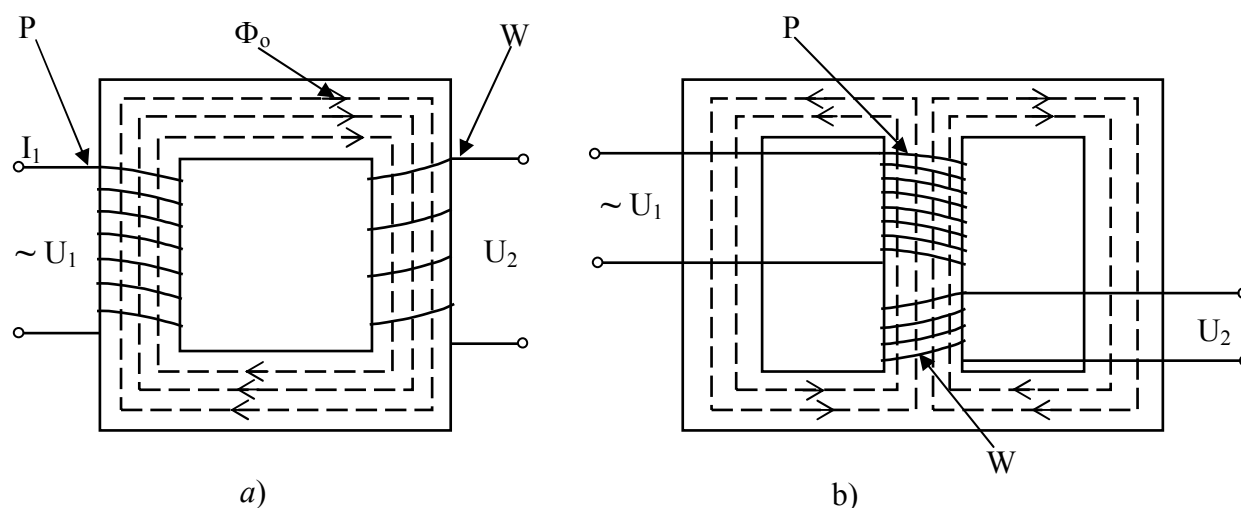


BADANIE TRANSFORMATORA

- I. Cel ćwiczenia:** zapoznanie się z budową i działaniem transformatora w trybie stanu jałowego oraz stanu obciążenia (roboczego), wyznaczenie przekładni i sprawności transformatora.
- II. Przyrządy:** transformator badany, generator mocy jako źródło napięcia, woltomierz – 2 szt., amperomierz – 2 szt., opornik regulowany (dekadowy).
- III. Literatura:**
1. T. Dryński, „Ćwiczenia laboratoryjne z fizyki”, PWN Warszawa 1991.
 2. E. Jeziński, „Transformatory”, Podstawy teoretyczne, WNT Warszawa 1965.

IV. Wprowadzenie.

Jednym z zasadniczych powodów, dla którego prądy przemienne znalazły powszechne zastosowanie, jest możliwość zmiany napięcia w bardzo szerokich granicach i bez dużych strat energii. Przyrządem, który do tego celu służy jest transformator (rys.1a). Składa się on z dwóch uzwojeń: pierwotnego P i wtórnego W, nawiniętych na rdzeń żelazny, najczęściej w kształcie prostokąta. Stosowane są też rdzenie innych kształtów, przy czym dość często spotyka się formę pokazaną na rys.1b, zwaną podwójnym prostokątem.



Rys.1. Zasada budowy transformatora.

Z kształtem rdzenia wiąże się zagadnienie większego lub mniejszego rozproszenia strumienia magnetycznego oraz masy zastosowanego żelaza. Rdzeń składa się z cienkich blach żelaznych o grubości ok. 0.5 mm, odizolowanych od siebie dla uniknięcia strat na prądy wirowe.

Jeśli uzwojenie pierwotne dołączymy do źródła prądu przemiennego o napięciu U_1 , wówczas przez uzwojenie pierwotne popłynie prąd przemienny o natężeniu I_1 (U_1 i I_1 oznaczają chwilowe wartości napięcia i natężenia), a poprzez rdzeń popłynie zmienny strumień magnetyczny Φ_0 , którego zmiany będą zgodne ze zmianami natężenia prądu I_1 , tzn. będą w fazie z prądem magnesującym. Strumień magnetyczny wytworzony przez uzwojenie pierwotne przenika również przez uzwojenie wtórne. W transformatorze mamy zatem zmienny strumień magnetyczny Φ_0 , który przenika dwa uzwojenia: pierwotne i wtórne, indukując w nich zmienne siły elektromotoryczne: E_1 – w uzwojeniu pierwotnym i E_2 – w uzwojeniu wtórnym.

1. Stan jałowy transformatora

Założmy najpierw, że uzwojenie wtórne jest otwarte, tzn. do zacisków uzwojenia wtórnego transformatora nie jest podłączony opór obciążenia; mamy wówczas tak zwany stan jałowy. Uzwojenie pierwotne transformatora zachowuje się wówczas jak zwojnica o określonym oporze indukcyjnym i omowym, przez którą będzie płynął prąd o natężeniu I_0 , zwany prądem stanu jałowego transformatora. Zależność przyłożonego napięcia U_1 od czasu określa równanie

$$U_1 = U_m \sin \omega t \quad (1)$$

gdzie U_m jest wartością szczytową albo amplitudą napięcia, $\omega = 2\pi f$ – tzw. częstością kołową zmian napięcia. Wiemy, że natężenie prądu w uzwojeniu o określonym oporze indukcyjnym (przy $R = 0$) jest opóźnione w fazie o $\pi/2$. Wobec tego mamy

$$I_1 = I_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = -I_m \cos \omega t \quad (2)$$

Z II prawa Kirchhoffa dla obwodu pierwotnego (suma sił elektromotorycznych działających w obwodzie zamkniętym jest równa sumie spadków napięć) mamy

$$U_1 + E_1 = I_1 R_1 \quad (3)$$

Jeżeli założymy, że opór omowy R_1 jest mały, ($R_1 = 0$), to z ostatniego równania wynika

$$U_1 = -E_1 \quad (4)$$

czyli napięcie U_1 jest skierowane przeciwnie do siły elektromotorycznej E_1 .

Strumień magnetyczny przenikając uzwojenie wtórne wywołuje w nim siłę elektromotoryczną indukcji E_2 , która wytworzy na końcówkach uzwojenia napięcie U_2 , przy czym U_2 mieć będzie kierunek zgodny z kierunkiem E_2 . Słuszna jest zatem równość

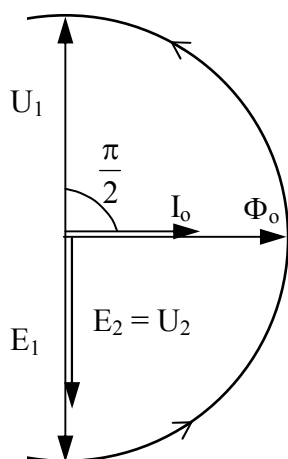
$$U_2 = E_2 \quad (5)$$

Iloraz napięcia U_2 na zaciskach uzwojenia wtórnego transformatora nieobciążonego do napięcia U_1 na uzwojeniu pierwotnym jest równy ilorazowi liczb zwojów tych uzwojeń i nosi nazwę przekładni transformatora

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{n_2}{n_1} = K \quad (6)$$

Przez proste dobieranie liczby zwojów uzwojenia pierwotnego i wtórnego możemy w sposób dowolny, ograniczony tylko wytrzymałością na przebicie materiałów izolacyjnych, zmieniać napięcie prądu przemiennego. Ta cecha oraz brak jakichkolwiek ruchomych części stanowią dominujące zalety transformatora, którym zawdzięcza on swe rozpowszechnienie.

Przejrzyste przedstawienie stosunków fazowych między prądowymi wielkościami wektorowymi w czasie jałowego stanu transformatora przedstawia rys.2.



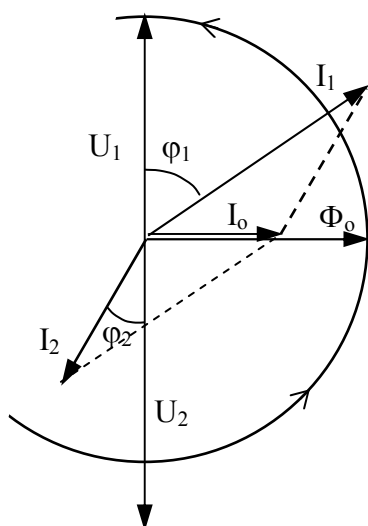
Rys.2. Stosunki fazowe napięcia i natężenia prądu w czasie stanu jałowego.

2. Transformator w stanie obciążenia

Jeśli transformator obciążymy, podłączając do końcówek uzwojenia wtórnego opór omowy R , wówczas w uzwojeniu wtórnym popłynie prąd o natężeniu I_2 . Wytworzone przez niego pole magnetyczne osłabia pierwotny strumień magnetyczny Φ_0 (zgodnie z regułą Lenza). W obwodzie pierwotnym nastąpi jednak wzrost prądu od wartości I_0 do pewnej wartości I_1 . Wytworzony przez ten prąd strumień magnetyczny skompensuje osłabienie wprowadzone przez prąd I_2 tak, że wartość strumienia magnetycznego w dalszym ciągu będzie stała i równa Φ_0 . Wówczas prądy I_1 i I_2 są tak przesunięte w fazie względem siebie, że ich suma geometryczna jest równa pierwotnemu prądowi magnesującemu I_0 tzn prądowi stanu jałowego transformatora.

Ze względu na istnienie oporu indukcyjnego zarówno w uzwojeniu pierwotnym, jak i wtórnym, prąd I_1 jest przesunięty w fazie w stosunku do napięcia U_1 o kąt φ_1 , a I_2 w stosunku do napięcia U_2 o kąt φ_2 .

Stosunki fazowe między wielkościami prądowymi transformatora obciążonego przedstawia rys.3.



Rys.3. Stosunki fazowe napięcia i natężenia prądu transformatora obciążonego; φ_1 , φ_2 – przesunięcia fazowe prądów I_1 i I_2 względem napięć U_1 i U_2 .

Stosunek napięć w uzwojeniu pierwotnym i wtórnym nie odpowiada już przekładni transformatora, gdyż mamy teraz do czynienia ze spadkiem napięcia na oporze omowym uzwojenia wtórnego. Można przyjąć, że napięcie U_2 zmierzone w czasie stanu jałowego jest równe czynnej sile elektromotorycznej E_2 w czasie stanu roboczego. Słuszne jest zatem równanie

$$U'_2 = U_2 - I_2 R_2 \quad (7)$$

gdzie U'_2 oznacza napięcie na końcówkach uzwojenia wtórnego obciążonego transformatora. Widzimy z niego, że napięcie U'_2 jest mniejsze od napięcia U_2 obliczonego na podstawie przekładni transformatora i to w stopniu tym większym im większe jest obciążenie transformatora.

W związku z zasadą zachowania energii należy oczekiwać, że moc prądu dostarczonego przez uzwojenie wtórne powinna być równa mocy prądu płynącego w uzwojeniu pierwotnym, w związku z czym słuszną będzie równość następująca:

$$I_1 U_1 = I_2 U_2 \quad \text{lub} \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1}$$

(stosunek natężeń prądów w obu uzwojeniach jest odwrotny do stosunku napięć).

W rzeczywistym przebiegu zjawisk moc oddana przez transformator jest mniejsza od mocy pobranej, gdyż istnieją jeszcze straty cieplne w uzwojeniach (zarówno pierwotnym jak i wtórnym) oraz straty cieplne w rdzeniu związane z powstawaniem prądów wirowych i histerezą żelaza. Sprawność działania danego transformatora można określić przez podanie współczynnika sprawności

$$\eta = \frac{U_2 I_2 \cos \varphi_2}{U_1 I_1 \cos \varphi_1} \quad (8)$$

gdzie φ_1 i φ_2 są przesunięciami między napięciem i natężeniem prądu w obwodzie pierwotnym i w obwodzie wtórnym. Z dużym przybliżeniem można przyjąć $\varphi_1 = \varphi_2$ a wówczas otrzymamy wzór przybliżony na współczynnik sprawności transformatora

$$\eta = \frac{U_2 I_2}{U_1 I_1} \quad (9)$$

Jak z powyższego wynika, charakter pracy transformatora określić mogą następujące zasadnicze wielkości:

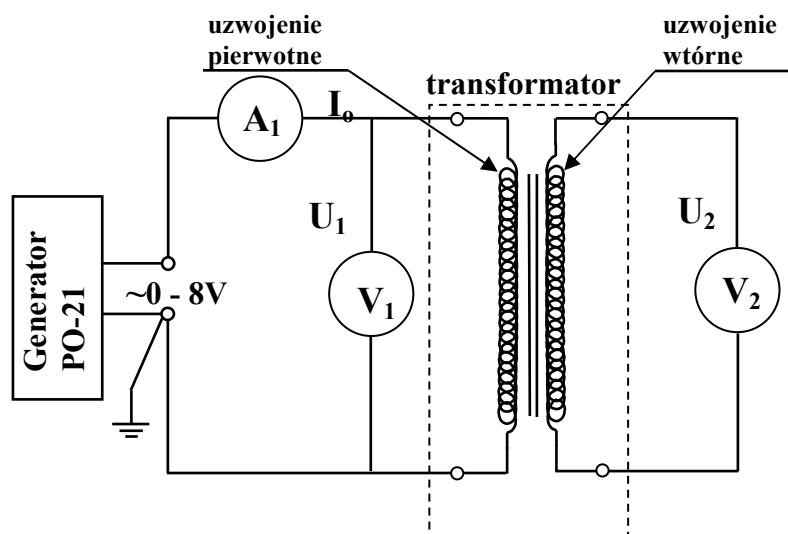
- natężenie prądu stanu jałowego,
- przekładnia transformatora,
- zależność napięcia wtórnego od obciążenia w czasie stanu roboczego,
- współczynnik sprawności η ,
- przesunięcie fazowe napięcia i natężenia prądu w uzwojeniu pierwotnym i wtórnym.

V. Pomiary.

1. Stan jałowy transformatora.

Wyznaczanie natężenia prądu stanu jałowego. Wyznaczanie przekładni transformatora.

Do badania wykorzystujemy transformator dodatkowy będący na wyposażeniu generatora PO-21. Stosujemy układ połączeń podany na rys.4. Pierwotne uzwojenie transformatora zasilane jest z wyjścia mocy generatora PO-21 pozwalającego w sposób ciągły regulować napięcie pierwotne U_1 w zakresie napięć 0 – 7,5 V. Częstotliwość napięcia wyjściowego generatora ustawiamy na 50 Hz. Do uzwojenia wtórnego podłączamy woltomierz cyfrowy V_2 . Ponieważ pobór prądu woltomierza cyfrowego jest niewielki (jest on rzędu mikroampera), to można przyjąć, że obserwowane na nim napięcia będą odpowiadały stanowi nieobciążonego transformatora. Podwyższamy stopniowo napięcie U_1 zwiększając je co 1 – 1,5 V. Odczytujemy wskazania woltomierza V_1 , odpowiadające mu wskazania woltomierza V_2 i natężenie prądu z amperomierza A_1 . Odczytane na amperomierzu A_1 natężenie prądu I_0 określa prąd stanu jałowego transformatora albo prąd magnesujący. Jest rzeczą oczywistą, że I_0 zależy od U_1 , przy czym powinno się okazać, że wzrost U_1 powoduje wzrost I_0 .

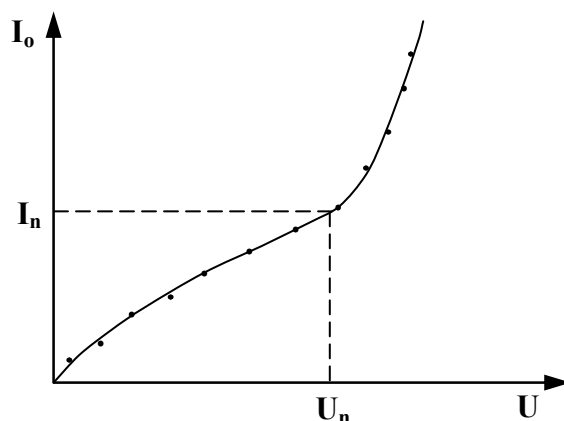


Rys. 4. Schemat układu do badania stanu jałowego transformatora.

Począwszy od pewnej wartości przyłożonego napięcia natężenie prądu rośnie znacznie szybciej niż w początkowej fazie.

Przyczyną jest to, że po przekroczeniu nasycenia rdzenia opór indukcyjny obwodu maleje, pozostaje tylko bardzo mały opór omowy. Charakter zależności I_0 od U_1 przedstawia rys.5. Współrzędne punktu przegięcia będą oznaczały odpowiednio napięcie nasycenia U_n i natężenie nasycenia I_n . Nie trzeba uzasadniać, że transformator nie może być dołączony do źródła o napięciu większym niż U_n .

W warunkach naszego ćwiczenia współrzędnych punktu przegięcia nie osiągamy (wartości napięcia U_1 są mniejsze od U_n).



Rys. 5. Zależność natężenia prądu w uzwojeniu pierwotnym od przyłożonego napięcia.

Przebieg zależności I_0 od U_1 wyznaczamy w odstępach np. co 1,5 V podwyższając stopniowo napięcie na wyjściu generatora, odczytujemy U_1 , U_2 i I_0 . Wyniki pomiarów notujemy w tabeli I.

Tabela I.

Obwód pierwotny		Obwód wtórny	Przekładnia $K = \frac{U_2}{U_1}$	Wartość średnia przekładni \bar{K}
Napięcie U_1	Natężenie I_0	Napięcie U_2		

2. Transformator w stanie obciążenia.

Stosujemy nieco zmieniony układ połączeń. Do uzwojenia wtórnego oprócz woltomierza V_2 dołączamy regulowany opór R (opornik dekadowy) oraz amperomierz A_2 (rys.6).

Należy zbadać :

1. jak zmienia się napięcie wtórne U'_2 przy różnych natężeniach prądu obciążenia I_2 (zmiana oporu R),
2. jaka jest sprawność transformatora.

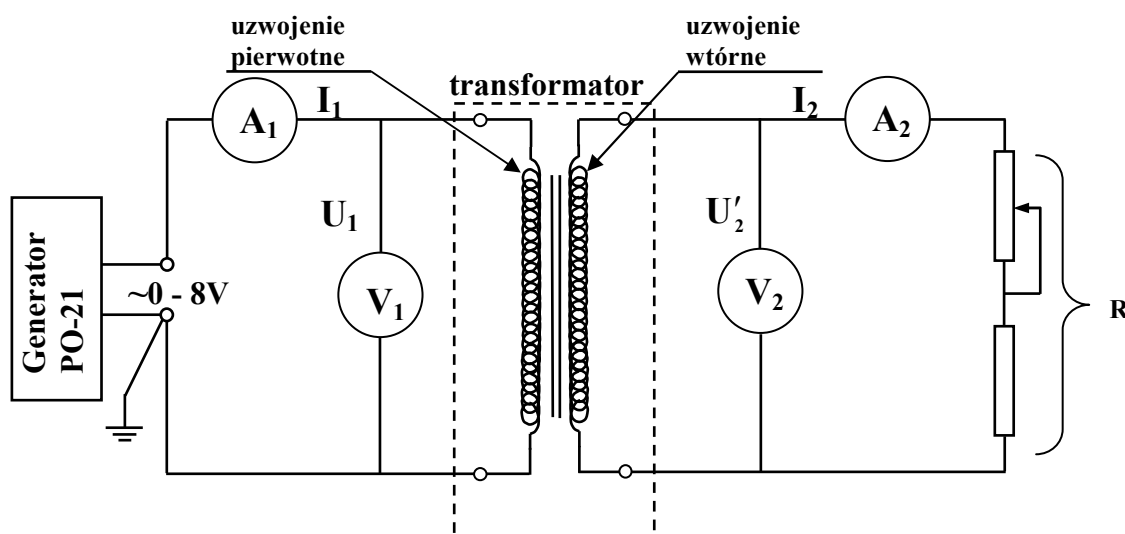
Dla danego napięcia U_1 ustalamy prąd obciążenia I_2 (dobierając odpowiednią wartość oporu R) i odczytujemy wskazania przyrządów pomiarowych obwodów pierwotnego i wtórnego zapisując je w tabeli II. Następnie zmieniamy wartość prądu obciążenia (zmieniając opór R bez zmiany napięcia U_1) i powtarzamy procedurę pomiarową. Pomiary wykonujemy dla zakresu prądów obciążenia $0,25 \div 4$ mA tak, by otrzymać co najmniej 8 punktów pomiarowych.

Uwagi praktyczne

Pomiary rozpoczynamy od maksymalnej wartości prądu obciążenia I_2 . Następnie stopniowo zmniejszamy prąd obciążenia aż do uzyskania zalecanej wartości minimalnej.

Napięcie wejściowe w obwodzie pierwotnym transformatora (z generatora) ustawione na początku pomiarów pozostawiamy bez zmiany.

W trakcie wykonywania serii pomiarów nie zmieniamy wybranego zakresu amperomierza w obwodzie pierwotnym transformatora.



Rys. 6. Schemat układu do badania transformatora w stanie obciążenia.

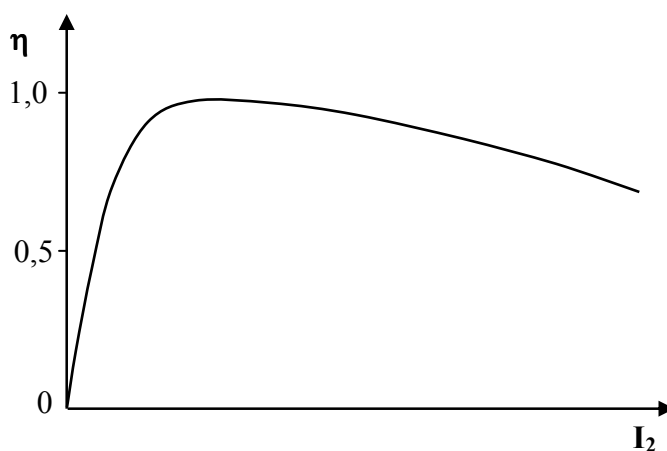
Okaze się teraz, że odczytane napięcia U'_2 są mniejsze od tych, które wynikają z przekładni transformatora dla stanu jałowego. Przyczyną jest spadek napięcia na oporze wewnętrznym uzwojenia transformatora.

Obliczamy moc (pozorną) pierwotną $U_1 I_1$ oraz moc (pozorną) wtórną $U'_2 I_2$, a następnie znajdujemy sprawność pracy transformatora na podstawie równania (9).

Tabela II

Obwód pierwotny			Obwód wtórny			Sprawność transformatora $\frac{U'_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2}{U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_2}$ lub $\approx \frac{U'_2 \cdot I_2}{U_1 \cdot I_1} \times 100\%$
Napięcie U_1	Natężenie I_1	Moc pozorna $M'_p = U_1 \cdot I_1$	Napięcie U'_2	Natężenie I_2	Moc pozorna $M''_p = U'_2 \cdot I_2$	

Przykładowy przebieg sprawności η transformatora w funkcji prądu obciążenia I_2 przedstawia rysunek 7.



Rys.7 Przykładowy przebieg sprawności η transformatora w funkcji prądu obciążenia

VI. Opracowanie.

Zbierając to co powiedziano powyżej, w opracowaniu należy:

1. Wykreślić zależność prądu I_0 w funkcji napięcia U_1 dla stanu jałowego transformatora.
2. Wyznaczyć przekładnię transformatora dla wszystkich par wartości U_1 i U_2 oraz obliczyć wartość średnią przekładni.
3. W oparciu o wyniki pomiarów z tabeli II obliczyć sprawność transformatora.
4. Wykreślić zależność współczynnika sprawności η od prądu obciążenia I_2 .
5. Zaznaczyć na sporządzonym wykresie (punkt 1) niepewności pomiarowe ΔI i ΔU wynikające z klasy przyrządu lub z danych technicznych miernika.

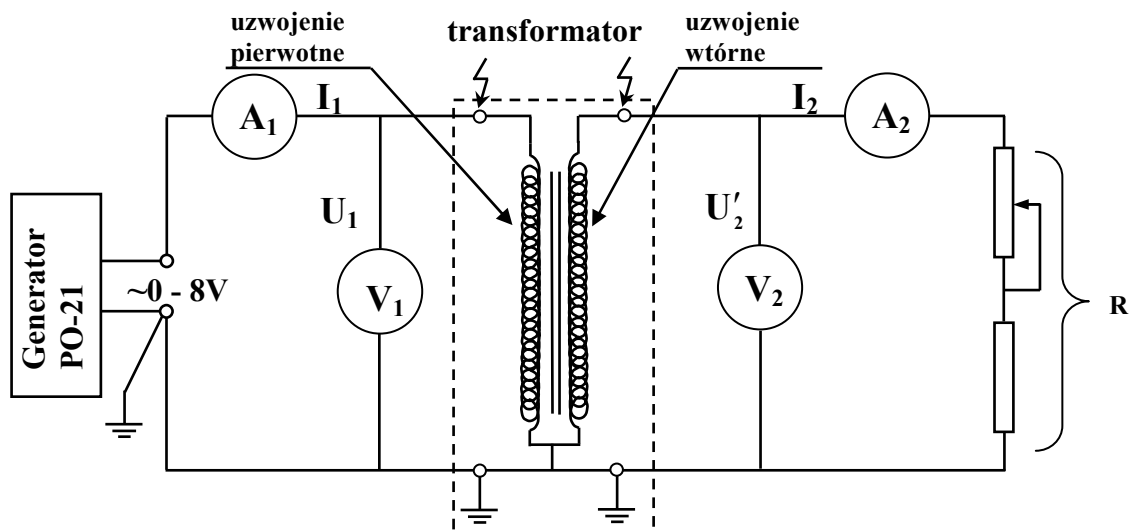
DODATEK DO ĆWICZENIA ET-4 (Badanie transformatora)

Praktyczne rady

1. Do pomiarów napięcia i prądu w obwodzie pierwotnym transformatora najlepiej jest wykorzystać mierniki cyfrowe. W obwodzie wtórnym woltomierz powinien być cyfrowy, amperomierz może być analogowy.
 2. Nastawić częstotliwość generatora PO-21 na 50 Hz. Uzwojenie pierwotne transformatora podłączyć do zacisków wyjścia mocy generatora (patrz schematy z rys. 4, 6 i 8) i wcisnąć klawisz zakresu napięcia 7,75V.
 3. Przy pomiarach w stanie jałowym transformatora napięcie U_1 zmieniać co 1,5 V potencjometrem regulacji napięcia wyjściowego generatora (napięcie odczytujemy na woltomierzu V_1 , nie na mierniku generatora).
 4. Wybrać następujące zakresy mierników:
 - woltomierze:
 - woltomierz V_1 – 20 V,
 - woltomierz V_2 – 200, V
 - amperomierze:
 - dla stanu jałowego:**
 - amperomierz A_1 cyfrowy – 4 lub 20 mA,
 - amperomierz A_1 analogowy (UM3) – 1,5 i 6 mA,
 - dla stanu obciążenia:**
 - amperomierz A_1 cyfrowy – 40 lub 200 mA,
 - amperomierz A_1 analogowy (UM3) – 15 mA,
 - amperomierz A_2 analogowy (UM3) – 6 mA i 1,5 mA.
 5. Stan obciążenia transformatora.
 - Amperomierz A_1 cyfrowy (zakres 40 lub 200 mA), amperomierz A_2 analogowy (zakres 6 mA).
 - a) Początkowo na oporniku dekadowym ustawić wartości oporu na zero. Wtedy opór obciążenia jest równy oporowi włączonemu w szereg z opornikiem dekadowym (opór obciążenia wynosi wówczas $R = 1,2 \text{ k}\Omega$). Przy tym obciążeniu napięcie wyjściowe z generatora ustawić na taką wartość, by woltomierz V_1 wskazywał napięcie z zakresu $3,2 \div 3,8 \text{ V}$. Pokrętłami opornika dekadowego ustalić maksymalny zakładany prąd obciążenia równy 4 mA. Wartość nastawionego napięcia początkowego ma zagwarantować nieprzekroczenie ustawionego zakresu pomiarowego amperomierza A_2 .
 - b) Prąd obciążenia zmieniać w zakresie od 0,25 mA do 4 – 5 mA rozpoczynając od wartości maksymalnej tak, aby uzyskać ok. 8 punktów pomiarowych. Proponowane wartości prądów obciążenia: 4, 3, 2, 1,5, 1, 0,75, 0,5, 0,25 mA. Dla prądów $I_2 = 0,75, 0,5, 0,25 \text{ mA}$ zmienić zakres amperomierza A_2 na 1,5 mA (dla amperomierza UM3).
- Amperomierze A_1 i A_2 analogowe (UM3).
- c) Ustawić na amperomierzu A_1 zakres 15 mA, na amperomierzu A_2 zakres 6 mA (patrz wyżej). Początkowo na oporniku dekadowym ustawić wartości oporu na zero. Wtedy opór obciążenia jest równy oporowi włączonemu w szereg z opornikiem dekadowym (opór obciążenia wynosi wówczas $R = 1,2 \text{ k}\Omega$). Przy tym obciążeniu napięcie wyjściowe z generatora ustawić na taką wartość, by woltomierz V_1 wskazywał napięcie $2,7 \div 2,9 \text{ V}$. Pokrętłami opornika dekadowego ustalić maksymalny zakładany prąd obciążenia równy 4 mA. Wartość nastawionego napięcia początkowego ma zagwarantować nieprzekroczenie ustawionych zakresów pomiarowych amperomierzy A_1 i A_2 .

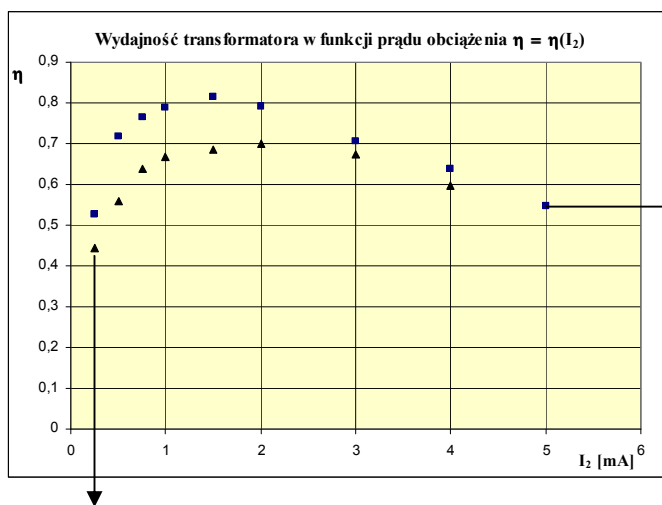
Dalej postępować wg punktu 5b.

6. Z uwagi na fakt, że uzwojenia transformatora (dodatkowy transformator do generatora PO-21) są nawinięte tak, jak w autotransformatorze, należy uziemiony zacisk wyjściowy generatora połączyć z zaciskiem transformatora oznaczonym symbolem masy (rys. 8).



Rys. 8. Schemat układu do badania transformatora w stanie obciążenia z uwzględnieniem wewnętrznych połączeń w puszcze zawierającej transformator.

7. Przykładowe wyniki pomiarów transformatora



Wyniki w tabeli poniżej dla: A_1 – cyfrowy, A_2 – analogowy.

U_1 [V]	I_1 [mA]	U_2 [V]	I_2 [mA]	η
3,26	19,64	7	5	0,547
3,27	15,54	8,1	4	0,638
3,29	11,74	9,1	3	0,707
3,31	7,72	10,1	2	0,791
3,32	5,88	10,6	1,5	0,814
3,33	4,23	11,1	1	0,788
3,33	3,33	11,3	0,75	0,764
3,33	2,43	11,6	0,5	0,717
3,34	1,68	11,8	0,25	0,526

Wyniki w tabeli poniżej dla: A_1 – analogowy, A_2 – analogowy.

U_1 [V]	I_1 [mA]	U_2 [V]	I_2 [mA]	η
3,27	16	7,8	4	0,596
3,52	12,25	9,7	3	0,675
3,76	8,75	11,5	2	0,699
3,88	7	12,4	1,5	0,685
4,02	5	13,4	1	0,667
4,08	4	13,9	0,75	0,639
4,16	3,12	14,5	0,5	0,559
4,23	2	15	0,25	0,443