

UNIWERSYTET TECHNOLOGICZNO-PRZYRODNICZY W BYDGOSZCZY
WYDZIAŁ INŻYNIERII MECHANICZNEJ
INSTYTUT EKSPLOATACJI MASZYN I TRANSPORTU
ZAKŁAD STEROWANIA



ELEKTROTECHNIKA I ELEKTRONIKA

ĆWICZENIE: **E21**

BADANIE TRANSFORMATORA JEDNOFAZOWEGO

Piotr Kolber, Daniel Perczyński
Bydgoszcz 2011

1. Cel ćwiczenia

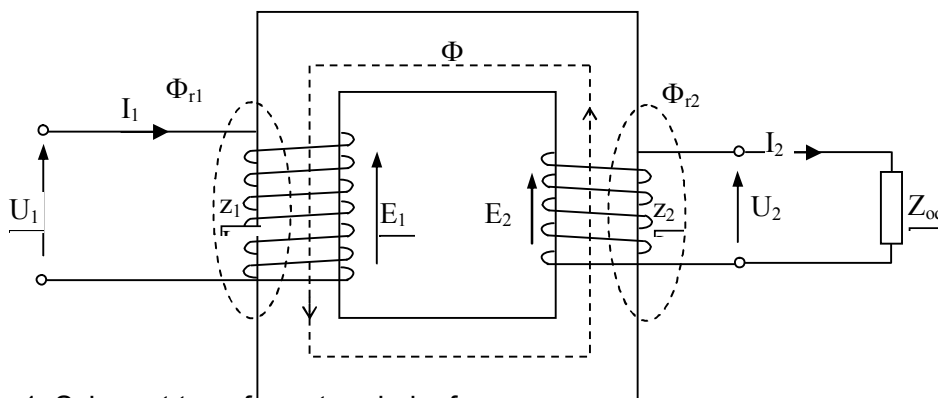
Celem badań jest zapoznanie się z zasadą działania oraz wyznaczenie podstawowych charakterystyk pracy transformatora jednofazowego.

2. Wprowadzenie

Transformator jest to urządzenie elektryczne służące do zmiany wartości napięcia przy zachowaniu tej samej mocy i częstotliwości. Przetwarzanie energii w transformatorze odbywa się na zasadzie indukcji elektromagnetycznej, która zachodzi w wytworzonym przez prąd zmienny polu magnetycznym. Transformatory znajdują zastosowanie przede wszystkim w energetyce (transformatory mocy), gdzie występuje potrzeba zmniejszenia strat wynikających z przesyłu energii na duże odległości, od źródeł zasilania do odbiorców. Oprócz transformatorów mocy, które są transformatorami trójfazowymi, istnieją również transformatory jednofazowe małej mocy, dla potrzeb radiotechniki, automatyki i transformatory specjalne (pomiarowe, bezpieczeństwa, spawalnicze itp.).

2.1 Budowa transformatora jednofazowego

Najprostszy transformator (rys. 1) posiada dwa oddzielone elektrycznie uzwojenia – pierwotne i wtórne, które są nawinięte na wspólny rdzeń wykonany z pakietu cienkich blach. Materiał ferromagnetyczny użyty do wykonania tych blach, charakteryzuje się dużą przenikalnością magnetyczną. Blachy są odizolowane wzajemnie (np. papierem, lakierem) w celu zmniejszenia strat mocy czynnej, pochodzących od prądów wirowych i strat na histerezę magnetyczną, a tym samym w celu ograniczenia nadmiernego nagrzewania się rdzenia.



Rys.1. Schemat transformatora jednofazowego

Uzwojenia wykonane są z izolowanego (np. papierem, bawełną) przewodu miedzianego. Transformator może być zasilany przez podłączenie do źródła dowolnego jego uzwojenia. Uzwojenie, którym doprowadza się energię, o liczbie zwojów z_1^* , nazywamy pierwotnym, zaś z uzwojenia wtórnego, o liczbie zwojów z_2 , pobiera się energię do zasilania odbiornika (wszystkie parametry transformatora dla strony pierwotnej wyróżnia się indeksem „1”, zaś dla strony wtórnej indeksem „2”). Niektóre transformatory mają po stronie wtórnej kilka cewek o różnych liczbach zwojów, co umożliwia otrzymanie kilku różnych napięć z tego samego transformatora.

2.2 Zasada działania

Jeśli zaciski uzwojenia pierwotnego zostaną zasilone napięciem sinusoidalnie zmiennym o częstotliwości f , w uzwojeniu pierwotnym popłynie prąd. Prąd ten wywoła w rdzeniu zmienny strumień magnetyczny Φ , dzięki któremu indukują się siły elektromotoryczne w obu uzwojeniach. Strumień ten jest sinusoidalnie zmienny i można go wyrazić wzorem

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t.$$

Jeśli do zacisków uzwojenia wtórnego przyłączymy jakikolwiek odbiornik, to w zamkniętym obwodzie tego uzwojenia popłynie prąd przemienny.

Wartości skuteczne sił elektromotorycznych zależą od liczby zwojów poszczególnych uzwojeń (z_1 i z_2) i wynoszą odpowiednio:

$$\begin{aligned} E_1 &= 4,44 f z_1 \Phi_m \\ E_2 &= 4,44 f z_2 \Phi_m \end{aligned}$$

Stosunek wartości sił elektromotorycznych nazywa się przekładnią transformatora

$$\mathfrak{G} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{z_1}{z_2}$$

Właściwości transformatora są rozpatrywane dla trzech stanów pracy:

- stanu jałowego,
- stanu obciążenia,
- stanu zwarcia.

2.4. Stan jałowy

Transformator jest w stanie jałowym wówczas, gdy jego uzwojenie pierwotne przyłączone jest do źródła zasilania, zaś uzwojenie wtórne nie jest obciążone – obwód wtórny jest otwarty ($I_2 = 0$). Wszystkie parametry w tym stanie przyjęto oznaczać indeksem „0” (np. napięcie po stronie pierwotnej w stanie jałowym to U_{10})

Jeżeli uzwojenie pierwotne jest zasilane napięciem sinusoidalnie zmiennym o wartości skutecznej U_{10} i częstotliwości f to w uzwojeniu pierwotnym popłynie niewielki prąd jałowy I_0 (od 1 do 5% I_n) będący sumą geometryczną prądu strat w rdzeniu I_{Fe} i prądu magnesującego I_{μ_0} (składowa bierna).

$$I_0 = I_{Fe} + jI_{\mu_0}$$

Udział prądu strat w rdzeniu jest niewielki, dlatego często przyjmuje się, że $I_0 = I_{\mu_0}$

Przepływ prądu magnesującego w uzwojeniu pierwotnym wzbudza w obwodzie magnetycznym (rdzeniu) strumień magnetyczny, który wytwarza siły elektromotoryczne w obu uzwojeniach. Ze źródła napięcia zostanie pobrana przez transformator moc czynna na pokrycie strat histerezowych i wiroprądowych w rdzeniu oraz moc bierna na wytworzenie strumienia. Moc czynna pobrana przez transformator w stanie jałowym wynosi:

$$P_0 = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{Cu}$$

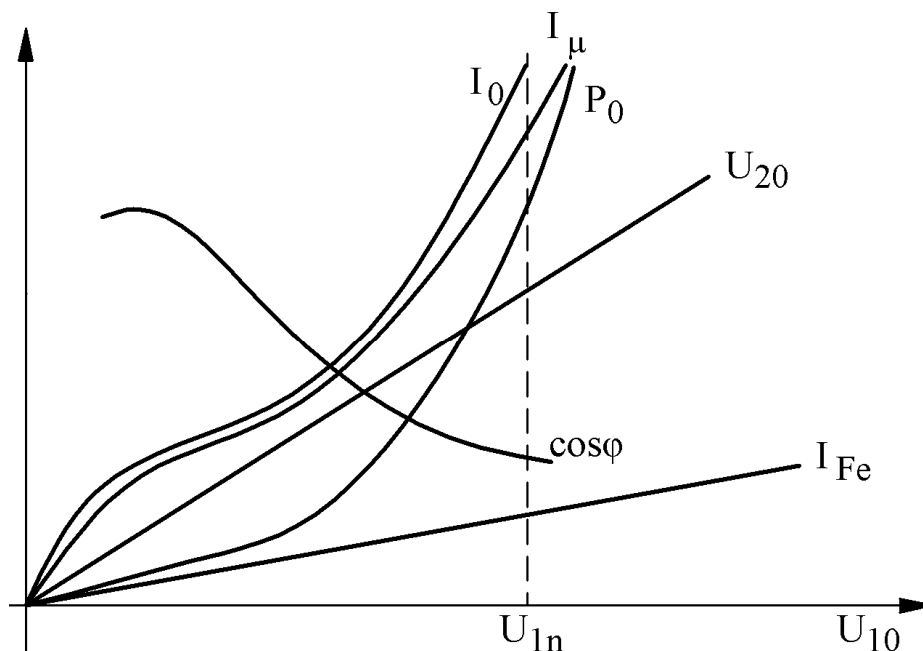
Straty mocy wynikające ze spadku napięcia na rezystancji uzwojeń transformatora, zwane stratami w miedzi ΔP_{Cu} , ze względu na mały prąd jałowy są pomijalnie małe. Nabierają one znaczenia w przypadku gdy transformator zostanie obciążony, zależą one bowiem od wartości płynącego wówczas prądu.

Transformator w stanie jałowym nie oddaje mocy, wobec tego moc czynna pobrana przez transformator nazywana jest stratami jałowymi albo też stratami w żelazie ΔP_{Fe} . Straty te nie zależą od obciążenia (tylko od sposobu wykonania rdzenia transformatora) i mają tę samą wartość dla wszystkich pozostałych stanów. Przy otwartych zaciskach wtórnych $U_{20} = E_2$, przekładnię transformatora można opisać wzorem:

$$\vartheta = \frac{U_{10}}{U_{20}}$$

Badanie transformatora w stanie jałowym przeprowadza się przy stałej częstotliwości i przy zmiennym napięciu zasilającym. Pozwala to wyznaczyć przekładnię transformatora i charakterystyki opisujące stan jałowy (rys. 2): $I_0=f(U_{10})$, $I_{\mu}=f(U_{10})$, $I_{Fe}=f(U_{10})$, $P_0=f(U_{10})$, $\cos\varphi_0=f(U_{10})$ oraz znamionowe straty mocy P_{0n} i znamionowy prąd jałowy I_{0n} . Pomiary w stanie jałowym umożliwiają wykonanie analizy:

1. stanu izolacji między blachami transformatora – w przypadku zwarcia między blachami transformatora, straty mocy w stanie jałowym są większe od strat znamionowych. (niewłaściwy stan izolacji powoduje wzrost strat jałowych)
2. stanu izolacji między uzwojeniami – w przypadku zwarcia w uzwojeniach transformatora nie można zwiększyć napięcia do wartości znamionowej, ponieważ już przy niskich jego wartościach prąd gwałtownie rośnie.



Rys. 2. Charakterystyki stanu jałowego transformatora jednofazowego

2.5. Stan obciążenia

Transformator jest w stanie obciążenia wtedy, gdy jego uzwojenie pierwotne jest zasilane ze źródła prądu przemiennego, a do zacisków uzwojenia wtórnego jest dołączony odbiornik. W stanie obciążenia płyną prądy w obu uzwojeniach i strumień magnetyczny powstaje w wyniku działania dwóch przepływów $\Theta_1=z_1I_1$ oraz $\Theta_2=z_2I_2$

W transformatorze wskutek obciążenia po stronie wtórnej płynie prąd I_2 wymuszony przez sem E_2 , natomiast po stronie pierwotnej płynie prąd I_1 zależny od wielkości prądu po stronie wtórnej. Prąd po stronie pierwotnej jest tym większy, im większy jest prąd wtórny. Dzieje się tak dlatego, ponieważ uzwojenia transformatora są magnetycznie sprzężone. Prąd wtórny osłabia strumień główny, wobec czego zmniejsza się siła elektromotoryczna E_1 i nie jest ona zrównoważona w stosunku do napięcia źródła. W celu zachowania równowagi w uzwojeniach popłynie dodatkowy prąd powiększający początkową wartość I_1 i wytworzy dodatkowy strumień magnetyczny wspomagający strumień główny. Dzięki temu pomimo

powstania prądu obciążenia, przepływ wypadkowy Θ_w i wynikający z niego strumień główny skojarzony z dwoma uzwojeniami pozostaje niezmienny.

Dla wyznaczenia zależności liczbowej między wartościami prądów I_1 i I_2 wygodnie jest skorzystać z równości mocy pozornych w transformatorze bez strat:

$$S_1 = S_2 \quad \text{czyli} \quad U_1 I_1 = U_2 I_2$$

a ponieważ

$$g = \frac{U_1}{U_2} = \frac{z_1}{z_2}$$

to

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{z_2}{z_1} = \frac{1}{g}$$

Prądy te spowodują powstanie na rezystancjach uzwojeń spadków napięć

$$\Delta U_{R1} = R_1 I_1 \quad \text{oraz} \quad \Delta U_{R2} = R_2 I_2$$

oraz na reaktancjach rozproszenia uzwojeń

$$\Delta U_{L1} = jX_{r1} I_1 \quad \text{oraz} \quad \Delta U_{L2} = jX_{r2} I_2$$

W związku z tym, napięcie po stronie pierwotnej transformatora U_1 jest równe sem E_1 powiększonej o spadki napięć $R_1 I_1$ i $X_{r1} I_1$, co można zapisać:

$$\underline{U}_1 = \underline{E}_1 + (R_1 + jX_{r1}) I_1$$

Po stronie wtórnej napięcie U_2 jest równe sem E_2 pomniejszonej o spadki napięcia $R_2 I_2$ oraz $X_{r2} I_2$, co przedstawia zależność:

$$\underline{U}_2 = \underline{E}_2 - (R_2 + jX_{r2}) I_2$$

Przy zasilaniu napięciem o stałej wartości skutecznej $U_1 = \text{const}$ wartość napięcia wtórnego U_2 zależy nie tylko od wartości obciążenia, ale również od jego charakteru, określonego współczynnikiem mocy $\cos \varphi$. Dla obciążenia rezystancyjno-indukcyjnego następuje zmniejszenie wartości napięcia U_2 , natomiast dla obciążenia rezystancyjno-pojemnościowego nastąpi wzrost napięcia wtórnego w stosunku do siły elektromotorycznej.

Prądy płynące w uzwojeniach wywołują ponadto na ich rezystancjach straty mocy, zwane stratami obciążeniowymi lub stratami w miedzi.

$$\Delta P_{Cu} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2$$

Moc pobierana z sieci przez transformator obciążony jest sumą mocy oddanej odbiorcy i strat w transformatorze obciążonym. Na straty w transformatorze obciążonym składają się zarówno straty w rdzeniu jak i straty obciążeniowe, czyli:

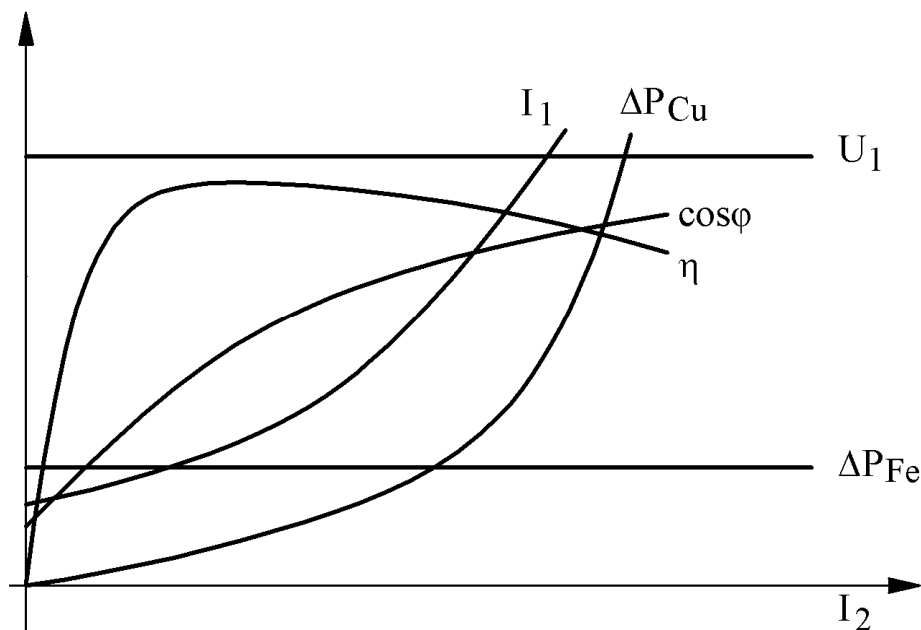
$$P_1 = P_2 + \Delta P_{Fe} + \Delta P_{Cu}$$

Sprawność transformatora obciążonego jest to stosunek mocy oddanej odbiorcy przez uzwojenie wtórne, do mocy pobranej z sieci przez uzwojenie pierwotne.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_{Fe} + \Delta P_{Cu}} = \frac{P_1 - \Delta P_{Fe} - \Delta P_{Cu}}{P_1}$$

Znamionową sprawność można określić po zbadaniu znamionowych strat obciążeniowych ΔP_{Cu_n} , które wykonuje się w stanie zwarcia transformatora.

Dla stanu obciążenia wyznacza się charakterystyki obciążeniowe (rys. 3), czyli charakterystyki różnych wielkości (prądu pierwotnego, strat w miedzi, napięcia wtórnego sprawności i współczynnika mocy) w funkcji prądu obciążenia.



Rys 3. Charakterystyki obciążeniowe transformatora jednofazowego

2.6. Stan zwarcia

Stan zwarcia transformatora występuje wówczas, gdy jedno z uzwojeń transformatora jest zasilane zaś drugie bezpośrednio zwarte, czyli $Z_{od} = 0$. Jeśli uzwojenie pierwotne jest zasilane napięciem o wartości znamionowej wówczas mówimy o zwarcu awaryjnym. W obu uzwojeniach popłyną prądy zwarcia wielokrotnie większe od wartości znamionowych, które powodują przegrzewanie się przewodów, a w konsekwencji prowadzą do zniszczenia izolacji i samego transformatora.

Próby zwarcia pomiarowego realizuje się obniżając napięcie pierwotne do takiej wartości, przy której w obu uzwojeniach płyną prądy o wartościach nie większych od znamionowych.

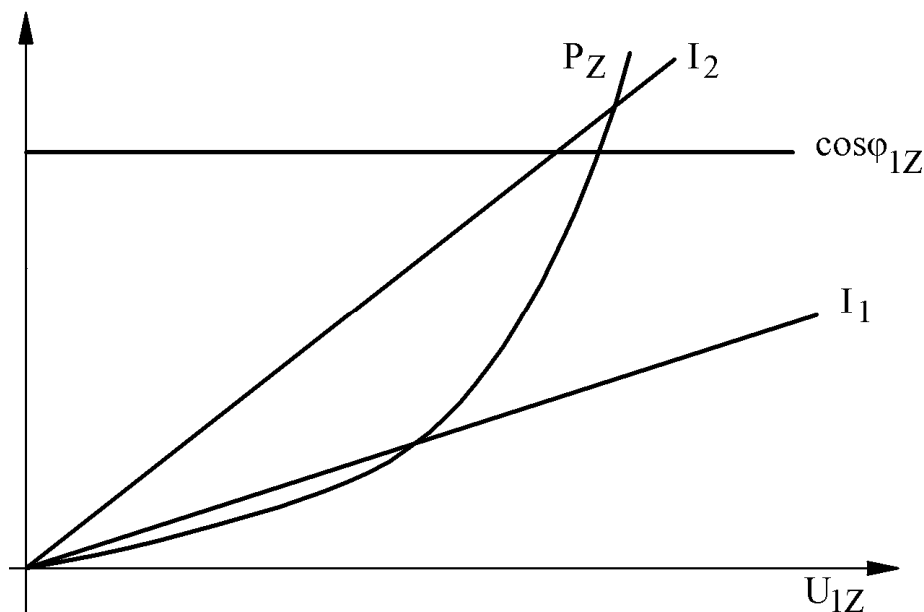
Parametrem charakterystycznym, badanym podczas prób, jest napięcie zwarcia transformatora. Jest to wartość napięcia jaką należy przyłożyć do uzwojenia pierwotnego tak, aby w zwartym uzwojeniu wtórnym popłynął prąd znamionowy. Napięcie zwarcia wyraża się w procentach napięcia znamionowego i można je określić dla każdej ze stron transformatora. Jego wartość procentowa dla obu stron jest jednakowa, dlatego oznacza się przez u_z bez dodatkowego indeksu „1” lub „2”. Wyrazić można je wzorem

$$u_z = \frac{U_z}{U_n} 100\%$$

Dzięki znajomości napięcia zwarcia, który jest jednym z parametrów katalogowych, można określić wartość prądu I_z przy zwarcu awaryjnym (przy zasilaniu napięciem znamionowym), spadek napięcia przy obciążeniu transformatora i przydatność transformatora do pracy równoległej z innymi transformatorami. Prąd zwarcia znamionowy można wyrazić wzorem:

$$I_z = I_n \frac{U_n}{U_z} = I_n \frac{100\%}{u_z}$$

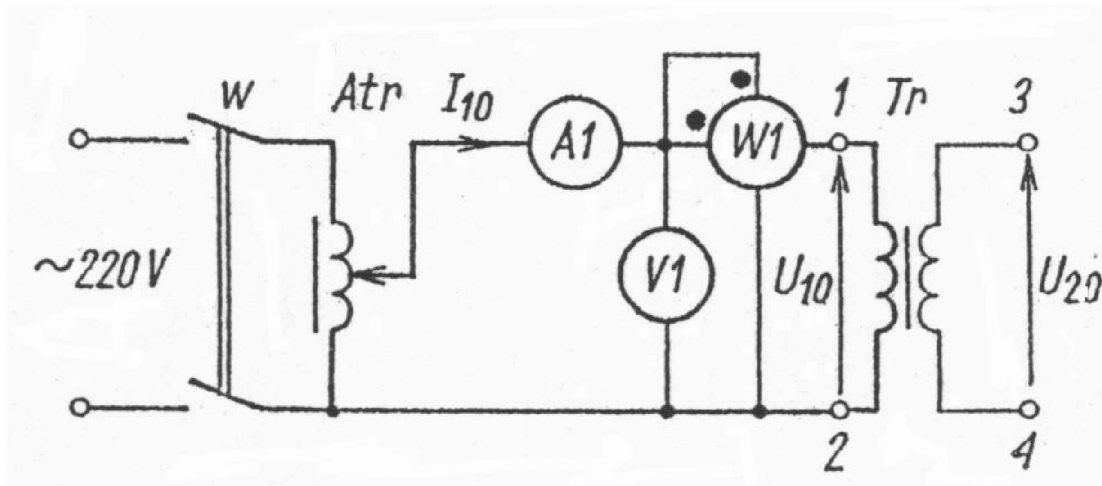
Moc czynna pobierana przez transformator w stanie zwarcia przemienia się całkowicie na ciepło wskutek strat w uzwojeniach i strat w rdzeniu
Dla stanu zwarcia wyznacza się charakterystyki (rys. 4): $I_{1z} = f(U_{1z})$, $I_{2z} = f(U_{1z})$, $P_z = f(U_{1z})$ oraz $\cos\varphi = f(U_{1z})$



Rys.4. Charakterystyki stanu zwarcia transformatora jednofazowego

3. Pomiary laboratoryjne

3.1 Sprawdzanie przekładni transformatora jednofazowego i pomiary w stanie jałowym. Sprawdzenie przekładni transformatora i pomiary w stanie jałowym przeprowadza się w układzie pomiarowym według schematu podanego na rysunku rys. 5



Rys. 5 Schemat do badania transformatora w stanie jałowym

3.1.1 Połączyć układ pomiarowy zgodnie ze schematem na rys.5.

Uzwojenie pierwotne transformatora jest połączone z autotransformatorem Atr , którym można nastawić żadaną wartość napięcia pierwotnego U_{10} . Do pomiaru napięć pierwotnego i wtórnego służą woltomierze napięcia zmiennego V_1 i V_2 . Watomierz $W1$ wskazuje pobieraną przez transformator moc czynną P_0 , zaś amperomierz $A1$ wskazuje prąd I_0 . Za pomocą autotransformatora Atr należy regulować wartość napięcia w zakresie od 0 do $1,2 U_{1n}$ oraz dokonać pomiarów I_0 , U_{10} , U_{20} , P_0 . Wyniki badań zamieścić w tabeli 1:

Tabela 1 Wyniki pomiarów i obliczeń dla stanu jałowego transformatora.

Lp	Pomiary				Obliczenia		
	I_0 [A]	U_{10} [V]	U_{20} [V]	P_0 [W]	$\cos\varphi_0$ -	I_{Fe} [A]	I_{μ} [A]
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							

Wartości znamionowe: $I_{0n} = \dots\dots\dots A$, $P_{0n} = \dots\dots\dots W$, przekładnia: $\vartheta = U_{1n}/U_{2n} = \dots\dots\dots$

3.1.2 Dokonać obliczeń wielkości zaznaczonych w tabeli 1

W tym celu należy zastosować następujące wzory:

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

$$I_{Fe} = I_0 \cos \varphi_0 = \frac{P_0}{U_{10}};$$

$$I_{\mu} = I_0 \sin \varphi_0.$$

3.1.3 Na podstawie wyników pomiarów i obliczeń wykreślić następujące charakterystyki transformatora w stanie jałowym: $I_0 = f(U_{10})$, $P_0 = f(U_{10})$, $\cos\varphi_0 = f(U_{10})$, $I_{\mu} = f(U_{10})$, $I_{Fe} = f(U_{10})$.

3.1.4 Na wykresach charakterystyk $I_0 = f(U_{10})$ oraz $P_0 = f(U_{10})$, zaznaczyć prąd znamionowy w stanie jałowym I_{0n} , oraz znamionowe straty jałowe $P_{0n} = \Delta P_{Fen}$ dla wartości znamionowej napięcia po stronie pierwotnej U_{1n} .

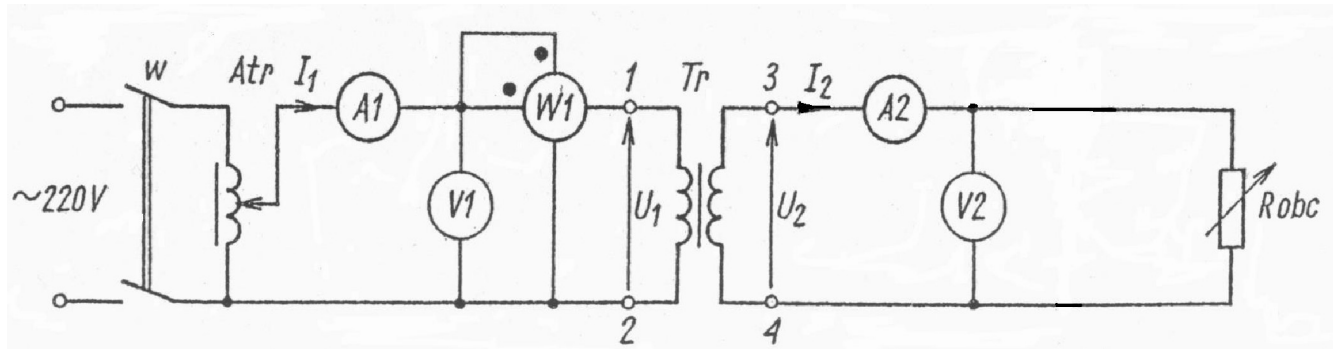
3.1.5 Dla znamionowej wartości napięcia pierwotnego dokonać obliczenia przekładni transformatora ϑ .

3.2 Pomiary w stanie obciążenia

Pomiary w stanie obciążenia przeprowadza się w układzie przedstawionym na rys.5.

3.2.1 Połączyć układ pomiarowy wg schematu na rys.5.

Opornik regulowany jest tak dobrany, aby wartość jego prądu znamionowego była nieco większa od wartości prądu znamionowego strony wtórnej transformatora, natomiast rezystancja minimalna R_{min} wynosiła ok. $0,9U_{2n}/I_{2n}$ strony wtórnej transformatora.



Rys.5. Schemat do badania transformatora w stanie obciążenia

Dobrać zakresy pomiarowe mierników do wartości parametrów znamionowych. Włączyć układ do sieci za pomocą wyłącznika $W1$, a następnie za pomocą autotransformatora wyregulować napięcie pierwotne do wartości znamionowej. Przy stałej wartości napięcia znamionowego wykonać pomiary, zmieniając rezystancję opornika obciążeniowego tak, aby wartości prądu obciążeniowego zmieniały się w zakresie od I_{2n} do I_{min} (wartość prądu I_{min} uzyskuje się przy maksymalnej wartości rezystancji opornika regulowanego). Wyniki pomiarów notować w tabeli 2.

Tabela 2

Lp	Pomiary					Obliczenia				
	U_1	I_1	P_1	U_2	I_2	P_2	η	$\cos\varphi_1$	$\Delta U\%$	ΔP
	[V]	[A]	[W]	[V]	[A]	[W]	-	-	[%]	[W]
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										

Wartości znamionowe: $U_{1n} = \dots\dots\dots V$; $\cos\varphi_2 = 1 = \text{const}$; $f = 50 \text{ Hz}$

3.3 Wykonać obliczenia stosując następujące wzory:

- mocy czynnej po stronie wtórnej

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2 \quad \text{przy czym} \quad \cos \varphi_2 = 1$$

- sprawności transformatora obciążonego:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}$$

- współczynnika mocy transformatora po stronie pierwotnej:

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{U_1 I_1}$$

- procentowej straty napięcia transformatora obciążonego:

$$\Delta U_{\%} = \frac{U_{20n} - U_2}{U_{20n}} \cdot 100\%$$

gdzie U_{20n} – napięcie po stronie wtórnej transformatora w stanie jałowym, przy znamionowym zasilaniu strony pierwotnej.

- całkowitej straty mocy czynnej:

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{Cu} \cong P_0 + P_z$$

3.4 Na podstawie pomiarów i obliczeń wykreślić charakterystyki transformatora w stanie obciążenia: $U_2 = f(I_2)$; $I_1 = f(I_2)$; $\cos \varphi_1 = f(I_2)$; $P_1 = f(I_2)$; $P_2 = f(I_2)$; $\Delta P = f(I_2)$; $\eta = f(I_2)$; $\Delta U_{\%} = f(I_2)$.

3.5 Wnioski

Literatura

1. Praca zbiorowa: „Elektrotechnika i elektronika dla nieelektryków”
2. Pilawski M. „Pracownia elektryczna”