość dużą dokładnością stosunkowi wartości skutecznych napięć, wyznaczonych w stanie jałowym

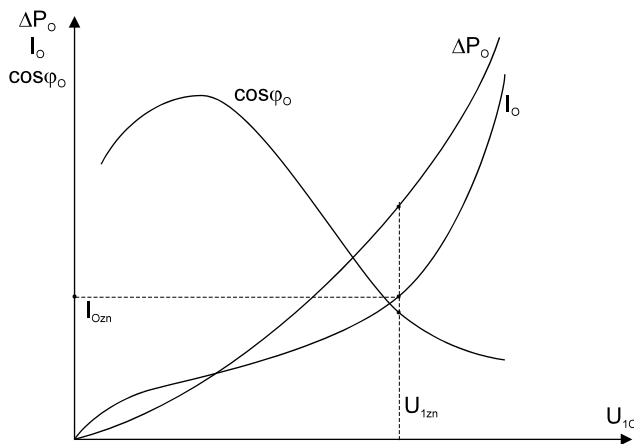
$$\mathfrak{G} = \frac{U_{10}}{U_{20}} \quad (5.6)$$

Przemienne strumień magnetyczny Φ_t powoduje powstanie w rdzeniu strat. Straty te wynikają z histerezy oraz z przepływu indukowanych prądów wirowych. Prądy wirowe powstają w przekrojach poprzecznych rdzenia i zależą od pola powierzchni tych przekrojów. Aby ograniczyć straty od prądów wirowych rdzeń wykonuje się z blach o jak najmniejszej grubości. Całość wyżej wymienionych strat nazywamy stratami w rdzeniu lub stratami jałowymi transformatora. Straty mocy w uzwojeniu pierwotnym ($R_1 I_0^2$) są bardzo małe

i można przyjąć, że cała moc czynna, jaką transformator pobiera w stanie jałowym, to moc strat w rdzeniu ΔP_0 . Straty te są w przybliżeniu proporcjonalne do kwadratu wartości skutecznej napięcia przyłożonego do transformatora. Z powyższego wynika, że $\Delta P_0 = cU_{10}^2$, czyli, że charakterystyka $\Delta P_0 = f(U_{10})$ przedstawia prawie dokładnie parabolę (rys. 5.3).

Prąd jałowy transformatora I_0 , równy prawie prądowi magnesującemu jest proporcjonalny do natężenia pola magnetycznego H , a napięcie U_0 proporcjonalne do amplitudy indukcji magnetycznej B_m czyli krzywa $I_0=f(U_{10})$ stanowi w przybliżeniu odpowiednik krzywej magnesowania $H=f(B)$. Przebieg krzywej $\cos\varphi_0=f(U_{10})$ wynika z przebiegu poprzednich charakterystyk. Współczynnik mocy w stanie jałowym wyrazić możemy następująco:

$$\cos\varphi_0 = \frac{\Delta P_0}{U_{10}I_0} = c \frac{U_{10}}{I_0} \quad (5.7)$$



Rys. 5.3. Charakterystyki stanu jałowego transformatora jednofazowego

5.1.2. Stan zwarcia pomiarowego

Próbie zwarcia pomiarowego transformatora przeprowadzamy w celu pomierzenia strat mocy w jego uzwojeniach oraz dla określenia napięcia zwarcia. Napięciem zwarcia transformatora nazywamy napięcie, jakie należy przyłożyć do zacisków uzwojenia pierwotnego, aby przy zwartych zaciskach uzwojenia wtórnego spowodować przepływ prądu znamionowego w obu

uzwojeniach. Napięcie zwarcia jest zwykle niewielkie i wynosi kilka lub kilkanaście procent napięcia znamionowego.

Straty w rdzeniu są w przybliżeniu proporcjonalne do kwadratu wartości skutecznej przyłożonego napięcia (kilka procent U_{1n}), więc straty te w czasie próby zwarcia są pomijalnie małe. Wobec powyższego moc pomierzona przy zwarcu pomiarowym jest praktycznie równa mocy traconej w uzwojeniach transformatora. Moc ta jest nazywana stratami obciążeniowymi i są one w praktyce - przy prądzie znamionowym - kilkakrotnie większe od strat jałowych transformatora.

Straty obciążeniowe w uzwojeniach można określić wzorem:

$$\Delta P_u = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 \quad (5.8)$$

gdzie:

I_1, I_2 - prądy fazowe pierwotny i wtórny; R_1, R_2 - rezystancje uzwojeń, mierzone prądem stałym, przeliczone na 75°C ;

Moc pobierana przy zwarcu ΔP_z praktycznie w całości pokrywa straty obciążeniowe w uzwojeniach, co pozwala na obliczenie rezystancji zwarcia transformatora.

$$R_z = \frac{\Delta P_z}{I_{1z}^2} \quad (5.9)$$

przy czym

$$R_z = R_1 + g^2 R_2 \quad (5.10)$$

Impedancja zwarcia transformatora

$$Z_z = \frac{U_{1z}}{I_{1z}} \quad (5.11)$$

Znając Z_z oraz R_z można obliczyć reaktancję zwarcia transformatora

$$X_z = \sqrt{Z_z^2 - R_z^2} \quad (5.12)$$

przy czym:

$$X_z = X_1 + g^2 X_2 \quad (5.13)$$

gdzie: X_1, X_2 - reaktancja uzwojeń pierwotnego i wtórnego.

Współczynnik mocy przy zwarcie pomiarowym:

$$\cos \varphi_z = \frac{\Delta P_z}{U_{1z} I_{1z}} \quad (5.14)$$

Jeżeli próba zwarcia pomiarowego przeprowadzana jest dla transformatora zimnego, rezystancję zwarcia należy przeliczyć na temperaturę Θ_{zn} , którą zazwyczaj przyjmuje się równą 75°C . Rezystancja zwarcia przeliczona będzie równa:

$$R_{z\Theta} = R_z \frac{235 + \Theta_{zn}}{235 + \Theta_0} \quad (5.15)$$

gdzie: Θ_0 - temperatura otoczenia.

Impedancja zwarcia przeliczona:

$$Z_{z\Theta} = \sqrt{R_{z\Theta}^2 + X_z^2} \quad (5.16)$$

Napięcie zwarcia:

$$U_z = Z_{z\Theta} I_{1zn} \quad (5.17)$$

Napięcie zwarcia wyrażone w procentach napięcia znamionowego:

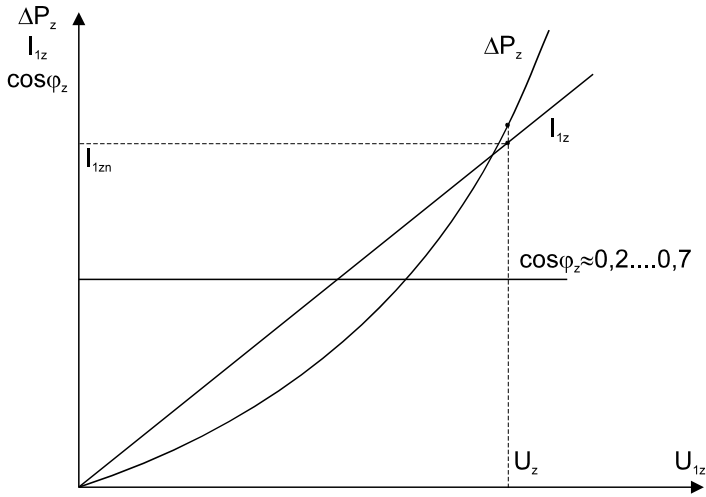
$$u_{z\%} = \frac{U_z}{U_{1zn}} 100\% \quad (5.18)$$

Współczynnik mocy przy zwarcu można wyrazić następująco:

$$\cos \varphi_z = \frac{R_z}{\sqrt{R_z^2 + X_z^2}} \quad (5.19)$$

Rezystancja i reaktancja obu uzwojeń są stałe w stanie zwarcia, a więc $\cos \varphi_z$ jest wielkością stałą, czyli charakterystyka $I_{1z}=f(U_{1z})$ ma przebieg prostoliniowy. Wartość $\cos \varphi_z$ zależy od mocy i konstrukcji transformatora.

Przykładowy przebieg charakterystyk zwarcia pomiarowego, przedstawiono na rys.5.4.



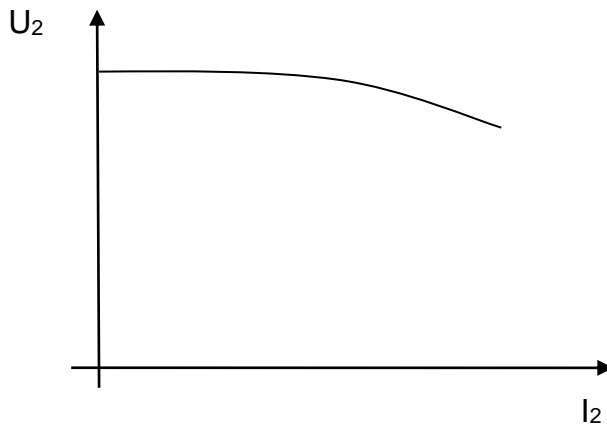
Rys. 5.4. Charakterystyki zwarcia pomiarowego transformatora jednofazowego

Straty mocy przy zwarcu, równe stratom w uzwojeniach, są proporcjonalne do kwadratu prądu I_{1z} , a prąd $I_{1z} = \frac{U_{1z}}{Z_z} = kU_{1z}$, czyli $\Delta P_z = kU_{1z}^2$, więc krzywa strat w funkcji napięcia jest parabolą.

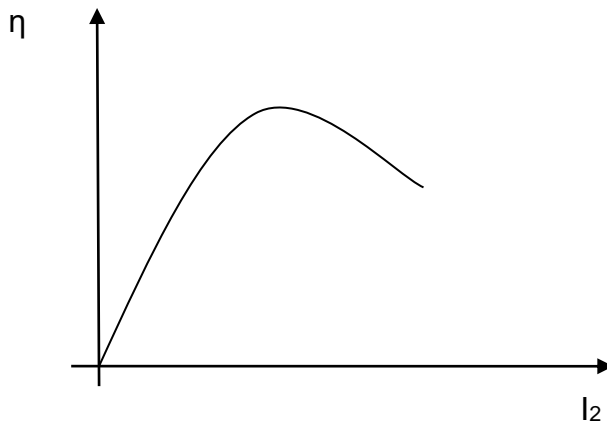
5.1.3. Stan obciążenia

W stanie obciążenia transformatora można wyznaczyć jego charakterystykę zewnętrzną oraz charakterystykę sprawności. Charakterystyką zewnętrzną transformatora nazywamy zależność napięcia na zaciskach uzwojenia wtórnego U_2 od prądu wtórnego I_2 przy $U_1=U_{1zn}=\text{const}$, $f=\text{const}$, $\cos\varphi_2=\text{const}$. Z przykładowego przebiegu tej charakterystyki przedstawionego na rys. 5.5, wynika, że przy wzroście prądu I_2 , napięcie U_2 maleje.

Sprawność transformatora można również wyznaczyć tzw. metodą strat poszczególnych. Moc czynna P_1 pobierana przez uzwojenie pierwotne jest równa sumie mocy czynnej P_2 , oddawanej przez uzwojenie wtórne oraz stratom mocy ΔP : w uzwojeniach ΔP_u (wyznaczonym podczas próby zwarcia) oraz w rdzeniu ΔP_0 (wyznaczonym podczas próby stanu jałowego).



Rys. 5.5. Charakterystyki zewnętrzne transformatora jednofazowego



Rys. 5.6. Charakterystyki sprawności transformatora jednofazowego

Straty mocy w transformatorze

$$\Delta P = \Delta P_0 + \Delta P_z \quad (5.20)$$

Sprawność transformatora

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} 100\% = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_0 + \Delta P_u} 100\% \quad (5.21)$$

Ponieważ moc strony wtórnej

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2 \quad (5.22)$$

wobec tego sprawność

$$\eta = \frac{U_2 I_2 \cos \varphi_2}{U_2 I_2 \cos \varphi_2 + \Delta P_0 + \Delta P_z} 100\% \quad (5.23)$$

Sprawność nowoczesnych transformatorów jest duża i zwykle przekracza 97%, w jednostkach wielkiej mocy dochodzi do 99%. Przykładowy przebieg krzywej sprawności przedstawiony jest na rys. 5.6. Krzywa sprawności ma pewne maksimum. Można dowiedzieć, że maksimum to wystąpi wówczas, gdy straty w uzwojeniach są równe stratom w rdzeniu, tzn. straty obciążeniowe równe stratom jałowym. Najczęściej maksimum zachodzi przy obciążeniach (40...60)% znamionowego. Przy obciążeniu znamionowym, tzn. dla $I_2 = I_{2zn}$, straty obciążeniowe są kilkakrotnie większe od strat jałowych.

5.2. Badania laboratoryjne

5.2.1. Oględziny i dane znamionowe

Należy zapoznać się z budową transformatora i zanotować jego dane znamionowe.

5.2.2. Pomiar rezystancji uzwojeń

Rezystancję uzwojeń należy pomierzyć mostkiem Thomsona.

Wyniki pomiarów:

Temperatura otoczenia	$\Theta_0 =$
Rezystancja uzwojenia pierwotnego	$R_1 = \dots$
Rezystancja uzwojenia wtórnego	$R_2 = \dots$

Zmierzone rezystancje należy przeliczyć na temperaturę 75°C wg wzoru

$$R_{75} = R \frac{235 + 75}{235 + \Theta_0} \quad (5.24)$$

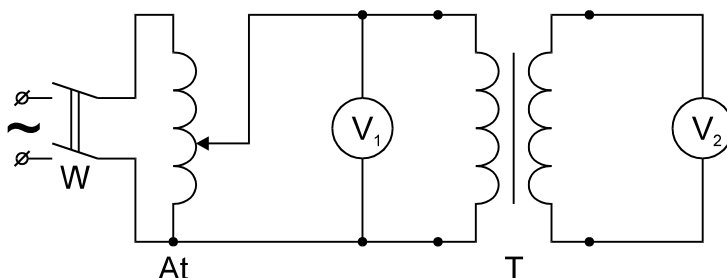
gdzie R - rezystancja danego uzwojenia w temperaturze otoczenia Θ_0 .

Wyniki obliczeń:

Rezystancja uzwojenia pierwotnego: $R_{1\theta} = \dots$
 Rezystancja uzwojenia wtórnego: $R_{2\theta} = \dots$

5.2.3. Pomiar przekładni

Pomiary należy wykonać wg schematu z rys.5.7. przy napięciu pierwotnym znamionowym, oraz przy napięciach różniących się od znamionowego o 5%. Na podstawie danych znamionowych należy obliczyć przekładnię znamionową transformatora i porównać ją z wartością przekładni obliczonej na podstawie pomiarów. Wyniki pomiarów oraz obliczeń zestawić w tabeli 5.1.



Rys. 5.7. Oznaczenia: V_1, V_2 - woltomierze; T - badany transformator; At - autotransformator.

Tabela 5.1.

Lp.	Pomiary		Obliczenia	
	U_1	U_2	$g_{\text{pom}} = \frac{U_1}{U_2}$	$g_{\text{zn}} = \frac{U_{1\text{zn}}}{U_{2\text{zn}}}$
	V	V	-	-
1				
2				
3				

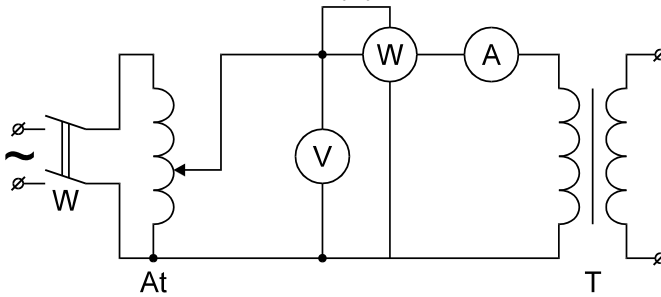
5.2.4. Próba stanu jałowego

Badanie transformatora w stanie jałowym należy wykonać w układzie przedstawionym na rys.5.8. Przy dobieraniu amperomierza i watomierza należy uwzględnić to, że prąd w stanie jałowym $I_0 = (0,05 \dots 0,1) I_{1\text{zn}}$. Ze względu na

znaczące przesunięcie fazowe pomiędzy napięciem i prądem wskazane jest zastosowanie watomierza o małym znamionowym współczynniku mocy.

Pomiary należy wykonać dla kilku wartości napięcia w granicach $(0...1,2)U_{zn}$. Jeden z pomiarów należy wykonać dla napięcia znamionowego. Na podstawie pomiarów obliczyć współczynnik mocy

$$\cos \varphi = \frac{\Delta P_0}{U_{10} I_0} \quad (5.25)$$



Rys. 5.8 Oznaczenia: A - amperomierz, W - watomierz, V - woltomierz;
At - autotransformator, T - badany transformator

Wyniki pomiarów i obliczeń zestawień w tabeli 5.2.

Tabela 5.2.

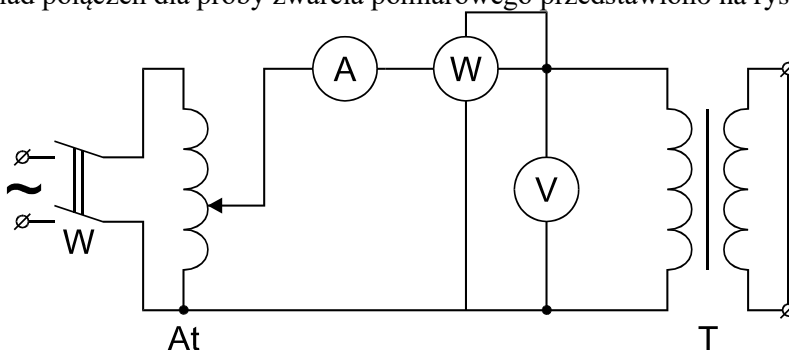
Lp.	Pomiary				Obliczenia	
	U ₁₀	ΔP ₀			I ₀	cos φ ₀ = $\frac{\Delta P_0}{U_{10} I_0}$
		α	k _w	P ₀		
	V	dz	W/dz	W	A	-
1.						
2.						
3.						
4.						
5.						
6.						
7.						
8.						
9.						
10.						

Na podstawie pomiarów i obliczeń wykreślić charakterystyki stanu jałowego:

$$\Delta P_0 = f(U_{10}); I_0 = f(U_{10}); \cos \varphi_0 = f(U_{10}).$$

5.2.5. Próba zwarcia pomiarowego

Układ połączeń dla próby zwarcia pomiarowego przedstawiono na rys. 5.9.



Rys. 5.9. Oznaczenia: A - amperomierz, W - watomierz, V - woltomierz; At - autotransformator, T - badany transformator

Uzwojenie wtórne) zwieramy krótkim przewodem o dużym przekroju, a do uzwojenia pierwotnego doprowadzamy napięcie z autotransformatora. Napięcie to regulujemy tak, aby prąd zmieniał się w granicach $(0,2...1,2)I_{zn}$. Jeden z pomiarów należy wykonać dla prądu znamionowego. Wyniki pomiarów i obliczeń zestawić w tabeli 5.3.

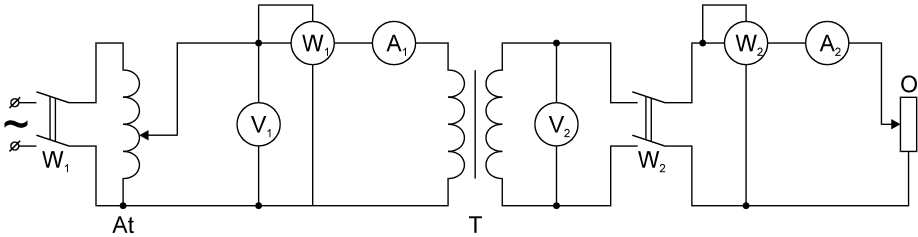
Tabela 5.3.

Lp.	Pomiary					Obliczenia							
	U_{1z}	I_{1z}	ΔP_z			R_z	Z_z	X_z	$\cos \varphi_z$	$R_{z\theta}$	$Z_{z\theta}$	U_z	u_z
			α	k_w	ΔP_z								
V	A	dz	W/dz	W	Ω	Ω	Ω	-	Ω	Ω	V	%	
1.													
2.													
3.													
4.													
5.													
6.													
7.													
8.													
9.													
10.													

Na podstawie pomiarów i obliczeń wykreślić charakterystyki zwarcia pomiarowego: $I_{1z}=f(U_{1z})$; $\Delta P_z=f(U_{1z})$; $\cos \varphi_z=f(U_{1z})$.

5.2.6. Wyznaczenie charakterystyki zewnętrznej

Charakterystykę należy wyznaczyć w układzie przedstawionym na rys.5.10.



Rys. 5.10. Oznaczenia: A_1, A_2 - amperomierze, W_1, W_2 - watomierze, V_1, V_2 - woltomierze, At - autotransformator, T - badany transformator, O - odbiornik

Zamykamy wyłącznik w_1 i nastawiamy napięcie znamionowe na uzwojeniu pierwotnym pilnując tej wartości przez cały czas pomiarów. Następnie zamykamy wyłącznik w_2 i zmniejszamy rezystancję odbiornika, zwiększając stopniowo prąd.

Należy wykonać kilka pomiarów dla prądu I_2 w granicach $(0,2...1,2)I_{2zn}$.

Tabela 5.4.

Lp.	Pomiary									Obliczenia			
	U_1	I_1	P_1			U_2	I_2	P_2			$\cos \varphi_1$	$\cos \varphi_2$	η
			α	k_w	P_1			α	k_w	P_2			
	V	A	dz	W/dz	W	V	A	dz	W/dz	W	-	-	%
1.													
2.													
3.													
4.													
5.													
6.													
7.													
8.													
9.													
10.													

Na podstawie pomiarów obliczyć $\cos \varphi_1$, $\cos \varphi_2$, oraz sprawność transformatora η , według wzorów:

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{U_1 I_1} \quad (5.26)$$

$$\cos \varphi_2 = \frac{P_2}{U_2 I_2} \quad (5.27)$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} 100\% \quad (5.28)$$

Wyniki pomiarów i obliczeń zestawić w tabeli 5.4.

Na podstawie pomiarów wykreślić charakterystyki zewnętrzną i sprawności transformatora.

5.2.7. Określenie sprawności metodą strat poszczególnych

Przyjmując stałą wartość $U_2=U_{2zn}$, należy określić sprawność transformatora dla $\cos\varphi_2=1,0$ oraz $\cos\varphi_2=0,8$ ind. uwzględniając straty wyznaczone podczas prób stanu jałowego i zwarcia pomiarowego. Straty w uzwojeniach ΔP_z należy odczytać z próby zwarcia pomiarowego dla kilku wartości prądu w granicach $(0,2\dots1,2)I_{2zn}$, biorąc pod uwagę, że $I_2 = I_1 \cdot \vartheta$. Straty w rdzeniu przyjąć stałe i równe stratom w rdzeniu przy znamionowym napięciu pierwotnym. Obliczenia wykonać dla $\cos \varphi_2=1$ i $\cos \varphi_2=0,8$

Wyniki obliczeń umieścić w tabeli 5.5.

Tabela 5.5.

L.p.	U_{2n}	I_1	I_2	ΔP_z	ΔP_0	$\cos \varphi_2$	η
	V	A	A	W	W	-	%
1.							
2.							
3.							
4.							
5.							
6.							
7.							
8.							
9.							
10.							

Na podstawie obliczeń wykreślić charakterystyki sprawności transformatora. Sprawność obliczyć ze wzoru (5.23).

5.3. Uwagi i wnioski

W dyskusji wyników pomiarów należy przede wszystkim zwrócić uwagę na otrzymane charakterystyki zewnętrzne i charakterystyki sprawności transformatora. Sprawdzić, czy krzywe sprawności osiągają maksimum w punkcie, dla którego straty obciążeniowe są równe stratom jałowym oraz wyznaczyć przy jakim obciążeniu (w procentach prądu znamionowego) występuje maksimum krzywej sprawności. Porównać sprawność obliczoną metodą strat poszczególnych ze sprawnością wyznaczoną w p. 5.2.6.

Literatura

- [1] E. Koziej, B. Sochoń: Elektrotechnika i elektronika, PWN 1975
- [2] Praca zbiorowa: Elektrotechnika i Elektronika dla nieelektryków, WNT Warszawa 2000.
- [3] E. Jezierski: Transformatory - Budowa i projektowaniem, WNT, 1963,
- [4] Laboratorium elektrotechniki pod redakcją R. Nowicza, Politechnika Łódzka 1993.