

Badanie transformatora

Cele ćwiczenia

- Wyznaczenie przekładni transformatora
- Wyznaczenie zależności napięcia oraz sprawności transformatora od natężenia prądu w uzwojeniu wtórnym dla transformatora obciążonego

Wprowadzenie

Prąd przemienny

Prąd przemienny o częstotliwości 50 Hz jest powszechnie wykorzystywany do zasilania urządzeń domowych i przemysłowych. Zależność napięcia przemiennego od czasu t możemy zapisać następującym równaniem

$$u = U_0 \cos(\omega t), \quad (1)$$

gdzie u jest chwilową wartością napięcia, U_0 - napięciem szczytowym a ω - częstotliwością kołową. Argument funkcji kosinus nazywany jest fazą. W obwodzie zamkniętym popłynie prąd o tym samym charakterze zmian, ale jego faza początkowa może różnić się od fazy napięcia

$$i = I_0 \cos(\omega t + \varphi), \quad (2)$$

gdzie i jest chwilową wartością natężenia prądu, I_0 - szczytowym natężeniem prądu a φ - różnicą faz napięcia i prądu. Różnica faz zależy od rodzaju i wartości elementów występujących w obwodzie: rezystancji, indukcyjności i pojemności. Jeżeli w obwodzie występuje jedynie rezystancja, to $\varphi = 0$ czyli nie ma przesunięcia fazowego między napięciem i prądem. W przypadku, gdy obwód ma charakter indukcyjny, napięcie wyprzedza prąd, a różnica faz mieści się w przedziale $\langle -\pi/2, 0 \rangle$. W obwodzie o charakterze pojemnościowym prąd wyprzedza napięcie, a φ mieści się w przedziale $\langle 0, \pi/2 \rangle$.

Moc wydzielana w obwodzie prądu przemiennego wyraża się wzorem

$$P = \frac{1}{2} U_0 I_0 \cos \varphi. \quad (3)$$

Taka sama moc $P = UI$ wydzielalaby się w przypadku przepływu prądu stałego o napięciu $U = U_0 / \sqrt{2}$ i natężeniu $I = I_0 / \sqrt{2}$ dla $\varphi = 0$. Wielkości U oraz I nazywa się odpowiednio napięciem skutecznym i natężeniem skutecznym. Podstawiając wartości skuteczne do równania (3), uzyskamy

$$P = UI \cos \varphi. \quad (4)$$

Jak widać w przypadku prądu przemiennego moc w obwodzie nie zależy jedynie od napięcia i natężenia prądu, ale również od ich przesunięcia fazowego, które powoduje straty mocy. W elektrotechnice wyrażenie $\cos \varphi$ nazywane jest kosinusem kąta strat.

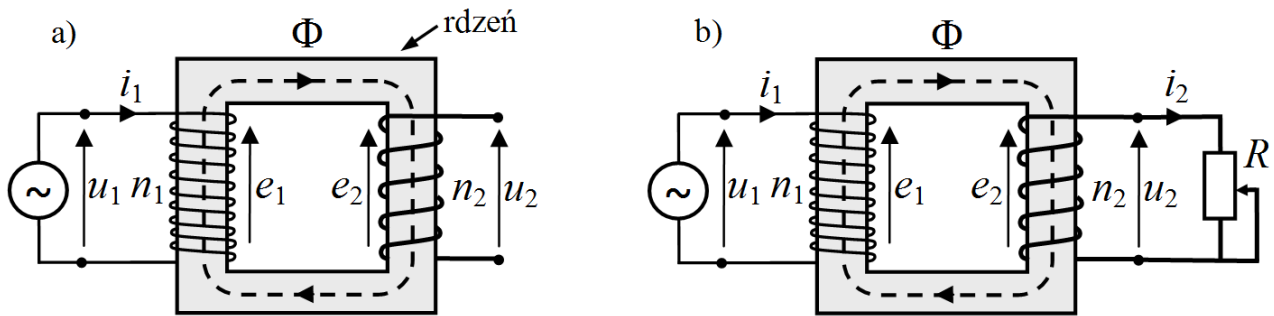
W praktyce posługujemy się wartościami skutecznymi napięcia i prądu. Na miernikach odczytujemy właśnie takie wartości. Musimy jednak mieć świadomość, że wartość napięcia w gniazdkach naszych domów zmienia się w zakresie 0 - 325 V (230 V to wartość skuteczna napięcia).

Transformator

Transformator jest urządzeniem powszechnie wykorzystywanym w energetyce, elektrotechnice, elektronice, spawalnictwie itd. Służy on do zamiany napięcia i natężenia prądu przemiennego na inne napięcie i natężenie prądu bez zmiany częstotliwości prądu. Przykładowo transformatory umożliwiają zamianę wysokiego napięcia stosowanego w energetycznych liniach przesyłowych (np. 400000 V) na znacznie niższe wykorzystywane w domowych urządzeniach. Transformatory w zależności od zastosowania mają różnorodną budowę, a teoria związana z ich działaniem jest bardzo złożona. W niniejszym ćwiczeniu poznamy jedynie podstawowe, często uproszczone, informacje związane z tym urządzeniem.

Transformator składa się z ferromagnetycznego rdzenia i co najmniej dwóch uzwojeń (cewek) nawiniętych na niego (rys. 1). Uzwojenia pierwotne (zasilające) i wtórne (odbiorcze) stanowią obwody elektryczne transformatora, natomiast rdzeń transformatora jest jego obwodem magnetycznym. Zasada

działania transformatora opiera się na zjawisku indukcji elektromagnetycznej. Rozróżniamy trzy podstawowe stany pracy transformatora: *stan jałowy*, *stan zwarcia* oraz *stan obciążenia*.



Rys. 1 Poglądowy schemat budowy transformatora a) praca w stanie jałowym, b) praca w stanie obciążonym

Stan jałowy (stan nieobciążony) transformatora

O stanie jałowym transformatora mówimy w sytuacji, gdy uzwojenie pierwotne podłączone jest do źródła prądu przemiennego, natomiast uzwojenie wtórne jest rozwarne (rys. 1a). Prąd przemienny przepływający w uzwojeniu pierwotnym indukuje w rdzeniu przemienny strumień magnetyczny Φ . Zgodnie z prawem indukcji Faradaya pod wpływem zmiennego pola magnetycznego przenikającego przez uzwojenia pierwotne i wtórne indukują się w nich chwilowe siły elektromotoryczne o wartościach

$$e_1 = -n_1 \frac{d\Phi}{dt}, \quad e_2 = -n_2 \frac{d\Phi}{dt}, \quad (5)$$

gdzie e_1 i e_2 są siłami elektromotorycznymi indukowanymi w uzwojeniach pierwotnym i wtórnym, n_1 i n_2 to liczby zwojów w uzwojeniach pierwotnym i wtórnym, wyrażenie $d\Phi/dt$ oznacza pochodną strumienia magnetycznego Φ po czasie t (szybkość z jaką strumień przenikający przez jeden zwoj zmienia się w czasie). Zwykle rezystancje uzwojeń transformatora są pomijalnie małe, a więc w stanie jałowym transformatora możemy zapisać, że chwilowe spadki napięć na uzwojeniu pierwotnym i wtórnym są równe co do wartości indukowanym w nich siłom elektromotorycznym

$$u_1 = e_1, \quad u_2 = e_2, \quad (6)$$

gdzie u_1 jest chwilowym napięciem źródła prądu dołączonego do uzwojenia pierwotnego a u_2 chwilowym spadkiem napięcia na końcach uzwojenia wtórnego. Korzystając z równań (5) i (6), możemy napisać następującą zależność

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{n_1}{n_2}. \quad (7)$$

Zastępując chwilowe spadki napięć na uzwojeniach pierwotnym i wtórnym odpowiednimi napięciami skutecznymi, możemy ostatecznie zapisać

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2} = K. \quad (8)$$

Liczbę K nazywamy *przekładnią transformatora*. Z równania (8) wynika, że, dobierając odpowiedni stosunek liczby uzwojeń pierwotnego i wtórnego, możemy uzyskać wzrost lub spadek napięcia na wyjściu transformatora w stosunku do napięcia zasilającego.

Stan zwarcia transformatora

O stanie zwarcia transformatora (stanie maksymalnego obciążenia) mówimy w przypadku, gdy uzwojenie pierwotne jest połączone ze źródłem prądu przemiennego, a uzwojenie wtórne jest zwarte. Odpowiada to sytuacji na rys. 1b, gdy regulowany rezystor (odbiornik) jest ustawiony w położeniu $R = 0$. Prąd o natężeniu i_1 płynący w uzwojeniu pierwotnym indukuje zmienny strumień pola magnetycznego w rdzeniu. W uzwojeniu wtórnym pod wpływem indukcji pojawia się prąd przemienny o chwilowym natężeniu i_2 . Jeżeli pominiemy straty w transformatorze, możemy, korzystając z zasady zachowania energii, stwierdzić, że moc przekazywana przez źródło do uzwojenia pierwotnego $U_1 I_1$ jest równa mocy przekazywanej do obwodu wtórnego $U_2 I_2$

$$U_1 I_1 = U_2 I_2, \quad (9)$$

gdzie U_1 , U_2 są skutecznymi napięciami, a I_1 , I_2 są skutecznymi natężeniami prądów odpowiednio w uzwojeniach pierwotnym i wtórnym.

Korzystając z powyższej zależności oraz równania (8), możemy napisać

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{1}{K}. \quad (10)$$

Stan obciążenia transformatora

Do tej pory omówiliśmy dwa skrajne przypadki stanu pracy transformatora, gdy uzwojenie wtórne było rozwarne (rezystancja odbiornika $R = \infty$) oraz, gdy było zwarte (rezystancja odbiornika $R = 0$). O stanie obciążenia transformatora mówimy, gdy do uzwojenia pierwotnego podłączono źródło prądu przemiennego, a uzwojenie wtórne połączono z odbiornikiem o skończonej rezystancji $R \neq 0$ (rys. 1b). W tej sytuacji stosunek napięć w uzwojeniu pierwotnym i wtórnym nie jest równy przekładni transformatora, gdyż w obwodzie uzwojenia wtórnego mamy do czynienia ze spadkiem napięcia na rezystancji uzwojenia wtórnego związanym z przepływem prądu. Badając więc napięcie na uzwojeniu wtórnym, obserwujemy jego spadek wraz ze wzrostem natężenia prądu płynącego w tym uzwojeniu (spadkiem rezystancji odbiornika).

Sprawność transformatora

Powyższe rozważania dotyczą tak zwanego *transformatora idealnego* (bezstratnego). W rzeczywistym transformatorze występują straty spowodowane głównie przez: rezystancję uzwojeń, prądy wirowe powstające w rdzeniu, histerezę ferromagnetyka oraz rozproszenie pola magnetycznego poza rdzeniem. Konstruktorzy starają się zapobiegać tym efektom poprzez: stosowanie w uzwojeniach wysokiej jakości przewodów miedzianych, tworzenie rdzeni transformatorów z szeregu odizolowanych blach ferromagnetycznych, optymalizacji kształtu rdzenia i uzwojeń w zależności od zastosowania transformatora.

Istotnym parametrem transformatora jest jego sprawność obliczana jako stosunek mocy oddanej P_2 do mocy pobranej ze źródła P_1 . Chcąc podać sprawność η w procentach, korzystamy z równania

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} 100\%. \quad (11)$$

Pamiętając, że mamy do czynienia z prądem przemiennym, a obwody mają charakter indukcyjny, wzory na moce pobraną P_1 i oddaną P_2 możemy zgodnie z równaniem (4) zapisać następująco

$$P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1, \quad P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2, \quad (12)$$

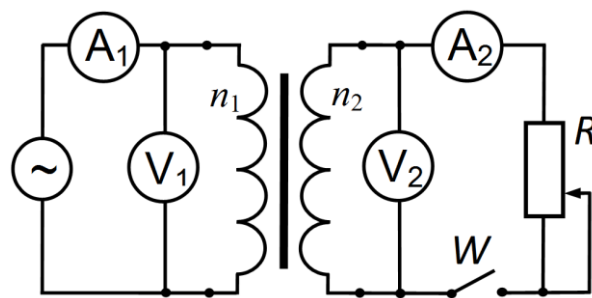
gdzie φ_1 i φ_2 są kątami przesunięcia fazowego pomiędzy napięciem i natężeniem prądu w obwodach pierwotnym i wtórnym. Zakładając z dużym przybliżeniem, że $\varphi_1 = \varphi_2$, możemy napisać przybliżony wzór na sprawność transformatora

$$\eta = \frac{U_2 I_2}{U_1 I_1} 100\%. \quad (13)$$

Chcąc uzyskać maksymalną sprawność transformatora, należy go odpowiednio zaprojektować, uwzględniając parametry elektryczne odbiornika. Dobrze zaprojektowane transformatory bardzo dużej mocy osiągają sprawność 97 - 99%, natomiast w przypadku prostych transformatorów małej mocy sprawność wynosi ok. 80%.

Układ pomiarowy

Do badań transformatora zaprojektowano układ pomiarowy składający się z regulowanego zasilacza prądu przemiennego, transformatora, rezystora suwakowego, włącznika, dwóch woltomierzy i dwóch amperomierzy (rys. 2). Uzwojenia transformatora mają odczepy umożliwiające wybór 200, 400 lub 600 zwojów. Napięcie źródła zasilającego można zmieniać w zakresie 1 - 12 V. Rezystor pełniący rolę odbiornika umożliwia zmiany rezystancji w zakresie 0 - 34 Ω .



Rys. 2 Schemat elektryczny układu pomiarowego

Uwaga! W obwodzie, ze względu na jego indukcyjny charakter, istnieje możliwość powstawania silnych impulsów prądowych w trakcie podłączania i wyłączenia uzwojeń transformatora. W związku z tym zmiana ilości uzwojeń transformatora oraz włączanie i wyłączenie zasilania obwodu powinno odbywać się przy minimalnym napięciu na źródle (1 V).

Przebieg ćwiczenia

A. Badania transformatora w stanie jałowym - wyznaczenie przekładni transformatora

1. Połącz układ zgodnie ze schematem na rys. 2, wybierając liczbę zwojów $n_1 = 400$ i $n_2 = 600$. Włacznik W przełącz na pozycję - rozłączony (0).
2. Ustaw pokrętko regulacji napięcia zasilacza na 1 V i włącz go.
3. Włącz multimetry i dodatkowo wciśnij w nich przyciski koloru niebieskiego w celu wyboru pomiaru prądów i napięć przemiennych.
4. Zmieniaj napięcie zasilania co 1 V w zakresie 1 - 10 V, każdorazowo zapisując napięcia U_1 i U_2 .
5. Powtórz pomiary dla liczby zwojów wtórnych n_2 równej 400 i 200 ($n_1 = 400$).
6. Wykreśl na wspólnym układzie współrzędnych zależności napięcia wtórnego od napięcia pierwotnego $U_2 = f(U_1)$
7. Korzystając z uzyskanych wyników pomiarowych oraz równania (8), wyznacz badane przekładnie transformatora a następnie ich wartości średnie i niepewności pomiarowe.
8. Wyznacz wartości teoretyczne przekładni transformatora ze stosunków liczby zwojów na uzwojeniach pierwotnym i wtórnym (równanie (8)). Porównaj wyniki doświadczalne z teoretycznymi.

B. Badania transformatora w stanie zwarcia

1. Napięcie zasilania nastaw na 1 V, włącznik W ustaw na pozycję - załączony (1) a suwak rezystora w położeniu 0Ω .
2. Wykonaj pomiary natężeń prądów I_1 i I_2 analogicznie do badań wykonanych wcześniej ($n_1 = 400$ a $n_2 = 600, 400$ oraz 200). Każdorazowo po pomiarach napięcie na zasilaczu ustaw w pozycji 1 V.
3. Wykreśl na wspólnym układzie współrzędnych zależności natężenia prądu wtórnego od natężenia prądu pierwotnego $I_2 = f(I_1)$.

C. Badania transformatora w stanie obciążonym

1. Na transformatorze wybierz liczby zwojów $n_1 = 400$ i $n_2 = 200$.
2. Ustaw regulator zasilacza w pozycji 4 V, a włącznik W pozostaw w pozycji - załączony (1).
3. Wykonaj 12 - 15 pomiarów wartości U_1 , I_1 , U_2 oraz I_2 , zmieniając rezystancję odbiornika w zakresie $0 - 34 \Omega$. Rezystancję zmieniaj początkowo co ok. 1Ω , potem co 2Ω , na końcu co 4Ω .
4. Włacznik W przełącz na pozycję - rozłączony (0), a następnie zapisz wartości U_1 , I_1 , U_2 oraz I_2 (w tym przypadku $R = \infty$).
5. Regulator zasilacza ustaw w pozycji 1 V, a następnie wyłącz zasilacz.
6. Wykreśl zależność napięcia od natężenia prądu w obwodzie wtórnym $U_2 = f(I_2)$.
7. Korzystając z wyników pomiarowych oraz równania (13), wylicz sprawności transformatora dla poszczególnych pomiarów, następnie wykreśl zależność sprawności transformatora od natężenia prądu w uzwojeniu wtórnym $\eta = f(I_2)$.

Zapisz wnioski.