

Indukcja wzajemna



Transformator

dr inż. Romuald Kędzierski

Do czego służy transformator?

*Jest to urządzenie (zwane też **maszyną elektryczną**), które wykorzystując zjawisko indukcji elektromagnetycznej pozwala na zmianę wartości napięcia elektrycznego **prądu przemiennego** oraz jego natężenia.*

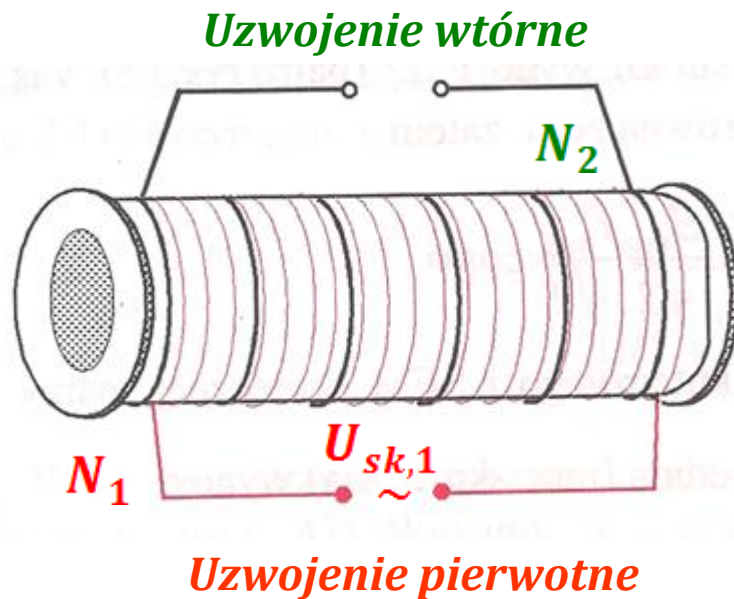
*Jest to urządzenie służące do przenoszenia energii elektrycznej prądu przemiennego – z wykorzystaniem zjawiska indukcji elektromagnetycznej – z jednego obwodu elektrycznego do drugiego, przy czym **nie ulega zmianie pierwotna częstotliwość prądu**, natomiast **zwykle zmieniane jest jego napięcie elektryczne**.*

Jego wynalezienie było jednym z głównych powodów tego, że w instalacjach elektrycznych wykorzystuje się prąd przemienny zamiast prądu stałego !

Zasada działania transformatora

Założenie wyjściowe:

- dwie zwojnice (cewki) – o różnych liczbach zwojów N są nawinięte na wspólnym rdzeniu ferromagnetycznym \Rightarrow mają takie same pole powierzchni przekroju poprzecznego S
- Jedna ze zwojnic (zwana wtedy **uzwojeniem pierwotnym**) jest podłączona do źródła przemiennego napięcia elektrycznego.



Przemiennie napięcie zasilające
obwód pierwotny



Płynie w nim prąd przemienny



Powstaje zmienny strumień
magnetyczny, który przenika także
przez drugą zwojnicę (**obwód wtórny**)



W obwodzie wtórnym – zgodnie z
prawem indukcji Faradaya – powstaje
SEM indukcji

Możliwe stany pracy transformatora

Stan (bieg) jałowy transformatora:

Uzwojenie pierwotne jest podłączone do źródła napięcia przemiennego, natomiast uzwojenie wtórne jest otwarte (nie podłączone do odbiornika prądu)

W obwodzie wtórnym nie płynie prąd elektryczny!

Stan (bieg) obciążony transformatora:

Uzwojenie pierwotne jest podłączone do źródła napięcia przemiennego, natomiast uzwojenie wtórne jest podłączone do odbiornika prądu o pewnym oporze elektrycznym R .

Założenie dodatkowe:

Wszelkie opory elektryczne* występujące w rozpatrywanym układzie zwojnic są na tyle małe, że można je zaniedbać!



Wartość SEM indukcji w uzwojeniu pierwotnym jest równa (w przybliżeniu) napięciu zasilającym obwód pierwotny.

* Oprócz oporów tzw. czynnych R , w obwodach prądu przemiennego występują też opory elektryczne związane z pojemnością elektryczną tych obwodów, jak i ich indukcyjnością!

Uwaga:

W rozpatrywanym przypadku można przyjąć, że strumień pola magnetycznego jest taki sam w dowolnym przekroju rdzenia, na którym nawinięte są zwojnice!

Wniosek:

Przez każdy ze zwojów – tak uzwojenia pierwotnego, jak i wtórnego – przenika taki sam strumień magnetyczny



W każdym ze zwojów obu uzwojeń powstaje taka sama co do wartości SEM indukcji!

Jeżeli chwilowa wartość strumienia magnetycznego – przenikającego przez każdą ze zwojnic – wynosi Φ_{ch}

to w każdym ze zwojów powstanie SEM o wartości:

$$\varepsilon_{i,ch} = - \frac{\Delta \Phi_{ch}}{\Delta t}$$

Stąd też, w każdej ze zwojnic – o pewnej liczbie zwojów N – powstanie SEM indukcji o wartości:

$$\varepsilon_{i,ch,1} = -N_1 \cdot \varepsilon_{i,ch}$$

$$\varepsilon_{i,ch,2} = -N_2 \cdot \varepsilon_{i,ch}$$

Po podzieleniu obu równań stronami mamy:

$$\frac{\mathcal{E}_{i,ch,2}}{\mathcal{E}_{i,ch,1}} = \frac{-N_2 \cdot \mathcal{E}_{i,ch}}{-N_1 \cdot \mathcal{E}_{i,ch}}$$

Jeżeli opór uzwojeń jest pomijalnie mały, a obwód wtórny jest rozarty (bieg jałowy: *nie płynie w nim prąd*), to:

$$\mathcal{E}_{i,ch,1} \cong U_1 \quad \mathcal{E}_{i,ch,2} = U_2$$

Stąd:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

Zależność ta dotyczy zarówno wartości chwilowych napięć, jak i maksymalnych czy skutecznych!

Uwaga:

Stosunek: $\frac{N_2}{N_1} = k$

Nazywa się **przekładnią transformatora** (współczynnikiem transformacji).

Wnioski:

$k > 1 \Rightarrow$ transformator podwyższa napięcie elektryczne

$k < 1 \Rightarrow$ transformator obniża napięcie elektryczne

Czy podczas pracy transformatora występują straty energii?

Oczywiście!

Są to tzw. :

straty w żelazie



mają miejsce w rdzeniu transformatora



wynikają z powstania tzw. prądów wirowych oraz histerezy magnetycznej podczas przemagnesowania rdzenia

straty w miedzi



mają miejsce w uzwojeniach transformatora



wynikają z tego, że uzwojenia mają pewne niezerowe opory elektryczne

Sprawność transformatora



stosunek mocy w obwodzie wtórnym do mocy pobieranej w obwodzie pierwotnym

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

Uwaga:

We współczesnych transformatorach, straty mocy zazwyczaj nie przekraczają 3%!

Dlatego można przyjąć (w przybliżeniu), że:

$$P_2 \cong P_1$$

Stąd:

$$U_2 \cdot I_2 \cong U_1 \cdot I_1$$

Zatem:

$$\frac{U_2}{U_1} \cong \frac{I_1}{I_2}$$

Wniosek:

Jeżeli transformator, w którym straty energii można pominąć, *podwyższa „k”* razy *napięcie elektryczne*, to także *„k”* razy *obniża natężenie prądu elektrycznego*.

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1} = k = \frac{I_1}{I_2}$$

Zadanie 1.

Dany jest transformator, w którym liczba zwojów uzwojenia pierwotnego wynosi 600, natomiast liczba zwojów w uzwojeniu wtórnym jest o 450 mniejsza. Straty energii w transformatorze można pominąć. Napięcie zasilające (prądu sinusoidalnie zmiennego) ma wartość skuteczną 230 V, natomiast moc wydzielona w odbiorniku podłączonym do obwodu wtórnego wynosiła 920 W. Oblicz wartość maksymalną natężenia płynącego przez odbiornik podłączony do obwodu wtórnego.

Zadanie 2.

Oblicz sprawność transformatora o przekładni 10, jeżeli natężenie skuteczne prądu w obwodzie pierwotnym wynosi 10 amperów, natomiast w uzwojeniu wtórnym 600 miliamperów.

Zadanie 3.

Transformator o sprawności 95% podwyższa napięcie od wartości skutecznej 220 V do 1100 V. Oblicz amplitudę natężenia prądu w uzwojeniu pierwotnym, jeżeli w uzwojeniu płynie prąd o natężeniu skutecznym 0,2 ampera.

***Rozszerzenie
wiadomości, poza
obowiązujący
obecnie zakres
profilu rozszerzonego***

Uwaga:

W obwodach prądu przemiennego, oprócz oporu czynnego R związanego z jego oporem omowym, występują również następujące **opory bierno**:

Opór indukcyjny (induktancja):

$$R_L = X_L = \omega \cdot L$$

Opór pojemnościowy (kapacytancja):

$$R_C = X_C = \frac{1}{\omega \cdot C}$$

Opór całkowity (zawada) obwodu składającego się z szeregowo połączonych elementów o pewnym oporze czynnym R , indukcyjności L i pojemności elektrycznej C (tzw. **obwód RLC**), dana jest zależnością:

$$Z = \sqrt{R^2 + (R_L - R_C)^2} = \sqrt{R^2 + \left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C}\right)^2}$$

Wtedy wartość skuteczna prądu przemiennego płynącego w takim obwodzie dana jest zależnością:

$$I_{sk} = \frac{U_{sk}}{Z}$$

W obwodach **RLC** przebiegi zmian napięcia elektrycznego i natężenia prądu są przesunięte w fazie o **kąt**, którego tangens można wyrazić wzorem:

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{R_L - R_C}{R}$$

Analiza szczególnych przypadków:

$R_L = R_C \Rightarrow \operatorname{tg}\varphi = 0 \Rightarrow \varphi = 0^\circ \Rightarrow$ *brak przesunięcia fazowego*

$R_L \ll R_C \Rightarrow \operatorname{tg}\varphi < 0 \Rightarrow \varphi < 0^\circ \Rightarrow$ *natężenie prądu wyprzedza w fazie napięcie elektryczne*

$R_L \gg R_C \Rightarrow \operatorname{tg}\varphi > 0 \Rightarrow \varphi > 0^\circ \Rightarrow$ *napięcie elektryczne wyprzedza w fazie natężenie prądu*

Moc średnią prądu sinusoidalnie przemiennego wydzieloną na odbiorniku o oporze R , w obwodzie RLC prądu przemiennego wyraża zależność:

$$P_{\acute{s}r} = I_{sk} \cdot U_{sk} \cdot \cos\varphi = I_{sk}^2 \cdot R \cdot \cos\varphi$$

$\cos\varphi$ - jest tzw. współczynnikiem mocy

Gdzie:

$$\cos\varphi = \frac{R}{Z}$$

Analiza szczególnych przypadków:

$$R_L = R_C \Rightarrow \operatorname{tg}\varphi = 0 \Rightarrow \varphi = 0^\circ \Rightarrow \cos\varphi = 1 \Rightarrow P_{\acute{s}r} = \frac{1}{2} \cdot I_{sk}^2 \cdot R = \mathit{max}$$

$$R_L - R_C \gg R \Rightarrow \operatorname{tg}\varphi \gg 1 \Rightarrow \varphi \rightarrow 90^\circ$$

napięcie elektryczne wyprzedza w fazie natężenie prądu o 90 stopni

$\cos\varphi \rightarrow 0 \Rightarrow P_{\acute{s}r} = 0$ w obwodzie płynie tzw. prąd bezwatowy

$$R_L - R_C \ll R \Rightarrow \operatorname{tg}\varphi \rightarrow 0 \Rightarrow \cos\varphi \rightarrow 1 \Rightarrow \varphi \rightarrow 0^\circ$$

brak przesunięcia fazowego między napięciem a natężeniem prądu

Dlaczego prąd przemienny przesyła się z elektrowni do odbiorcy końcowego (na dużą odległość) pod bardzo wysokim napięciem, które dopiero na końcu obniża się do napięcia, do którego dostosowane są odbiorniki prądu w domu?

Jeżeli stacja odbiorcza energii elektrycznej, pracuje pod napięciem skutecznym i współczynnikiem mocy, równych odpowiednio:

$$U_{sk} \quad \cos\varphi$$

to moc średnia wydzielona w odbiorniku dana jest zależnością:

$$P_{\acute{s}r} = U_{sk} \cdot I_{sk} \cdot \cos\varphi$$

Zatem natężenie prądu płynącego w przewodach doprowadzających dane jest wzorem (odbiornik i przewody doprowadzające są połączone szeregowo!):

$$I_{sk} = \frac{P_{\acute{s}r}}{U_{sk} \cdot \cos\varphi}$$

Wynika stąd, że straty mocy w przewodach doprowadzających o oporze omowym R wynoszą:

$$\Delta P = I_{sk}^2 \cdot R$$

Gdzie:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S}$$

Stąd:

$$\Delta P = \frac{\rho \cdot l \cdot P_{sr}^2}{U_{sk}^2 \cdot S \cdot \cos^2 \varphi}$$

Uwaga:

*Przy danej długości linii przesyłowej l i mocy wydzielonej w odbiorniku P_{sr} , straty mocy można ograniczyć – w praktyce – tylko przez zwiększenie napięcia elektrycznego **i/lub** współczynnika mocy.*

Zwiększenie pola powierzchni przekroju poprzecznego przewodów S , zwiększa z jednej strony masę przewodów (i obciążenie konstrukcji słupów podtrzymujących linie wysokiego napięcia!), jak koszt takich przewodów.

Zadanie dla „chętnych”

Pewien obwód składa się z szeregowo połączonych: opornika o oporze 100Ω , cewki o indukcyjności $0,5 \text{ H}$ i kondensatora o pojemności $10 \mu\text{F}$. Napięcie zasilające ma wartość skuteczną 230 V a częstotliwość prądu wynosi 50 Hz .

Oblicz:

- opór indukcyjny obwodu,***
- opór pojemnościowy obwodu,***
- zawadę obwodu,***
- natężenie skuteczne prądu w obwodzie,***
- częstotliwość rezonansową ($R_L = R_C$),***
- natężenie skuteczne prądu przy częstotliwości rezonansowej,***
- tangens kąta przesunięcia fazowego.***