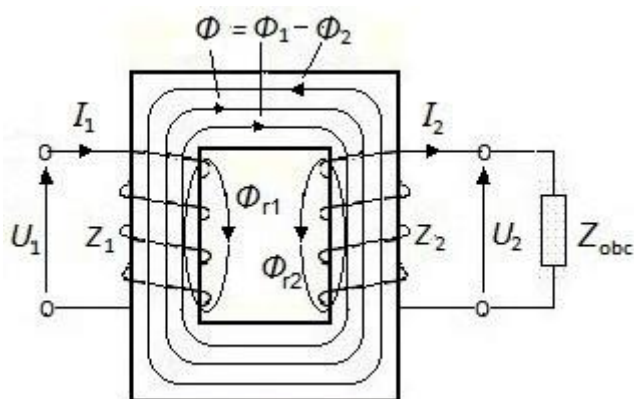


## Transformator rzeczywisty

W transformatorze rzeczywistym o przekładni 1:1 ( $z_1 = z_2$ ) do zacisków uzwojenia wtórnego jest przyłączony odbiornik, jak na rysunku 4.

W zamkniętym obwodzie tego uzwojenia, pod wpływem siły elektromotorycznej  $E_2$ , popłynie prąd przemienny  $I_2$ .

Powstały przepływ  $\Theta_2$  w uzwojeniu wtórnym wytworzy strumień rozproszenia  $\Phi_{r2}$ . Zmieni się również wartość prądu  $I_1$  w uzwojeniu pierwotnym i wartość strumienia rozproszenia  $\Phi_{r1}$  wytworzonego przez przepływ pierwotny  $\Theta_1$ . W tym czasie, gdy w uzwojeniach pierwotnym i wtórnym płyną prądy  $I_1$  i  $I_2$ , strumień magnetyczny  $\Phi$  zamykający się przez rdzeń transformatora jest strumieniem wypadkowym powstałym w wyniku działania dwóch przepływów –  $\Theta_1$  i  $\Theta_2$ . W powstałym układzie energia elektryczna dostarczana do uzwojenia pierwotnego przy napięciu  $U_1$  i prądzie  $I_1$  zostaje przetworzona na energię elektryczną otrzymywaną z uzwojenia wtórnego przy napięciu  $U_2$  i prądzie  $I_2$ .



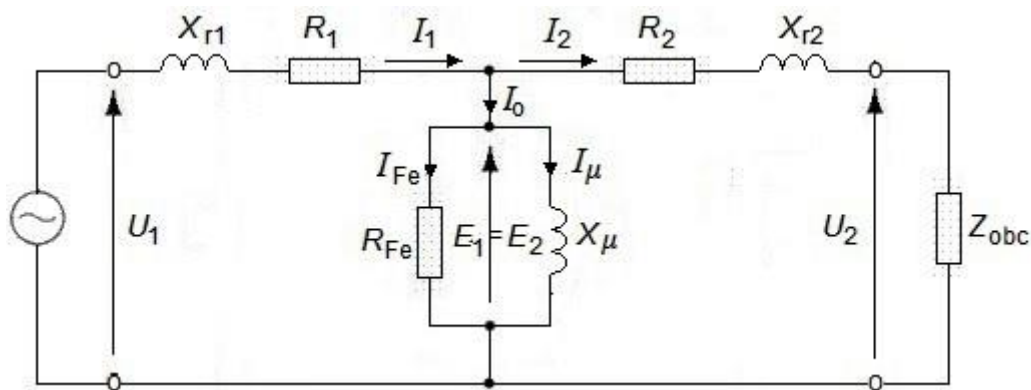
**Rys. 4. Transformator rzeczywisty**

$\Phi_{r1}$  – strumień rozproszenia uzwojenia pierwotnego,  
 $\Phi_{r2}$  – strumień rozproszenia uzwojenia wtórnego.

Występujące w transformatorze rzeczywistym strumienie rozproszenia  $\Phi_{r1}$  i  $\Phi_{r2}$  (Rys. 4), zamykają się przez powietrze i sprzęgają się tylko z jednym uzwojeniem:  $\Phi_{r1}$  z uzwojeniem pierwotnym o liczbie zwojów  $z_1$ ,  $\Phi_{r2}$  z uzwojeniem wtórnym o liczbie zwojów  $z_2$ .

W efekcie, wytworzony w rdzeniu rzeczywisty strumień magnetyczny  $\Phi$  sprzężony z dwoma uzwojeniami będzie nieco mniejszy niż w transformatorze idealnym. Wynika stąd następujący wniosek: nie cała energia bierna bierze udział w wytwarzaniu siły elektromotorycznej.

Schemat zastępczy transformatora rzeczywistego, o przekładni 1 : 1, ułatwiający opis analityczny bez konieczności każdorazowego przeliczania poszczególnych wielkości, przedstawia rysunek 5.



**Rys. 5. Schemat zastępczy transformatora rzeczywistego**

$X_{r1}$ ,  $X_{r2}$  – reaktancje odpowiadające strumieniom rozproszenia odpowiednio: uzwojenia 1 ( $\Phi_{r1}$ ) i uzwojenia 2 ( $\Phi_{r2}$ ).

Dla transformatora o przekładni większej niż 1 wartości wielkości uzwojenia wtórnego należy przeliczyć do poziomu napięcia pierwotnego z uwzględnieniem rzeczywistej przekładni.

W układzie przedstawionym na rysunku 5:

- straty mocy czynnej w uzwojeniach transformatora uwzględniają rezystancje  $R_1$  i  $R_2$ ,
- straty mocy czynnej w rdzeniu uwzględnia rezystancja  $R_{Fe}$ , natomiast,
- straty mocy biernej na rozproszenie strumienia uwzględniają reaktancje  $X_{r1}$  i  $X_{r2}$ .

Straty mocy występujące w uzwojeniach pierwotnym i wtórnym transformatora rzeczywistego są związane z przepływem prądów w obwodach o określonej rezystancji. Są to tzw. straty w miedzi oraz straty w rdzeniu magnetycznym, czyli straty histerezy i wiropądowe. Straty w rdzeniu ( $\Delta P_{Fe}$ ) są sumą strat mocy wywołane histerezą obwodu magnetycznego ( $\Delta P_h$ ) i strat mocy wywołane prądami wirowymi ( $\Delta P_w$ ), czyli:

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_h + \Delta P_w.$$

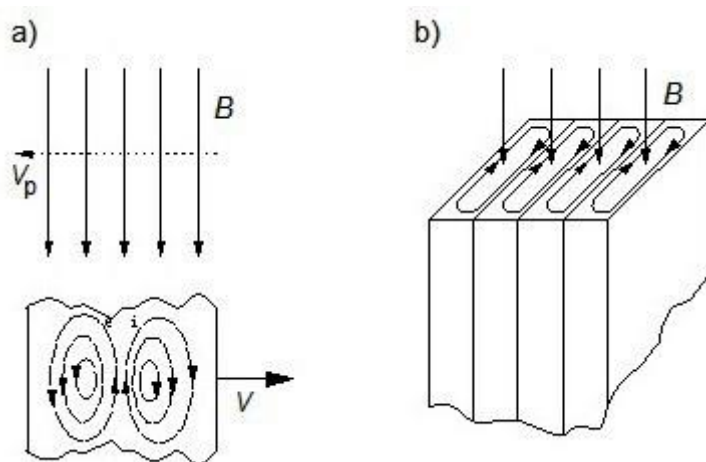
Straty histerezy ( $\Delta P_h$ ) związane są z magnesowaniem rdzenia ferromagnetycznego i wynikają z istnienia pętli histerezy magnetycznej. Sinusoidalnie zmienny strumień magnetyczny wywołuje dwukrotne przemagnesowanie rdzenia w ciągu okresu.

Straty histerezy w rdzeniu są proporcjonalne do częstotliwości i w przybliżeniu do kwadratu amplitudy indukcji magnetycznej  $B_m$  (przy wartościach  $B_m \geq 1[T]$ ).

$$\Delta P_h = k_h \cdot B^2 \cdot f$$

Straty wiropądowe występują niezależnie od strat histerezy i wywołane są prądami wirowymi w rdzeniu transformatora.

Zjawisko prądów wirowych można wyjaśnić na przykładzie masy metalowej znajdującej się w polu magnetycznym (Rys. 6). Jeżeli pole magnetyczne porusza się z prędkością  $v_p$ , to w masie metalowej indukuje się siła elektromotoryczna o zwrocie wynikającym z reguły prawej dłoni, którą można wyznaczyć ze wzoru  $e = \pm d\Phi/dt$ . Pod wpływem tej siły w masie metalowej, będącej dobrym przewodnikiem, płyną prądy zamykające się po drodze o jak najmniejszej rezystancji. Prądy te tworzą wiry – stąd nazwa prądy wirowe.



**Rys. 6. Powstawanie prądów wirowych: ( a ) w masie metalowej, ( b ) w pakiecie blach**

Z punktu widzenia zjawiska prądów wirowych jest sprawą obojętną, czy masa metalowa znajdująca się w ruchu jest umieszczona w stałym (lub zmiennym) polu magnetycznym, czy też zmiennie w czasie pole magnetyczne przenika nieruchomą masę metalową. W transformatorach mamy np. do czynienia z nieruchomym rdzeniem ferromagnetycznym, umieszczonym w zmiennym polu magnetycznym. Prądy wirowe są w większości urządzeń elektrycznych zjawiskiem niepożądanym, gdyż powodują występowanie strat energii zamienianej na ciepło. W celu ograniczenia prądów wirowych rdzenie maszyn i urządzeń elektrycznych wykonuje się z blach bądź specjalnych materiałów ferromagnetycznych o dużej rezystywności. Na Rys.6 (b) przedstawiono fragment rdzenia wykonanego z nadmiernie grubych blach tak, aby można było zaznaczyć linie prądów wirowych. Blachy te są od siebie odizolowane cienkim papierem i czasami lakierowane. Prądy wirowe zamykają się w obrębie każdej blachy, napotykając na swej drodze większą rezystancję ze względu na znacznie mniejszy przekrój. Straty wiroprądowe są proporcjonalne do kwadratu grubości blach, do kwadratu częstotliwości i do kwadratu amplitudy indukcji magnetycznej, a odwrotnie proporcjonalne do rezystywności blachy. Zwiększenie około 5-krotnie rezystywności stali można uzyskać przez dodatek krzemu, w ilości około 2,5 do 4,5 [%].