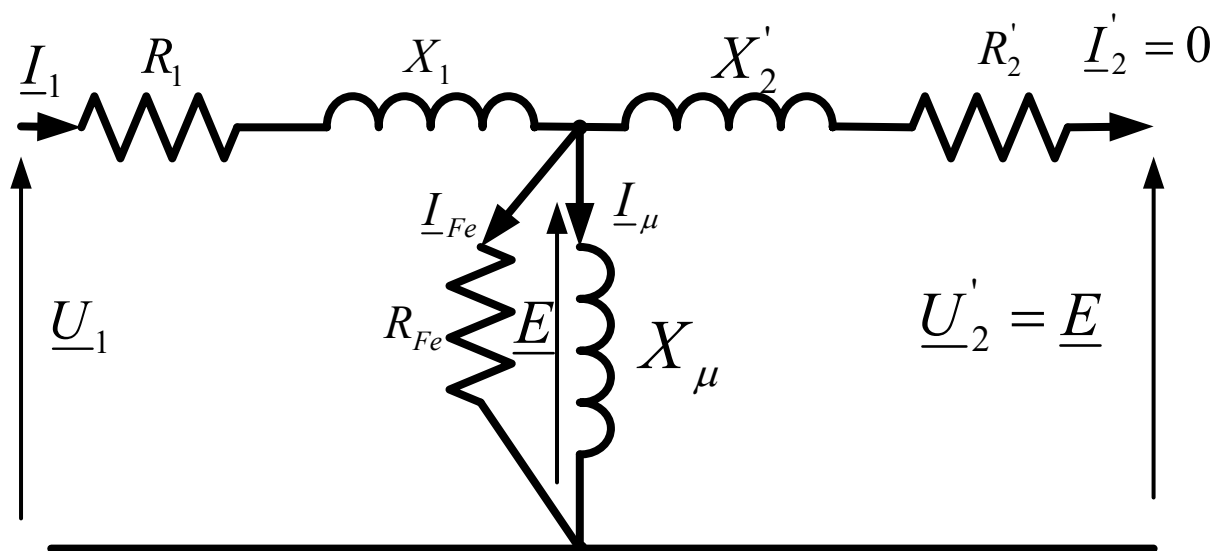


Transformator jednofazowy (cd)

W transformatorze pracującym bez obciążenia (stan jałowy) wartość prądu po stronie wtórna jest równy zero ($R_{ys. I}$). W takim przypadku przez uzwojenie strony pierwotnej przepływa tylko prąd biegu jałowego, którego składnikami są prąd magnesujący I_μ oraz składnik prądu związany ze stratami w żelazie I_{Fe} .



Rys. 1 Stan jałowy transformatora.

Wartość tego prądu zwykle jest mniejsza niż 5% prądu znamionowego:

$$i_o = \frac{I_0}{I_n} 100\% \approx 0.5..5\% \quad (1)$$

Spadki napięcia na rezystancji uzwojenia oraz reaktancji rozproszenia mają, w transformatorach energetycznych, pomijalnie małe wartości, stąd możemy przyjąć, że:

$$\underline{U}_1 \approx \underline{E} \quad (2)$$

A schemat zastępczy dla stanu jałowego przyjmuje postać przedstawioną na Rys. 2.

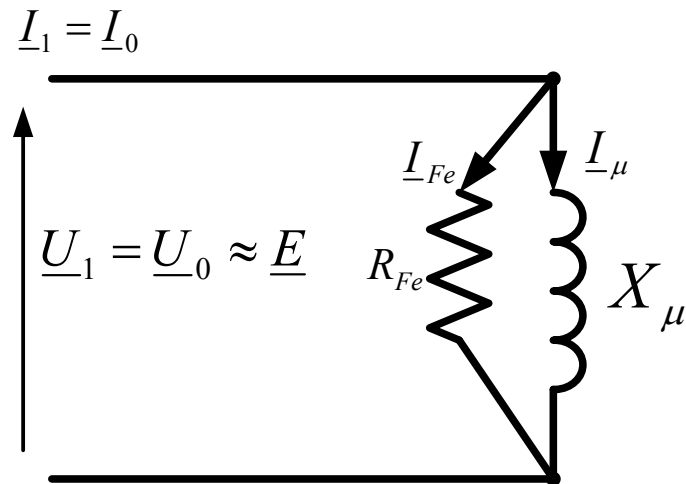
Jako, że:

$$E = 4.44zf\Phi = U \quad (3)$$

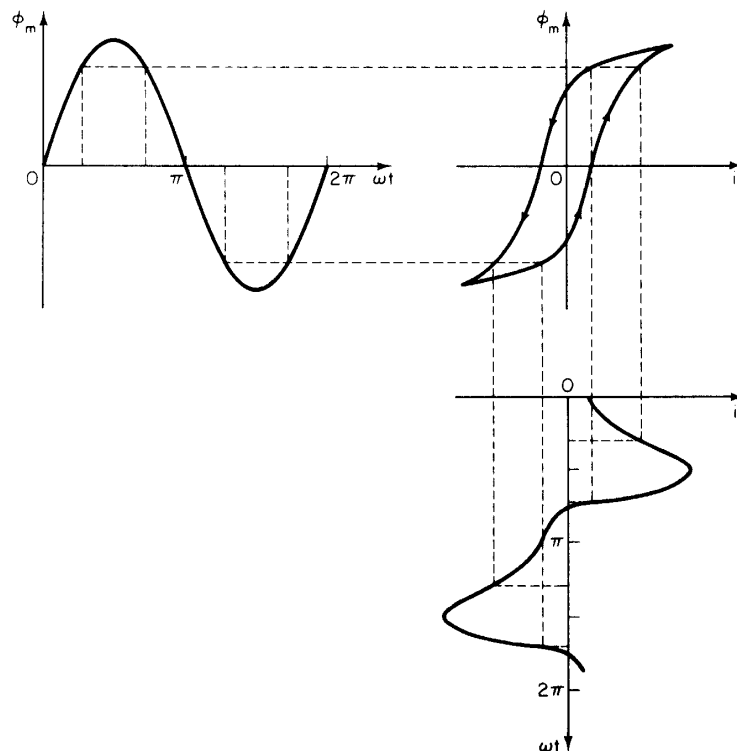
a wartość siły elektromotorycznej jest równa napięciu zasilającemu, to strumień magnetyczny w rdzeniu jest równy:

$$\Phi = \frac{U}{4.44zf} \quad (4)$$

Jeśli przyjmiemy, że napięcie zasilające ma przebieg sinusoidalny w czasie, to rzeczywisty kształt prądu biegu jałowego można uzyskać w sposób zaprezentowany na Rys. 3.

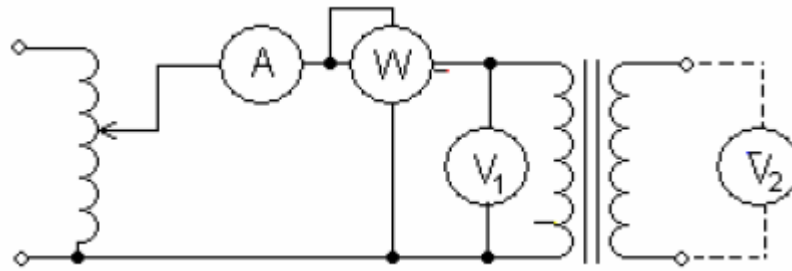


Rys. 2 Uproszczony schemat zastępczy transformatora dla stanu jałowego.



Rys. 3 Przebieg rzeczywistego prądu biegu jałowego transformatora.

W schemacie zastępczym nie uwzględnia się odkształcenia prądu, a wartości parametrów odzwierciedlają jedynie rzeczywiste wartości skuteczne prądów, napięć oraz strat występujących w rzeczywistym transformatorze. Parametry schematu szacuje się zwykle poprzez wykonanie próby biegu jałowego (**Rys. 4**) polegającej na pomiarze mocy pobieranej przez transformator oraz wartości skutecznych prądów i napięć dla przypadku zmian napięcia zasilającego od zera do napięcia większego od znamionowego (do ok. $1.3U_n$).



Rys. 4 Układ do pomiaru stanu jałowego transformatora.

Próba taka ma na celu sprawdzenie stanu izolacji transformatora, pomiar rzeczywistej przekładni zwojowej k oraz wyznaczenie parametrów X_μ i R_{Fe} . W tym celu mierzymy napięcia po stronie pierwotnej i wtórnej, a przekładnia zwojowa jest obliczana ze wzoru:

$$k = \frac{U_{10}}{U_{20}} \quad (5)$$

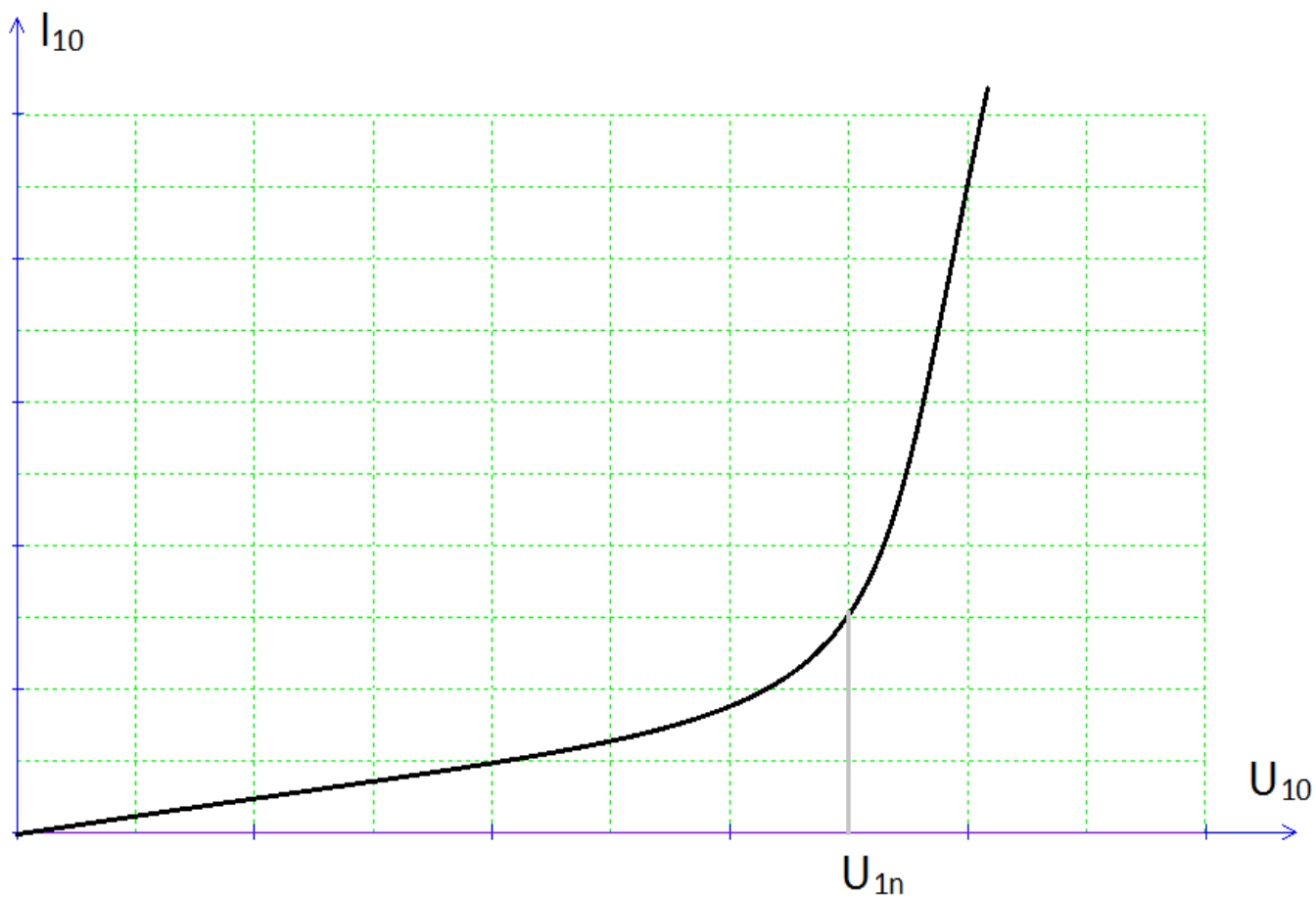
W celu wyznaczenia parametrów schematu zastępczego dla biegu jałowego korzystamy z zależności:

$$R_{Fe} = \frac{U_{10}^2}{P_0} \quad (6)$$

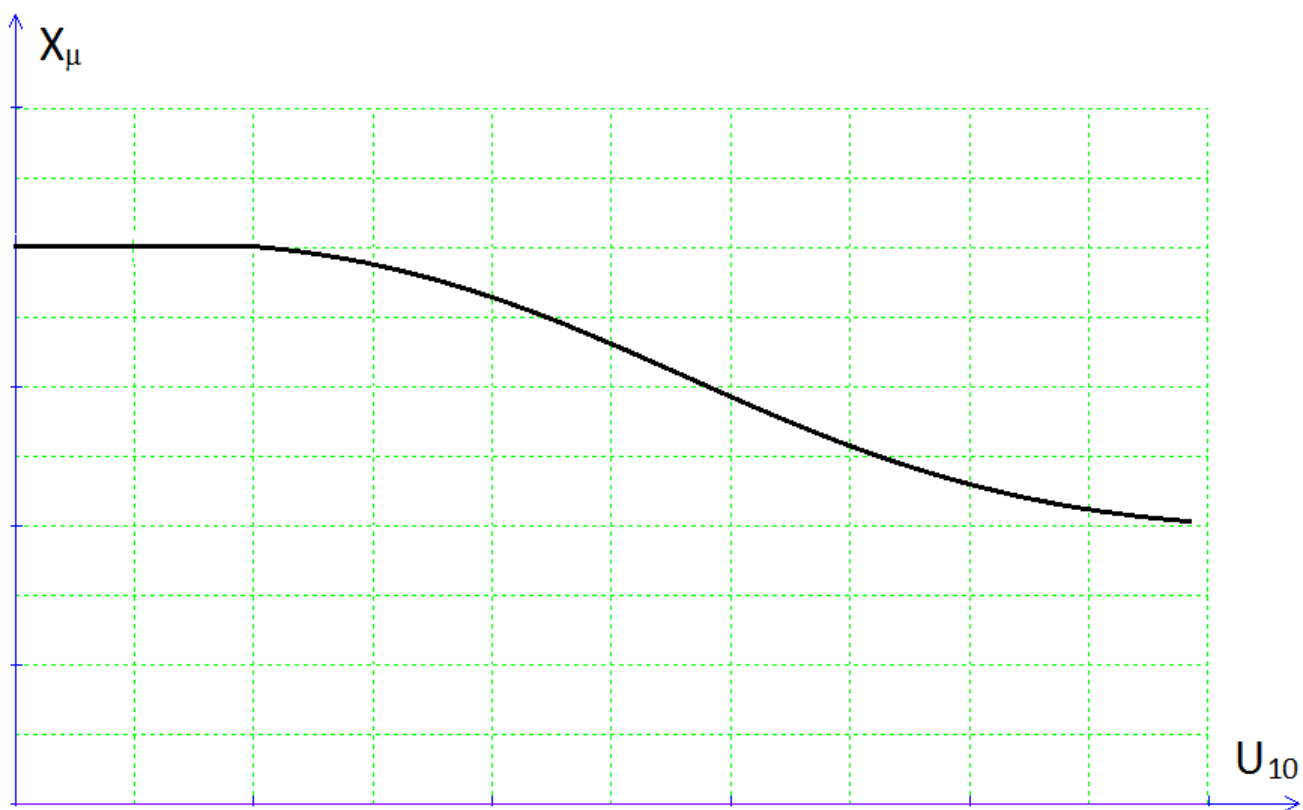
$$I_{Fe} = \frac{U_{10}}{R_{Fe}} \quad (7)$$

$$I_\mu = \sqrt{I_{10}^2 - I_{Fe}^2} \quad (8)$$

$$X_\mu = \frac{U_{10}}{I_\mu} \quad (9)$$



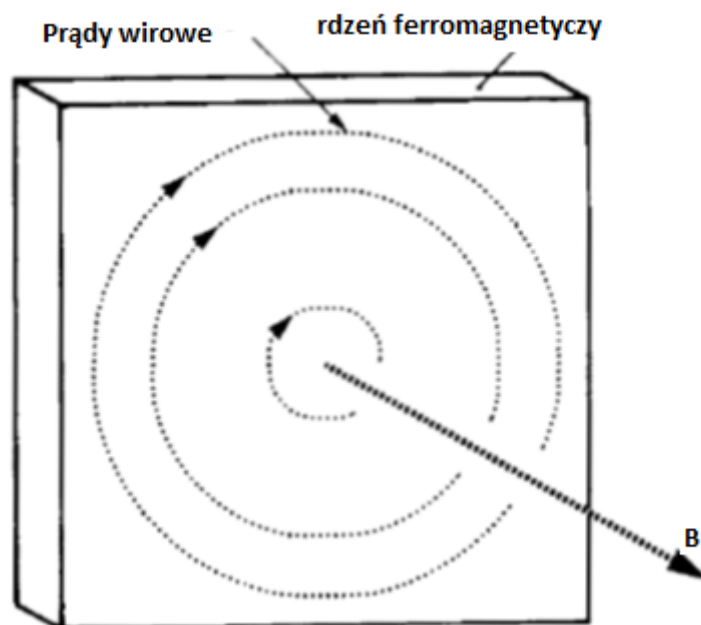
Rys. 5 Charakterystyka biegu jałowego $I_{10} = f(U_{10})$



Rys. 6 Zależność wartości reaktancji X_{μ} od napięcia zasilającego.

Na podstawie pomiarów możemy także narysować kształt charakterystyk biegu jałowego. Zależność prądu biegu jałowego jest nieliniowa i jest wynikiem krzywej magnesowania (Rys. 5). Dominujące znaczenie (przy napięciu znamionowym) ma tu prąd magnesujący. Skutkiem nasycenia obwodu magnetycznego jest także fakt zależności wartości reaktancji magnesującej X_{μ} od napięcia zasilającego (Rys. 6). Podobny kształt ma także zależność współczynnika mocy od napięcia. Wartość rezystancji związanej ze stratami w żelazie jest w przybliżeniu wartością stałą.

O stratach w żelazie decydują dwa składniki: straty spowodowane histerezą, których wartość jest proporcjonalna do pola wewnątrz histerezy oraz straty na prądy wirowe, wynikające z faktu indukowania się wewnątrz rdzenia napięć. Napięcia te powodują przepływ prądu zgodnie z drogą wyznaczoną przez kierunek zmian pola magnetycznego B oraz kierunek indukowanych sił elektromotorycznych (Rys. 7). Istnienie prądów wirowym wymusza konieczność budowy rdzenia z cienkich blach jednostronnie izolowanych. Straty histerezowe można zmniejszać jedynie poprzez stosowanie różnych domieszek do materiału ferromagnetycznego uzyskując jak najmniejszą szerokość pętli histerezy.



Rys. 7 Istota powstania prądów wirowych.

Straty mocy wywołane histerezą są proporcjonalne do częstotliwości f oraz wartości maksymalnej indukcji B_m wewnątrz rdzenia w potęgze zależnej od stanu nasycenia:

$$\Delta P_h = k_h f B_m^x \quad (10)$$

Wartość stałej k_h zależy od składu chemicznego materiału ferromagnetycznego oraz jego obróbki termicznej i mechanicznej. Dla blachy anizotropowej (walcowana na zimno):

$$x \approx \begin{cases} 2 \text{ dla } B_m < 1.45 \\ 2.25 \text{ dla } 1.45 < B_m < 1.7 \\ 2.6 \text{ dla } B_m > 1.7 \end{cases} \quad (11)$$

Wartość stratności (strat na jednostkę masy lub objętości) zależy od indukcji nasycenia jak i kierunku magnesowania. Wartość indukcji nasycenia dla blach zimno walcowanych jest równa ok. 1.5÷1.8T, dla blach walcowanych na gorąco 1.4÷1.6T.

Straty mocy wywołane prądami wirowymi są proporcjonalne do częstotliwości i maksymalnej indukcji w drugiej potęgze.

$$\Delta P_w = k_w f^2 B_m^2 \quad (12)$$

W praktyce straty wyznacza się na podstawie stratności (straty mocy w jednostce masy), podawanej przy określonej częstotliwości i indukcji (zwykle 50 lub 60 Hz i 1 lub 1.5T), dla blach walcowanych na zimno $p_{1.0} \cong 0.4 \text{ W/kg}$, $p_{1.5} \cong 0.8 \div 1.0 \text{ W/kg}$, dla blach gorącowalcowanych $p_{1.0} \cong (4)1.3 \div 0.8 \text{ W/kg}$. Typowa grubość blach stosowanych na rdzenie transformatorów energetycznych to 0.35÷0.5 mm. W szacunkowych obliczeniach można przyjąć, że przy napięciu znamionowym wartość strat na prądy wirowe jest równa ok 25% całkowitych strat w żelazie ($\Delta P_w \cong 0.25 P_{fe}$, $\Delta P_h \cong 0.75 P_{fe}$). Od wielu lat stosuje się także blach amorficzne (szybkie studzenie gorącego metalu na podłożu). Uzyskuje się tu bardzo małe grubości blach (<0.1mm) przy indukcji

nasylenia ok. 2.1T, od razu tworzy się warstwa izolacyjna (w postaci tlenku żelaza). Materiał ten jest droższy od częściej stosowanych blach zimnowalcowanych. Ma znacznie mniejszą stratność lecz także istotne wady – jest bardzo kruchy i dzięki temu trudny w obróbce (cięcie laserem, konieczność zapewnienia dopasowanej do jego cech technologii budowy transformatorów). Stosowane są także rozwiązania w postaci blach nanokrystalicznych o bardzo małej stratności. Udział strat od prądów wirowych zwykle jest rzędu 40%-50% strat całkowitych w żelazie. Nowe materiały częściej stosuje się w transformatorach pracujących przy większej częstotliwości (energoelektronika, transmisja sygnałów).

O jakości rdzenia transformatora decyduje także tzw. współczynnik wypełnienia rdzenia:

$$k_w = \frac{S_{fe}}{S_{fe} + S_{izol}} \quad (13)$$

Wartość tego współczynnika stanowi podstawę do oceny proporcji pomiędzy materiałem czynnym (ferromagnetykiem) a izolacją między blachami. Dla blach walcowanych na gorąco ma on wartość ok. $k_w=0.9 \div 0.9$. Dla blach zimnowalcowanych $k_w=0.98$.

Obliczanie strat mocy w żelazie wykonuje się zwykle na podstawie stratności blach jarzma p_j i kolumn p_k oraz ich mas m_j, m_k :

$$\Delta P_{fe} = k_p (p_k m_k + p_j m_j) \quad (14)$$

Występuje to współczynnik strat dodatkowych w żelazie k_p , którego wartość, rzędu $1.2 \div 1.5$, jest zależna od sposobu zaplatania rdzenia oraz dokładności (i technologii) jego obróbki. Składowa czynna prądu jałowego jest równa:

$$I_{fe} = \frac{\Delta P_{fe}}{E} \approx \frac{\Delta P_{fe}}{U} \quad (15)$$

Wartość prądu magnesującego jest zwykle obliczana na podstawie prawa przepływu Ampera. Jego wartość maksymalna jest proporcjonalna do sumy spadków

napięć magnetycznych na drodze pola magnetycznego wewnątrz rdzenia, z uwzględnieniem wypadkowej szczeliny powietrznej:

$$I_{\mu\max} = \frac{\sum H_x l_x}{z_1} \quad (16)$$

Wartość skuteczna prądu magnesującego jest równa:

$$I_{\mu} = \frac{\sum H_x l_x}{zk_s} \quad (17)$$

Wartość współczynnika szczytu k_s jest zależna od stanu nasycenia obwodu magnetycznego. Największy wpływ na spadek napięcia magnetycznego ma grubość wypadkowej szczeliny powietrznej δ , stąd istnieje dążność do minimalizacji grubości szczeliny powietrznej transformatora poprzez odpowiednie zaplatanie rdzeni i jarzm transformatora. Pomijając spadek napięcia magnetycznego w rdzeniu możemy napisać, że:

$$I_{\mu} = \frac{H_{\delta} \delta}{z \sigma_s} \quad (18)$$

Biorąc pod uwagę, że:

$$H_{\delta} = \frac{B_{\delta}}{\mu_0} = \frac{\Phi}{S \mu_0} \quad (19)$$

$$\Phi = \frac{U}{4.44 z f} \quad (20)$$

Wartość skuteczna prądu magnesującego jest równa:

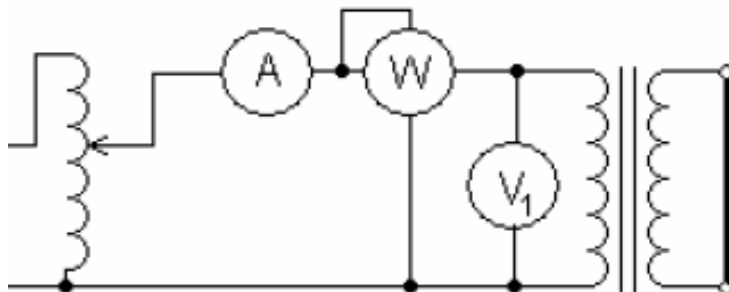
$$I_{\mu} = \frac{U \delta}{4.44 z^2 k_s f S \mu_0} = c \delta \quad (21)$$

Wartość skuteczna prądu biegu jałowego transformatora jest równa:

$$I_0 = \sqrt{I_{\mu}^2 + I_{fe}^2} \quad (22)$$

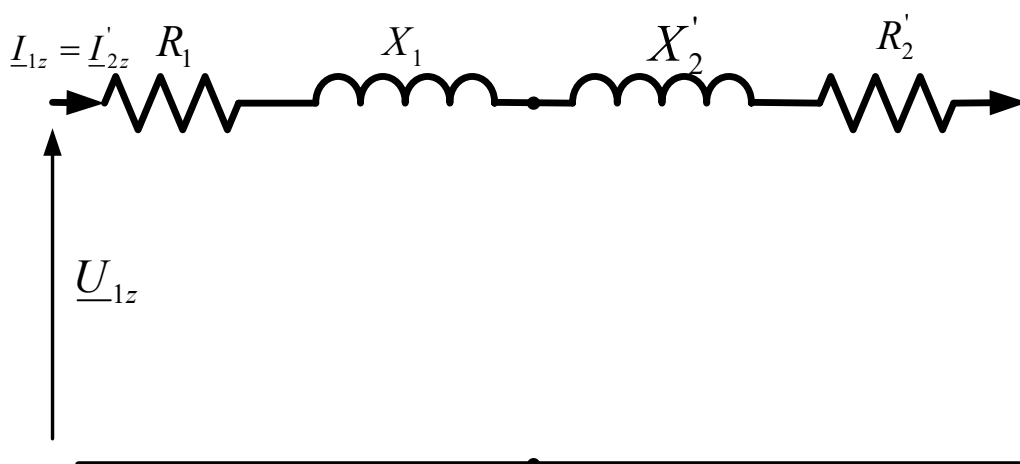
Zwarcie pomiarowe transformatora:

W stanie zwarcia transformatora napięcie na zaciskach strony wtórnej jest równe zero (Rys. 1).



Rys. 8 Zwarcie pomiarowe transformatora

(23)



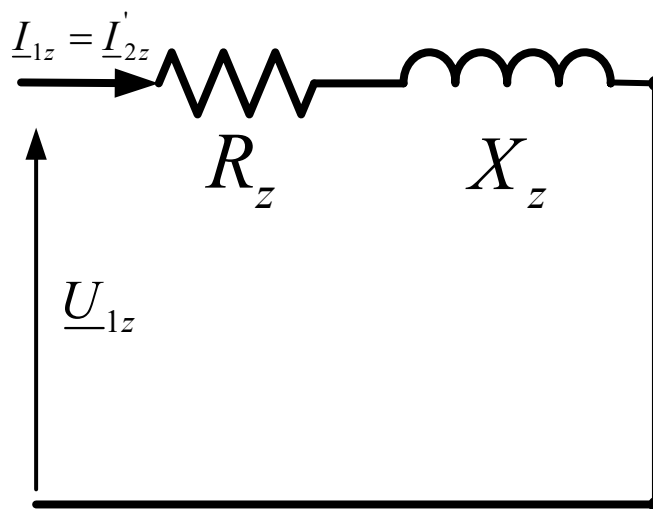
Rys. 9 Schemat zastępczy transformatora w stanie zwarcia.

Transformatory energetyczne budowane są w taki sposób, by spadek napięcia na rezystancjach oraz reaktancjach rozproszenia był jak najmniejszy. Jako, że prąd biegu jałowego ma małą wartość (5% prądu znamionowego), to jego wartość możemy w czasie zwarcia transformatora pominąć. W schemacie zastępczym transformatora pozostaną tylko składniki pokazane na Rys. 9. W schemacie pozostają szeregowo połączone rezystancje i reaktancje rozproszenia. W praktyce nie oblicza się ich odrębnie. Wykorzystuje się ich sumy nazywając je odpowiednio rezystancją i reaktancją zwarcia (Rys. 9):

$$R_z = R_1 + R_2' \quad (24)$$

$$X_z = X_1 + X_2' \quad (25)$$

Praktycznie stosowany schemat zastępczy transformatora w stanie zwarcia pokazano na **Rys. 10**.



Rys. 10 Uproszczony schemat zastępczy transformatora w stanie zwarcia.

Próba zwarcia transformatora jest jedną z ważniejszych. Parametry wyznaczone w czasie tej próby są wykorzystywane w wielu praktycznych zastosowaniach transformatorów. Próba zwarcia ma na celu wyznaczenie tzw. parametrów zwarciovych (rezystancji i reaktancji zwarcia) oraz wyznaczenia jednego z podstawowych parametrów jakim jest napięcia zwarcia.

Napięcie zwarcia definiowane jest jako wartość napięcia przyłożonego do zacisków strony pierwotnej dla której przy zwartych zaciskach strony wtórnej płynie przez stronę wtórną płynie prąd o wartości znamionowej:

$$U_{1z} = \underline{I}_{2n}' \sqrt{R_z^2 + X_z^2} \quad (26)$$

W przypadku pominięcia prądu stanu jałowego:

$$\underline{I}_{2n}' = \underline{I}_{1n} \quad (27)$$

W danych katalogowych transformatora napięcie zwarcia podawane jest w procentach (lub w wartości względnej) w odniesieniu do napięcia znamionowego:

$$u_{z\%} = \frac{U_{1z}}{U_{1n}} 100\% \approx 5 \div 15\% \quad (28)$$

W praktyce używa się także pojęć: czynne i bierne napięcie zwarcia:

$$U_{Rz} = U_{1z} \cos \varphi_z \quad (29)$$

$$U_{Xz} = U_{1z} \sin \varphi_z \quad (30)$$

Oraz kąt zwarciaowy:

$$\operatorname{tg} \varphi_z = \frac{X_z}{R_z} \quad (31)$$

Parametry zwarcia oblicza się na podstawie próby zwarcia ustalonego (Rys. 8). Wykonuje się tu pomiary napięcia, prądu oraz mocy pobieranej przez transformator przy zwartych zaciskach strony wtórnej. Wobec faktu, że w schemacie występują składniki o wartości stałej nie ma konieczności wykonywania wielu pomiarów.

Parametry zwarcia można oszacować wg. zależności:

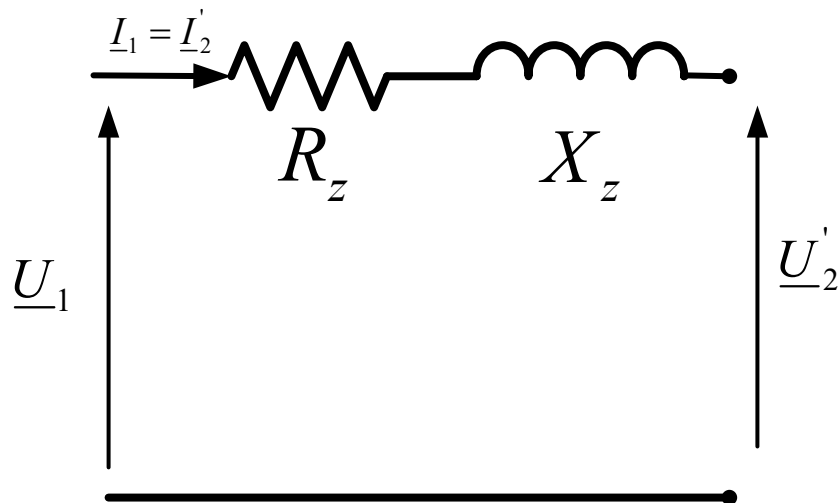
$$R_z = \frac{P_z}{I_{1z}^2} \quad (32)$$

$$Z_z = \frac{U_{1z}}{I_{1z}} \quad (33)$$

$$X_z = \sqrt{Z_z^2 - R_z^2} \quad (34)$$

Wobec małej wartości prądu magnesującego wobec jego wartości znamionowej, często używa się uproszczonego schematu zastępczego także z stanie obciążenia, wówczas schemat zastępczy transformatora w czasie normalnej pracy (tzn. pod

obciążeniem większym od ok. 25% prądu znamionowego). Praktyczny uproszczony schemat zastępczy pokazano na Rys. 11.



Rys. 11 Uproszczony schemat zastępczy transformatora energetycznego.

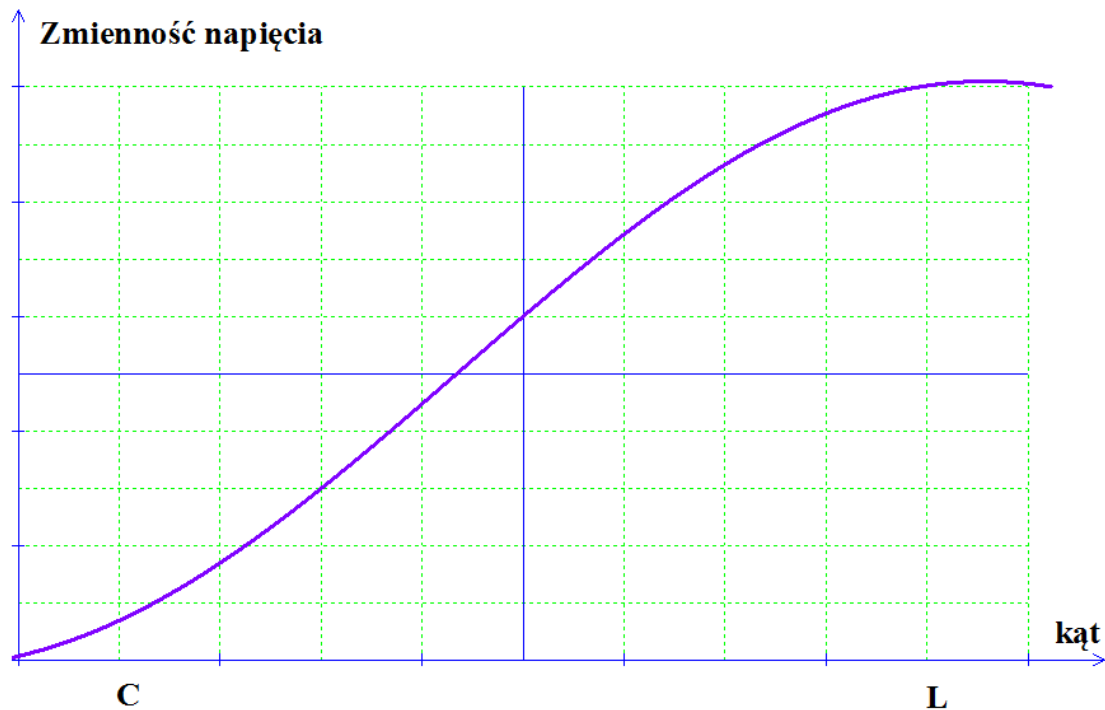
W przypadku zmiany obciążenia transformatora napięcia na jego zaciskach zmienia się. Zmiana spowodowana jest pojawieniem się spadków napięć na odpowiednich wartościach rezystancji i reaktancji rozproszeń strony pierwotnej i wtórnej. Używane jest tu pojęcie spadku napięcia.

Spadek napięcia jest to wartość różnicy algebraicznej pomiędzy wartościami skutecznymi napięciem strony pierwotnej i sprowadzonego do strony pierwotnej napięcia strony wtórnej. Wartość tak zdefiniowanego spadku napięcia jest zależna zarówno od wartości prądu jak i charakteru obciążenia. Przy pominięciu gałęzi poprzecznej schematu zastępczego, dla danego kąta przesunięcia pomiędzy napięciem a prądem strony wtórnej $\cos\varphi_2$, spadek napięcia można oszacować na podstawie parametrów wyznaczonych przy próbie zwarcia::

$$\Delta U = U_1 - U_2' \approx U_{Rz} \cos \varphi_2 + U_{Xz} \sin \varphi_2 \quad (35)$$

Najważniejsze znaczenie praktyczne ma odpowiedź na pytanie: jaka jest wartość spadku napięcia która wystąpi przy różnym charakterze obciążenia i wartości znamionowej prądu. Wartość tak zdefiniowaną nazywamy **zmiennością napięcia**. Zależność napięcia od charakteru obciążenia pokazano na Rys. 12. Ważnym wnioskiem

z takiego kształtu tej zależności jest fakt, że napięcie po stronie wtórnej transformatora może być zarówno mniejsza jak i większa niż w stanie jałowym.



Rys. 12 Zależność zmienności napięcia od kąta obciążenia

Z uwagi na zależność zmienności napięcia od charakteru obciążenia w praktyce pojawia się potrzeba regulacji napięcia po stronie wtórnej. Najczęściej zmienia się je poprzez wykorzystanie odczepów zmieniając w ten sposób przekładnię transformatora w stanie beznapięciowym w zakresie do 5% poprzez stosowanie odpowiednich przełączników zaczepów. Dla dużych transformatorów (blokowych i sieciowych) używa się regulacji pod obciążeniem w zakresie do 20%.