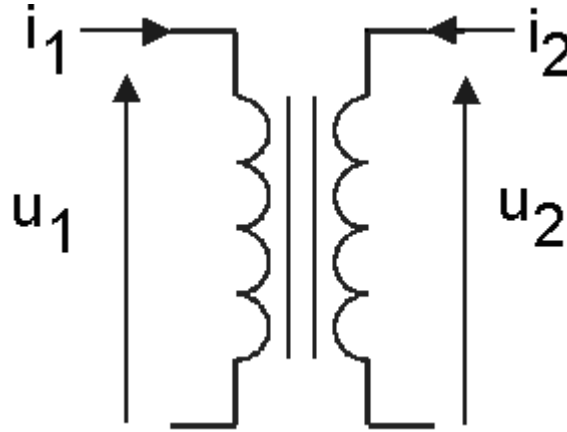


WYBRANE STANY NIEUSTALONE TRANSFORMATORA

Analizę pracy transformatora w stanach przejściowych można przeprowadzić w oparciu o równania dynamiki.



Rys. 1 Schemat ideowy transformatora jednofazowego.

Oznaczmy kierunki prądów i napięć w transformatorze tak jak na jak na Rys. 1. Przy założeniu liniowości obwodu magnetycznego równania dynamiki przyjmują postać:

$$\frac{d\psi_1}{dt} = u_1 - R_1 i_1 \quad (1)$$

$$\frac{d\psi_2}{dt} = u_2 - R_2 i_2 \quad (2)$$

Wartość strumieni skojarzonych z uzwojeniami jest wynikiem rozkładu pola magnetycznego wytwarzanego przez prądy w obu uzwojeniach transformatora. Są one zależne zatem zarówno od prądów jak i od stanu nasycenia rdzenia ferromagnetycznego:

$$\psi_1 = f_1(i_1, i_2) \quad (3)$$

$$\psi_2 = f_2(i_1, i_2) \quad (4)$$

Ich rozwiązanie jest bardzo trudne i większości przypadków stosuje się wiele uproszczeń. Jednym z uproszczeń jest założenie o liniowości obwodu magnetycznego - można używać w takim przypadku stałych wartości, będących wynikiem proporcji pomiędzy strumieniami skojarzonymi a prądami, które wytwarzają pole magnetyczne (nazywanych indukcyjnością własną L_1 i L_2 oraz indukcyjnością wzajemną M):

$$\psi_1 = L_1 i_1 + M i_2 \quad (5)$$

$$\psi_2 = M i_1 + L_2 i_2 \quad (6)$$

Taka postać równań dynamiki ma zastosowanie jedynie w małych transformatorach, które pracują na liniowej części charakterystyki magnesowania. W transformatorach stosowanych w energetyce do przesyłania energii elektrycznej model liniowy jest poprawny jedynie w stanie zwarcia lub przy obciążeniu strony wtórnej impedancją zbliżoną do znamionowej.

Rozpatrzmy przypadek gdy zwarte jest uzwojenie strony wtórnej, czyli tzw. zwarcie udarowe. Przyjmijmy, że amplituda napięcia na zaciskach pierwotnych ma wartość stałą niezależnie od zjawisk zachodzących w transformatorze. Stan zwarcia udarowego możemy analizować jako włączenie transformatora przy zwartych zaciskach wtórnych. Możemy wówczas skorzystać z uproszczenia polegającego na pominięciu prądu jałowego. Uproszczone równanie dynamiki będzie wówczas zawierać jedynie rezystancję oraz indukcyjność zwarcia:

$$u_1 = R_z i_z + L_z \frac{di_z}{dt} \quad (7)$$

Napięcie zasilające możemy przedstawić wzorem:

$$u_1 = U_{1m} \sin(\omega t + \alpha) \quad (8)$$

Gdzie kąt α wyznacza nam moment załączenia transformatora do sieci. Rozwiązanie takiego równania jest suma dwóch składowych (periodycznej i aperiodycznej):

$$i_z = i_{zp} + i_{za} \quad (9)$$

Składowa periodyczna przyjmuje postać:

$$i_{zp} = \frac{U_{1m}}{Z_z} \sin(\omega t + \alpha - \varphi) \quad (10)$$

Gdzie φ jest kątem pomiędzy prądem a napięciem w stanie ustalonym. Składową aperiodyczną można przedstawić zależnością:

$$i_{za} = \frac{U_{1m}}{Z_z} \sin(\alpha - \varphi) e^{-\frac{t}{T_z}} \quad (11)$$

Stała czasowa obwodu jest równa:

$$T_z = \frac{L_z}{R_z} \quad (12)$$

Wypadkowy prąd zwarcia zależy więc od momentu, w którym nastąpiło zwarcie. Gdy pominiemy rezystancję transformatora (bliskie prawdy dla dużych jednostek) to składowa aperiodyczna miałaby przebieg nietłumiony:

$$e^{-\frac{t}{T_z}} = 1 \quad (13)$$

Największa możliwa wartość prądu udarowego jest równa:

$$i_z = 2\sqrt{2}I_z \quad (14)$$

Gdzie I_z jest wartością skuteczną prądu zwarcia w stanie ustalonym.

Jako że wartość prądu zwarcia w stanie ustalonym może być nawet 20-krotnie większy od znamionowej wartości prądu to wartość maksymalna w stanie zwarcia udarowego może przekraczać ponad 40-krotnie wartość maksymalną prądu znamionowego. Tak duże wartości prądu udarowego mogą powodować nadmierne grzanie się uzwojeń w czasie trwania zwarcia oraz powodować rozrywanie uzwojeń na skutek wytworzenia siły dynamicznej w uzwojeniach. Znajomość największej możliwej wartości prądu w stanie przejściowym jest istotna z uwagi na konieczność zapewnienia odpowiedniej wytrzymałości mechanicznej uzwojeń.

Drugim ważnym przypadkiem niezbędnych do analizy jest tzw. prąd włączenia transformatora. Istotne problemy pojawiają się tu w sytuacji, gdy włączamy transformator na pełne napięcie przy rozłączonym obwodzie strony wtórnej. Równanie dynamiki wynikają z faktu, że następuje tu proces przejściowy związany z wytworzeniem dużej wartości pola magnetycznego (tzw. strumienia głównego). W takim przypadku nie można pominąć zjawiska nasycenia obwodu magnetycznego, a równanie dynamiki można opisać wzorem:

$$u_0 = R_0 i_0 + \frac{d\Psi_0}{dt} \quad (15)$$

Wartość chwilowa napięcia zasilającego:

$$u_0 = U_m \sin(\omega t + \alpha) \quad (16)$$

W stanie jałowym wartość indukcyjności L_0 nie jest stała i zależy od stanu nasycenia maszyny, stąd dla potrzeb analizy równanie dynamiki zapiszemy dla pochodnej strumienia. Dla uproszczenia równania (13) możemy przyjąć, że spadek napięcia na rezystancji jest znacznie mniejszy od napięcia indukowanego na skutek zmian pola magnetycznego w czasie. Możemy zatem przyjąć, że obliczenie spadku napięcia na rezystancji jest równe:

$$R_0 i_0 \approx \frac{R_0}{L_0} \Psi \quad (17)$$

Równanie dynamiki przyjmuje postać:

$$U_m \sin(\omega t + \alpha) = \frac{R_0}{L_0} \Psi + \frac{d\Psi}{dt} \quad (18)$$

Rozwiązanie równania ma dwie składowe strumieni periodyczną:

$$\Psi_{0p} = \Psi_{pm} \sin(\omega t + \alpha - \varphi) \quad (19)$$

i aperiodyczną:

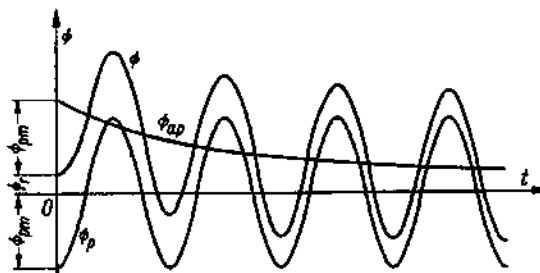
$$\Psi_{0a} = \Psi_{am} \sin(\alpha - \varphi) e^{-\frac{t}{T_0}} \quad (20)$$

Podobnie jak przy zwarciu stan przejściowy zależy od chwili włączenia transformatora do sieci.

W najkorzystniejszym przypadku, gdy $\alpha_0 - \varphi_0 = 0$ od razu powstaje strumień sinusoidalny równy strumieniowi w stanie ustalonym.

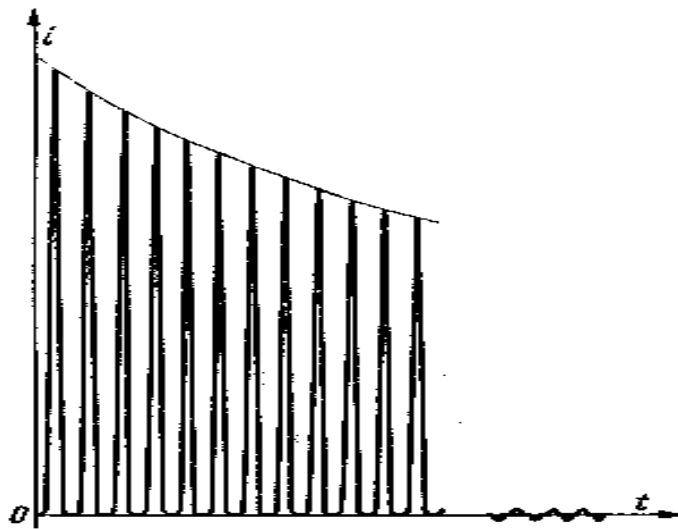
Biorąc pod uwagę fakt istnienia remanentu magnetycznego ψ_r to w najgorszym przypadku wartość chwilowa strumienia magnetycznego może osiągnąć wartość:

$$\Psi_{\max} \approx 2\Psi_u + \Psi_r \quad (21)$$



Rys. 2 Przebieg strumienia magnetycznego w stanie przejściowym.

Ponad dwukrotny wzrost strumienia powoduje silne nasycenie rdzenia i duży wzrost prądu nawet do wartości ponad 200 razy większej niż w stanie ustalonym. Jeśli prąd biegu jałowego jest równy np. 1% prądu znamionowego, to w najgorszym przypadku wartość maksymalna prądu włączenia może być 2-krotnie większa od prądu znamionowego, co może powodować zadziałanie zabezpieczeń transformatora. Silne nasycenie skutkuje nie tylko dużą wartością prądu w stanie przejściowym lecz także znacznie wydłuża czas dojścia do stanu ustalonego.



Rys. 3 Przykładowy przebieg prądu włączenia transformatora.