



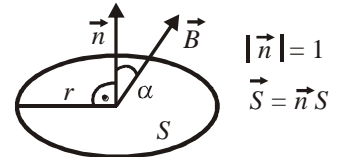
## Ćwiczenie 252. Badanie transformatora

### Wprowadzenie

Istota działania transformatora polega na wykorzystaniu zjawiska indukcji elektromagnetycznej. Zjawisko to polega na wzbudzeniu w obwodzie elektrycznym siły elektromotorycznej indukcji  $\mathcal{E}$ , w skrócie SEM, pod wpływem zmiany w czasie strumienia magnetycznego przenikającego ten obwód. Gdy obwód jest zamknięty, zaczyna w nim płynąć indukowanym prąd elektryczny.

W przypadku jednorodnego pola magnetycznego, dla którego wektor indukcji magnetycznej  $\vec{B}$  jest jednakowy w każdym punkcie, strumień magnetyczny  $\Phi$  przechodzący przez powierzchnię  $S$  jest iloczynem skalarnym wektorów  $\vec{B}$  i  $\vec{S}$ :

$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S} = B \cdot S \cdot \cos \alpha,$$



gdzie  $\alpha$  oznacza kąt pomiędzy wektorami  $\vec{B}$  i  $\vec{S}$ . Wektor  $\vec{n}$ , przedstawiony na rysunku, jest jednostkowym wektorem, prostopadłym do powierzchni  $S$ . Jednostką strumienia magnetycznego jest weber, [Wb];  $1 \text{ Wb} = 1 \text{ T} \cdot \text{m}^2$ . Tutaj T oznacza jednostkę indukcji magnetycznej (tesla):  $1 \text{ T} = 1 \text{ N}/(\text{A} \cdot \text{m}) = 1 \text{ kg A}^{-1} \text{ s}^{-2}$ .

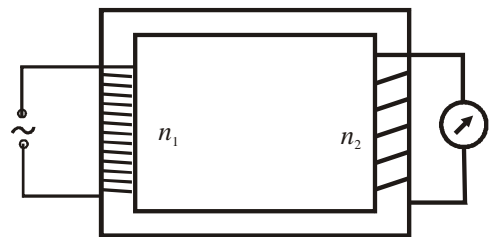
Zależność między SEM,  $\mathcal{E}_{ind}$ , powstającą w obwodzie, a prędkością zmian strumienia magnetycznego przechodzącego przez obwód wyraża prawo Faraday'a, zgodnie z którym siła elektromotoryczna indukcji jest proporcjonalna do prędkości zmian strumienia  $\Phi$ :

$$\mathcal{E}_{ind} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (1)$$

Gdy mamy do czynienia ze zwojnicą składającą się z  $n$  połączonych szeregowo koncentrycznych zwojów, SEM jest  $n$  razy większa niż dla obwodu o jednym zwoju:

$$\mathcal{E}_{ind} = -n \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (2)$$

Opisane zjawisko indukcji elektromagnetycznej wykorzystywane jest w transformatorach do podwyższania lub obniżania (transformowania) napięcia prądu zmiennego. Transformator składa się z dwóch uzwojeń — pierwotnego i wtórnego — nawiniętych na wspólny rdzeń ze stali miękkiej, a więc z materiału o dużej przenikalności magnetycznej. Zadaniem rdzenia jest znaczne wzmocnienie strumienia magnetycznego przechodzącego przez uzwojenia. Rdzeń wykonany jest z odizolowanych od siebie blaszek — taka budowa utrudnia powstawanie w objętości rdzenia prądów wirowych, co zmniejsza straty energii spowodowane nagrzewaniem się transformatora.



Uzwojenie transformatora dołączone do źródła prądu zmiennego nosi nazwę uzwojenia pierwotnego, uzwojenie połączone z odbiornikiem energii elektrycznej nazywane jest uzwojeniem wtórnym. Po przyłożeniu do uzwojenia pierwotnego napięcia zmiennego  $U_1$  popłynie przez nie prąd zmienny, wywołujący w rdzeniu zmienny strumień indukcji magnetycznej  $\Phi$ , który prawie całkowicie skupiony jest wewnątrz rdzenia i praktycznie całkowicie przenika uzwojenie wtórne, indukując w nim SEM indukcji  $\mathcal{E}_2$ :

$$\mathcal{E}_2 = -n_2 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}, \quad (3)$$

gdzie  $n_2$  – liczba zwojów w uzwojeniu wtórnym. Jeśli w obwodzie wtórnym o oporze  $R_2$  płynie prąd  $I_2$ , to napięcie na końcach tego uzwojenia wynosi:

$$U_2 = \mathcal{E}_2 - I_2 R_2. \quad (4)$$

Ten sam strumień indukcji wywołuje równocześnie w uzwojeniu pierwotnym, o liczbie zwojów  $n_1$ , SEM samoindukcji  $\mathcal{E}_1$ :

$$\mathcal{E}_1 = -n_1 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (5)$$

Wówczas napięcie  $U_1$  zasilające obwód pierwotny spełnia zależność:

$$U_1 = \mathcal{E}_1 + I_1 R_1, \quad (6)$$

$R_1$  oznacza opór uzwojenia pierwotnego. Ponieważ na ogół opory uzwojeń są małe, można przyjąć, że  $R_1$  i  $R_2$  dążą do zera i napięcia na uzwojeniach są równe siłom elektromotorycznym:

$$U_1 = \mathcal{E}_1 = -n_1 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad \text{oraz} \quad U_2 = \mathcal{E}_2 = -n_2 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (7)$$

Po podzieleniu równań (7) stronami otrzymujemy:

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

Stosunek liczby zwojów w obu uzwojeniach, równy stosunkowi napięć, nazywany jest przekładnią transformatora  $k$ :

$$k = \frac{n_2}{n_1} = \frac{U_2}{U_1} \quad (9)$$

Rzeczywista wartość przekładni może różnić się od obliczonej na podstawie zależności (9) ze względu na skończony opór omowy uzwojeń, histerezę rdzenia, rozproszenie strumienia indukcji magnetycznej itp. Czynniki te powodują także straty przy przekazywaniu energii: na wydzielanie ciepła w uzwojeniach, powstawanie prądów wirowych i przemagnesowanie rdzenia.

Straty energii w transformatorze określa współczynnik zwany *sprawnością transformatora*  $\eta$ . Sprawność transformatora  $\eta$  jest to stosunek mocy prądu w uzwojeniu wtórnym  $P_2 = U_2 \cdot I_2$  do mocy prądu w uzwojeniu pierwotnym  $P_1 = U_1 \cdot I_1$ :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2 \cdot I_2}{U_1 \cdot I_1} \quad (10)$$

W nowoczesnych transformatorach straty dają się zmniejszyć do kilku procent. Uważając, że dla takich transformatorów moce prądu w pierwotnym i wtórnym uzwojeniu są prawie równe,  $U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2$ , dochodzimy do wniosku, że natężenia prądów w pierwotnym i wtórnym uzwojeniu są odwrotnie proporcjonalne do liczby zwojów w tych uzwojeniach:

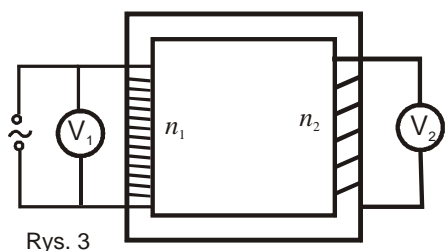
$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{n_2}{n_1} = k.$$

Transformatory znalazły szerokie zastosowanie w technice i radiotechnice, ponieważ przez proste dobieranie liczby zwojów w uzwojeniach możemy w sposób dowolny, ograniczony tylko wytrzymałością na przebicie materiałów izolacyjnych, zmieniać napięcie prądu zmiennego.

## Wykonanie pomiarów

### I. Wyznaczanie przekładni transformatora

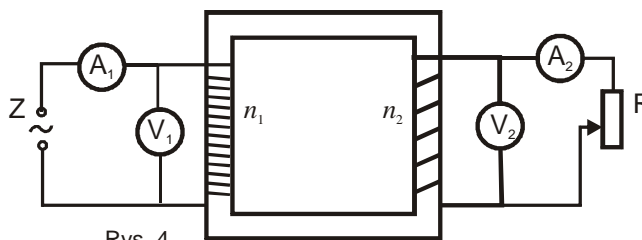
1. Łączymy obwód wg schematu na rys. 3:  
Z – zasilacz lub autotransformator,  $V_1$ ,  $V_2$  – woltomierze.
2. Ustawiamy napięcie zasilające obwód pierwotny na wartość  $U_1$  i odczytujemy napięcie  $U_2$ .



- Pomiary powtarzamy dla 8 różnych wartości napięcia  $U_1$ . (np. bliskich 20 V, 18 V, 16 V, itd.).
- Obliczamy przekładnię  $k_i$  dla poszczególnych pomiarów oraz średnią wartość  $\bar{k}$ .

## II. Wyznaczanie sprawności transformatora

- Łączymy obwód wg schematu na rys. 4,  $R$  – opornik,  $A_1$  i  $A_2$  – amperomierze.
- Ustawiamy napięcie zasilacza na wartość bliską 15 V i przy najmniejszej wartości opornika regulowanego  $R$  odczytujemy napięcia i natężenia w uzwojeniach transformatora.
- Pomiary powtarzamy kilkakrotnie, przy coraz to większych wartościach oporu  $R$ .
- Dla każdego pomiaru obliczamy wartość sprawności.
- Sporządzamy wykres zależności  $\eta$  od mocy prądu w uzwojeniu wtórnym,  $\eta = f(P_2)$ .



Rys. 4

**UWAGA.** Przed włączeniem obwodu do sieci ustawiamy potencjometr zasilacza na zerową wartość napięcia, a przyrządy pomiarowe na maksymalny zakres pomiarowy. Po uruchomieniu pomiaru dobieramy tak zakresy przyrządów, by wykorzystać ich możliwie najczulszy zakres (np. amperomierz powinien wyświetlać wartość 12,00 mA a nie 0,012 A).

### Rachunek błędów

**I. Przekładnia transformatora:**  $k = U_2 / U_1$ .

Do obliczenia błędu pojedynczego pomiaru przekładni  $\Delta k$  stosujemy metodę różniczki zupełnej. Otrzymamy wzór:

$$\Delta k = k \left( \frac{\Delta U_2}{U_2} + \frac{\Delta U_1}{U_1} \right).$$

**II. Sprawność transformatora:**  $\eta = \frac{U_2 \cdot I_2}{U_1 \cdot I_1}$ .

Błędem pomiaru obarczone są wszystkie cztery wielkości występujące w powyższym wzorze. Błąd bezwzględny  $\Delta \eta$  obliczamy metodą różniczki zupełnej. Po obliczeniach otrzymamy:

$$\Delta \eta = \eta \left( \frac{\Delta U_1}{U_1} + \frac{\Delta I_1}{I_1} + \frac{\Delta U_2}{U_2} + \frac{\Delta I_2}{I_2} \right).$$

**III. Moc prądu w uzwojeniu wtórnym:**  $P_2 = U_2 \cdot I_2$ .

Do obliczenia  $\Delta P_2$  również stosujemy metodę różniczki zupełnej:  $\Delta P_2 = P_2 \left( \frac{\Delta U_2}{U_2} + \frac{\Delta I_2}{I_2} \right)$ .

**Błędy bezwzględne**  $\Delta \eta$  i  $\Delta P_2$  obliczamy dla kilku pomiarów i zaznaczamy na wykresie  $\eta = f(P_2)$ .

Dokładność pomiaru  $\Delta U$ ,  $\Delta I$  podana jest w instrukcji przyrządu. W przypadku mierników cyfrowych wykorzystywanych w ćwiczeniu należy przyjąć dokładność (błąd względny) równą 1,5 % zarówno dla napięcia jak i natężenia prądu zmiennego.

Wynik obliczeń błędu pomiaru powinien być zaokrąglony w górę.