

Zespół Szkół Technicznych im. J. i J. niadeckich w Grudzi dzu



Laboratorium Elektryczne . Pracownia Automatyki i
Robotyki (s.48)

Instrukcja Laboratoryjna: **4. Badanie transformatora jednofazowego**

Opracował mgr inż. Marcin Jabłoński

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. Ogólne 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 metodami strat poszczególnych

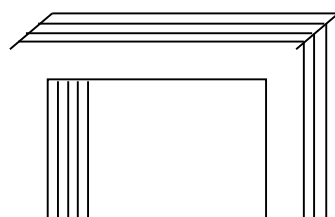
5.3. Uwagi i wnioski

5.1. Wiadomości ogólne

5.1.1. Budowa i zasada działania

Transformatorem nazywamy urządzenie służące do zmiany wartości napięcia i natężenia 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.

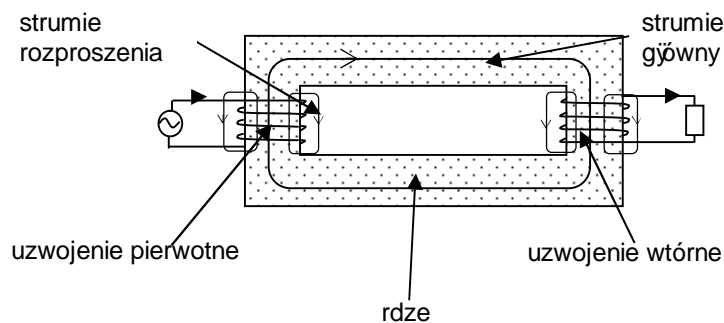
Uzwojenia transformatora, pokazane na rys. 5.2., wykonane są z miedzi elektrolitycznej (niekiedy z aluminium). Uzwojenia górnego (wyższego) napięcia nawijane są drutem okrągłym w izolacji emaliowanej (lub bawełnianej) lub profilowym w izolacji papierowej, a uzwojenia dolnego (niższego) napięcia nawijane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

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 zacząpów, umieszczonego w kadzi transformatora. Regulacja ta może odbywać się pod obciążeniem lub bez obciążenia, tzn. po uprzednim odciążeniu 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 obydwa 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 występuje strumień rozproszenia, które są skojarzone tylko z jednym uzwojeniem; pierwotnym lub wtórnym. Na ogół w transformatorach strumień rozproszenia stanowi kilka procent strumienia głównego. W najnowszych transformatorach obwód magnetyczny jest prawie idealny i dlatego strumień rozproszenia jest niewielki, czyli można przyjąć, że całe strumień $\Phi(t)$ skojarzony jest z obu uzwojeniami. Przemienny strumień magnetyczny wzniciwa 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 ó liczba zwojów uzwojenia pierwotnego, z_2 ó 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:

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

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} .

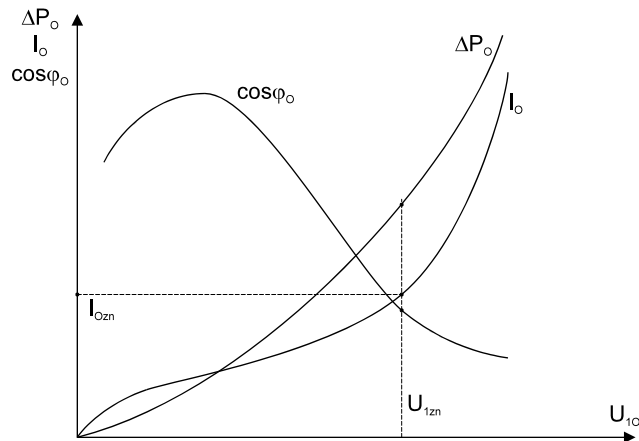
W stanie jałowym $E_1 \approx U_{10}$, $E_2 = U_{20}$ więc przekładnia transformatora równa jest z dokładnością do stosunku wartości skutecznych napięć, wyznaczonych w stanie jałowym

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

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 rdzenie wykonuje się z blach o jak najmniejszej grubości. Całkowicie wymienione straty 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 przyłączonego do transformatora. Z powyższego wynika, że $\Delta P_0 = c U_{10}^2$, 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

Prób 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 zwarcium 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 zwarcium 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

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

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:

$$X_z = X_1 + 9^2 X_2 \quad (5.13)$$

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

Współczynnik mocy przy zwarciu pomiarowym:

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

Jeśli 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:

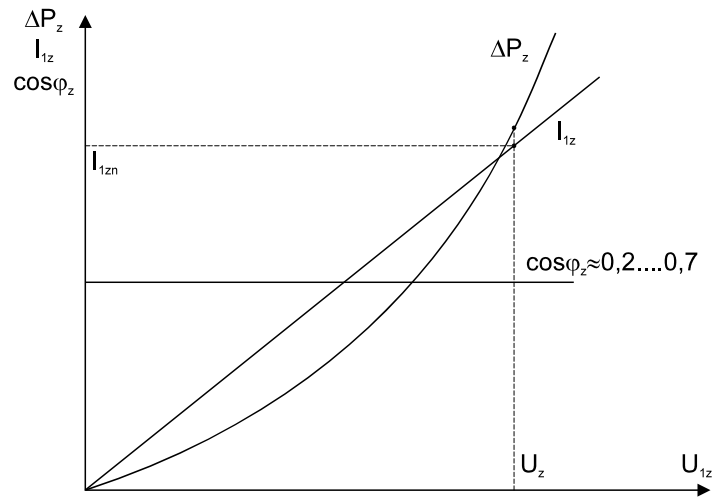
$$u_{z\%} = \frac{U_z}{U_{1zn}} 100\% \quad (5.18)$$

Współczynnik mocy przy zwarciu 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.



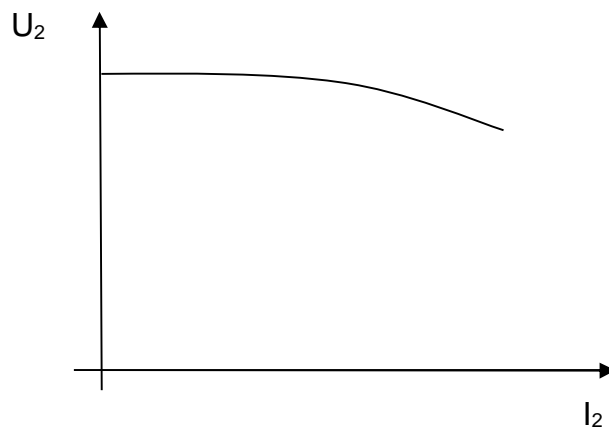
Rys. 5.4. Charakterystyki zwarcia pomiarowego transformatora jednofazowego

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.

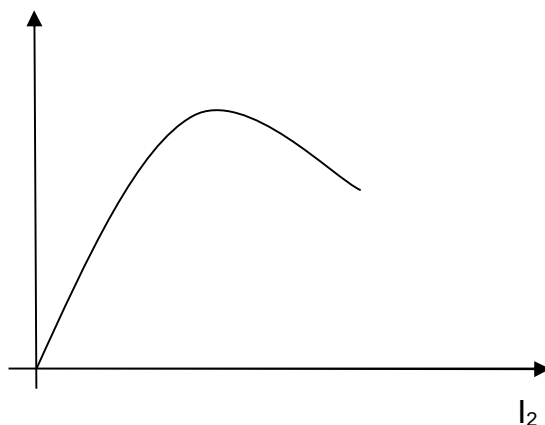
5.1.3. Stan obciążenia

W stanie obciążenia transformatora można wyznaczyć jego charakterystykę zewnętrzną oraz charakterystykę sprawności. Charakterystykę zewnętrzną transformatora nazywamy zależnością 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

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

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 się, że maksimum to występuje wówczas, gdy straty w uzwojeniach są równe stratom w rdzeniu, tzn. straty obciążeniowe są 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. Ogólne 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 nale y przeliczy na temperatur 75°C wg wzoru

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

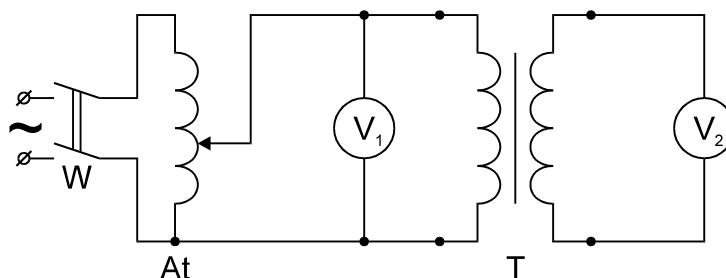
gdzie R - rezystancja danego uzwojenia w temperaturze otoczenia Θ_0 .

Wyniki oblicze :

Rezystancja uzwojenia pierwotnego:	$R_1 = \dots$
Rezystancja uzwojenia wtórnego:	$R_2 = \dots$

5.2.3. Pomiar przekładni

Pomiary nale y wykona wg schematu z rys.5.7. przy napi ciu pierwotnym znamionowym, oraz przy napi ciach ró ni cych si od znamionowego o 5%. Na podstawie danych znamionowych nale y obliczy przekładni znamionow transformatora i porówna j z warto ci przekładni obliczonej na podstawie pomiarów. Wyniki pomiarów oraz oblicze zestawí w tabeli 5.1.



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

Tabela 5.1.

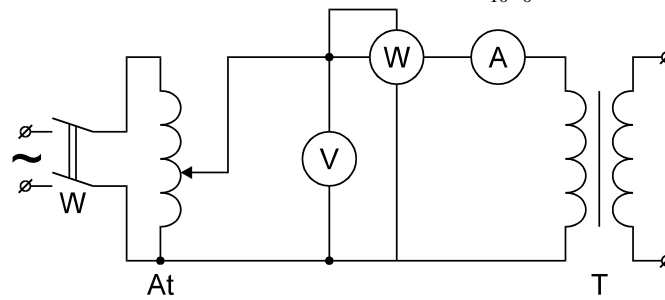
Lp.	Pomiary		Obliczenia	
	U_1	U_2	$\mathcal{G}_{pom} = \frac{U_1}{U_2}$	$\mathcal{G}_{zn} = \frac{U_{1zn}}{U_{2zn}}$
	V	V	-	-
1				
2				
3				

5.2.4. Próba stanu jaćowego

Badanie transformatora w stanie jaćowym nale y wykona w układzie przedstawionym na rys.5.8. Przy dobieraniu amperomierza i watomierza nale y uwzgl dni to, e pr d w stanie jaćowym $I_0 = (0,05 \dots 0,1) I_{1zn}$. Ze wzgl du na znaczne przesuni cie fazowe pomi dzy napi ciami i pr dem wskazane jest zastosowanie watomierza o maćym 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 obliczenia zestawiać w tabeli 5.2.

Tabela 5.2.

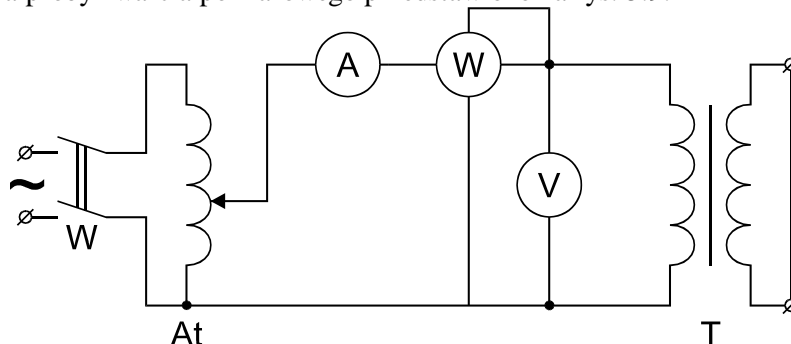
Lp.	Pomiary				Obliczenia	
	U ₁₀	ΔP ₀				I ₀
		α	k _w	P ₀		
		V/dz	W/dz	W		
V	dz	W/dz	W	A	-	
1.						
2.						
3.						
4.						
5.						
6.						
7.						
8.						
9.						
10.						

Na podstawie pomiarów i obliczenia wykreśli 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 pomiarowy 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 du ym przekroju, a do uzwojenia pierwotnego doprowadzamy napi cie z autotransformatora. Napi cie to regulujemy tak, aby pr d zmieniał si w granicach $(0,2...1,2)I_{zn}$. Jeden z pomiarów nale y wykona dla pr du znamionowego. Wyniki pomiarów i oblicze zestawia w tabeli 5.3.

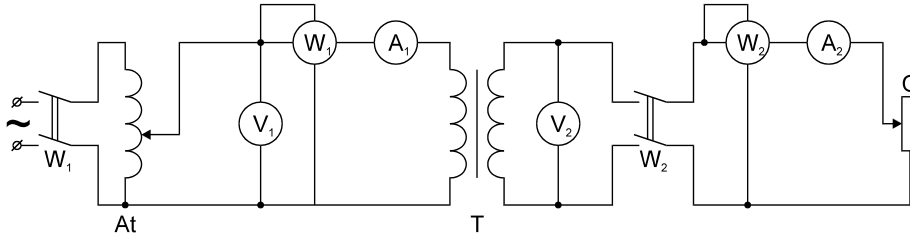
Tabela 5.3.

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	P_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 oblicze wykre li charakterystyki zwarcia pomiarowego: $I_{1z}=f(U_{1z})$; $P_z=f(U_{1z})$; $\cos \varphi_z=f(U_{1z})$.

5.2.6. Wyznaczenie charakterystyki zewn trznej

Charakterystyk nale y wyznaczy w uk łdzie przedstawionym na rys.5.10.



Rys. 5.10. Oznaczenia: A₁, A₂ - amperomierze, W₁, W₂ - watomierze, V₁, V₂ - woltomierze, At - autotransformator, T - badany transformator, O - odbiornik

Zamykamy wy €cznik w₁ i nastawiamy napi cie znamionowe na uzwojeniu pierwotnym pilnuj c tej warto ci przez ca ł czas pomiarów. Nast pnie zamykamy wy €cznik w₂ i zmniejszamy rezystancj odbiornika, zwi kszaj c stopniowo pr d.

Nale y wykona kilka pomiarów dla pr du I₂ 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 φ ₁	cos φ 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 obliczy cos φ₁, cos φ₂, oraz sprawno transformatora η, wed łg 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 oblicze zestaw i w tabeli 5.4.

Na podstawie pomiarów wykre li charakterystyki zewn trzn i sprawno ci transformatora.

5.2.7. Okre lenie sprawno ci metod strat poszczególnych

Przyjmując stałą wartość $U_2=U_{2zn}$, należy określić sprawność transformatora dla $\cos\varphi_2=1,0$ oraz $\cos\varphi_2=0,8$ i udzielić odpowiedzi na pytania: jak zmieniają się straty wyznaczone podczas prób stanu jałowego i zwarcia pomiarowego. Straty w uzwojeniach P_z należy odczytać z próby zwarcia pomiarowego dla kilku wartości prądu w granicach $(0,2...1,2)I_{2zn}$, biorąc pod uwagę, że $I_2 = I_1 \cdot \vartheta$. Straty w rdzeniu przyjmij stałe i równe stratom w rdzeniu przy znamionowym napięciu pierwotnym. Obliczenia wykonaj dla $\cos\varphi_2=1$ i $\cos\varphi_2=0,8$.

Wyniki obliczeń umieść w tabeli 5.5.

Tabela 5.5.

L.p.	U_{2n}	I_1	I_2	P_z	P_0	$\cos\varphi_2$	
	V	A	A	W	W	-	%
1.							
2.							
3.							
4.							
5.							
6.							
7.							
8.							
9.							
10.							

Na podstawie obliczeń wykreśl charakterystyki sprawności transformatora. Sprawność obliczaj 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. Sprawdź, czy krzywe sprawności osiągnęły maksimum w punkcie, dla którego straty obciążeniowe są równe stratom jałowym oraz wyznacz przy jakim obciążeniu (w procentach prądu znamionowego) występuje maksimum krzywej sprawności. Porównaj sprawność obliczoną metodą strat poszczególnych ze sprawnością wyznaczoną w p. 5.2.6.

Literatura

- [1] E. Koziej, B. Socho : 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/ódzka 1993.