

Ćwiczenie 6

TRANSFORMATORY JEDNOFAZOWE

Wiadomości ogólne

Transformatory są urządzeniami służącymi do przetwarzania energii prądu przemiennego o danym napięciu, na energię prądu przemiennego o innym napięciu. Transformatory jednofazowe są powszechnie stosowane jako urządzenia dopasowujące napięcie sieci 220 V (rzadziej 380 V) do napięć narzucanych przez odbiorniki, np. transformatory zasilające układy prostownikowe do ładowania akumulatorów, transformatory bezpieczeństwa (220/24 V) do zasilania odbiorników przenośnych, transformatory zasilające układy elektroniczne, transformatory w spawarkach i zgrzewarkach. Występują również w technice transformatory jednofazowe przeznaczone tylko do celów pomiarowych. Są to przekładniki napięciowe i prądowe. Odmianą transformatorów są autotransformatory, które budowane są zazwyczaj z płynną regulacją napięcia wyjściowego od 0 ÷ 250 V przy zasilaniu napięciem 220 V.

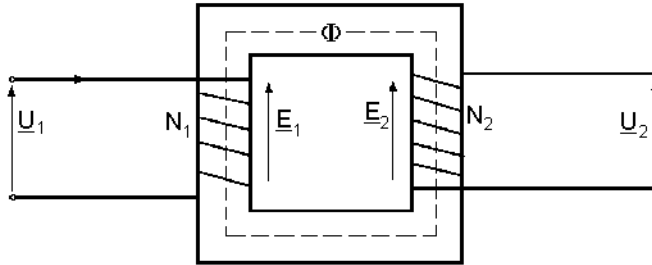
1. Transformator jednofazowy

1.1. Budowa i zasada działania

Transformator składa się z obwodu magnetycznego oraz dwóch uzwojeń nie połączonych galwanicznie.

W obecnie budowanych transformatorach obwód magnetyczny - rdzeń, wykonuje się z blachy elektrotechnicznej, (z dodatkiem krzemu - 2,5 ÷ 4,5%) walcowanej na zimno (tzw. blachy transformatorowej) o grubości około 0,3 mm z izolacją tlenkową. Blacha zimnowalcowana charakteryzuje się, przy strumieniu skierowanym wzdłuż kierunku walcowania, dużą przenikalnością magnetyczną μ_{Fe} oraz małą stratnością (około 0,6 W/kg). Dodatek krzemu oraz podział rdzenia na izolowane blachy, powodują zmniejszenie strat mocy czynnej w rdzeniu wskutek prądów wirowych.

Uzwojenie zasilane z sieci nazywa się uzwojeniem pierwotnym, natomiast zasilające odbiornik nazywa się uzwojeniem wtórnym (rys. 6.1).



Rys. 6.1. Szkic ideowy transformatora jednofazowego

W transformatorach wykorzystane jest zjawisko indukcji elektromagnetycznej polegające na indukowaniu siły elektromotorycznej e w uzwojeniu o ilości zwojów N przez wnętrze którego przenika zmienny strumień Φ :

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} . \quad (6.1)$$

Uzwojenie pierwotne zasilane napięciem przemiennym wzbudza w rdzeniu przemienny strumień magnetyczny:

$$\Phi_t = \Phi_m \sin \omega t , \quad (6.2)$$

który indukuje w obu uzwojeniach przemienne siły elektromotoryczne E_1 i E_2 o wartościach skutecznych:

$$E_1 = 4,44 \cdot f \cdot N_1 \cdot \Phi_m , \quad (6.3)$$

$$E_2 = 4,44 \cdot f \cdot N_2 \cdot \Phi_m , \quad (6.4)$$

gdzie: N_1, N_2 - liczby zwojów szeregowych, odpowiednio uzwojenia pierwotnego i wtórnego,

Φ_m - amplituda strumienia magnetycznego zmieniającego się sinusoidalnie,

$$\Phi_m = S_{Fe} \cdot B_m , \quad (6.5)$$

gdzie: S_{Fe} - powierzchnia przekroju stali rdzenia,

B_m - amplituda indukcji magnetycznej; dla blachy walcowanej na zimno,

$B_m = (1,4 \div 1,6)$ T (średnio 1,5 T), dla blachy walcowanej na gorąco,

$B_m = (1,2 \div 1,4)$ T (średnio 1,3 T).

Przekładnia transformatora ϑ :

$$\vartheta = \frac{E_1}{E_2} = \frac{4,44 \cdot f \cdot N_1 \cdot \Phi_m}{4,44 \cdot f \cdot N_2 \cdot \Phi_m} = \frac{N_1}{N_2} . \quad (6.6)$$

Zgodnie z (6.1), ważną właściwością transformatora jest to, że nie przekazuje on ze strony zasilania na stronę odbioru składowej stałej prądu i dlatego może służyć do jej eliminacji.

W pracy transformatora można wyróżnić trzy charakterystyczne stany:

- jałowy,
- zwarcia,
- obciążenia.

1.2. Stan jałowy

Stan jałowy ma miejsce, gdy uzwojenie pierwotne zasilane jest napięciem znamionowym a uzwojenie wtórne - otwarte ($I_2 = 0$). W badaniach laboratoryjnych stan jałowy transformatora wykorzystuje się do wyznaczania przekładni napięciowej ϑ_u , prądu stanu jałowego I_0 oraz strat mocy czynnej P_{Fe} w stali rdzenia.

$$\vartheta_u = \frac{U_{10}}{U_{20}} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} , \quad (6.7)$$

ponieważ przy $I_2 = 0$; $U_{20} = E_2$, natomiast

$$\underline{U}_{10} = \underline{E}_1 + \underline{I}_0 \underline{R}_1 + j \underline{I}_0 \underline{X}_1 . \quad (6.8)$$

Prąd stanu jałowego I_0 z uwagi na bardzo małe szczeliny powietrzne w rdzeniu i wykonanie go z ferromagnetyka o dużej przenikalności magnetycznej jest mały, ($I_0 = (2 \div 8) \% I_{1n}$).

$$\underline{I}_0 = \underline{I}_{0cz} + \underline{I}_\mu . \quad (6.9)$$

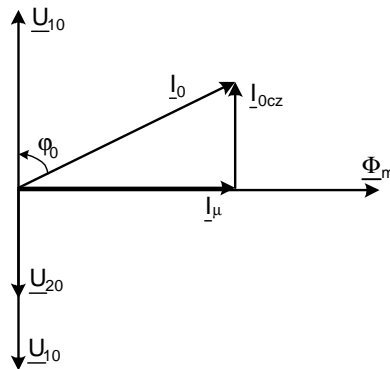
Składowa czynna I_{0cz} charakteryzuje straty mocy czynnej w stali rdzenia, (strata mocy w uzwojeniu pierwotnym $I_0^2 R_1$ - pomijalnie mała) które są praktycznie zależne od kwadratu napięcia zasilającego U_1 .

$$P_0 = U_1 \cdot I_{0cz} \approx P_{Fe} = C_{Fe} \cdot U_1^2 . \quad (6.10)$$

Składowa bierna I_μ nazywana prądem magnesującym wzbudza w rdzeniu strumień magnetyczny Φ_m (rys. 6.2)

$$\Phi_m = \frac{I_{\mu m} \cdot N_1}{R_\mu} = \frac{I_{\mu m} \cdot N_1}{I_{sr}} \mu \cdot S_{Fe} . \quad (6.11)$$

W transformatorach amplituda strumienia Φ_m zgodnie z (6.3) i (6.8) zależy od wartości napięcia zasilającego, natomiast amplituda prądu magnesującego $I_{\mu m}$ potrzebnego na jego wytworzenie zgodnie z (6.11) zależy od wymiarów geometrycznych (I_{sr} , S_{Fe}) a szczególnie od materiału (μ) z jakiego wykonany jest rdzeń.



Rys. 6.2. Wykres wskazowy stanu jałowego transformatora

W badaniach eksploatacyjnych, próbę stanu jałowego przeprowadza się do oceny stanu technicznego transformatora a szczególnie do stwierdzenia powstałych zwarc zwojowych i poprawności montażu rdzenia.

Zwarcie zwojowe w uzwojeniu pierwotnym powoduje wzrost napięcia na wyjściu, natomiast zwarcie zwojowe po stronie wtórnej powoduje obniżenie napięcia na wyjściu. W obu przypadkach zwarc zwojowych następuje wzrost prądu stanu jałowego transformatora.

1.3. Stan zwarcia

W badaniach laboratoryjnych przeprowadza się próbę zwarcia pomiarowego.

W eksploatacji transformatora mogą występować zwarcia zwane zwarciami ruchowymi.

Zwarcie pomiarowe przeprowadza się napięciem obniżonym, nazywanym napięciem zwarcia pomiarowego, przy którym prądy w obu uzwojeniach osiągają wartości znamionowe.

Próba taka ma na celu:

- 1) wyznaczenie procentowego napięcia zwarcia,

$$u_{z\%} = \frac{U_z}{U_{1n}} 100\% , \quad (6.12)$$

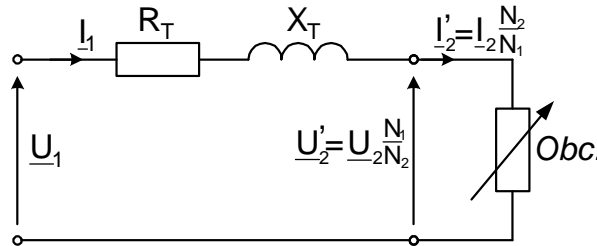
które jest niewielkie i wynosi: $u_{z\%} = 3 \div 15\% U_{1n}$ (np. dla transformatorów TON o mocach $40 \div 1600$ kVA i $U_1 = 6$ kV, $u_{z\%} = 4,5\%$),

- 2) wyznaczenie strat mocy czynnej w uzwojeniach, które odpowiadają znamionowemu obciążeniu,

$$P_z = I_{1n}^2 R_1 + I_{2n}^2 R_2 = I_{1n}^2 R_T . \quad (6.13)$$

Straty mocy czynnej w stali rdzenia z uwagi na niskie napięcie zasilające są pomijalnie małe (6.10),

- 3) wyznaczenie parametrów uproszczonego schematu zastępczego transformatora (rys.6.3).



Rys. 6.3. Uproszczony schemat zastępczy transformatora

$$Z_T = \frac{U_z}{I_{1n}} , \quad (6.14)$$

$$\cos \varphi_z = \frac{P_z}{U_z I_{1n}} , \quad (6.15)$$

$$R_T = Z_T \cos \varphi_z ; \quad X_T = Z_T \sin \varphi_z . \quad (6.16)$$

Zwarcie strony wtórnej przy znamionowym napięciu zasilającym nazywane jest zwarcie ruchowym - eksploatacyjnym. Prądy zwarcia ruchowego można wyznaczyć z zależności:

$$I_{1z} = I_{1n} \frac{100\%}{u_{z\%}} ; \quad I_{2z} = I_{1z} \vartheta . \quad (6.17)$$

Znajomość prądu I_{1z} ($I_{1z} = 7 \div 33 I_{1n}$) pozwala ustalić zabezpieczenia transformatora przed skutkami zwarcia ($7 I_{1n}$ - jednostki małej mocy, $33 I_{1n}$ - jednostki bardzo dużej mocy).

1.4. Obciążenie transformatora

W transformatorze obciążonym moce pozorne po obu stronach są praktycznie równe:

$$U_1 I_1 = S_1 \approx S_2 = U_2 I_2, \quad (6.18)$$

równe są także amperozwoje:

$$I_1 N_1 \approx I_2 N_2, \quad (6.19)$$

$$I_1 \approx I_2 \frac{N_2}{N_1} = I_2 \frac{1}{\vartheta} = I_2' . \quad (6.20)$$

Moc transformatora jest związana z przekrojem rdzenia zależnością:

$$S_{Fe} = C \sqrt{\frac{S}{f}}, \quad (6.21)$$

w której:

S_{Fe} - powierzchnia przekroju stali kolumny rdzenia w cm^2 ,

S - moc transformatora w $\text{V}\cdot\text{A}$,

f - częstotliwość napięcia zasilającego w Hz ,

C - stała, zawiera się w granicach $3,5 \div 6$.

Najczęściej stała C jest zbliżona do 5.

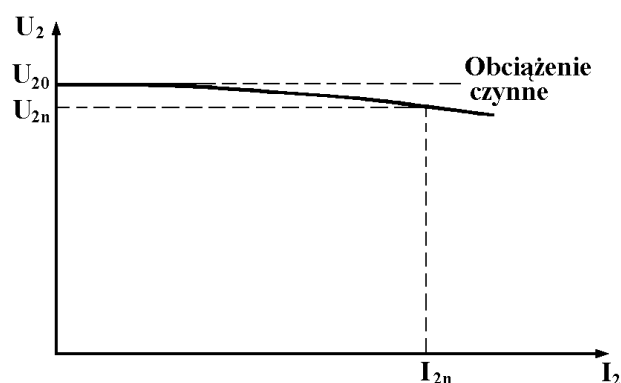
Przy stałym napięciu zasilającym U_1 , napięcie strony wtórnej U_2 nieznacznie zmienia się wraz z obciążeniem:

$$\underline{U}_1 = \vartheta \underline{U}_2 + \underline{I}_1 R_T + j \underline{I}_1 X_T \quad (6.22)$$

Zależność $U_2 = f(I_2)$ przy $U_1 = \text{const.}$ i $\cos\varphi_2 = \text{const.}$ nazywa się charakterystyką zewnętrzną transformatora (rys. 6.4). Zmienność napięcia wyjściowego przy przejściu transformatora od stanu jałowego do obciążenia znamionowego jest niewielka, wynosi kilka procent i jest zależna od charakteru obciążenia R, L, C .

$$\sigma_{u2\%} = \frac{U_{20} - U_{2n}}{U_{20}} 100\% . \quad (6.23)$$

Sprawności transformatorów z uwagi na brak części wirujących są dość wysokie i wynoszą około 80 % dla jednostek małej mocy oraz do 99 % dla jednostek dużej mocy.



Rys. 6.4. Charakterystyka zewnętrzna transformatora

2. Autotransformator

Autotransformator w odróżnieniu od transformatora posiada tylko jedno uzwojenie, część którego stanowi uzwojenie wtórne (rys. 6.5). Z uwagi na metaliczne połączenie strony pierwotnej i wtórnej, autotransformatory mogą być wykorzystywane do zasilania odbiorników w zasadzie tylko przy niskim napięciu nie przekraczającym 250 V. Do celów laboratoryjnych najczęściej autotransformatory budowane są na napięcie pierwotne 220 V, natomiast napięcie wtórne regulowane od 0 ÷ 250 V. W części uzwojenia BC występuje różnica prądów I_1 i I_2 , zatem ta część uzwojenia może być wykonana przewodem o odpowiednio mniejszej powierzchni przekroju.

Przekładnia autotransformatora wynosi;

$$\vartheta = \frac{U_{10}}{U_{20}} \approx \frac{N_1}{N_2} \quad (6.24)$$

W autotransformatorze rozróżnia się dwie moce:

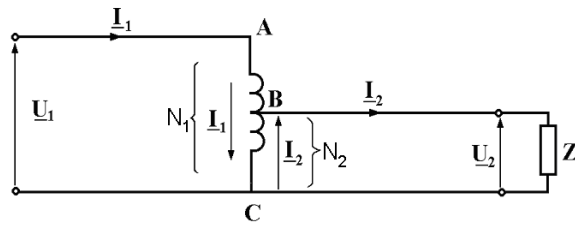
moc przechodnia -

$$S_p = U_1 \cdot I_1 \approx U_2 \cdot I_2, \quad (6.25)$$

oraz moc własna -

$$S_w = I_1(U_1 - U_2), \quad (6.26)$$

która decyduje o wymiarach, masach rdzenia i uzwojeń autotransformatora.



Rys. 6.5. Autotransformator jednofazowy

3. Przekładnik prądowy

Przekładnik prądowy przeznaczony jest do poszerzania zakresów pomiarowych mierników (amperomierzy, watomierzy, liczników energii) jak również do umożliwienia pomiarów tych wielkości w układach wysokonapięciowych w bezpieczny sposób.

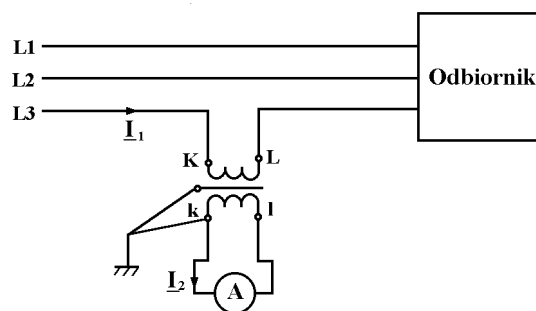
Przekładnik prądowy włącza się do sieci szeregowo z odbiornikiem podobnie jak amperomierz (rys. 6.6). Uzwojenie wtórne jak również rdzeń są uziemione.

Przekładnik prądowy, z uwagi na małą wartość impedancji mierników, pracuje podobnie jak transformator w stanie zwarcia, dla którego obowiązuje zależność:

$$I_1 \cdot N_1 = I_2 \cdot N_2 \quad (6.27)$$

Przekładnia prądowa przekładnika:

$$\vartheta_i = \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad (6.28)$$



Rys. 6.6. Pomiar prądu z wykorzystaniem przekładnika prądowego

W czasie pracy przekładnika (obwód wtórny zamknięty), strumień w rdzeniu jest bardzo mały. Przerwa w obwodzie wtórnym przekładnika powoduje wzrost strumienia w rdzeniu do wartości:

$$\Phi_m = \frac{\sqrt{2}I_1 \cdot N_1}{R_\mu}, \quad (6.29)$$

gdyż $I_2 \cdot N_2 = 0$, w następstwie czego w obwodzie tym pojawia się znaczne napięcie mogące zniszczyć izolacje uzwojeń, jak również zagrażać bezpieczeństwu obsługi. Prąd wtórny przekładników technicznych wynosi 5 A, pierwotny natomiast do kilku tysięcy A, w zależności od potrzeb.

4. Wykonanie ćwiczenia

4.1. Badanie transformatora jednofazowego

Dane znamionowe:

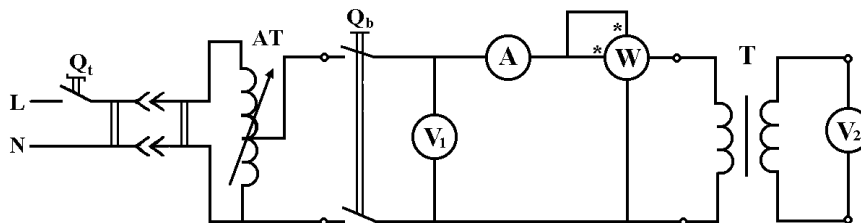
Należy zapoznać się z budową transformatora, podstawowe dane znamionowe zestawić w tabeli 6.1.

Tabela 6.1.

S_n	U_{1n}	I_{1n}	U_{20}	I_{2n}
VA	V	A	V	A

4.1.1. Próba stanu jałowego

Zestawić układ pomiarowy przedstawiony na rys. 6.7. Próbę przeprowadzić przy znamionowym napięciu U_{1n} . Wyniki pomiarów i obliczeń zestawić w tabeli 6.2.



Rys. 6.7. Układ pomiarowy do próby stanu jałowego transformatora

Tabela 6.2.

Pomiary				Obliczenia			
U_{10}	I_0	P_0	U_{20}	ϑ_u	I_0	ΔP_0	$\cos\varphi_0$
V	A	W	V	-	%	%	-

Poszczególne wielkości obliczyć z zależności:

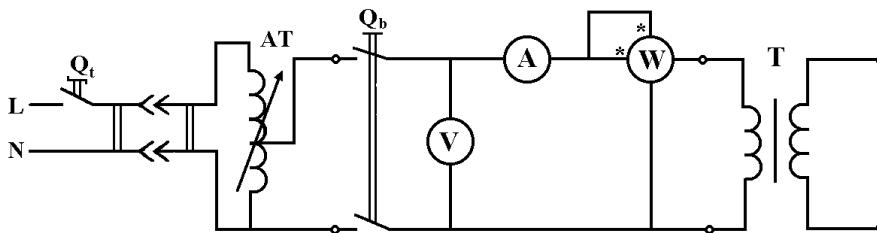
$$\vartheta_u = \frac{U_{10}}{U_{20}}; \quad I_{0\%} = \frac{I_0}{I_{1n}} 100 \% ; \quad \Delta P_{0\%} = \frac{P_0}{S_n} 100 \% ,$$

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{U_{10} \cdot I_0} .$$

Przeprowadzić dyskusję otrzymanych wyników oraz narysować wykres wskazowy dla tego stanu pracy transformatora.

4.1.2. Próba zwarcia pomiarowego

Zestawić układ pomiarowy przedstawiony na rys. 6.8 dobierając odpowiednio zakresy pomiarowe przyrządów.



Rys. 6.8. Układ pomiarowy do próby zwarcia transformatora

Za pomocą autotransformatora stopniowo zwiększać napięcie na transformatorze do wartości przy której prąd wskazywany przez amperomierz osiągnie wartość równą prądowi znamionowemu I_{1n} .

Wyniki pomiarów i obliczeń zestawić w tabeli 6.3.

Tabela 6.3.

Pomiary			Obliczenia				
U_{1z}	I_1	P_z	U_z	ΔP_{Cu}	$\cos \varphi_z$	I_{1z}	I_{2z}
V	A	W	%	%	-	A	A

W obliczeniach wykorzystać zależności:

$$u_{z\%} = \frac{U_{1z}}{U_{1n}} 100\%; \quad \Delta P_{Cu\%} = \frac{P_z}{S_n} 100\%; \quad \cos \varphi_z = \frac{P_z}{U_{1z} I_{1n}},$$

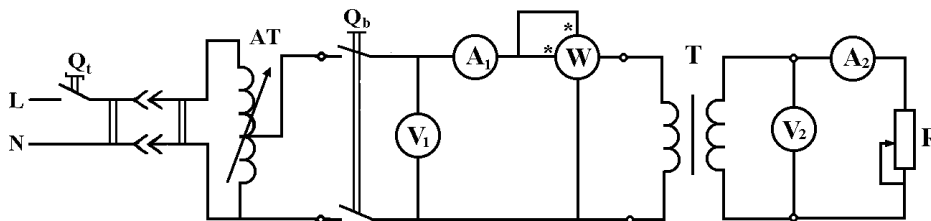
$$I_{1z} = I_{1n} \frac{100\%}{u_{z\%}}; \quad I_{2z} = I_{1z} \vartheta_u.$$

Ponadto obliczyć parametry uproszczonego schematu zastępczego transformatora:

$$Z_T = \frac{U_{1z}}{I_{1n}}; \quad R_T = Z_T \cos \varphi_z; \quad X_T = Z_T \sin \varphi_z$$

4.1.3. Próba obciążenia

Zestawić układ pomiarowy przedstawiony na rys. 6.9. Próbę obciążenia przeprowadzić dla znamionowego napięcia U_{1n} zasilającego transformator. Zmieniając rezystorem R obciążenie transformatora w granicach $I_2 = 0 \div 1,2 I_{2n}$ dokonać 5 pomiarów. Wyniki pomiarów i obliczeń zestawić w tabeli 6.4.



Rys. 6.9. Układ pomiarowy do próby obciążenia transformatora

Tabela 6.4.

Lp.	Pomiary					Obliczenia		
	U_1	I_1	P_1	U_2	I_2	P_2	η	$\cos\varphi_1$
	V	A	W	V	A	W	%	-

W obliczeniach korzystać z zależności:

$$P_2 = U_2 \cdot I_2; \eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\%; \cos\varphi_1 = \frac{P_1}{U_1 \cdot I_1}.$$

Wykreślić charakterystykę zewnętrzną transformatora: $U_2 = f(I_2)$.

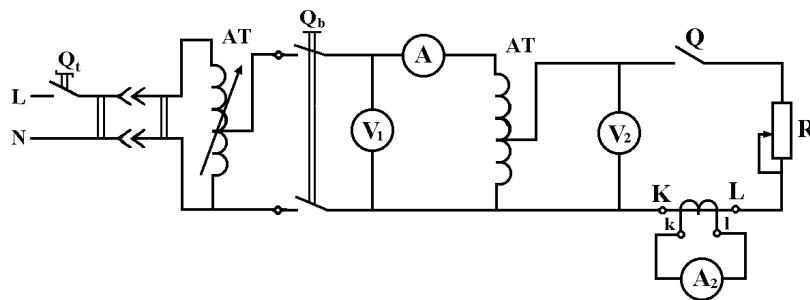
Dla znamionowego prądu I_{2n} odczytać z charakterystyki $U_2 = f(I_2)$ wartość napięcia U_2 i obliczyć z zależności (6.23) zmienność napięcia wyjściowego $\delta_{u2\%}$.

Przeprowadzić dyskusję uzyskanych wyników badań.

4.2. Badanie autotransformatora i pomiar natężenia prądu z wykorzystaniem przekładnika prądowego

W ćwiczeniu zostanie wykorzystany autotransformator o nastawianej przekładni z włączonym przekładnikiem prądowym do pomiaru natężenia prądu strony wtórnej w próbie obciążenia.

Zestawić układ pomiarowy przedstawiony na rys. 6.10.



Rys. 6.10. Układ pomiarowy do badania autotransformatora

Pomiary przeprowadzić dla stanu jałowego oraz dla obciążenia znamionowego ustalonego rezystorem R przy znamionowym napięciu zasilającym nastawionym autotransformatorem laboratoryjnym AT. Wyniki pomiarów i obliczeń zestawić w tabeli 6.5. W obliczeniach wykorzystać zależności podane w p. 6.2 i 6.3. Przeprowadzić dyskusję wyników uzyskanych z pomiarów i obliczeń.

Tabela 6.5.

Stan jałowy				Stan obciążenia							
U_{10}	I_0	U_{20}	ϑ_u	U_1	I_1	U_2	I_2'	ϑ_i	I_2	S_p	S_w
V	A	V	-	V	A	V	A	-	A	VA	VA

Prąd I_2 strony wtórnej autotransformatora obliczać z zależności: $I_2 = I_2' \cdot \vartheta_i$,
gdzie:

I_2' - wartość prądu odczytana z amperomierza A_2 ,

$\vartheta_i = \frac{I_1}{I_2}$ - przekładnia przekładnika prądowego.

4.3. Wykaz aparatury

Podać zestawienie przyrządów pomiarowych, urządzeń regulacyjnych jak też urządzeń obciążających zgodnie z wytycznymi podanymi w części ogólnej.

Zagadnienia do samodzielnego opracowania

1. Budowa i zasada działania transformatora.
2. Wyrażenia na siły elektromotoryczne E_1 i E_2 ; z czego wynika współczynnik liczbowy 4,44 oraz przekładnia transformatora.
3. Rola rdzenia ferromagnetycznego w transformatorze.
4. Cel badań laboratoryjnych transformatora w stanie jałowym.
5. Charakterystyka napięciowo-prądowa stanu jałowego oraz prąd stanu jałowego transformatora.
6. Wykres wskazowy dla stanu jałowego transformatora.
7. Cel badań laboratoryjnych transformatora w stanie zwarcia.

8. Co to jest zwarcie ruchowe transformatora oraz jak oblicza się prądy w uzwojeniach przy takim zwarceniu?
9. Mechanizm przenoszenia energii oraz związek między prądami płynącymi w obu uzwojeniach transformatora.
10. Charakterystyka zewnętrzna $U_2 = f(I_2)$ oraz zmienność napięcia wyjściowego transformatora.
11. Zależność mocy transformatora od przekroju rdzenia ferromagnetycznego
12. Autotransformator: budowa, schemat elektryczny uzwojeń, zasada działania, zalety i wady.
13. Przekładnik prądowy: przeznaczenie, budowa, zasada działania, sposób włączenia, skutki przerwy w obwodzie wtórnym w czasie jego pracy.

Literatura:

- [1] Piątek Z., Kubit J., Pasko M.: Elektrotechnika Ogólna cz.3. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1999.
- [2] Praca zbiorowa : Poradnik inżyniera elektryka T.2. WNT, Warszawa 1995.
- [3] Skwarczynski J., Tertel Z.: Maszyny elektryczne – część pierwsza. Teoria. Wydawnictwo AGH, Kraków 1995.