

# ĆWICZENIE nr 9

## BADANIE TRANSFORMATORA JEDNOFAZOWEGO

**CEL ĆWICZENIA:** poznanie zasady działania, budowy, właściwości i metod badania transformatora.

### PROGRAM ĆWICZENIA

1. Wiadomości ogólne
  - 1.1. Budowa i zasada działania transformatora
    - 1.2. Stan jałowy transformatora
    - 1.3. Stan obciążenia transformatora
    - 1.4. Straty mocy czynnej i sprawność transformatora
    - 1.5. Charakterystyka zewnętrzna i zmienność napięcia transformatora
2. Badania laboratoryjne
  - 2.1. Schemat układu połączeń
  - 2.2. Wykonanie pomiarów
  - 2.3. Opracowanie wyników pomiarów
3. Uwagi i wnioski
4. Pytania kontrolne

# 1. WIADOMOŚCI OGÓLNE

## 1.1. Budowa i zasada działania transformatora

Transformator jest urządzeniem elektrycznym, działającym na zasadzie indukcji elektromagnetycznej, służącym do zmiany wartości napięć i prądów przemiennych przy prawie niezmienniej mocy.

Transformator jest scharakteryzowany przez następujące ważniejsze wielkości znamionowe:

- a) moc pozorna w  $V \cdot A$ ,  $kV \cdot A$  lub  $MV \cdot A$ ,
- b) napięcia pierwotne i wtórne w  $V$  lub  $kV$ ,
- c) prądy pierwotny i wtórny w  $A$  lub  $kA$ .

Ze względu na zastosowanie i wartość mocy transformatory można podzielić na dwie zasadnicze grupy:

-- **transformatory jednofazowe**, o mocach do kilkuset wołtoamperów. Transformatory te są stosowane między innymi w miernictwie elektrycznym, jako tzw. przekładniki oraz w elektronice jako transformatory zasilające urządzenia elektroniczne.

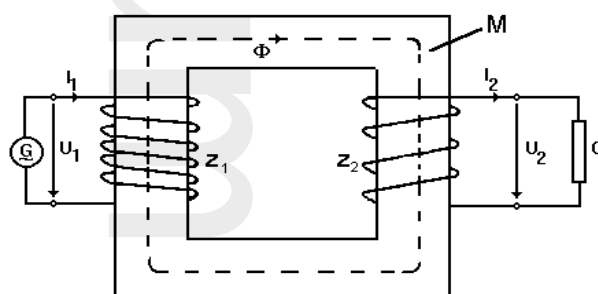
-- **transformatory trójfazowe**, o mocach, dochodzących do kilkuset magawoltoamperów i napięciach rzędu setek kilowoltów. Są to najczęściej transformatory olejowe, w których olej spełnia rolę czynnika chłodzącego oraz stanowi dodatkową izolację elektryczną. Transformatory te stosowane są przy przesyłaniu energii elektrycznej na duże odległości.

Zasadniczymi elementami transformatora jednofazowego są:

a) obwód magnetyczny, tzw. **rdzeń**, wykonany z pakietu cienkich (o grubości 0,35 mm) blach ferromagnetycznych, odizolowanych elektrycznie od siebie, będących stopem żelaza o znikomej zawartości węgla (ok. 0,05%) oraz krzemu (ok. 3,5%),

b) co najmniej dwa **uzwojenia elektryczne**, wykonane z izolowanego drutu nawojowego, najczęściej miedzianego, umieszczone na rdzeniu.

Na rys.1 przedstawiono schemat transformatora jednofazowego.



Rys.1. Schemat transformatora jednofazowego: M- obwód magnetyczny (rdzeń);  $\phi$ - strumień magnetyczny w rdzeniu;  $z_1$ ,  $z_2$ - liczby zwojów, odpowiednio: uzwojenia pierwotnego i wtórne; G- źródło napięcia zasilającego; O- odbiornik energii elektrycznej;  $U_1$ ,  $I_1$ - odpowiednio: napięcie pierwotne i prąd pierwotny;  $U_2$ ,  $I_2$ - odpowiednio: napięcie wtórne i prąd wtórny.

Uzwojenie, do którego przyłożone jest napięcie zasilające nazywa się **uzwojeniem pierwotnym**, natomiast uzwojenie, do którego przyłączony jest odbiornik- **uzwojeniem wtórnym**.

**wtórnym.** Przepływ energii elektrycznej odbywa się w kierunku od źródła zasilającego do odbiornika. Nośnikiem energii w transformatorze jest strumień magnetyczny.

**Napięcie wtórne** jest na ogół różne od **napięcia pierwotnego**. Jeżeli napięcie wtórne jest wyższe od napięcia pierwotnego, to transformator jest **transformatorem podwyższającym napięcie**, w przeciwnym przypadku- **transformatorem obniżającym napięcie**. Należy zaznaczyć, że ten sam transformator może być podwyższającym lub obniżającym napięcie w zależności od kierunku przepływającej energii.

## 1.2. Stan jałowy transformatora

W **stanie jałowym transformatora** uzwojenie pierwotne jest zasilane ze źródła napięcia sinusoidalnie zmiennego, a uzwojenie wtórne jest rozwarne tzn., że do zacisków tego uzwojenia nie jest przyłączony odbiornik i prąd  $I_2=0$ . Wówczas w uzwojeniu pierwotnym płynie tzw. **prąd jałowy**  $I_0$ , którego wartość nie przekracza zwykle 10% prądu znamionowego.

Prąd jałowy ma dwie składowe: bierną, związaną z wytwarzaniem strumienia w rdzeniu i czynną, związaną ze stratami mocy czynnej w rdzeniu. Udział tej drugiej w prądzie jałowym jest b. mały (współczynnik mocy transformatora w stanie jałowym  $\cos\phi_0=(0,1-0,3)$ ) i w dalszych rozważaniach można przyjąć, że strumień magnetyczny jest wytwarzany przez amperozwoje  $I_0 z_1$ .

Sinusoidalnie zmienny strumień magnetyczny  $\phi$ , skojarzony z uzwojeniami pierwotnym i wtórnym, indukuje w nich- zgodnie z zasadą indukcji elektromagnetycznej- siły elektromotoryczne, o wartościach chwilowych, odpowiednio

$$e_1 = -z_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (1)$$

$$e_2 = -z_2 \frac{d\phi}{dt} \quad (2)$$

Dla wartości skutecznych wyrażenia (1) i (2) przyjmują następujące postacie

$$E_1 = 4,44 f z_1 \phi_m \quad (3)$$

$$E_2 = 4,44 f z_2 \phi_m \quad (4)$$

gdzie:  $\phi_m$  - amplituda strumienia magnetycznego w rdzeniu w  $Wb$ ,  $f$ - częstotliwość w  $Hz$  Dzieląc stronami wyrażenia (3) i (4) otrzymuje się wzór na **przekładnię transformatora**

$$g = \frac{E_1}{E_2} = \frac{z_1}{z_2} \quad (5)$$

W stanie jałowym prąd  $I_2=0$ , zatem  $U_2=E_2$ , jeżeli jednocześnie założymy, że prąd  $I_0=0$ , to spadek napięcia w uzwojeniu pierwotnym będzie równy zero i  $U_1=E_1$ . Wówczas wzór (5) przyjmie postać, która nazywa się **prawem transformacji napięć**

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{z_1}{z_2} \quad (6)$$

Prawo transformacji napięć stosuje się w **przekładnikach napięciowych**, które są transformatorami obniżającymi wysokie napięcie (np. 6 kV) do wartości 100 V, co umożliwia pośredni pomiar tych napięć typowymi woltomierzami. Uzwojenie pierwotne przekładników prądowych dołączone jest do mierzonego napięcia, natomiast uzwojenie wtórne zasila woltomierz.

### 1.3. Stan obciążenia transformatora

Jeżeli do zacisków uzwojenia wtórnego przyłączymy odbiornik, to pod wpływem siły elektromotorycznej  $E_2$  w obwodzie wtórnym transformatora popłynie prąd  $I_2$ . Prąd ten, przepływając przez uzwojenie wtórne wytworzy strumień magnetyczny skierowany (zgodnie z regułą Lenza) przeciwnie do strumienia magnetycznego  $\Phi$ . Ponieważ napięcie pierwotne  $U_1$  nie uległo zmianie, to również strumień  $\Phi$  nie może się zmienić. Zatem w uzwojeniu pierwotnym popłynie taki prąd  $I_1$ , aby amperozwoje wypadkowe obydwu uzwojeń miały poprzednią wartość  $I_0 z_1$ , czyli

$$I_1 z_1 - I_2 z_2 = I_0 z_1 \quad (7)$$

Jeżeli przyjąć jak poprzednio, że prąd jałowy  $I_0=0$ , to otrzymamy zależność, określającą **prawo transformacji prądów**

$$I_1 z_1 = I_2 z_2 \quad (8)$$

lub

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{z_2}{z_1} = \frac{1}{g} \quad (9)$$

Prawo transformacji prądów wykorzystuje się w **przekładnikach prądowych**, czyli w transformatorach obniżających b. duże prądy do wartości 5 A, umożliwiające pomiar pośredni tych prądów przy użyciu typowych amperomierzy. Uzwojenie pierwotne przekładników prądowych włącza się szeregowo w obwód mierzonego prądu, natomiast do uzwojenia wtórnego przyłącza się amperomierz.

Moc pozorna transformatora po stronie pierwotnej wyraża się zależnością

$$S_1 = U_1 I_1 \quad (10)$$

natomiast po stronie wtórnej

$$S_2 = U_2 I_2 \quad (11)$$

Uwzględniając zależności (6) i (8) otrzymuje się **prawo transformacji mocy**

$$S_1 = S_2 \quad (12)$$

Jeżeli do zacisków uzwojenia wtórnego transformatora dołączy się odbiornik o impedancji  $Z_0$ , to

$$Z_0 = \frac{U_2}{I_2} \quad (13)$$

wówczas impedancja między zaciskami pierwotnymi

$$Z_1 = \frac{U_1}{I_1} \quad (14)$$

Uwzględniając zależności (6) i (8) otrzymuje się **prawo transformacji impedancji**

$$Z_1 = Z_0 g^2 \quad (15)$$

### 1.4. Straty mocy czynnej i sprawność transformatora

W transformatorze występują straty mocy czynnej w rdzeniu i uzwojeniach, powodujące nagrzewanie się tych elementów.

Podczas przemagnesowania rdzenia przemiennym strumieniem magnetycznym  $\Phi$  powstają **straty histerezowe**

$$\Delta P_h \sim f B_m^2 \quad (16)$$

gdzie  $B_m$  - amplituda indukcji w rdzeniu, wyrażająca się zależnością  $B_m = \Phi_m / S_{Fe}$ , w której  $S_{Fe}$  jest przekrojem poprzecznym rdzenia.

Jednocześnie przemienny strumień magnetyczny indukuje w rdzeniu prądy wirowe, które są przyczyną powstawania **strat wirowych**

$$\Delta P_w \sim d^2 f^2 B_m^2 \quad (17)$$

w zależności tej wielkość  $d$  jest grubością blachy rdzenia

Całkowite straty mocy w rdzeniu, czyli tzw. **straty jałowe** transformatora

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_h + \Delta P_w \sim B_m^2 \quad (18)$$

Przy stałej częstotliwości  $f$  zachodzi proporcjonalność  $\Phi_m \sim U_1$ , a stąd

$$\Delta P_{Fe} \sim U_1^2 \quad (19)$$

Jakość blach użytych do budowy rdzeni transformatorów ocenia się na podstawie **stratności magnetycznej**, czyli ilorazu całkowitych strat mocy w rdzeniu  $\Delta P_{Fe}$  (w  $W$ ) i masy rdzenia  $m_{Fe}$  (w  $kg$ ).

Obecnie podstawowym materiałem stosowanym do budowy rdzeni (patrz p. 1.1) jest blacha zimnowalcowana o stratności magnetycznej ok.  $0,5 W/kg$  dla  $B_m = 1T$  i  $f = 50 Hz$ .

Straty jałowe wyznacza się w stanie jałowym transformatora, mierząc moc czynną watomierzem, włączonym w obwód pierwotny. Ponieważ w stanie jałowym prąd  $I_0$  jest b. mały, można przyjąć, że wskazanie watomierza  $P_w = \Delta P_{Fe}$ .

Straty jałowe są praktycznie niezależne od obciążenia transformatora, gdyż indukcja magnetyczna w rdzeniu prawie nie zmienia swojej wartości ( $U_1 \approx const$ ;  $B_m \approx const$ )

Współczynnik mocy transformatora w stanie jałowym (patrz p.1.2.) wyznacza się ze wzoru

$$\cos \varphi_0 = \frac{\Delta P_{Fe}}{U_1 I_1} \quad (20)$$

W stanie obciążenia transformatora w obydwu uzwojeniach płyną prądy, które powodują występowanie strat mocy w uzwojeniach, czyli tzw. **strat obciążeniowych**

$$\Delta P_u = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 \quad (21)$$

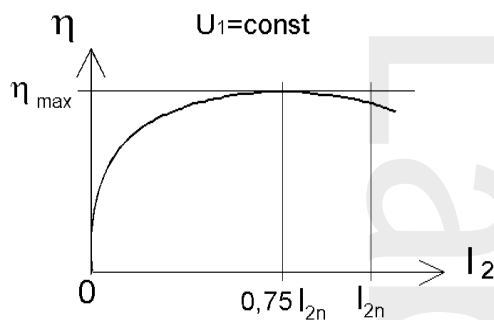
gdzie:  $I_1, I_2$ - odpowiednio: prąd pierwotny i prąd wtórny;  $R_1, R_2$ - odpowiednio: rezystancje uzwojenia pierwotnego i uzwojenia wtórnego.

Ze względu na straty mocy czynnej w transformatorze moc  $P_2$  oddawana do odbiornika jest mniejsza od mocy  $P_1$ , pobieranej przez transformator. Dla oceny jakości transformatora wyznacza się jego **sprawność** z zależności

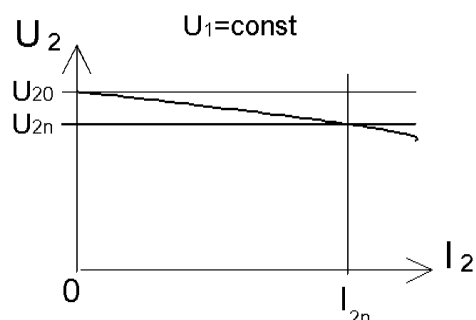
$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_{Fe} + \Delta P_u} \quad (22)$$

W stanie jałowym sprawność jest równa zero, a przy około 75% obciążenia znamionowego osiąga maksimum. Sprawność transformatorów energetycznych b. dużych mocy osiąga wartość (92-99)%, natomiast dla transformatorów jednofazowych małej mocy nie przekracza zwykle 80%.

Na rys.2 przedstawiona jest zależność sprawności  $\eta$  od prądu obciążenia  $I_2$  transformatora.



Rys.2. Charakterystyka sprawności



Rys.3. Charakterystyka zewnętrzna

### 1.5. Charakterystyka zewnętrzna i zmienność napięcia transformatora

Transformator podczas normalnej pracy przy napięciu pierwotnym  $U_1$  o prawie stałej wartości i zmiennym obciążeniu. Przy wzroście obciążenia prądy  $I_1$  i  $I_2$  rosną, w związku z czym rosną spadki napięć w uzwojeniu pierwotnym i uzwojeniu wtórnym i napięcie wtórne nieco maleje. Ilustruje to charakterystyka zewnętrzna transformatora  $U_2 = f(I_2)$ , przedstawiona na rys.3.

Dla określenia spadków napięć w uzwojeniach transformatora operuje się tzw. **zmiennością napięcia**

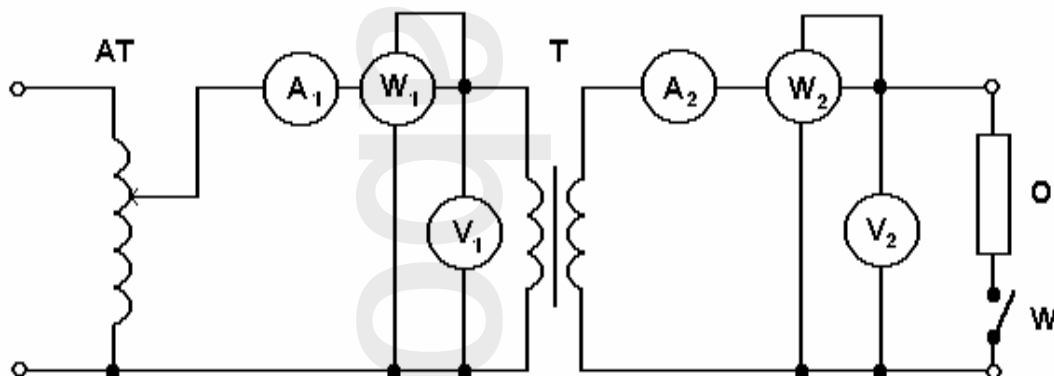
$$\Delta U_{\%} = \frac{U_{20} - U_{2n}}{U_{20}} 100\% \quad (23)$$

gdzie:  $U_{20}$ - napięcie wtórne w stanie jałowym;  $U_{2n}$ - napięcie wtórne przy obciążeniu znamionowym.

W prawidłowo zaprojektowanym transformatorze zmienność napięcia nie powinna przekraczać kilku procent napięcia znamionowego.

## 2. BADANIA LABORATORYJNE

### 2.1. Schemat układu połączeń



Wykaz aparatury i jej dane znamionowe:

- AT- autotransformator regulacyjny.....  
 T- transformator badany.....  
 O- odbiornik.....  
 A<sub>1</sub>-amperomierz.....  
 V<sub>1</sub>-woltomierz.....  
 W<sub>1</sub>-watomierz.....  
 A<sub>2</sub>-amperomierz.....  
 V<sub>2</sub>-woltomierz.....  
 W<sub>2</sub>-watomierz.....  
 W- wyłącznik.....

### 2.2. Wykonanie pomiarów

Badanie transformatora należy przeprowadzić zgodnie z instrukcją dodatkową. Wyniki pomiarów i obliczeń zamieścić w tabeli.

Lp.	U <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	α <sub>1</sub>	k <sub>w1</sub>	P <sub>1</sub>	U <sub>2</sub>	I <sub>2</sub>	α <sub>2</sub>	k <sub>w2</sub>	P <sub>2</sub>	η
	V	A	dz	W/dz	W	V	A	dz	W/dz	W	-

Przykłady obliczeń:

$$P_1 = \alpha_1 k_{w1} =$$

$$P_2 = \alpha_2 k_{w2} =$$

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

### 2.3. Opracowanie wyników pomiarów

a) Dane znamionowe transformatora:

$$U_{1n} =$$

$$I_{1n} =$$

$$U_{2n} =$$

$$I_{2n} =$$

$$S_n =$$

b) Wykreślić charakterystyki  $U_2 = f(I_2)$  oraz  $\eta = f(I_2)$

c) Obliczyć przekładnię transformatora

$$g = \frac{U_{1o}}{U_{2o}} =$$

d) Wyznaczyć prąd jałowy

$$I_{1o} =$$

e) Obliczyć procentowy udział prądu jałowego w prądzie znamionowym

$$I_{1o\%} = \frac{I_{1o}}{I_{1n}} 100\% =$$

f) Obliczyć zmienność napięcia

$$\Delta U_{\%} = \frac{U_{2o} - U_{2n}}{U_{2o}} 100\% =$$

g) Wyznaczyć straty jałowe (straty mocy czynnej w rdzeniu)

$$\Delta P_{Fe} = P_{1o} =$$

h) Obliczyć całkowite straty mocy dla znamionowego obciążenia transformatora

$$\Delta P_n = P_{1n} - P_{2n} =$$

i) Obliczyć straty obciążeniowe (straty mocy czynnej w uzwojeniach) dla znamionowego obciążenia

$$\Delta P_u = \Delta P_n - \Delta P_{Fe} =$$

j) Wyznaczyć sprawność maksymalną i wartość prądu wtórnego, dla którego ona występuje

$$\eta_{\max} = \quad \text{dla } I_2 =$$

k) Obliczyć współczynnik mocy transformatora w stanie jałowym

$$\cos \varphi_{1o} = \frac{P_{1o}}{U_{1o} I_{1o}} =$$

l) Obliczyć współczynnik mocy po stronie pierwotnej i po stronie wtórnej transformatora przy obciążeniu znamionowym

$$\cos \varphi_{1n} = \frac{P_{1n}}{U_{1n} I_{1n}} =$$

$$\cos \varphi_{2n} = \frac{P_{2n}}{U_{2n} I_{2n}} =$$



**UWAGA!**

- indeksy "1" i "2", dotyczą odpowiednio strony pierwotnej i strony wtórnej transformatora,
- indeks "o" dotyczy stanu jałowego transformatora (pomiar pierwszy),
- indeks "n" dotyczy obciążenia znamionowego transformatora (pomiar ostatni).

**3. UWAGI I WNIOSKI****4. PYTANIA KONTROLNE**

1. Jakie są zasadnicze elementy transformatora?
2. Omówić zasadę działania transformatora.
3. Z jakiego materiału wykonany jest rdzeń transformatora i dlaczego?
4. Czy transformator przedstawiony na rys.1 jest podwyższającym napięcie?
5. Co to jest przekładnia transformatora i jak się ją wyznacza?
6. Co to jest stan jałowy transformatora?
7. Co to są straty straty jałowe transformatora i od czego zależą?
8. Omówić sposób pomiaru strat jałowych.
9. Na czym polega obciążenie transformatora.
10. Co to są straty obciążeniowe transformatora i od czego zależą?
11. Podać wszystkie prawa transformacji.