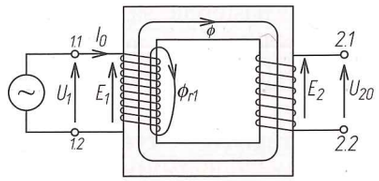
4.5.1. Stan jałowy i obwód magnetyczny transformatora

Stan jałowy transformatora jest to taki stan, w którym uzwojenie pierwotne jest dołączone do źródła prądu przemiennego, a uzwojenie wtórne jest otwarte (**rys. 4.24**).



Rys. 4.24. Transformator w stanie jałowym

Uwaga. *Wszystkie wielkości charakterystyczne dla stanu jałowego oznacza się wskaźnikiem 0, np. P_{10} — moc pobrana przez uzwojenie pierwotne w stanie jałowym, I_0 — wartość skuteczna prądu pobieranego w stanie jałowym (prąd jałowy) itp.*

W stanie jałowym, w uzwojeniu pierwotnym płynie prąd jałowy I_0, wywołując przepływ $N_1 I_0$, pod wpływem którego powstaje strumień magnetyczny Φ_0. Znaczna część tego strumienia zamyka się przez rdzeń — jest to tzw. strumień główny Φ, a część Φ_{r1} zamyka się przez powietrze i jest skojarzona tylko z uzwojeniem pierwotnym — jest to tzw. strumień rozproszony pierwotny. Strumień główny indukuje w uzwojeniach pierwotnym i wtórnym siły elektromotoryczne o wartościach skutecznych określonych odpowiednio wzorami (4.10) i (4.11): $E_1 = 4{,}44 N_1 f \Phi_m$, $E_2 = 4{,}44 N_2 f \Phi_m$.

Transformator w stanie jałowym jest nieobciążony, a więc **nie oddaje żadnej mocy** (w uzwojeniu wtórnym nie płynie prąd). Stąd wniosek, że **cała moc P_{10} pobrana w stanie jałowym jest zużyta na pokrycie strat.** Są to straty w miedzi i straty w stali (p. 2.3). Prąd I_0 ma bardzo małą wartość (3÷12% prądu znamionowego strony pierwotnej), dlatego można założyć, że straty w uzwojeniu o rezystancji R_1 ($\Delta P_{Cu0} = R_1 I_0^2$) są pomijalnie małe w porównaniu ze stratami, jakie występowałyby przy prądzie znamionowym. Tak więc można przyjąć, że cała moc pobrana przez transformator w stanie jałowym będzie równa stratom w stali (jak przy obciążeniu znamionowym), czyli:

$$P_{10} \approx \Delta P_{Fe} \tag{4.18}$$

Straty w stali (w rdzeniu, często zwane stratami jałowymi P_0) stanowią zwykle 0,15÷1,5% mocy znamionowej. Dolna granica dotyczy transformatorów dużych, górna — transformatorów małych (**tabl. 4.1**). Współczynnik mocy w stanie jałowym $\cos\varphi_0 \approx 0{,}1$, co oznacza, że transformator pobiera bardzo małą moc czynną i bardzo dużą (w stosunku do mocy czynnej) moc bierną. Moc czynna, jak wykazano, jest zużywana na pokrycie strat w stali, a moc bierna na namagnesowanie rdzenia (wytworzenie strumienia magnetycznego).

W każdym obwodzie elektrycznym napięcia się bilansują. Zastanówmy się, w jaki sposób jest równoważone napięcie U_1 doprowadzone do uzwojenia pierwotnego. Jak już wspomniano, pod wpływem napięcia U_1 w obwodzie transformatora płynie prąd I_0, który wytwarza strumień ($\Phi + \Phi_{r1}$). Uzwojenie ma pewną

rezystancję R_1, pod wpływem płynącego prądu powstaje więc spadek napięcia na tej rezystancji U_{R1}. Strumień rozproszony Φ_{r1} skojarzony z uzwojeniem pierwotnym indukuje napięcie rozproszenia U_{X1}, którego wartość zależy od reaktancji uzwojenia pierwotnego $X_1 = \omega L_1$ (gdzie: ω — pulsacja, L_1 — indukcyjność uzwojenia pierwotnego).

Strumień główny Φ indukuje siły elektromotoryczne E_1 i E_2 o wartościach zgodnych z zależnościami (4.10) i (4.11). Napięcie U_1 doprowadzone do zacisków transformatora jest zatem równoważone przez spadek napięcia $R_1 I_0$ na rezystancji R_1, spadek napięcia $X_1 I_0$ na reaktancji X_1 uzwojenia oraz przez indukowaną siłę elektromotoryczną E_1.

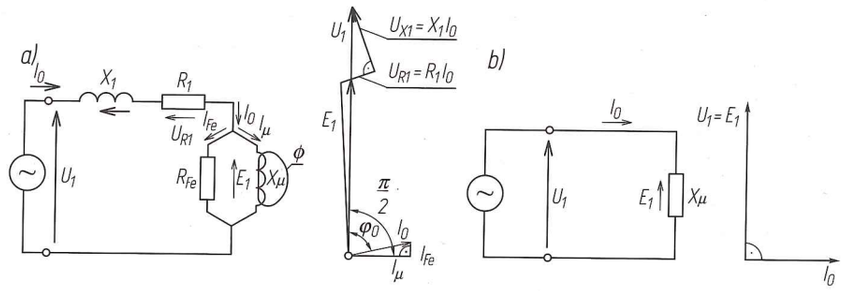
Tablica 4.1

Prąd jałowy i straty jałowe wybranych transformatorów energetycznych (wyrażone w procentach odpowiednio prądu znamionowego i mocy znamionowej)

Moc znamionowa	Prąd jałowy				Straty jałowe				
	przy znamionowym napięciu górnym [kV]								
	do 20	20÷30	40÷66	110÷121	do 10	10÷20	20÷30	40÷66	110÷121
kVA	%	%	%	%	%	%	%	%	%
20	10,0	—	—	—	0,65	0,75	—	—	—
50	8,5	9,5	—	—	0,52	0,59	0,70	—	—
100	7,3	8,0	—	—	0,44	0,49	0,59	—	—
200	6,2	6,8	—	—	0,37	0,41	0,45	—	—
500	5,0	5,5	—	—	0,29	0,33	0,35	—	—
1 000	4,4	4,7	—	—	0,25	0,27	0,29	—	—
5 000	—	—	3,3	—	—	—	—	0,24	—
10 000	—	—	2,7	3,2	—	—	—	0,19	0,21
20 000	—	—	2,4	2,7	—	—	—	0,14	0,16
31 500	—	—	2,2	2,5	—	—	—	0,13	0,14

Schemat zastępczy transformatora w stanie jałowym

Na podstawie przeprowadzonej analizy można narysować schemat zastępczy transformatora w stanie jałowym (schemat obwodu elektrycznego równoważnego transformatorowi w stanie jałowym — **rys. 4.25**).



Rys. 4.25 Schemat zastępczy i wykres wektorowy transformatora w stanie jałowym: a) pełny; b) uproszczony

Schematy zastępcze sporządza się dla wszystkich maszyn elektrycznych i wszystkich stanów pracy. Są one pomocne przy sporządzaniu wykresów wektorowych i analizowaniu wpływu zmian obciążenia.

W stanie jałowym w uzwojeniu wtórnym indukuje się napięcie E_2, ale nie płynie żaden prąd (uzwojenie jest otwarte), dlatego na schemacie zastępczym dla stanu jałowego można pominąć elementy strony wtórnej.

Na schemacie sem E_1 przedstawiono jako napięcie na tzw. reaktancji magnesowania transformatora X_μ, przez którą płynie prąd magnesujący I_μ (składowa bierna prądu I_0), a ponieważ $\cos \varphi_0 \approx 0{,}1$, zatem $I_{Fe} = 0{,}1 I_\mu$. Można więc przyjąć, że:

$$I_0 \approx I_\mu \tag{4.19}$$

Aby uwzględnić straty w rdzeniu, należy wprowadzić do schematu rezystancję zastępczą R_{Fe}. Straty w rdzeniu są proporcjonalne do kwadratu napięcia. Można je przedstawić jako straty w pewnym elemencie rezystancyjnym R_{Fe}, przez który płynie prąd proporcjonalny do sem E_1. Prąd ten jest składową czynną I_{Fe} prądu jałowego. Rezystancja R_{Fe} jest tak dobrana i tak połączona, aby powstające w niej ciepło było ilościowo równe ciepłu rzeczywistemu, powstającemu w rdzeniu stalowym na skutek strat. Element R_{Fe} nie reprezentuje żadnego rzeczywistego rezystora, lecz jest umownym elementem zastępczym, podobnie jak X_μ. Spadki napięcia na elementach R_1 i X_1 w stanie jałowym są małe w porównaniu z napięciem U_1 i wynoszą $0{,}1 \div 0{,}5\% U_1$, dlatego często się je pomija i przyjmuje, że:

$$U_1 = E_1 \tag{4.20}$$

Na rysunku 4.26 przedstawiono wykres wektorowy transformatora w stanie jałowym.

Charakterystyki stanu jałowego

W większości przypadków transformator jest zasilany ze źródła o prawie stałych wartościach napięcia i częstotliwości. W tych warunkach są wymuszone (mają wartości stałe): napięcie U_1 i częstotliwość f, natomiast wielkościami dostosowującymi się są m.in.: strumień magnetyczny Φ i prąd I_0. Strumień magnetyczny dostosowuje się zgodnie z zależnością:

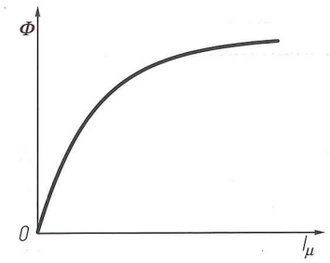
$$\Phi_m = \frac{E}{4{,}44 N_1 f} \approx \frac{U_1}{4{,}44 N_1 f} \tag{4.21}$$

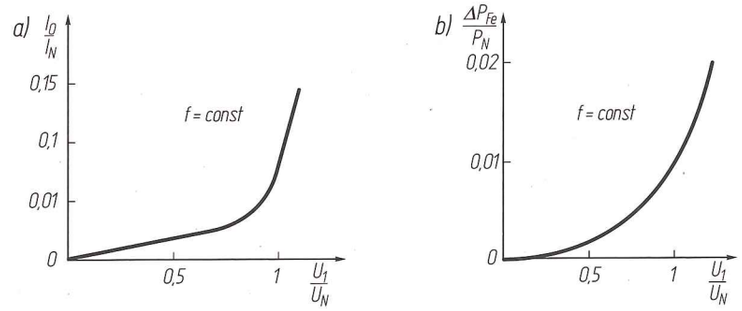
Widać z tego, że zmiana wartości napięcia zasilania przy niezmienionej częstotliwości i liczbie zwojów, powodowałaby liniową zmianę wartości strumienia.

Prąd I_0 również dostosowuje się do wymuszonej wartości napięcia. Wartość prądu można wyznaczyć według zależności:

$$I_0 = I_\mu = \frac{E_1}{X_\mu} = \frac{U_1}{X_\mu} \tag{4.22}$$

Rys. 4.26. Charakterystyka magnesowania





Rys. 4.27. Charakterystyki stanu jałowego (wartości podane w stosunku do wartości znamionowych): a) $I_0 = f(U_1)$; b) $\Delta P_{Fe} = f(U_1)$

W transformatorach z rdzeniem stalowym reaktancja X_μ nie jest stała, lecz zależy od stanu nasycenia obwodu magnetycznego, a więc przede wszystkim od wartości napięcia zasilania, któremu odpowiada pewien strumień magnetyczny ($U \approx E = c\Phi$). Znając wartość tego strumienia, można wyznaczyć wartość prądu I_μ z charakterystyki magnesowania obwodu (**rys. 4.26**). Zależność $I_0 = f(U_1)$ przy stałej częstotliwości f i stałej liczbie zwojów N_1 oraz zależność $\Delta P_{Fe} = f(U_1)$ przy stałej częstotliwości f i stałej liczbie zwojów N_1 nazywają się **charakterystykami stanu jałowego** (**rys. 4.27**).

Z charakterystyki $I_0 = f(U_1)$ wynika, że praca transformatora jest możliwa przy napięciu niższym niż napięcie znamionowe, natomiast **praca przy napięciu wyższym od znamionowego powoduje znaczne zwiększenie prądu jałowego.** Transformatory są tak projektowane, że praca typowych transformatorów w warunkach znamionowych odpowiada początkowi zakrzywienia charakterystyki. Informacja ta może być przydatna do określania napięcia znamionowego transformatora.

Główne źródło nagrzewania transformatora w stanie jałowym stanowią straty w rdzeniu. Są one określone zależnością:

$$\Delta P_{Fe} = c_h B^2 f + c_w B^2 f^2 \approx c_{Fe} B^2 f^{1,3} \tag{4.23}$$

gdzie: c_h, c_w — stałe, zależne od rodzaju materiału, związane z występowaniem zjawiska histerezy i prądami wirowymi.

Można przyjąć, z dostateczną dokładnością, że zależność strat w rdzeniu od napięcia zasilania przy stałej częstotliwości (rys. 4.28b) jest następująca:

$$\Delta P_{\mathrm{Fe}} = cU_1^{\,2} \tag{4.24}$$

gdyż:

$$B = c_b \Phi = c_b \frac{E_1}{4{,}44 f N_1} \approx c_{b1} U_1 \tag{4.25}$$

Biorąc pod uwagę, że:

$$B = c_b \Phi = c_b \frac{E_1}{4{,}44 f N_1} \approx \frac{c_1}{f} \tag{4.26}$$

zgodnie z zależnością (4.23) otrzyma się:

$$\Delta P_{\mathrm{Fe}} = \frac{c_{1h}}{f} + c_{1w} \tag{4.27}$$

gdzie: c, c_b, c_{b1}, c_1, c_{1h}, c_{1w} — wielkości stałe dla danego transformatora.

Z powyższych rozważań wynika następujący wniosek praktyczny: **Transformator zaprojektowany na częstotliwość 50 Hz może bez przeszkód pracować przy większej częstotliwości i napięciu znamionowym. W przypadku zmniejszenia częstotliwości poniżej wartości znamionowej należy obniżyć napięcie zasilania tak, aby nie powiększać strat w rdzeniu oraz prądu jałowego.** Jeżeli zmniejszaniu częstotliwości przy U_1 = const towarzyszy zwiększenie strumienia magnetycznego, to powoduje on zwiększenie prądu określone charakterystyką magnesowania pokazaną na rysunku 4.27 (zwiększenie prądu I_0 może być tak duże, że może spowodować nadmierne nagrzanie się transformatora).

Próba stanu jałowego

Schemat połączeń do przeprowadzenia próby stanu jałowego przedstawiono na **rysunku 4.29**. Transformator po stronie pierwotnej jest zasilany napięciem znamionowym U_{1N}. Następnie mierzy się napięcie U_{20}, prąd I_0 oraz moc P_0. Na podstawie tych pomiarów można wyznaczyć:

- przekładnię

$$n = \frac{U_{1N}}{U_{20}} = \frac{U_{1N}}{U_{2N}} \tag{4.28}$$

- straty w rdzeniu

$$\Delta P_{\mathrm{Fe}} = P_0 - R_1 I_0^{\,2} \approx P_0 \tag{4.29}$$

- współczynnik mocy w stanie jałowym

$$\cos\varphi_0 = \frac{P_0}{U_{1N} I_0} \tag{4.30}$$

- składową czynną I_{Fe} prądu jałowego I_0

$$I_{\mathrm{Fe}} = \frac{\Delta P_{\mathrm{Fe}}}{E_1} \approx \frac{P_0}{U_{1N}} \tag{4.31}$$

- składową bierną prądu jałowego I_0

$$I_\mu = \sqrt{I_0^2 - I_{\mathrm{Fe}}^2} \tag{4.32}$$

oraz elementy schematu zastępczego:

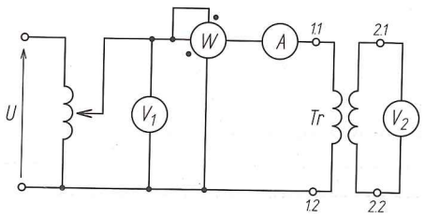
- rezystancję

$$R_{\mathrm{Fe}} = \frac{E_1^2}{\Delta P_{\mathrm{Fe}}} \approx \frac{U_{1N}^2}{P_0} \tag{4.33}$$

- reaktancję

$$X_\mu = \frac{E_1}{I_\mu} \approx \frac{U_{1N}}{P_0} \tag{4.34}$$

W układzie, według rysunku 4.28, można także wyznaczyć charakterystyki stanu jałowego (rys. 4.27).



Rys. 4.28. Schemat połączeń do wykonania próby stanu jałowego

Pomiary mocy w stanie jałowym mogą być dokonywane w różnych celach. Jeżeli na przykład pomiar ten będzie powtarzany dla danego transformatora systematycznie, to na podstawie wyników można oceniać stan rdzenia: zwiększenie mocy P_0 może świadczyć o pogorszeniu się stanu izolacji pakietu blach (wzrost strat w rdzeniu). Dokonując pomiaru mocy P_0 w trakcie produkcji, można określić jakość wykonania: jeżeli w takich samych transformatorach moce P_0 są różne, to przyczyną większego poboru mocy P_0 może być między innymi zwarcie blach pakietu.

Prąd magnesujący transformatora

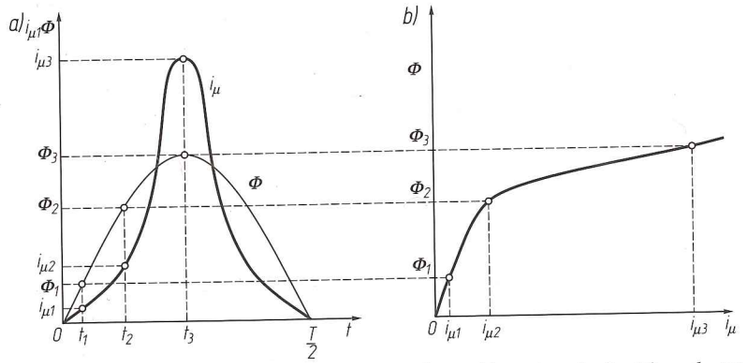
Dla użytkownika interesujący jest kształt krzywej prądu jałowego transformatora zasilanego napięciem sinusoidalnym. W celu uproszczenia rozważań przyjęto, że $I_0 = I_\mu$ (pominięto składową czynną I_{Fe}, tzn. straty w rdzeniu).

Jeżeli napięcie jest sinusoidalnie zmienne, to strumień również musi być sinusoidalnie zmienny (ponieważ w stanie jałowym $u_1 \approx e_1$ oraz $e_1 = N_1 \frac{\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}t}$). Przebiegi napięcia i strumienia są przesunięte względem siebie w fazie o kąt $\pi/2$, ale kształt przebiegu jest taki sam. Zależność między prądem magnesującym a strumieniem

przedstawia krzywa magnesowania pierwotnego (rys. 4.27). Ma ona charakter prostoliniowy tylko w początkowej swej części, a następnie nachyla się do osi poziomej. Tak więc proporcjonalność między strumieniem a prądem magnesującym, która występuje przy mniejszych wartościach strumienia, zanika przy zagięciu krzywej magnesowania, tzn. dla większych wartości strumienia. Jeżeli więc napięcie i strumień są sinusoidalne, to prąd magnesujący będzie odkształcony od przebiegu sinusoidalnego. Odkształcenie będzie tym większe, im bardziej wykracza się poza prostoliniową część krzywej magnesowania. **Przyczyną nachylania się krzywej do osi poziomej, a więc i odkształcania prądu magnesującego, jest zjawisko nasycania się żelaza**. Jeżeli z jakichś względów należy zachować sinusoidalny przebieg prądu magnesującego (prądu jałowego), to warunki pracy transformatora trzeba tak dobrać, aby strumień maksymalny mieścił się w zakresie prostoliniowej części charakterystyki magnesowania. Z tego m.in. względu zmniejsza się wartość indukcji w rdzeniach transformatorów przeznaczonych do celów specjalnych.

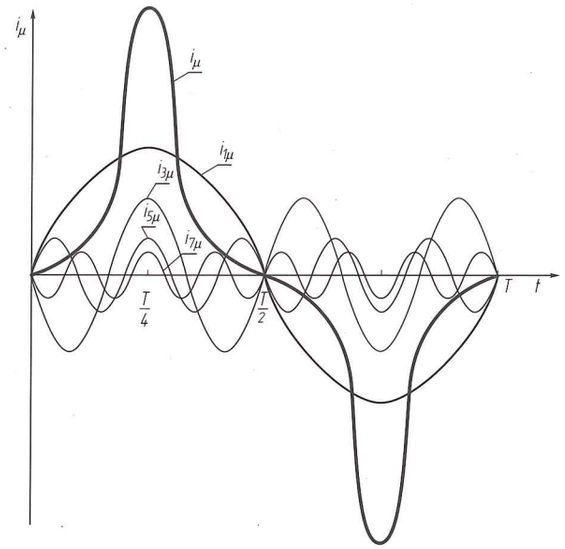
Wyznaczanie przebiegu prądu magnesującego z krzywej magnesowania przedstawiono na **rysunku 4.29**. Mając dany przebieg strumienia w funkcji czasu $\Phi = f(t)$ oraz charakterystykę magnesowania $\Phi = f(i_\mu)$, na podstawie krzywej $\Phi = f(t)$ można określić dla dowolnie wybranych chwil t_1, t_2, t_3 odpowiadające im wartości strumienia Φ_1, Φ_2, Φ_3. Po przeniesieniu wartości strumienia na wykres $\Phi = f(i_\mu)$ można znaleźć odpowiadające im wartości prądu magnesującego $i_{\mu1}$, $i_{\mu2}$, $i_{\mu3}$. Wartości te przenosi się na wykres czasowy (rys. 4.29) i w ten sposób otrzymuje się przebieg prądu magnesującego w czasie $i_\mu = f(t)$. Rysując przebieg prądu, można zauważyć, że jest on odkształcony od sinusoidy i ma charakter okresowy. **Każdy przebieg niesinusoidalny okresowy można zastąpić sumą przebiegów sinusoidalnych (tzw. harmonicznych), każdy o innej amplitudzie i innej częstotliwości**. Zastąpienie przebiegu niesinusoidalnego sumą przebiegów sinusoidalnych nazywa się **rozkładem w szereg Fouriera**. Prąd magnesujący rozłożony na wyższe harmoniczne zawiera tylko harmoniczne nieparzyste. We wzorze (4.35) oraz na **rysunku 4.30** zostały przedstawione nieparzyste harmoniczne (od 1 do 7), czyli:

$$i = I_{1\mu m}\sin\omega t - I_{3\mu m}\sin 3\omega t + I_{5\mu m}\sin 5\omega t - I_{7\mu m}\sin 7\omega t + \ldots \qquad (4.35)$$



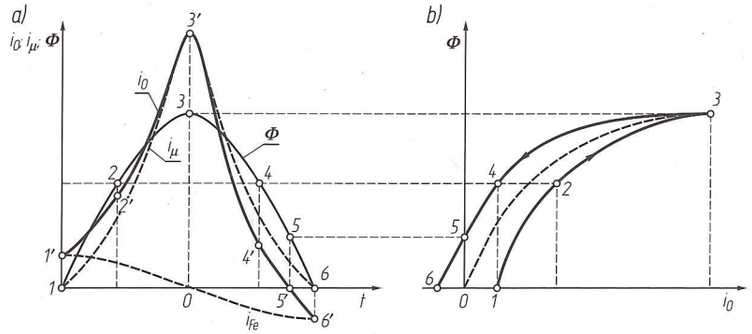
Rys. 4.29. Konstrukcja krzywej prądu magnesującego: a) przebieg strumienia Φ i prądu magnesującego i_μ; b) charakterystyka magnesowania

Rys. 4.30. Prąd magnesujący rozłożony na harmoniczne



Harmoniczna pierwsza jest to tzw. harmoniczna podstawowa o częstotliwości podstawowej. **Dla transformatora trójfazowego duże znaczenie ma harmoniczna trzecia, która może wywołać w pewnych przypadkach poważne zakłócenia w pracy tego transformatora** (p. 4.6.3).

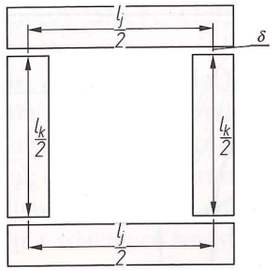
W rozważaniach pominięto składową czynną prądu magnesującego. Aby zbadać jej przebieg, należy zastosować tę samą metodę postępowania, co przy wyznaczaniu przebiegu $i_\mu = f(t)$, lecz należy posłużyć się charakterystyką magnesowania uwzględniającą straty histerezowe (pętla histerezy) — **rys. 4.31b**. Wyznaczenie przebiegu prądu $i_0 = f(t)$ (krzywa 1'3'6') przedstawiono na **rysunku 4.31a**. Jeżeli z przebiegu $i_0 = f(t)$ wydzieli się (odejmie) przebieg $i_\mu = f(t)$, to otrzymany zostanie wykres $i_{Fe} = f(t)$ (krzywa 1'06'). Prąd I_{Fe} ma tym większą wartość, im szersza jest pętla histerezy (większe straty na przemagnesowywanie).



Rys. 4.31. Konstrukcja krzywej prądu pobieranego przez transformator w stanie jałowym z uwzględnieniem zjawiska histerezy: a) przebieg prądów i strumienia; b) charakterystyka magnesowania — pętla histerezy

Obwód magnetyczny transformatora

Prąd jałowy transformatora można także wyznaczyć w sposób obliczeniowy, dysponując charakterystyką magnesowania materiału, z którego wykonano rdzeń, oraz parametrami konstrukcyjnymi obwodu magnetycznego.



Rys. 4.32. Droga strumienia magnetycznego w rdzeniu transformatora. Objaśnienia w tekście

W obwodzie magnetycznym transformatora wyróżnia się (**rys. 4.32**) odcinki drogi w jarzmie l_j, odcinki drogi w kolumnie l_k i odcinki drogi w powietrzu $l_\delta = 4\delta$ (δ — szerokość szczeliny powietrznej). Aby obliczyć wartość prądu jałowego transformatora I_0, należy znać prąd magnesujący oraz I_{Fe}. Z kolei do obliczenia prądu I_μ trzeba znać przepływ Θ, gdyż:

$$I_{\mu m} = \frac{\Theta}{N} \tag{4.36}$$

Przepływ jest równy sumie spadków napięć magnetycznych na poszczególnych odcinkach obwodu magnetycznego. Przy obliczaniu prądu magnesującego należy wstawić liczbę zwojów rozważanego uzwojenia, czyli na podstawie rysunku 4.32:

$$\Theta = \Sigma Hl = H_j l_j + H_k l_k + H_\delta l_\delta = I_{\mu m} N_1 \tag{4.37}$$

Do obliczenia natężenia pola magnetycznego jest konieczna znajomość wartości strumienia magnetycznego potrzebnego do indukowania żądanej siły elektromotorycznej oraz wymiarów rdzenia, a także charakterystyki magnesowania blachy, z której jest wykonany rdzeń transformatora. Strumień wynosi:

$$\Phi = \frac{U_1}{4{,}44 f N_1} \tag{4.38}$$

Przyjęto, że $U_1 \approx E_1$. Liczbę zwojów N_1 określa się na podstawie tabel wartości optymalnych napięć przypadających na jeden zwój (patrz np. [19]).

Po obliczeniu strumienia Φ, znając przekrój poprzeczny S_k kolumny i S_j jarzma, określa się indukcję magnetyczną według wzoru:

$$B = \frac{\Phi}{S} \tag{4.39}$$

Po obliczeniu indukcji magnetycznej B_k w kolumnie i B_j w jarzmie, z charakterystyki magnesowania blachy, z której jest wykonany rdzeń, wyznacza się natężenie pola magnetycznego H.

Indukcję magnetyczną w szczelinie powietrznej przyjmuje się zwykle równą indukcji magnetycznej w kolumnie $B_\delta = B_k$, a natężenie pola magnetycznego w szczelinie (powietrznej) określa związek:

$$H_\delta = \frac{B_\delta}{\mu_0} \tag{4.40}$$

Znając wartość natężenia pola magnetycznego H_k w kolumnie, H_j w jarzmie i H_δ w szczelinie powietrznej, można już obliczyć przepływ:

$$I_{\mu m} N_1 = H_j l_j + H_k l_k + H_\delta l_\delta \tag{4.41}$$

a następnie wartość skuteczną prądu magnesującego:

$$I_\mu = \frac{H_j l_j + H_k l_k + H_\delta l_\delta}{N_1 \sqrt{2}} \tag{4.42}$$

Ze względu na niesinusoidalny przebieg prądu magnesującego otrzymana wartość jest za duża, co uwzględnia się, wprowadzając odpowiedni współczynnik kształtu, który dla każdej wartości indukcji należy odczytać z odpowiednich wykresów (patrz np. [19]).

Prąd I_{Fe} w przybliżeniu można wyznaczyć z zależności:

$$I_{Fe} = \frac{\Delta P_{Fe}}{E_1} = \frac{\Delta P_{Fe}}{U_1} \tag{4.43}$$

przy czym straty w rdzeniu oblicza się na podstawie jego wymiarów (przekroju s i długości l, gęstości blachy γ_{Fe} i stratności blachy Δp):

$$\Delta P_{Fe} = (1{,}1 \div 1{,}3)\, sl \gamma_{Fe} \Delta p \tag{4.44}$$

Mając wyznaczony prąd magnesujący I_μ oraz prąd strat w rdzeniu I_{Fe}, można obliczyć prąd jałowy transformatora I_0:

$$I_0 = \sqrt{I_{Fe}^2 + I_\mu^2} \tag{4.45}$$

Ze względu na małą wartość prądu zastępczego strat w rdzeniu I_{Fe}, prąd jałowy jest praktycznie równy prądowi magnesującemu.

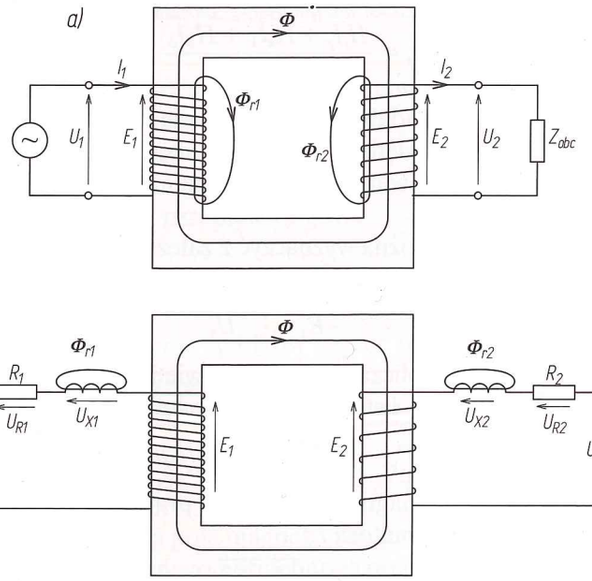
4.5.2. Stan obciążenia

Stanem obciążenia transformatora nazywa się taki stan pracy, w którym uzwojenie pierwotne jest zasilane napięciem znamionowym, a w obwód wtórny jest włączony odbiornik.

W stanie obciążenia transformatora w obu uzwojeniach płyną prądy. Prąd strony wtórnej I_2 zależy od napięcia na zaciskach tej strony oraz od parametrów odbiornika. Natomiast prąd strony pierwotnej I_1 w ten sposób dopasowuje się do

prądu obciążenia, aby sumaryczny przepływ magnesujący rdzeń $\Theta_{wyp} = N_1 I_1 - N_2 I_2$ wywoływał strumień główny Φ, który indukuje siłę elektromotoryczną E_1 zbliżoną do napięcia zasilania U_1.

Biorąc pod uwagę, że uzwojenie pierwotne i wtórne mają pewną rezystancję oraz prądy obu stron wywołują własne strumienie rozproszenia Φ_{r1} i Φ_{r2}, można przedstawić transformator jednofazowy w stanie obciążenia z wyodrębnionymi rezystancjami oraz napięciami U_{x1} i U_{x2} indukowanymi przez strumienie rozproszone uzwojeń (**rys. 4.33b**). Zgodnie z drugim prawem Kirchhoffa można stwierdzić, że napięcie U_1 przyłożone do uzwojenia pierwotnego transformatora jest równoważone przez spadek napięcia na rezystancji uzwojenia pierwotnego R_1, napięcie U_{x1} oraz zaindukowaną siłę elektomotoryczną E_1. Natomiast zaindukowana w uzwojeniu wtórnym siła elektromotoryczna E_2 jest równoważona przez spadek napięcia na rezystancji uzwojenia wtórnego R_2, napięcie U_{x2} oraz U_2.



Rys. 4.33. Transformator jednofazowy w stanie obciążenia: a) układ połączeń; b) schemat z wyodrębnionymi rezystancjami i reaktancjami

Przepływ wypadkowy:

$$\Theta_{wyp} = N_1 I_1 — N_2 I_2 \tag{4.46}$$

powinien wywołać strumień główny indukujący siłę elektromotoryczną E_1 o wartości bliskiej U_1, można więc napisać:

$$N_1 I_0 = N_1 I_1 - N_2 I_2 \tag{4.47}$$

czyli:

$$\Theta_{wyp} = \Theta_0 = \Theta_1 - \Theta_2 \tag{4.48}$$

Dzieląc obie strony równania (4.47) przez N_1, otrzyma się:

$$I_0 = I_1 - \frac{N_2}{N_1} I_2 \tag{4.49}$$

lub inaczej:

$$I_1 - I_0 = \frac{N_2}{N_1} I_2 \tag{4.50}$$

Wyrażenie:

$$\frac{N_2}{N_1} I_2 = I_2' \tag{4.51}$$

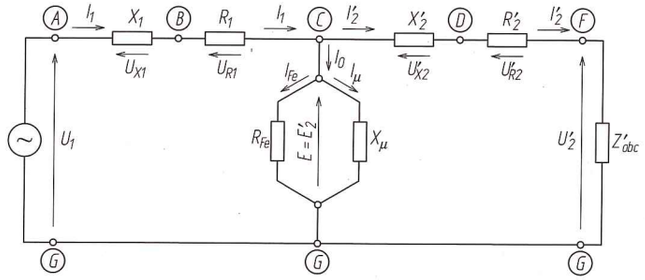
nazywa się **prądem wtórnym odniesionym do strony pierwotnej**. Jest to prąd, który popłynąłby w uzwojeniu wtórnym, gdyby miało ono taką samą liczbę zwojów co uzwojenie pierwotne. Gdyby $N_1 = N_2$, to wyrażenie (4.50) miałoby postać:

$$I_1 - I_0 = I_2 \tag{4.52}$$

Po uwzględnieniu wyrażenia (4.51) w równaniu (4.50) otrzyma się:

$$I_1 - I_0 = I'_2 \tag{4.53}$$

Jest to równanie prądów dla transformatora.



Rys. 4.34. Schemat zastępczy transformatora o dowolnej przekładni

Na podstawie równania (4.53) przedstawiającego rozpływ prądów w transformatorze można sporządzić schemat zastępczy transformatora obciążonego (**rys. 4.34**). Wszystkie wielkości strony pierwotnej są reprezentowane przez wartości rzeczywiste, a wszystkie wielkości strony wtórnej są sprowadzone na stronę pierwotną. Stosując odpowiednie wzory przeliczeniowe, wielkości sprowadzone: I'_2, R'_2, X'_2, Z'_{obc}, E'_2, U'_2 można przeliczyć na wielkości rzeczywiste. Na tej zasadzie można wyprowadzić inne wzory przeliczeniowe.

Siła elektromotoryczna strony wtórnej odniesiona do strony pierwotnej:

$$E_2' = \frac{N_1}{N_2} E_2 \tag{4.54}$$

gdzie E'_2 — napięcie, które indukowałoby się w uzwojeniu wtórnym, gdyby miało taką samą liczbę zwojów jak uzwojenie pierwotne.

Analogicznie:

$$U_2' = \frac{N_1}{N_2} U_1 \tag{4.55}$$

$$R_2' = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 R_2 \tag{4.56}$$

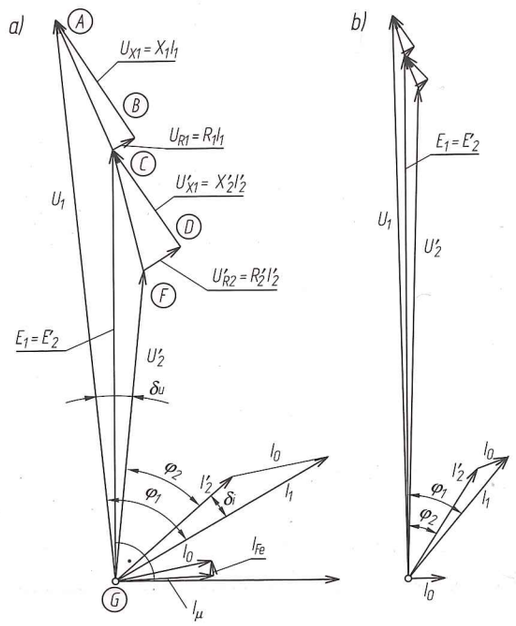
$$X_2' = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 X_2 \tag{4.57}$$

Przedstawione przekształcenia sprowadzające parametry strony wtórnej transformatora do strony pierwotnej nie zmieniają zależności mocy po stronie wtórnej, co można sprawdzić, przeliczając:

$$S_2 = U_2 I_2 = U_2 n I_2 \frac{1}{n} = U_2' I_2' = S_2'$$

$$\Delta P_{Cu} = R_2 I_2^2 = R_2 n^2 \left(I_2 \frac{1}{n}\right)^2 = R_2' I_2'^2 = \Delta P_{Cu}'^2$$

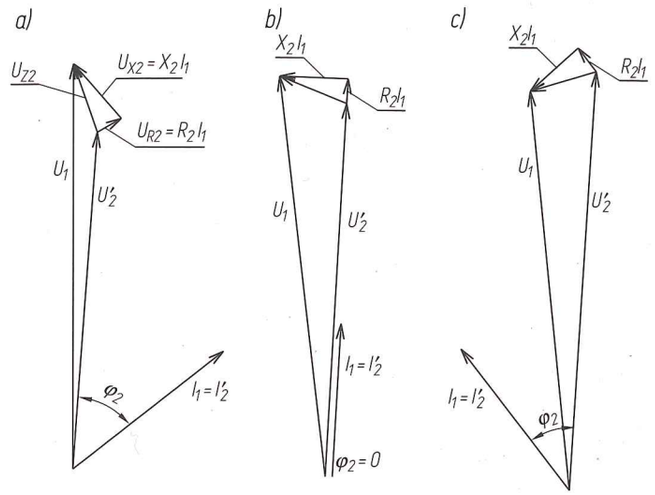
Na podstawie przeprowadzonych rozważań transformator o dwóch uzwojeniach niepołączonych elektrycznie (jedynie sprzęgniętych strumieniem magnetycznym) udało się zastąpić obwodem elektrycznym łączącym obwód wtórny z obwodem pierwotnym.



Rys. 4.35. Wykres wektorowy transformatora odpowiadający schematowi zastępczemu z rysunku 4.35: a) bez zachowania proporcji właściwych typowym transformatorom; b) z zachowaniem tych proporcji

Znając wartości parametrów schematu zastępczego transformatora, można narysować wykres wektorowy transformatora, zaczynając od znanego napięcia i prądu strony wtórnej sprowadzonych na stronę pierwotną. **Wykres wektorowy pozwala w dogodny sposób analizować pracę transformatora przy zmieniającym się obciążeniu**. Pokazuje on zasadniczą właściwość ruchową transformatora zasilanego napięciem o stałej wartości skutecznej i stałej częstotliwości **(rys. 4.35)**. Właściwość ta polega

na zmianie napięcia na zaciskach strony wtórnej, przy zmianach obciążenia na tej stronie. Zmiana jest spowodowana spadkami napięć na rezystancjach uzwojeń oraz na reaktancjach X_1 i X_2. Wykonując wykresy wektorowe dla różnych charakterów obciążenia transformatora (np. czysto indukcyjne, czysto pojemnościowe, rezystancyjne itp.), można się przekonać, że dla obciążenia indukcyjnego transformatora napięcie $U'_2 < U_1$, czyli w transformatorze obciążonym indukcyjnie występuje „obniżanie napięcia". Natomiast przy obciążeniu pojemnościowym obserwuje się „podwyższanie napięcia", czyli $U'_2 > U_1$ **(rys. 4.36)**.



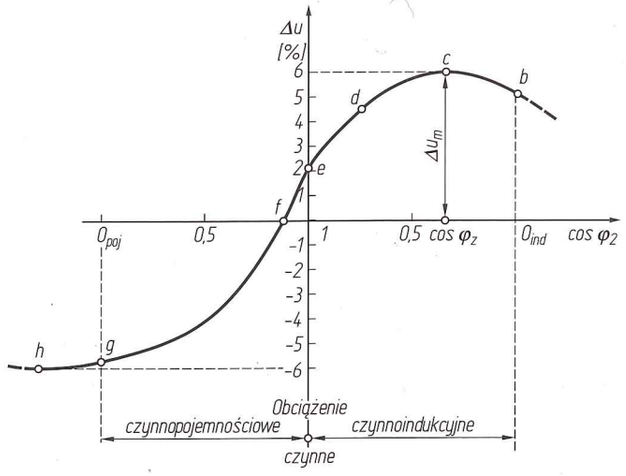
Rys. 4.36. Wykresy wektorowe transformatora przy obciążeniu o charakterze: a) indukcyjnym; b) rezystancyjnym; c) pojemnościowym

Zakres wahań napięcia strony wtórnej określa wielkość $\Delta u_{\%}$, zwana **zmiennością napięcia transformatora.** Informuje ona, o ile zmieniło się napięcie na zaciskach wtórnych transformatora, przy zmianie obciążenia od zera do znamionowego. Zmienność napięcia podaje się w % lub w wartościach względnych w stosunku do napięcia znamionowego, przy czym:

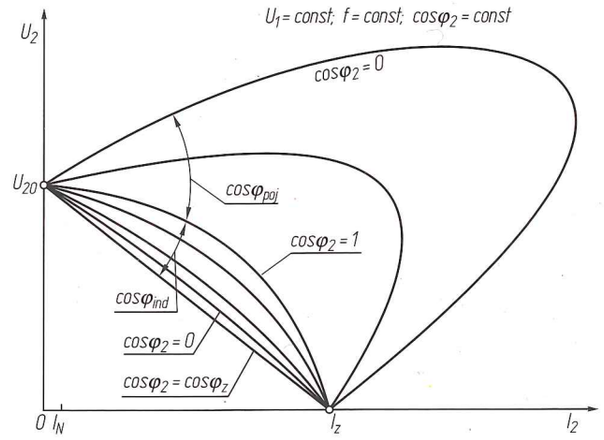
$$\Delta u_{\%} = \frac{U_{20} - U_{2IN}}{U_{20}} 100\%$$

gdzie: U_{2IN} — napięcie strony wtórnej przy obciążeniu prądem znamionowym, U_{20} — napięcie strony wtórnej w stanie jałowym (należy pamiętać, że napięcie znamionowe strony wtórnej jest to napięcie w stanie jałowym po stronie wtórnej).

Na **rysunku 4.37** pokazano wykres zmienności napięcia transformatora w funkcji $\cos\varphi_2$. Zmiany napięcia strony wtórnej transformatora w funkcji prądu obciążenia (dla odbiornika o stałym $\cos\varphi_2$) przedstawiają charakterystyki zewnętrzne pokazane na **rysunku 4.38**.



Rys. 4.37. Zależność zmienności napięcia transformatora od współczynnika mocy obciążenia



Rys. 4.38. Charakterystyki zewnętrzne transformatora przy różnych współczynnikach mocy obciążenia

4.5.3. Stan zwarcia. Zwarcie pomiarowe

Stanem zwarcia transformatora nazywa się taki stan, w którym do uzwojenia pierwotnego jest doprowadzone napięcie zasilające, a uzwojenie wtórne jest zwarte.

Napięcie na zaciskach zwartego uzwojenia jest równe zero i dlatego, mimo że w uzwojeniu płynie prąd, nie oddaje ono mocy na zewnątrz do odbiornika. Moc pobierana przez zwarty transformator pokrywa wyłącznie straty, zamieniając się całkowicie w ciepło.

Zwarcie występujące przy pełnym napięciu zasilającym nazywa się **zwarciem awaryjnym**. **Prąd płynący w uzwojeniach transformatora podczas zwarcia przy pełnym napięciu zasilającym jest od kilku do kilkudziesięciu razy większy od prądu znamionowego.** Stan ten jest niebezpieczny dla transformatorów z dwóch powodów:

- powstają bardzo duże siły dynamiczne działające na uzwojenia (proporcjonalne do kwadratu prądu);
- całkowita moc pobrana w tym stanie wydziela się w postaci ciepła, co powoduje szybki wzrost temperatury uzwojeń, a w konsekwencji uszkodzenie izolacji.

W chwili wystąpienia awarii występuje dodatkowo stan nieustalony, co potęguje skutki zwarcia (p. 4.5.4).

Do stanu zwarcia można doprowadzić celowo, aby na podstawie pomiarów wyznaczyć różne dane charakterystyczne. Zwarcie uzyskiwane w warunkach laboratoryjnych nazywa się **zwarciem pomiarowym** (lub **zwarciem normalnym**) i jest ono realizowane przy obniżonym napięciu, tzw. napięciu zwarcia.

Napięcie zwarcia jest to takie napięcie doprowadzone do pierwotnych zacisków transformatora, przy zwartym uzwojeniu wtórnym, pod wpływem którego w uzwojeniach transformatora płyną prądy znamionowe. Napięcie zwarcia można określić dla każdej ze stron transformatora (w zależności od tego, po której stronie jest zwarcie) i podaje się je w procentach napięcia znamionowego:

$$u_{z\%} = \frac{U_z}{U_N} 100\% \tag{4.58}$$

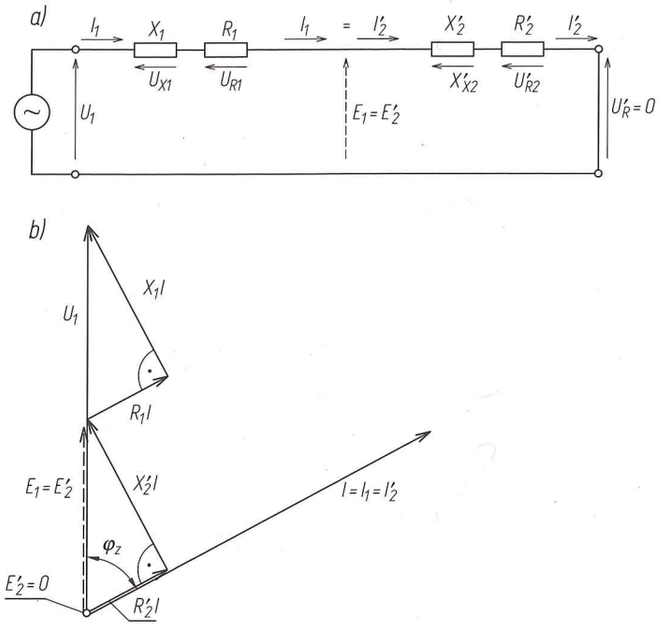
lub w jednostkach względnych:

$$u_z = \frac{U_z}{U_N} \tag{4.59}$$

Napięcia zwarcia transformatorów energetycznych są znormalizowane i zawierają się w granicach $4 \div 15\% U_N$ (granica dolna dla małych transformatorów, górna — dla dużych).

Schemat zastępczy i wykres wektorowy transformatora w stanie zwarcia przedstawiono na **rysunku 4.39**.

Przy napięciu wtórnym równym zero napięcie pierwotne rozkłada się jedynie na napięcia na impedancjach uzwojeń transformatora. Indukowana siła elektromotoryczna $E_1 = E'_1$ jest równa w przybliżeniu połowie napięcia pierwotnego U_1. W stanie zwarcia pomiarowego napięcie E_1 wynosi kilka procent napięcia znamionowego. Wtedy prąd magnesujący I_μ, zmieniający się w funkcji napięcia według krzywej magnesowania, jest pomijalnie mały w stosunku do prądów znamionowych w uzwojeniach transformatora. Oznacza to bardzo dużą wartość reaktancji X_μ w schemacie zastępczym transformatora, czyli przerwę w gałęzi X_μ (rys. 4.35). Straty w rdzeniu ΔP_{Fe} są proporcjonalne do kwadratu indukcji, czyli do kwadratu napięcia (gdyż $U \sim B$), którego wartość w tym przypadku jest rzędu kilku procent napięcia znamionowego, dlatego można je pominąć (gdyż



Rys. 4.39. Transformator w stanie zwarcia a) schemat zastępczy; b) wykres wektorowy

stanowią one ułamek procenta strat znamionowych w rdzeniu). Oznacza to dużą wartość rezystancji R_{Fe} w schemacie zastępczym, czyli przerwę w gałęzi R_{Fe}. Stąd wynika przerwa w całej gałęzi poprzecznej w schemacie zastępczym transformatora i wartość prądu $I_0 = I_\mu + I_{Fe} \approx 0$.

W schemacie zastępczym pozostają więc tylko połączone szeregowo rezystancje i reaktancje: R_1, R'_2, X_1 i X'_2, przy czym:

$$R_1 + R'_2 = R_z \qquad \text{— rezystancja zwarcia} \tag{4.60}$$

$$X_1 + X'_2 = X_z \qquad \text{— reaktancja zwarcia} \tag{4.61}$$

$$Z_z = \sqrt{R_z^2 + X_z^2} \qquad \text{— impedancja zwarcia} \tag{4.62}$$

Tak więc napięcie zwarcia można wyrazić jako:

$$U_z = Z_z I_N \tag{4.63}$$

W przypadku zwarcia awaryjnego prąd płynący w uzwojeniu transformatora, przy znamionowym napięciu U_N na jego zaciskach i po ustąpieniu stanu nieustalonego, nazywa się **ustalonym prądem zwarcia transformatora** I_z. Można napisać, że:

$$U_N = Z_z I_z \tag{4.64}$$

Dzieląc stronami równania (4.63) i (4.64), otrzyma się:

$$\frac{U_z}{U_N} = \frac{Z_z I_N}{Z_z I_z}$$

czyli:

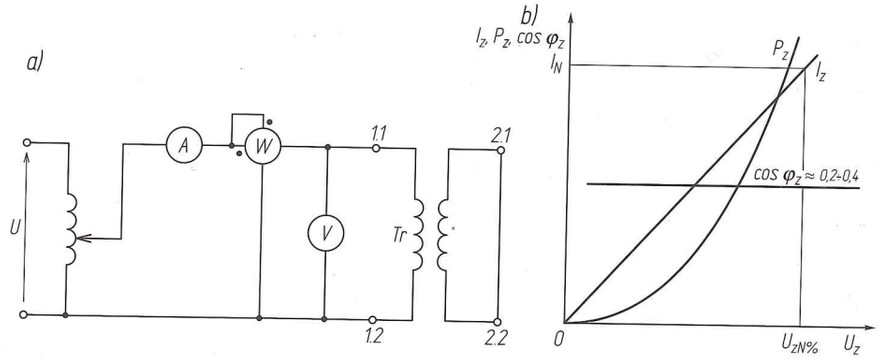
$$\frac{U_z}{U_N} = \frac{I_N}{I_z} \tag{4.65}$$

Z zależności tej wynika, że **ustalony prąd zwarcia transformatora (przy pełnym napięciu) jest tyle razy większy od prądu znamionowego, ile razy napięcie zwarcia jest niższe od napięcia znamionowego**. Na przykład dla transformatora o napięciu zwarcia równym 5% prąd zwarcia wynosi $20I_N$, gdyż:

$$\frac{5\%}{100\%} = \frac{I_N}{I_z}, \quad \text{zatem} \quad I_z = 20I_N$$

Próba zwarcia i charakterystyki zwarcia

Próbę zwarcia pomiarowego wykonuje się w laboratorium w sposób następujący. Transformator jest zasilany z regulowanego źródła napięcia (**rys. 4.40**), obwód wtórny jest zwarty, a napięcie zasilające zmienia się od zera do takiej wartości, przy której w uzwojeniu strony zasilanej popłynie prąd znamionowy. Odczytana wartość napięcia to napięcie zwarcia U_z. Ponadto mierzy się moc P_z pobieraną przy zwarciu.



Rys. 4.40. Transformator w stanie zwarcia: a) schemat układu pomiarowego; b) charakterystyki

Na podstawie tych pomiarów można obliczyć:

- straty w uzwojeniu

$$\Delta P_{Cu} \approx P_z \tag{4.66}$$

- współczynnik mocy w stanie zwarcia

$$\cos\varphi_z = \frac{P_z}{U_z I_N} \tag{4.67}$$

- impedancję zwarcia

$$Z_z = \frac{U_z}{I_N} \tag{4.68}$$

- rezystancję zwarcia

$$R_z = \frac{\Delta P_{\mathrm{Cu}}}{I_N^2} \approx \frac{P_z}{I_N^2} \tag{4.69}$$

$$R_z = R_1 + R'_2 \text{ oraz } R_1 \approx R'_2$$

- reaktancję zwarcia

$$X_z = \sqrt{Z_z^2 - R_z^2} \tag{4.70}$$

$$X_z = X_1 + X'_2, \text{ przy czym } X_1 \approx X'_2$$

Pomiary napięć, prądów i mocy czynnych w stanie zwarcia i w stanie jałowym umożliwiają wyznaczenie wartości liczbowych wszystkich elementów (R_1, R_2, X_1, X_2, X_μ i R_{Fe}) występujących w schematach zastępczych transformatorów, jak również strat w rdzeniu ΔP_{Fe} oraz strat w uzwojeniach ΔP_{Cu}. Impedancję zwarcia Z_z i rezystancję zwarcia R_z można również obliczyć na podstawie parametrów znajdujących się zwykle na tabliczce znamionowej transformatora:

$$Z_z = \frac{U_z}{I_N}, \qquad u_{z\%} = \frac{U_z}{U_N} 100, \quad S_N = U_N I_N$$

zatem:

$$Z_z = \frac{u_z}{100} \cdot \frac{U_N^2}{I_N} \tag{4.71}$$

oraz:

$$R_z = \frac{\Delta P_{\mathrm{Cu}}}{I_N^2} = \Delta P_{\mathrm{Cu}} \frac{U_N^2}{S_N^2} \tag{4.72}$$

Zwiększając stopniowo podczas próby zwarcia napięcie zasilania od 0 do wartości powodującej przepływ prądu ok. $1{,}2I_N$ oraz mierząc systematycznie prąd i moc, można wyznaczyć charakterystyki zwarcia transformatora.

4.5.4. Stany nieustalone w pracy transformatora: włączanie transformatora i zwarcie awaryjne

Stany nieustalone występują zawsze przy przejściu z jednego stanu ustalonego do innego. Towarzyszą one **włączaniu transformatora, zwarciu, zanikowi lub wzrostowi napięcia zasilania, zmianom obciążenia i wyładowaniom atmosferycznym**.

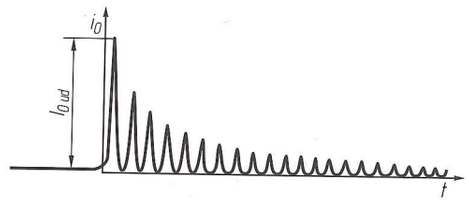
Zmianie stanu ustalonego odpowiada zmiana energii zawartej w polu elektrycznym i magnetycznym całego obwodu. Zmiany nie mogą się dokonywać gwałtownie, ponieważ obwód charakteryzuje pewna bezwładność czasowa.

O szybkości zanikania procesu przejściowego decyduje stała czasowa T obwodu, będąca stosunkiem indukcyjności L i rezystancji R obwodu. Dokładna analiza stanu nieustalonego wymaga ułożenia, a następnie rozwiązania — przy uwzględnieniu przyjętych warunków początkowych — równań różniczkowych opisujących rozpatrywany obwód. Przyjmuje się przy tym pewne założenia upraszczające, gdyż matematyczny opis wszystkich zjawisk towarzyszących stanom nieustalonym jest skomplikowany. Analiza stanów nieustalonych ma na celu określenie przebiegów strumieni i prądów oraz wynikających stąd zjawisk cieplnych i dynamicznych, przy przechodzeniu transformatora z jednego stanu ustalonego do innego. Prądy, napięcia i siły występujące w stanach nieustalonych mogą być znacznie większe niż występujące w stanach ustalonych. Wartości te należy brać pod uwagę przy projektowaniu (wytrzymałość mechaniczna, układ izolacyjny) oraz przy eksploatacji (dobór zabezpieczeń, aparatów pomiarowych i regulacyjnych) transformatorów. Szczególną uwagę należy zwrócić na przebiegi prądów przy włączaniu transformatora do sieci oraz przy zwarciu transformatora.

Włączanie transformatora

Rozwiązanie i analiza równań różniczkowych opisujących parametry podczas włączania transformatora do sieci wykracza poza przyjęty zakres materiału tego podręcznika. Dlatego podane zostaną tylko wnioski końcowe:

- wartość prądu udarowego (maksymalnego prądu podczas włączania) w bardzo dużym stopniu zależy od chwili włączenia transformatora i od stanu rdzenia (pozostałości magnetycznej w rdzeniu);
- w przypadkach najbardziej niekorzystnych udarowy prąd włączania może być kilkakrotnie większy od prądu znamionowego;
- stała czasowa prądu włączania jest dość znaczna; w dużych transformatorach może wynosić nawet kilkanaście sekund.



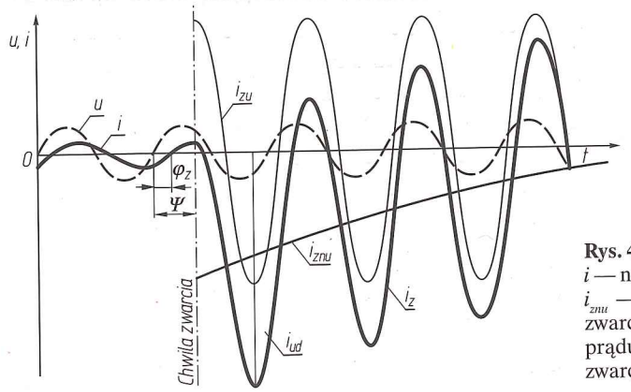
Rys. 4.41. Przebieg prądu włączania transformatora w stanie jałowym

Prąd włączania (rys. 4.41) nie jest dla transformatora niebezpieczny ani pod względem cieplnym, ani dynamicznym. Może jednak spowodować zbędne zadziałanie urządzeń zabezpieczających i wyłączenie transformatora.

Zwarcie udarowe transformatora

Analizę zwarcia najwygodniej jest przeprowadzić na podstawie schematu zastępczego przedstawionego na rysunku 4.40. Opisując ten stan za pomocą równania różniczkowego i rozwiązując je, można sformułować następujące wnioski:

- Prąd zwarcia ma dwie składowe (**rys. 4.42**):
  i_{zu} — składową ustaloną udarowego prądu zwarcia,
  i_{znu} — składową nieustaloną (tłumioną) udarowego prądu zwarcia.



Rys. 4.42. Przebieg prądu zwarcia u, i — napięcie i prąd przed zwarciem, i_{znu} — składowa nieustalona prądu zwarcia, i_{zu} — składowa ustalona prądu zwarcia, i_{ud} — udarowy prąd zwarcia, i_z — prąd zwarcia

- Wartość maksymalna prądu zwarcia to tzw. **udarowy prąd zwarcia** i wynosi:

$$I_{ud} = k_{ud}\sqrt{2}I_z \tag{4.73}$$

gdzie k_{ud} — **współczynnik udaru**; dla małych transformatorów wynosi on 1,2÷1,3, a dla dużych 1,7÷1,8.

Udarowy prąd zwarcia jest największą wartością prądu, jaka może się pojawić podczas pracy transformatora. Zjawiska cieplne podczas stanu nieustalonego, mimo tak dużego prądu nie są niebezpieczne, gdyż stan ten trwa od kilku do kilkunastu okresów przyłożonego napięcia. Bardzo istotne są natomiast zjawiska dynamiczne. Siły powstające w wyniku działań dynamicznych należy uwzględnić przy obliczaniu wytrzymałości mechanicznej uzwojeń transformatora. W celu ograniczenia sił działających przy zwarciu transformatory największych mocy buduje się na wysokie napięcia zwarcia i szczególną uwagę przywiązuje się do rozmieszczenia cewek (symetria, jednakowa długość). Udarowy prąd zwarcia ma decydujący wpływ na dobór zabezpieczeń, aparatury pomiarowej i rozdzielczej transformatora.

4.6. Transformatory energetyczne

Wśród stosowanych transformatorów bardzo dużą rolę odgrywają trójfazowe transformatory energetyczne (zwane także transformatorami mocy). Są to transformatory największych mocy. Ze względu na ich zastosowanie dzieli się je na trzy podstawowe grupy:

1. **Transformatory blokowe** pracujące w bloku energetycznym elektrowni z generatorem, turbiną i kotłem — podwyższają one napięcie generatora (napięcie nie przekracza 25 kV) do wartości napięcia sieci przesyłowej. W Polsce moc największych generatorów wynosi 500 MW, a moc transformatora blokowego pracującego z tym generatorem wynosi 630 MVA. Maksymalne moce transformatorów blokowych przekraczają 1000 MVA.
2. **Transformatory sieciowe** sprzęgające dwie sieci przesyłowe najwyższych napięć (np. 400/220 kV) lub transformatory obniżające, które łączą sieć przesyłową z siecią rozdzielczą. Obniżają one bardzo wysokie napięcia, np. 400 kV, na napięcie 110 kV, a ich moce sięgają 500 MVA.
3. **Transformatory rozdzielcze** obniżają napięcie górne z 30, 15, 10 lub 6,3 kV na napięcie 400 V. Moce transformatorów rozdzielczych przeznaczonych do zasilania odbiorców miejskich i wiejskich wynoszą od 40 do 630 kVA, natomiast do zasilania odbiorców przemysłowych — od 250 do 1600 kVA.

4.6.1. Transformowanie w układzie trójfazowym

Transformowanie (przetwarzanie) w układzie trójfazowym można uzyskać, zestawiając i odpowiednio łącząc trzy transformatory jednofazowe (co stosuje się rzadko) lub konstruując transformatory trójfazowe. Budowę transformatorów trójfazowych (rdzenia i uzwojeń) omówiono w punkcie 4.4.1.

Przy analizowaniu pracy transformatorów trójfazowych należy uwzględniać następujące fakty:

- W stanie ustalonym transformator trójfazowy symetryczny, zasilany symetrycznym układem napięć i obciążony odbiornikiem trójfazowym symetrycznym, charakteryzuje się jednakowymi przebiegami prądów i napięć we wszystkich fazach, przesuniętych względem siebie o kąt $2\pi/3$. Z tego względu w stanie ustalonym, w warunkach pełnej symetrii, **dla transformatora trójfazowego stosuje się schemat zastępczy transformatora jednofazowego**, przy czym wielkości w nim występujące są wielkościami fazowymi transformatora.
- **Moc znamionowa transformatora trójfazowego** wynosi niezależnie od układu połączeń:

$$S_N = 3U_{Nf}I_{Nf} = \sqrt{3}U_N I_N \tag{4.74}$$

- Jako **napięcie znamionowe** transformatora trójfazowego podaje się **napięcie międzyfazowe**.
- Wszystkie **moce czynne**, **bierne i pozorne oraz straty mocy** obliczane dla pracy symetrycznej transformatora ze schematu zastępczego odnoszą się do jednej fazy i dla całego transformatora **muszą być pomnożone przez liczbę faz**, np. gdy $m = 3$:

$$P_2 = 3U_{2f}I_{2f}\cos\varphi_2 \tag{4.75}$$

4.6.2. Układy i grupy połączeń transformatorów trójfazowych

Stosowane są trzy układy połączeń transformatorów trójfazowych: w **gwiazdę**, w **trójkąt** i w **zygzak**. Każdy układ połączeń ma swój symbol graficzny i literowy (**tabl. 4.2**), a oznaczenia końcówek uzwojeń są znormalizowane. I tak:

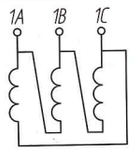
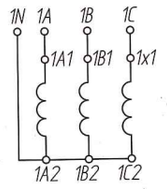
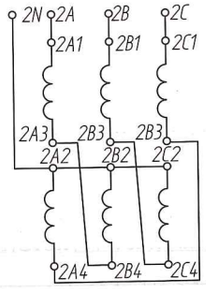
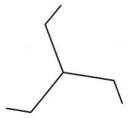
- końce uzwojeń transformatora oznacza się literami *A*, *B*, *C*, a wyprowadzony przewód neutralny literą *N*;
- strony transformatora (górną, średnią i dolną) oznacza się cyframi umieszczonymi przed literą oznaczającą fazę np., *1A*, *2A*, *3A* przy czym cyfra *1* odpowiada stronie górnego, cyfra *2* — średniego, a cyfra *3* — dolnego napięcia.

Końcówki uzwojeń oznacza się cyframi umieszczonymi za literą. Cyfra *1* oznacza początek, a cyfra *2* — koniec uzwojenia. W przypadku gdy jedno uzwojenie transformatora jest podzielone na części, to końce poszczególnych części uzwojenia oznacza się kolejnymi cyframi *3*, *4* itd.

Zasadę oznaczania końców uzwojeń transformatora trójfazowego przedstawiają rysunki w tablicy 4.2.

Tablica 4.2

Układy połączeń uzwojeń transformatorów trójfazowych

Układ połączeń	Schemat połączeń	Symbol graficzny	Oznaczenie literowe	
			uzwojenie górne	uzwojenie dolne
Trójkąt			D	d
Gwiazda			Y	y
Zygzak			—	z

Układ połączeń w gwiazdę może być zrealizowany przez połączenie we wspólnym punkcie neutralnym wszystkich trzech końców uzwojeń lub wszystkich początków. Początki lub końce są wyprowadzone do tabliczki zaciskowej. Początkami uzwojeń usytuowanych na jednej kolumnie transformatora nazywa się umownie zaciski, które dla pewnej wybranej chwili mają wyższy potencjał od drugich zacisków w parach przynależnych do danego uzwojenia. Punkt neutralny może być wyprowadzony lub nie. Jak wiadomo z podstaw elektrotechniki, dla takiego układu napięcia międzyfazowe są $\sqrt{3}$ razy większe od napięć fazowych, a prądy przewodowe są równe prądom fazowym:

$$U = \sqrt{3}\,U_f, \quad I = I_f \tag{4.76}$$

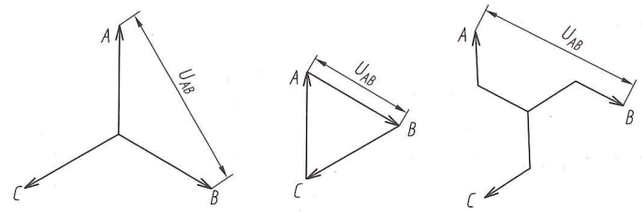
Układ połączeń w trójkąt powstaje przez połączenie końca pierwszej fazy z początkiem drugiej, końca drugiej z początkiem trzeciej, a końca trzeciej z początkiem pierwszej, lub też przez połączenie końca pierwszej fazy z początkiem trzeciej, końca trzeciej z początkiem drugiej, a końca drugiej z początkiem pierwszej. W układzie połączeń w trójkąt napięcia fazowe są równe międzyfazowym, a prądy fazowe są $\sqrt{3}$ razy mniejsze od prądów przewodowych:

$$U = U_f, \quad I = \sqrt{3}\,I_f \tag{4.77}$$

Układ połączeń w zygzak jest układem specjalnym (stosowanym przy obciążeniach niesymetrycznych) umożliwiającym rozłożenie na dwie kolumny przepływu wywołanego prądem jednej fazy. Z tego względu połączenie w zygzak tworzy się, łącząc szeregowo dwie połówki uzwojenia umieszczone na dwóch kolumnach w sposób cykliczny (przy czym obie połówki uzwojenia muszą być połączone przeciwnie). Wolne końce jednych połówek łączy się w gwiazdę, natomiast wolne końce drugich połówek wyprowadza na tabliczkę zaciskową.

$$U_f = \frac{\sqrt{3}}{2}\,U, \quad I_f = I \tag{4.78}$$

gdzie U — napięcie fazowe przy połączeniu w gwiazdę.



Rys. 4.43. Rysunek pomocniczy do ustalenia wartości napięć międzyfazowych w transformatorach przy różnych układach połączeń

Wartości napięć międzyfazowych dla tego samego transformatora przy różnych układach połączeń przedstawiono na **rysunku 4.43**. Wykorzystując proste zależności trygonometryczne dla trójkąta prostokątnego (o kątach 30°, 60°, 90°),

można wykazać, że jeżeli przyjmie się napięcie międzyfazowe przy połączeniu w gwiazdę za jednostkowe $U = 1$, to przy połączeniu w trójkąt $U = \frac{1}{\sqrt{3}}$, a przy połączeniu w zygzak $U = \frac{\sqrt{3}}{2}$. Wynika z tego, że w celu uzyskania takiego samego napięcia międzyfazowego należy w zależności od połączenia nawinąć odpowiednio: dla gwiazdy — N zwojów, dla trójkąta $N\sqrt{3} \approx 1{,}73N$ zwojów, a przy zygzaku $\frac{2N}{\sqrt{3}} \approx 1{,}15N$ zwojów.

Przekładnia zwojowa i napięciowa

Przekładnią napięciową transformatora trójfazowego jest stosunek wartości skutecznych znamionowych napięć międzyfazowych strony wyższego i niższego napięcia. Jest to często wartość inna niż wartość przekładni zwojowej określającej stosunek liczby zwojów. W zależności od różnych sposobów łączenia uzwojeń przekładnię napięciową n_u wyraża się za pomocą przekładni zwojowej w następujący sposób:

Yy: $$n_u = \frac{U_{gN}}{U_{dN}} = \frac{\sqrt{3}U_{gNf}}{\sqrt{3}U_{dNf}} \approx \frac{N_g}{N_d} \quad (4.79)$$

Dd: $$n_u = \frac{U_{gN}}{U_{dN}} = \frac{U_{gNf}}{U_{dNf}} \approx \frac{N_g}{N_d} \quad (4.80)$$

Dy: $$n_u = \frac{U_{gN}}{U_{dN}} = \frac{U_{gNf}}{\sqrt{3}U_{dNf}} \approx \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{N_g}{N_d} \quad (4.81)$$

Yd: $$n_u = \frac{U_{gN}}{U_{dN}} = \frac{\sqrt{3}U_{gNf}}{U_{dNf}} \approx \sqrt{3} \frac{N_g}{N_d} \quad (4.82)$$

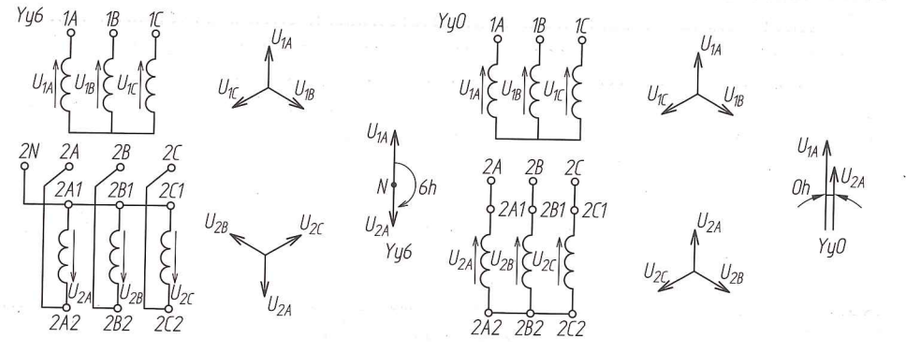
Yz: $$n_u = \frac{U_{gN}}{U_{dN}} = \frac{\sqrt{3}U_{gNf}}{\frac{3}{2}U_{dNf}} \approx \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{N_g}{N_d} \quad (4.83)$$

Dz: $$n_u = \frac{U_{gN}}{U_{dN}} = \frac{U_{gNf}}{\frac{3}{2}U_{dNf}} \approx \frac{2}{3} \frac{N_g}{N_d} \quad (4.84)$$

Zestawiając różne układy połączeń uzwojeń po obu stronach transformatora, otrzymuje się różne grupy połączeń transformatorów trójfazowych. Ma to wpływ na charakter magnesowania rdzenia transformatora trójfazowego. **W zależności od sposobu połączenia obu uzwojeń transformatora można uzyskać różne przesunięcia fazowe między napięciami po stronie wysokiego**

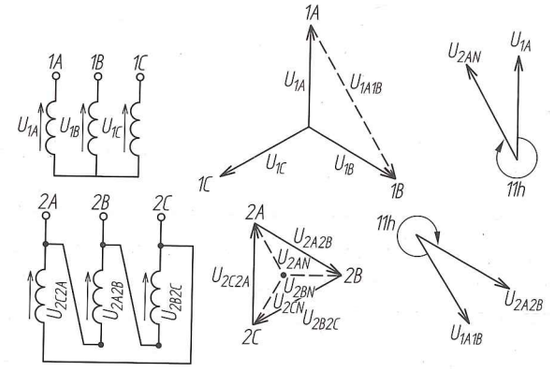
i niskiego napięcia. Dla układów: gwiazda, trójkąt i zygzak kąty przesunięcia fazowego są zawsze wielokrotnością kąta 30°, dlatego wygodnie jest podawać je jako **tzw. przesunięcie godzinowe.** Kątowi 30° odpowiada 1 godzina (przesunięcie wskazówki godzinowej zegara o 30° jest równoważne jednej godzinie), kątowi 180° odpowiada 6 godzin itd. Kąt ten jest mierzony od napięcia górnego do dolnego w kierunku zgodnym z następstwem faz, czyli określa, o ile napięcie dolne opóźnia się w fazie względem napięcia górnego.

Dla każdego transformatora trójfazowego podaje się grupę połączeń, która zawiera symbole połączeń strony napięcia oraz kąt przesunięcia fazowego między odpowiadającymi sobie napięciami międzyfazowymi, np. Yy6. Grupę połączeń określa się graficznie, przyjmując jedną z faz uzwojenia górnego napięcia za odniesienie. Na **rysunku 4.44** pokazano wpływ sposobu łączenia uzwojeń połączonych w gwiazdę na kąt przesunięcia.



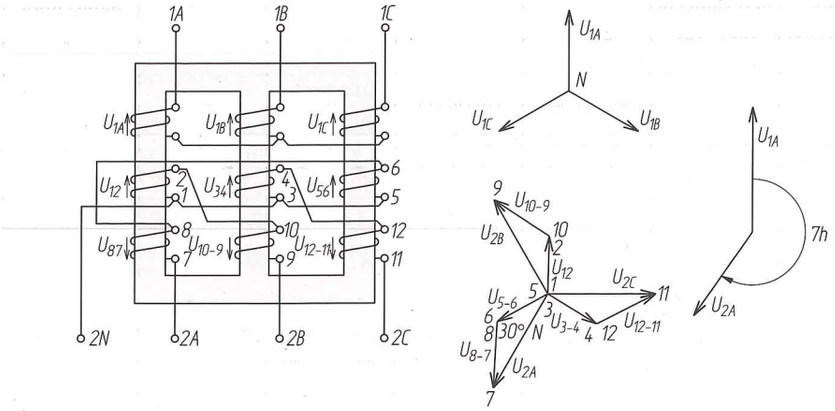
Rys. 4.44. Wpływ sposobu łączenia uzwojeń połączonych w gwiazdę na kąt przesunięcia

Przy układzie połączeń w gwiazdę są możliwe tylko dwie grupy: grupa Yy0 oraz Yy6, niezależnie od tego, czy zmiana zacisków jednego z uzwojeń nastąpiła po stronie górnego, czy dolnego napięcia. Znacznie więcej grup połączeń może powstać dla transformatora, w którym jedno z uzwojeń połączono w gwiazdę, natomiast drugie w trójkąt. Na **rysunku 4.45** pokazano sposób określenia grupy połączeń dla transformatora o układzie gwiazda-trójkąt Yd11. Równie dużo grup połączeń



Rys. 4.45. Graficzny sposób określenia grupy połączeń uzwojeń transformatora o układzie Yd11

można uzyskać przy łączeniu jednego z uzwojeń transformatora w gwiazdę, a drugiego w zygzak. Na **rysunku 4.46** przedstawiono graficzny sposób określenia grupy połączeń uzwojeń transformatora o układzie Yz7.



Rys. 4.46. Graficzny sposób określenia grupy połączeń uzwojeń transformatora o układzie Yz7

Ze względu na pracę równoległą transformatorów (podrozdz. 4.6.5), w praktyce jest konieczne ograniczenie różnorodności grup połączeń. Polska norma zaleca stosowanie tylko grup połączeń: Yy0, Dy5, Yd5, Yz5, Dy11, Yd11 oraz Yz11 (**tabl. 4.3**).

Przy doborze określonej grupy połączeń trzeba ocenić właściwości transformatora i występujące w nim zjawiska, biorąc pod uwagę przede wszystkim:

- koszt budowy transformatora o różnych układach połączeń uzwojeń,
- przebieg prądu magnesującego dla nasyconego obwodu magnetycznego (wpływ trzeciej harmonicznej na pracę transformatora trójfazowego),
- niesymetrię obciążenia,
- dostępność punktów zerowych.

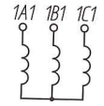
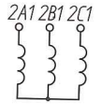
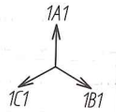
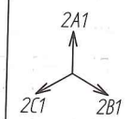
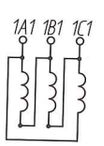
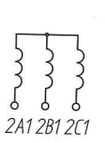
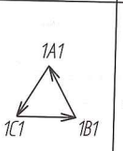
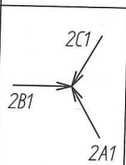
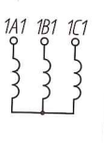
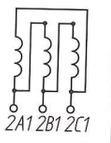
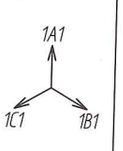
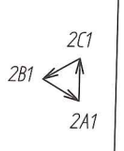
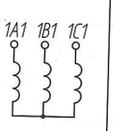
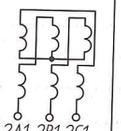
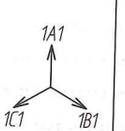
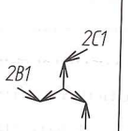
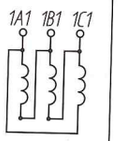
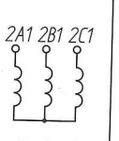
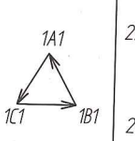
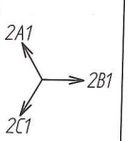
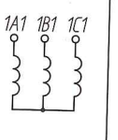
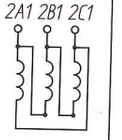
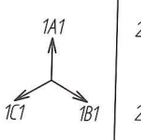
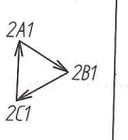
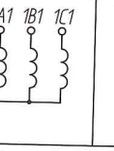
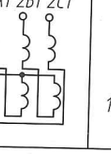
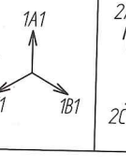
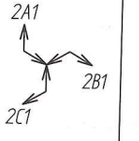
Zakładając, że wymiary rdzenia analizowanego transformatora nie ulegają zmianie oraz nasycenie rdzenia również jest jednakowe, to przy określonym strumieniu napięcie na jeden zwój będzie takie samo, niezależnie od układu połączeń.

Przy równych prądach przewodowych prądy fazowe układu połączeń w trójkąt są $\sqrt{3}$ razy mniejsze niż układu połączeń w gwiazdę lub w zygzak. Napięcie fazowe gwiazdy jest $\sqrt{3}$ razy mniejsze niż trójkąta, czyli liczba zwojów na fazę gwiazdy jest $\sqrt{3}$ razy mniejsza niż trójkąta, ale przy założeniu takiej samej gęstości prądu, przekroje przewodów są dla gwiazdy $\sqrt{3}$ razy większe. A zatem masa miedzi dla układu połączeń w gwiazdę i w trójkąt jest praktycznie taka sama, czyli koszty wykonania będą zbliżone. Jednak ze względu na izolację i sposób ułożenia uzwojeń układ połączeń w trójkąt jest nieco droższy niż w gwiazdę.

Porównując połączenie w gwiazdę z zygzakiem, dochodzi się do wniosku, że przy takich samych prądach znamionowych przekroje przewodów są takie same,

Tablica 4.3

Zalecane grupy połączeń transformatorów trójfazowych według PN-EN 60076-1:2001 [11]

Symbol grupy łączeniowej	Kąt przesunięcia fazowego	Układ połączeń uzwojeń		Wykresy wskazowe napięć		Przekładnia napięciowa n_u
		górne	dolne	górne	dolne	
Yy0	0					n_z
Dy5	$\frac{5}{6}\pi$					$\frac{1}{\sqrt{3}} n_z$
Yd5						$\sqrt{3}\, n_z$
Yz5						$\frac{2}{\sqrt{3}} n_z$
Dy11	$\frac{11}{6}\pi$					$\frac{1}{\sqrt{3}} n_z$
Yd11						$\sqrt{3}\, n_z$
Yz11						$\frac{2}{\sqrt{3}} n_z$

a stosunek liczby zwojów na jednej kolumnie zygzaka i gwiazdy jest taki sam, jak stosunek sumy napięć obu połówek zygzaka do napięcia fazowego gwiazdy:

$$\frac{N_z}{N_g} = \frac{2U}{U_f} = \frac{2\dfrac{U_f}{\sqrt{3}}}{U_f} = \frac{2}{\sqrt{3}} \approx 1{,}15$$

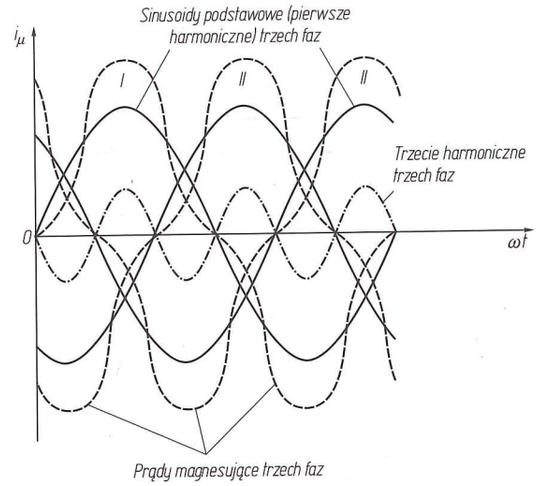
Liczba zwojów połączenia w zygzak jest więc przy takim samym napięciu międzyfazowym $2/\sqrt{3}$ razy większa od liczby zwojów połączenia w gwiazdę (czyli o ponad 15%), a zatem koszt miedzi dla połączenia w zygzak jest o ponad 15% wyższy niż dla gwiazdy.

W przypadku transformatorów niskich i średnich napięć koszt uzwojeń połączonych w gwiazdę i w trójkąt jest taki sam, natomiast w przypadku połączenia w zygzak znacznie większy. Przy wysokich napięciach koszt uzwojeń dla gwiazdy jest nieco mniejszy niż dla trójkąta.

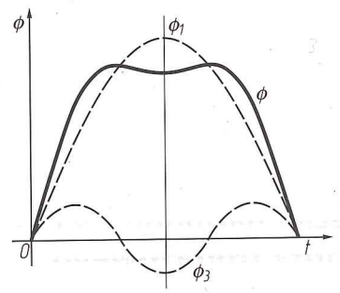
Koszty budowy transformatora trójfazowego w różnych układach połączeń uzwojeń można oszacować, porównując wartości napięć międzyfazowych dla tego samego transformatora, przy zastosowaniu różnych układów połączeń. Jak już wykazano układem najtańszym jest gwiazda, natomiast aby uzyskać takie samo napięcie międzyfazowe przy połączeniu w zygzak, trzeba nawinąć 1,15 razy więcej zwojów, a przy połączeniu w trójkąt — 1,73 razy więcej. Najdroższym układem w tym przypadku jest więc połączenie w trójkąt. Porównując natomiast wartości prądów, można stwierdzić, że najtańsze jest połączenie w trójkąt.

4.6.3. Wpływ trzeciej harmonicznej na pracę transformatora trójfazowego

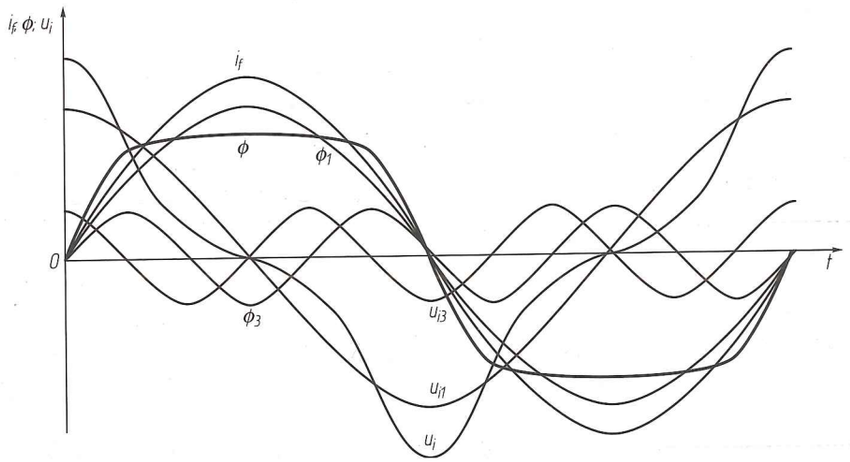
Z rozważań w punkcie 4.5.1 (prąd magnesujący transformatora) wynika, że przy zasilaniu transformatora jednofazowego napięciem sinusoidalnym, w przypadku wyjścia poza prostoliniową część charakterystyki magnesowania, pojawiają się odkształcenia prądu magnesującego od przebiegu sinusoidalnego. Prąd ten zawiera wyższe harmoniczne (rys. 4.30), z których trzecia harmoniczna ma szczególne znaczenie, gdyż oprócz tego, że jej amplituda jest największa, to trzecie harmoniczne wszystkich trzech faz są ze sobą w fazie (**rys. 4.47**). Jak wykazano uprzednio, wskutek nieliniowości krzywej magnesowania prąd magnesujący i strumień magnetyczny nie mogą być jednocześnie sinusoidalne (ponieważ nie są wzajemnie proporcjonalne w całym zakresie charakterystyki magnesowania). Zatem, jeżeli strumień magnetyczny jest sinusoidalny (przy wymuszeniu napięciowym sinusoidalnym), to prąd magnesujący zawiera wyższe harmoniczne, w tym harmoniczną trzecią. Można łatwo wykazać, że jeżeli prąd jest sinusoidalny (wymuszenie prądowe sinusoidalne), to strumień magnetyczny jest odkształcony, zawiera wyższe harmoniczne, w tym harmoniczną trzecią (**rys. 4.48**). Odkształceniu strumienia zawsze towarzyszy odkształcenie napięcia (**rys. 4.49**), ponieważ każda harmoniczna strumienia indukuje odpowiednią harmoniczną napięcia.



Rys. 4.47. Przebieg odkształconych prądów magnesujących oraz pierwszych i trzecich harmonicznych trzech faz

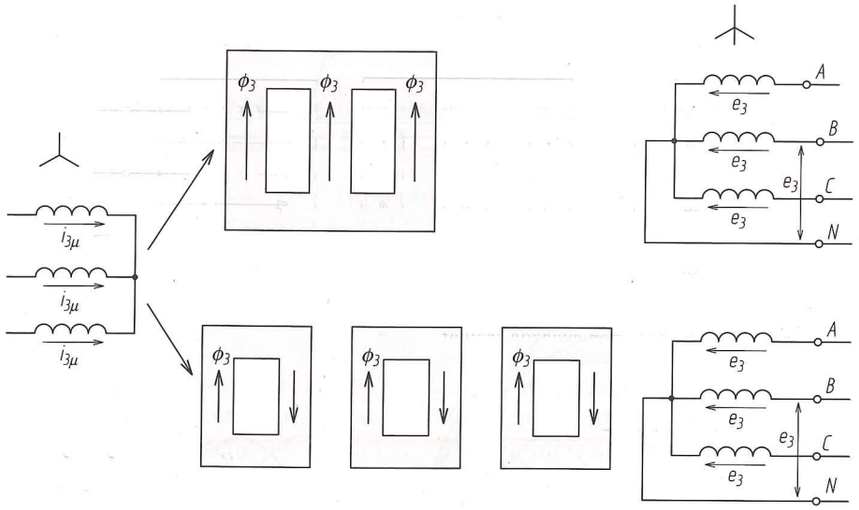


Rys. 4.48. Wyższe harmoniczne strumienia odkształconego



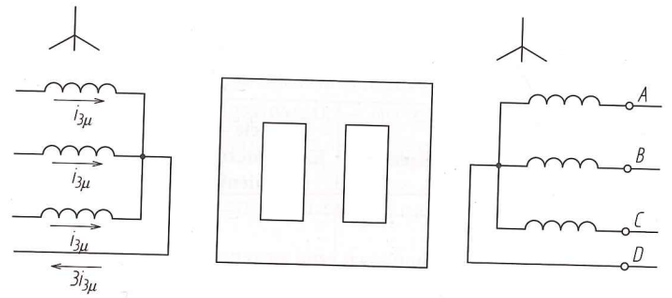
Rys. 4.49. Napięcie indukowane przez odkształcony strumień

Przeanalizujemy wpływ trzeciej harmonicznej na pracę transformatora trójfazowego. W transformatorze o układzie połączeń gwiazda-gwiazda bez przewodu neutralnego trzecie harmoniczne nie mogą występować w prądzie magnesującym, gdyż będąc ze sobą w fazie nie mają drogi przepływu. Na **rysunku 4.50** zaznaczono strzałkami rozpływ prądów trzeciej harmonicznej $i_{3\mu}$ dla trzech faz. Jeśli natomiast jest przewód neutralny (**rys. 4.51**), to trzecie harmoniczne mają obwód zamknięty przez ten przewód i mogą występować w prądzie magnesującym. W transformatorze z rysunku 4.50 nie będzie trzeciej harmonicznej w prądzie magnesującym, dlatego pojawi się ona w strumieniu. Strumienie trzecich harmonicznych również są ze sobą w fazie. W transformatorze trójfazowym trójkolumnowym strumienie te zamykają się przez powietrze, olej oraz przez ścianki kadzi. Są więc tłumione ze względu na dużą reluktancję, jaką napotykają na swojej drodze. Ich wpływ na indukowaną sem (napięcie) transformatora jest mały. Natomiast w transformatorze złożonym z trzech transformatorów jednofazowych, w których trzecie harmoniczne strumieni mogą się swobodnie zamknąć przez rdzenie, wartości tych strumieni są duże. Indukuje się trzecia harmoniczna sem e_3, wskutek czego odkształcenie sem i napięcia jest znaczne, nie tylko ze względu na jej amplitudę, lecz także ze względu na potrójną częstotliwość trzeciej harmonicznej (wartość sem zależy również od częstotliwości). Jeżeli w wyniku tego odkształcenie strumienia wyniesie np. 20%, to odkształcenie napięcia wyniesie 60%. Odkształcenia te wystąpią tylko w napięciach fazowych.



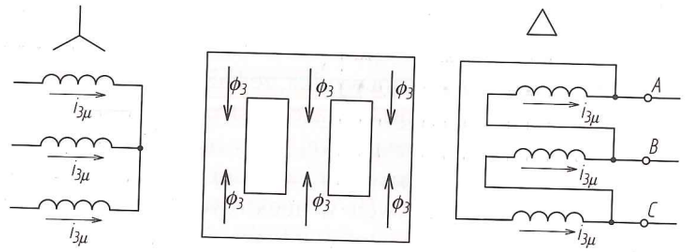
Rys. 4.50. Występowanie trzecich harmonicznych prądów magnesujących, strumieni i sem w transformatorze o układzie połączeń gwiazda-gwiazda z przewodem neutralnym

W sytuacji, gdy przewód neutralny jest po stronie pierwotnej (rys. 4.51), trzecie harmoniczne prądów trzech faz zamkną się przez ten przewód. Wobec tego strumień się nie odkształci, nie będzie w nim trzeciej harmonicznej i napięcie nie będzie odkształcone.



Rys. 4.51. Występowanie trzecich harmonicznych prądów magnesujących, strumieni i sem w transformatorze o układzie połączeń gwiazda z przewodem neutralnym-gwiazda z przewodem neutralnym

W przypadku gdy uzwojenia transformatora są połączone w układ gwiazda-trójkąt bez przewodu neutralnego po stronie pierwotnej, jak wykazano już wyżej w prądzie nie będzie trzeciej harmonicznej. Wobec tego trzecia harmoniczna wystąpi w strumieniu. Trzecie harmoniczne strumieni wywołają trzecie harmoniczne sem e_3, które w zamkniętym obwodzie trójkąta wywołają trzecie harmoniczne prądów i_3, będące ze sobą w fazie. Prądy te wytworzą znowu trzecie harmoniczne strumienia Φ_3 skierowane przeciwnie do strumieni „szkodliwych" i zniosą je prawie całkowicie (**rys. 4.52**). W związku z tym napięcie nie będzie odkształcone.



Rys. 4.52. Występowanie trzecich harmonicznych prądów magnesujących, strumieni i sem w transformatorze o układzie połączeń gwiazda-trójkąt

Na podstawie powyższej analizy można określić wpływ trzeciej harmonicznej prądu magnesującego na odkształcenie napięcia wtórnego transformatorów (**tabl. 4.4**). Wnioski są następujące: ze względu na występowanie wyższych harmonicznych strumieni i napięć, przy nasyconym obwodzie magnetycznym, transformatory powinny mieć układy uzwojeń pozwalające na wytworzenie trzeciej harmonicznej prądu magnesującego. Najkorzystniejszy jest zatem układ połączeń w trójkąt, następnie w gwiazdę i zygzak z przewodem neutralnym, natomiast najbardziej niekorzystny jest układ połączeń w gwiazdę lub zygzak bez przewodu neutralnego.

Tablica 4.4

Wpływ trzeciej harmonicznej prądu magnesującego na odkształcenie napięcia wtórnego transformatorów

Układ połączeń strony pierwotnej	Trzecie harmoniczne prądu	Rdzeń	Trzecie harmoniczne strumieni	Układ połączeń strony wtórnej	Odkształcenie napięcia fazowego
Gwiazda bez przewodu neutralnego	nie występują	trójkolumnowy	nie występują	gwiazda z przewodem neutralnym	nieznaczne
		trzy rdzenie jednofazowe	duże	gwiazda z przewodem neutralnym	bardzo znaczne
Gwiazda z przewodem neutralnym	występują	trójkolumnowy	nie występują	gwiazda z przewodem neutralnym	nie występuje
Gwiazda bez przewodu neutralnego	nie występują	trójkolumnowy	nie występują	trójkąt	nie występuje

4.6.4. Obciążenie niesymetryczne transformatora trójfazowego

W praktyce w układach trójfazowych często zdarzają się przypadki niesymetrycznego obciążenia poszczególnych faz transformatora, szczególnie przy zasilaniu odbiorców komunalnych.

Z zasady działania transformatora wynika, że każdemu zwiększeniu obciążenia strony wtórnej odpowiada wzrost obciążenia strony pierwotnej. Jeżeli pominie się prąd jałowy, warunkiem prawidłowej pracy transformatora jest kompensowanie się przepływów strony pierwotnej i wtórnej: $\Theta_1 = \Theta_2$.

W transformatorach trójfazowych w niektórych przypadkach może nie nastąpić kompensacja przepływów strony wtórnej i pierwotnej, a praca z nieskompensowanym przepływem strony pierwotnej przez przepływ strony wtórnej jest szczególnie niekorzystna dla transformatora.

Aby uniknąć takich przypadków, należy przeanalizować warunki pracy transformatora w różnych układach sieciowych i dopiero wtedy dokonać wyboru układu połączeń.

Przy analizowaniu wpływu asymetrycznego obciążenia na pracę transformatora trójfazowego najłatwiej jest posłużyć się metodą składowych symetrycznych. Jednak metoda ta wykracza poza zakres materiału obowiązujący w szkole średniej, dlatego podane zostaną tylko końcowe wnioski wynikające z przeprowadzenia analizy. Są one następujące:

- Jeżeli strona pierwotna musi być połączona w gwiazdę, a po stronie wtórnej jest potrzebny przewód neutralny w celu uzyskania napięć fazowych i międzyfazowych oraz może wystąpić niesymetryczne obciążenie fazowe, to po stronie wtórnej korzystne jest połączenie uzwojeń transformatora w zygzak.

- Ogólnie można stwierdzić, że ze względu na niesymetryczne obciążenie najkorzystniejszy jest układ połączeń w zygzak lub w trójkąt, z tym jednak, że układ połączeń w trójkąt po stronie wtórnej nie daje możliwości otrzymania dwóch napięć: niskiego, fazowego — do zasilania np. oświetlenia i innych odbiorników jednofazowych, oraz wyższego, międzyfazowego — do zasilania silników elektrycznych.
- W przypadku niesymetrycznych obciążeń najbardziej niekorzystny jest układ Yy.

Właściwości wybranych układów połączeń transformatorów trójfazowych przedstawiono w **tablicy 4.5**.

Tablica 4.5

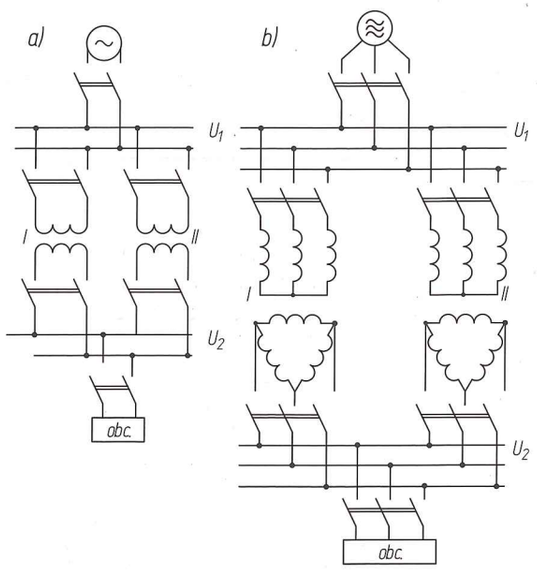
Właściwości różnych układów połączeń transformatorów trójfazowych

Układ połączeń	Zalety	Wady	Przekładnia
Yy gwiazda-gwiazda	Układ najtańszy. Po obydwu stronach napięcia międzyfazowe. Najmniejsza liczba zwojów w porównaniu z innymi układami. Możliwość stosowania przewodu neutralnego	Nie nadaje się do obciążeń niesymetrycznych. Nierównomierność obciążenia przenosi się ze strony wtórnej na pierwotną	$\frac{N_1}{N_2}$
Dy trójkąt-gwiazda	Nadaje się do obciążeń niesymetrycznych. Niewielkie zniekształcenie napięcia. Możliwość pracy przy przerwie w jednej fazie po stronie pierwotnej (układ „V")	Układ kosztowny. Największa liczba zwojów w porównaniu z innymi układami pozwalającymi uzyskać takie same napięcie	$\frac{N_1}{N_2\sqrt{3}}$
Yz gwiazda-zygzak	Układ typowy dla obciążeń niesymetrycznych (np. w sieciach oświetleniowych). Napięcie międzyfazowe po obu stronach. Możliwość stosowania przewodu neutralnego	Układ droższy niż Yy, ale tańszy niż Dy. W celu uzyskania takiego samego napięcia co przy gwieździe należy zwiększyć liczbę zwojów o ok. 15%	$\frac{2N_1}{N_2\sqrt{3}}$

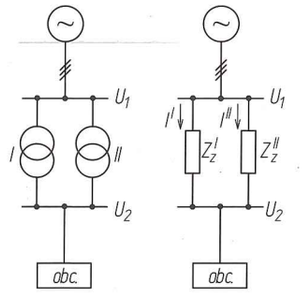
4.6.5. Praca równoległa transformatorów

Pracą równoległą transformatorów nazywa się taką pracę, przy której strony pierwotne dwu lub kilku transformatorów są zasilane ze wspólnych szyn, a strony wtórne tych transformatorów zasilają odbiory również przez wspólne szyny (**rys. 4.53, 4.54**).

Praca równoległa transformatorów jest uzasadniona tym, że moc znamionowa każdego transformatora jest mniejsza niż moc znamionowa stacji transformatorowej, a tym samym mniejsza jest moc i koszt transformatora rezerwowego. Ponadto przy pracy równoległej jest możliwa bardziej elastyczna eksploatacja



Rys. 4.53. Praca równoległa transformatorów: a) jednofazowych; b) trójfazowych



Rys. 4.54. Uproszczony schemat pracy równoległej transformatorów

stacji, gdyż moc pracujących transformatorów można dopasować do obciążenia. Dzięki temu unika się pracy dużych jednostek przy małym obciążeniu, co jest nieekonomiczne (stałe straty w rdzeniu) i pogarsza współczynnik mocy ze względu na pobór prądu magnesującego (o charakterze indukcyjnym).

Praca równoległa transformatorów jest poprawna, jeżeli są spełnione następujące warunki:

1. W obwodach wtórnych transformatorów w stanie jałowym nie płyną żadne prądy.
2. Transformatory obciążają się proporcjonalnie do swoich mocy znamionowych.
3. Odpowiednie prądy poszczególnych transformatorów są ze sobą w fazie, czyli prąd płynący w linii jest sumą arytmetyczną prądów poszczególnych transformatorów.

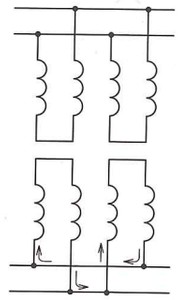
Aby spełnienie powyższych warunków było możliwe, transformatory przeznaczone do pracy równoległej muszą spełniać odpowiednie wymagania.

a) **Warunek pierwszy** będzie spełniony przede wszystkim wówczas, gdy transformatory będą prawidłowo połączone, czyli odpowiednie fazy będą przyłączone do tych samych szyn. W przypadku, gdyby transformatory były połączone wadliwie (**rys. 4.55**), w obwodzie utworzonym przez uzwojenia wtórne transformatorów popłynąłby duży prąd zwarcia. Prawidłowość połączenia można sprawdzić np. za pomocą żarówek (**rys. 4.56**). Jeżeli żarówki się nie świecą, to połączenie jest prawidłowe. Do spełnienia pierwszego warunku konieczne jest

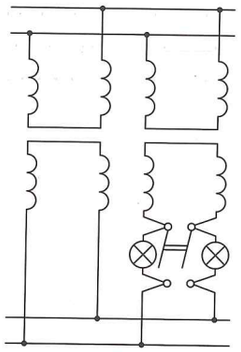
b) ponadto, aby przekładnie transformatorów były jednakowe (norma dopuszcza błąd rzędu 0,5%), gdyż nawet przy bardzo małych różnicach przekładni płynie

stosunkowo duży prąd wyrównawczy. Prąd ten powoduje dodatkowe straty, a jednocześnie utrudnia prawidłowy podział obciążenia, gdyż prąd wyrównawczy dodaje się do prądu obciążenia jednego transformatora, a odejmuje od prądu obciążenia drugiego transformatora.

c) Przy pracy równoległej transformatorów trójfazowych musi być ponadto spełniony warunek zgodności grup połączeń transformatorów (o takim samym przesunięciu godzinowym).



Rys. 4.55. Wadliwe połączenie transformatorów do pracy równoległej. Strzałki wskazują kierunek przepływu prądu w obwodzie zwartym



Rys. 4.56. Kontrola właściwego połączenia transformatorów do pracy równoległej za pomocą żarówek

Drugi warunek dotyczy równomiernego rozkładu obciążenia, proporcjonalnego do mocy znamionowych współpracujących ze sobą transformatorów. Oznacza to, że jeżeli oba transformatory mają jednakową moc, to obciążenia powinny rozłożyć się po połowie na każdy transformator. Gdyby obciążenie nie rozkładało się proporcjonalnie do mocy, to mniejszy transformator mógłby pracować jako przeciążony lub większy jako niedociążony, przy znamionowym obciążeniu drugiego transformatora.

Wiadomo, że od napięcia zwarcia transformatora zależy wartość impedancji zwarcia, czyli

$$Z_z = \frac{U_z}{I_N} \tag{4.85}$$

Przy pracy równoległej transformatorów napięcia pierwotne i wtórne obu transformatorów są jednakowe, dlatego musi być spełniona równość:

$$Z_{zI} I_I = Z_{zII} I_{II} \tag{4.86}$$

Przekształcając zależność (4.86), można stwierdzić, że tylko przy jednakowych napięciach zwarcia obu transformatorów obciążają się one proporcjonalnie do swoich mocy znamionowych i zachodzą wówczas następujące zależności:

$$\frac{I_{\%I}}{I_{\%II}} = \frac{u_{z\%II}}{u_{z\%I}} \tag{4.87}$$

$$\frac{I_{\mathrm{I}}}{I_{\mathrm{II}}} = \frac{I_{N\mathrm{I}}}{I_{N\mathrm{II}}} \tag{4.88}$$

oraz

$$S_{\mathrm{II}} = S_{N\mathrm{II}} \frac{u_{z\%\mathrm{I}}}{u_{z\%\mathrm{II}}} \tag{4.89}$$

Należy jeszcze sprawdzić, kiedy może być spełniony **trzeci warunek**, tzn. kiedy prądy poszczególnych transformatorów będą ze sobą w fazie (wówczas prąd w linii jest sumą arytmetyczną prądów poszczególnych transformatorów). W tym celu należy przeanalizować wykresy wektorowe obu transformatorów. W wyniku tej analizy można sformułować wniosek, że aby prądy obu współpracujących transformatorów były ze sobą w fazie, to czynne straty napięcia powinny być równe. W praktyce jest to bardzo trudne do osiągnięcia, zwłaszcza przy dużych różnicach mocy znamionowej współpracujących transformatorów. Z tego względu wprowadza się ograniczenie różnicy mocy transformatorów pracujących równolegle. Stosunek mocy transformatorów nie powinien być większy niż 1:3, a najlepiej, aby moce transformatorów pracujących równolegle były równe.

W wyniku powyższych rozważań można sformułować następujące warunki, jakie muszą spełniać transformatory dopuszczone do pracy równoległej:

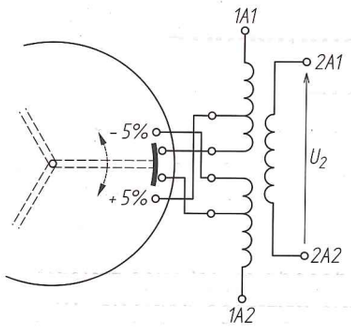
1. Równość przekładni transformatorów z dokładnością do 0,5% (przy jednakowych napięciach znamionowych).
2. Przynależność transformatorów do tych samych grup połączeń o tym samym przesunięciu godzinowym.
3. Równość napięć zwarcia z dokładnością do 10%.
4. Stosunek mocy znamionowych nie większy niż 1 : 3.

4.6.6. Regulacja napięcia w transformatorze

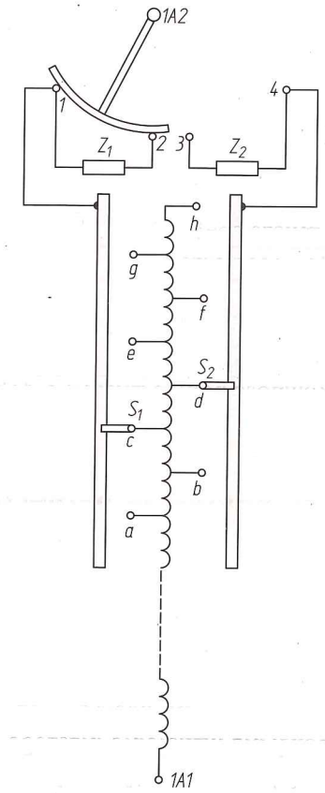
Przy zmianach wartości i charakteru prądu obciążenia transformatora zmienia się wartość napięcia na jego zaciskach wtórnych (p. 4.5.2). Istnieje wówczas potrzeba regulacji napięcia w transformatorze po to, aby napięcie w sieci zasilanej przez ten transformator miało wartość stałą. **Regulację napięcia osiąga się przez zmianę przekładni zwojowej (zmianę liczby zwojów)**. Uzwojenie wyższego napięcia ma większą liczbę zwojów, a jednocześnie mniejszy prąd znamionowy niż uzwojenie niższego napięcia — dogodniej jest więc zmienić przekładnię przez zmianę liczby zwojów uzwojenia wyższego napięcia. Wiąże się z tym jedynie taka niedogodność, że urządzenia regulacyjne muszą być izolowane na odpowiednio wyższe napięcie. Mimo to urządzenia regulacyjne instaluje się zazwyczaj po stronie wyższego napięcia. Rozróżnia się dwa rodzaje regulacji napięcia w transformatorze:

- regulację w stanie beznapięciowym,
- regulację pod obciążeniem.

Regulacja napięcia w stanie beznapięciowym to regulacja dokonywana na transformatorze odłączonym od sieci. Zakres regulacji tego typu wynosi najczęściej ±5%. Zaczepy regulacyjne są zwykle wyprowadzone w połowie każdej fazy (**rys. 4.57**) i są zwierane zwieraczem. W transformatorach olejowych (p. 4.4.1) zwieracz jest umieszczony wewnątrz kadzi i zanurzony w oleju. Jest on napędzany drążkiem izolacyjnym, którego wałek znajduje się ponad pokrywą transformatora. Ślizgacze zwierające odpowiednie zaczepy mogą być przemieszczane tylko w stanie beznapięciowym, gdyż regulowanie napięcia pod obciążeniem mogłoby powodować rozwieranie obwodu i przerwy w dostawie napięcia po stronie wtórnej albo zwieranie części uzwojenia, co wywołałoby przepływ prądu zwarcia w tej części uzwojenia. W transformatorach pracujących w liniach przesyłowych, w których nie wolno nawet na chwilę przerwać dopływu energii, instaluje się urządzenia do regulacji napięcia pod obciążeniem.



Rys. 4.57. Zasada regulacji napięcia transformatora w stanie beznapięciowym



Rys. 4.58. Zasada regulacji napięcia transformatora pod obciążeniem

Regulacja napięcia pod obciążeniem polega na tym, że zmiany przekładni dokonuje się przy transformatorze obciążonym. Zakres regulacji napięcia pod obciążeniem wynosi ok. ± 20%. Istnieje wiele rozwiązań regulatorów pozwalają-

cych spełnić to zadanie. Każde z tych rozwiązań polega na tym, że na czas przełączania w obwód zwojów regulacyjnych, zwieranych w czasie przełączania, dołącza się impedancję. W układzie przedstawionym na **rysunku 4.58** zwojami czynnymi w fazie *A* między zaciskami *1A1* i *1A2* są zwoje zawarte między wyprowadzeniami *1A1* i *c*. W celu zwiększenia liczby zwojów czynnych ślizgacz obrotowy należy przestawić z zacisków *1-2* na zaciski *3-4*. Po drodze jednak ślizgacz zewrze zaciski *2-3*, powodując zwarcie obwodu *c-1-2-3-4-d*. Zwarcie to nie jest groźne, gdyż zwoje pomiędzy wyprowadzeniami *c* i *d* nie są zwarte bezpośrednio, lecz przez impedancje Z_1 i Z_2. Następnie po przesunięciu ślizgacza w prawo, powoduje się włączenie w obwód czynny zwojów pomiędzy *1A1* i *d*. Liczba zwojów została zwiększona bez przerwy w obwodzie i bez spowodowania szkodliwego zwarcia. Dalsze podwyższenie napięcia wymaga przesunięcia ślizgacza S_1 z zaczepu *c* na zaczep *e*, a ślizgacza obrotowego z powrotem w lewo. Ze względu na konieczność dokładnej regulacji napięcia liczba stopni regulacyjnych wynosi zwykle kilkadziesiąt. Dokonywanie poszczególnych przełączeń odbywa się za pomocą napędu silnikowego lub kilku zdalnie sterowanych styczników — w celu zapewnienia bezpieczeństwa obsługi.

4.7. Straty i sprawność

Sprawnością nazywa się stosunek mocy czynnej wydawanej *P* do mocy czynnej pobieranej P_{in}:

$$\eta = \frac{P}{P_{in}} \quad \text{lub} \quad \eta = \frac{P}{P_{in}}\,100\%\ [\%] \tag{4.90}$$

Uwzględniając całkowite straty mocy, sprawność można wyrazić jako:

$$\eta = \frac{P}{P + \Sigma\Delta P} \tag{4.91}$$

lub

$$\eta = \frac{P_{in} - \Sigma\Delta P}{P_{in}} \tag{4.92}$$

gdzie:

$$\Sigma\Delta P = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{Cu} \tag{4.93}$$

oznacza sumę strat przy obciążeniu (pominięto straty dielektryczne w izolacji).

Jak wykazano w punkcie 4.5.1 straty w stali ΔP_{Fe} są w przybliżeniu równe mocy czynnej pobranej przez transformator w stanie jałowym. Straty te zależą od indukcji magnetycznej, a zwykle przyjmuje się, że przy stałej wartości napięcia pierwotnego indukcja również pozostaje stała. Straty w stali zalicza się do strat niezależnych od obciążenia transformatora i nazywa się je **stratami stałymi**.

Straty w miedzi ΔP_{Cu} są związane z przepływem prądu w uzwojeniach transformatora. Zalicza się do nich nie tylko straty mocy występujące na rezystancji uzwojenia określonej z prawa Ohma, lecz również straty dodatkowe w uzwo-

jeniach i częściach metalowych wywołane przez strumienie rozproszenia, proporcjonalne do prądu obciążenia. Jak wykazano w punkcie 4.5.3 straty mocy w uzwojeniach ΔP_{Cu} są równe mocy pobranej przez zwarty transformator, przy napięciu pierwotnym równym napięciu zwarcia (prąd jest wówczas równy prądowi znamionowemu). Straty te są wywołane prądem znamionowym, dlatego oznaczone zostaną przez ΔP_{CuN}, przy czym:

$$\Delta P_{CuN} = mR_z I_N^2 \tag{4.94}$$

gdzie: *m* — liczba faz, R_z — rezystancja zwarcia

oraz

$$\Delta P_{CuN} = P_z$$

Jak widać, straty mocy w miedzi (w uzwojeniach) zależą od prądu obciążenia i dlatego są nazywane **stratami zmiennymi** lub **stratami obciążeniowymi**.

Straty mocy w uzwojeniach przy obciążeniu dowolnym prądem ΔP_{Cu} oblicza się według wzoru:

$$\Delta P_{Cu} = \Delta P_{CuN}\left(\frac{I}{I_N}\right)^2 = \Delta P_{CuN}\left(\frac{S}{S_N}\right)^2 \tag{4.95}$$

Wzór (4.95) został otrzymany po wykonaniu następujących przekształceń:

$$mR_z I_N^2 = \Delta P_{CuN}$$

$$mR_z I^2 = \Delta P_{Cu}$$

$$\frac{\Delta P_{Cu}}{\Delta P_{CuN}} = \frac{mR_z I^2}{mR_z I_N^2}$$

$$\Delta P_{Cu} = \Delta P_{CuN}\left(\frac{I}{I_N}\right)^2$$

Jeżeli we wzorze na sprawność uwzględnić wzór (4.95) oraz:

$$P = mU_2 I_2 \cos\varphi_2 \tag{4.96}$$

gdzie: U_2 — napięcie fazowe strony wtórnej, I_2 — prąd fazowy strony wtórnej,

to otrzyma się:

$$\eta = \frac{mU_2 I_2 \cos\varphi_2}{mU_2 I_2 \cos\varphi + \Delta P_{CuN}\left(\frac{I_2}{I_N}\right)^2 + \Delta P_{Fe}} \tag{4.97}$$

Dla transformatorów nie można określić sprawności znamionowej. Ze wzoru (4.97) wynika, że sprawność transformatora zmienia się m.in. przy zmianie współczynnika mocy obciążenia. Aby wyznaczyć obciążenie, przy którym sprawność transformatora jest maksymalna, należy rozwiązać równanie różniczkowe,

co wykracza poza przyjęty zakres materiału tego podręcznika. Podane zostaną więc tylko wnioski wynikające z rozwiązania tego równania.

Maksymalna sprawność transformatora występuje wówczas, gdy straty w uzwojeniach są równe stratom w rdzeniu, czyli gdy:

$$\Delta P_{Cu} = \Delta P_{Fe} \tag{4.98}$$

Wykorzystując zależność (4.95), można więc napisać:

$$\Delta P_{Cu} = \Delta P_{CuN}\left(\frac{I}{I_N}\right)^2 = \Delta P_{Fe}$$

zatem maksymalna sprawność wystąpi przy obciążeniu:

$$I_{2(\eta\,max)} = I_N\sqrt{\frac{\Delta P_{Fe}}{\Delta P_{CuN}}} \tag{4.99}$$

lub

$$S_{2(\eta\,max)} = S_N\sqrt{\frac{\Delta P_{Fe}}{\Delta P_{CuN}}} \tag{4.100}$$

Ze wzorów (4.99) i (4.100) wynika, że **jeżeli transformator ma pracować z maksymalną sprawnością przy obciążeniu mocą znamionową, to znamionowe straty w stanie zwarcia muszą być równe znamionowym stratom jałowym**.

Zagadnienie maksymalnej sprawności jest bardzo ważne. Transformatory pracują w różnych warunkach, przy pełnym obciążeniu lub niedociążone. **Należy tak dobierać transformatory, aby sprawność maksymalna występowała przy takim obciążeniu, które trwa najdłużej**.

Na ogół transformatory pracują przy obciążeniu mniejszą mocą od znamionowej, dlatego też **transformatory projektuje się tak, aby straty jałowe były mniejsze od strat obciążeniowych i wynosiły przeciętnie**:

$$\frac{\Delta P_{FeN}}{\Delta P_{CuN}} = 0{,}2 \div 0{,}7$$

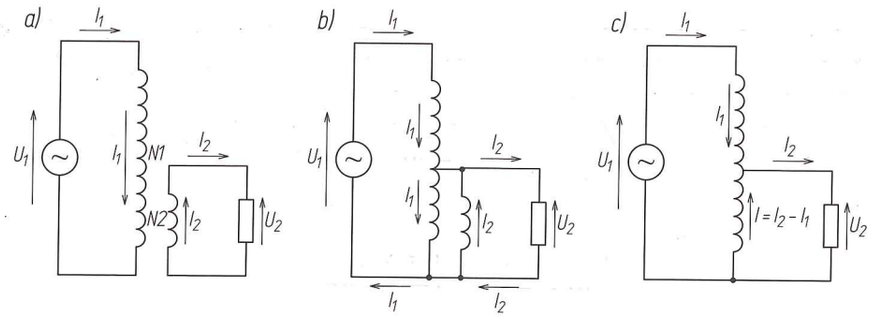
Sprawność małych transformatorów energetycznych o mocy kilku kVA wynosi ok. 95%, a transformatorów dużych o mocach kilkudziesięciu MVA dochodzi do 99%.

4.8. Transformatory specjalne

4.8.1. Autotransformator

Autotransformator jest odmianą konstrukcyjną transformatora — ma on tylko jedno uzwojenie (**rys. 4.59**).

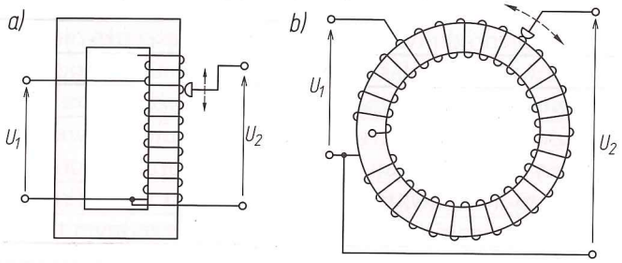
W autotransformatorze część uzwojenia jest wspólna zarówno dla pierwotnego, jak i wtórnego napięcia. Z rysunku 4.60 widać, że w autotransformatorze obie strony — zasilana i odbiornikowa — są połączone galwanicznie.



Rys. 4.59. Zamiana transformatora (a) na autotransformator (c)

Autotransformatory są wykonywane w taki sposób, że mogą mieć:

- stałą liczbę zwojów uzwojenia wtórnego,
- zmienną skokowo liczbę zwojów uzwojenia wtórnego (za pomocą odczepów),
- zmienną płynnie liczbę zwojów uzwojenia wtórnego (za pomocą suwaka — **rys. 4.60**).



Rys. 4.60. Autotransformatory regulacyjne jednofazowe: a) o liniowym ruchu suwaka; b) o obrotowym ruchu suwaka

W stanie jałowym zależność między napięciem U_2 i U_1 jest następująca:

$$U_{20} = U_{10}\frac{N_2}{N_1} \tag{4.101}$$

Dla autotransformatorów wprowadza się pojęcie **mocy przechodniej** — jest to moc pozorna przekazywana ze strony pierwotnej do strony wtórnej:

$$S_p = S_1 = U_1 I_2 \approx S_2 = U_2 I_2 \tag{4.102}$$

Mocą znamionową autotransformatora nazywa się moc przechodnią w znamionowych warunkach pracy (przy znamionowym prądzie i znamionowym napięciu).

Przekładnię autotransformatora określa się tak samo, jak transformatora jednofazowego:

$$\eta = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} \tag{4.103}$$

We wspólnej części uzwojenia autotransformatora płynie prąd I. Pomijając prąd jałowy, można przyjąć, że prądy I_1 i I_2 są ze sobą w fazie, a zatem wartość skuteczna prądu I jest różnicą wartości skutecznych prądów I_2 i I_1:

$$I = I_2 - I_1 = I_2 - \frac{I_2}{n} = I_2\left(1 - \frac{1}{n}\right) = I_2\,\frac{n-1}{n} \tag{4.104}$$

Iloczyn prądu we wspólnej części uzwojenia i napięcia na tej części uzwojenia nazywa się **mocą własną autotransformatora**:

$$S_w = U_2 I \tag{4.105}$$

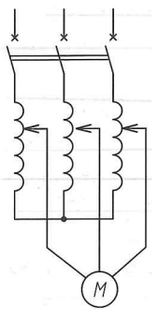
Jest to moc przenoszona ze strony pierwotnej do strony wtórnej za pośrednictwem pola magnetycznego.

Na podstawie zależności (4.104) i (4.102) można określić związek między mocą własną a mocą przechodnią autotransformatora:

$$S_w = U_2 I_2\,\frac{n-1}{n} = S_p\,\frac{n-1}{n} \tag{4.106}$$

Moc własna autotransformatora jest tym mniejsza, im przekładnia jest bliższa jedności. Wówczas prąd płynący we wspólnej części uzwojenia jest znacznie mniejszy od prądu I_2, a moc własna jest znacznie mniejsza od mocy przechodniej. W związku z tym, wspólna część uzwojenia może być wykonana ze znacznie cieńszego drutu niż w transformatorze dwuuzwojeniowym o mocy znamionowej równej mocy przechodniej autotransformatora. Autotransformator jest też znacznie mniejszy i lżejszy, ma mniejsze straty i wyższą sprawność (z tego względu niekiedy autotransformator nazywa się oszczędnym transformatorem) — są to niewątpliwie jego zalety. Do wad należy zaliczyć, że **wszelkiego rodzaju zakłócenia powstałe po stronie wtórnej przenoszą się bezpośrednio (galwanicznie, a nie za pomocą sprzężeń magnetycznych) na stronę pierwotną i odwrotnie**. Stwarza to poważne niebezpieczeństwo dla odbiorców lub obsługi autotransformatora. Drugą istotną wadą jest bardzo duża wartość prądów w stanie zwarcia.

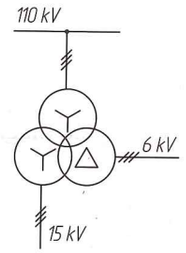
Stosuje się zarówno **autotransformatory jednofazowe**, jak i **trójfazowe**. Autotransformatory jednofazowe są używane w technice laboratoryjnej do regulacji napięcia w szerokim zakresie (rys. 4.61). Autotransformatory trójfazowe stosuje się niekiedy do rozruchu silników indukcyjnych (**rys. 4.61**) lub synchronicznych, do regulacji napięcia w liniach energetycznych, a także jako tzw. transformatory sprzęgające do połączenia sieci wysokich napięć o niewiele różniących się napięciach, np. 400/220 kV.



Rys. 4.61. Schemat połączenia autotransformatora trójfazowego do rozruchu silnika indukcyjnego

4.8.2. Transformator trójuzwojeniowy

Transformator trójuzwojeniowy ma po trzy uzwojenia na każdej kolumnie. Są to: **uzwojenie górnego napięcia** (GN), **średniego napięcia** (SN) i **dolnego napięcia** (DN). Umożliwia on zasilanie jednocześnie dwóch sieci odbiorczych. W schematach elektroenergetycznych transformator trójuzwojeniowy jest oznaczany symbolem pokazanym na **rysunku 4.62**. W zależności od potrzeb każde z uzwojeń może spełniać rolę uzwojenia pierwotnego lub wtórnego.



Rys. 4.62. Schemat transformatora trójuzwojeniowego o układzie Yyd i napięciach znamionowych 110/15/6 kV

Transformatory trójfazowe trójuzwojeniowe stosowane w energetyce mają zazwyczaj jedno uzwojenie połączone w trójkąt do stłumienia trzeciej harmonicznej strumienia. Moce znamionowe wszystkich stron są jednakowe lub moc jednego lub obu uzwojeń wtórnych wynosi 2/3 mocy uzwojenia pierwotnego (zasilanego). W takim przypadku **mocą znamionową transformatora trójuzwojeniowego** nazywa się największą z mocy pozornych jego uzwojeń.

Transformatory trójuzwojeniowe stosuje się w elektrowniach, gdzie trzecie uzwojenie (wtórne) zasila sieć elektryczną urządzeń dla potrzeb własnych elektrowni. Są również używane w dużych zakładach przemysłowych — wówczas trzecie uzwojenie może być obciążone kompensatorem synchronicznym. Stosuje się je też w rozdzielniach wiążących sieci przemysłowe o trzech napięciach. Oprócz energetyki, transformatory trójuzwojeniowe i wielouzwojeniowe mają zastosowanie w automatyce, teletechnice i urządzeniach elektronicznych. Są to najczęściej transformatory jednofazowe małej mocy (od kilku do kilkunastu W).

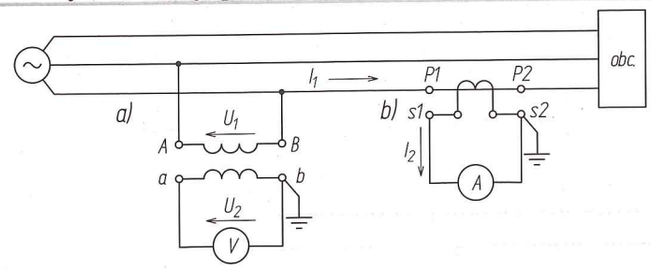
4.8.3. Przekładniki

Przekładnikami są nazywane transformatory specjalne stosowane w celu obniżenia wartości prądu lub napięcia dla dokonania pomiarów lub galwanicznego oddzielenia obwodu pomiarowego od sieci wysokiego napięcia.

Przekładniki stosuje się przy pomiarach prądów, napięć, mocy i energii elektrycznej, a także w układach zabezpieczeń elektroenergetycznych, sterowania, regulacji i sygnalizacji w sieciach elektrycznych. Bezpośrednie włączenie przyrządów pomiarowych do obwodów wysokiego napięcia jest niemożliwe, gdyż wykonanie przyrządu pomiarowego wysokiego napięcia jest bardzo trudne lub wręcz nierealne. Bardzo ważną sprawą jest także bezpieczeństwo ludzi obsługujących przyrządy pomiarowe. Z tych względów do zalet stosowania przekładników należą:

- możliwość pomiaru prądów i napięć o dużych wartościach,
- odizolowanie układu pomiarowego lub innych urządzeń od wysokiego napięcia po stronie pierwotnej przekładnika,
- możliwość standaryzacji przyrządów pomiarowych i innych urządzeń zasilanych z przekładników dzięki znormalizowaniu napięć i prądów strony wtórnej.

Rozróżnia się dwa rodzaje przekładników: napięciowe i prądowe (**rys. 4.63**).



Rys. 4.63. Przekładnik: a) napięciowy; b) prądowy

Niezależnie od wartości parametrów pierwotnych, które obejmują zakres od kilkuset kV oraz od dziesiątek A do dziesiątek kA, znamionowym napięciem wtórnym przekładnika napięciowego jest 100 V (lub 110 V), a znamionowym prądem wtórnym przekładnika prądowego jest 5 A (lub 1 A do celów specjalnych).

Typowe przekładniki są wykonywane na moce znamionowe od kilku do kilkuset VA. Przy projektowaniu obwodów z przekładnikami należy je dobierać na właściwą moc, ponieważ przeciążenie przekładnika powoduje błędy, a przy znacznych przeciążeniach może powstać trwałe uszkodzenie przekładnika. Zaciski przekładników prądowych i napięciowych muszą być jednoznacznie oznaczone. Jest to niezbędne ze względu na prawidłowe przyłączenie takich przyrządów pomiarowych, jak watomierz lub licznik. Stosuje się następujące oznaczenia zacisków:

- w przekładnikach prądowych:
  początki uzwojeń P1 — s1,
  końce uzwojeń P2 — s2,
- w przekładnikach napięciowych:
  początki uzwojeń A — a,
  końce uzwojeń B — b.

Ze względu na bezpieczeństwo obsługi obwody wtórne przekładników powinny być uziemione.

Przekładnik napięciowy jest transformatorem dwuuzwojeniowym pracującym praktycznie w stanie jałowym (duża impedancja włączonych przyrządów pomiarowych). Strona wyższego napięcia jest włączona do sieci, której napięcie jest mierzone. Po stronie wtórnej przyłącza się równolegle woltomierz i ewentualnie cewki napięciowe watomierzy i liczników.

Jeżeli obciążenie strony wtórnej jest bardzo małe (duża impedancja przyłączonego woltomierza), to napięcie strony pierwotnej jest praktycznie iloczynem napięcia strony wtórnej i przekładni przekładnika. W miarę wzrostu obciążenia

strony wtórnej wzrastają spadki napięcia na reaktancjach i rezystancjach uzwojeń, co jest powodem powstawania **błędów pomiaru**. Są to: błąd napięciowy i błąd kątowy. **Błąd napięciowy** wynika stąd, że napięcie pierwotne jest wyższe od pomnożonego przez przekładnię napięcia wtórnego o spadki napięcia na rezystancji i reaktancji uzwojenia pierwotnego. **Błąd kątowy** jest kątem przesunięcia fazowego między napięciem pierwotnym i wtórnym. W celu zmniejszenia obu błędów przekładniki są tak konstruowane, aby prąd stanu jałowego był bardzo mały. Z tego względu obwód magnetyczny musi być słabo nasycony, a więc rdzeń przekładnika musi mieć znaczny przekrój.

Ze względu na przeznaczenie przekładników napięciowych rozróżnia się **przekładniki pomiarowe** (klasy dokładności od 0,1 do 3) oraz **przekładniki zabezpieczeniowe** służące do zasilania uzwojeń przekaźników, o dopuszczalnych większych wartościach błędów przetwarzania.

Przekładnik prądowy jest to transformator dwuuzwojeniowy pracujący w warunkach normalnych w stanie zwarcia (małe impedancje przyrządów przyłączonych do obwodu). Po stronie pierwotnej jest on zasilany prądem mierzonym (przy czym dla dużych prądów mierzonych obwód pierwotny stanowi szyna wiodąca prąd), a po stronie wtórnej ma odpowiednio większą liczbę zwojów, dobraną ze względu na wartość znamionową prądu strony wtórnej (na ogół 5 A).

Ze względu na stosunek prądów najbardziej poprawną pracą przekładnika jest stan zwarcia. W stanie zwarcia prąd jałowy jest pomijalnie mały, mały jest też prąd magnesujący, strumień i straty w rdzeniu. Rdzeń przekładnika może wobec tego mieć nieduże wymiary, a więc także masę. Jeśli uwzględni się prąd magnesujący, to prąd pierwotny oraz przeliczony na stronę pierwotną prąd wtórny nie są równe, a ponadto są przesunięte w fazie o pewien kąt α_i. Jest to przyczyną **błędu prądowego** ΔI i **błędu kątowego** α_i. Przy doborze przyrządów pomiarowych i innych urządzeń, które włącza się w obwód wtórny, należy pamiętać o nieprzekraczaniu mocy znamionowej przekładnika. W przypadku włączenia odbiorników o impedancji większej niż wynika to z mocy znamionowej przekładnika, napięcie strony wtórnej wzrasta i zmniejsza się dokładność pomiaru.

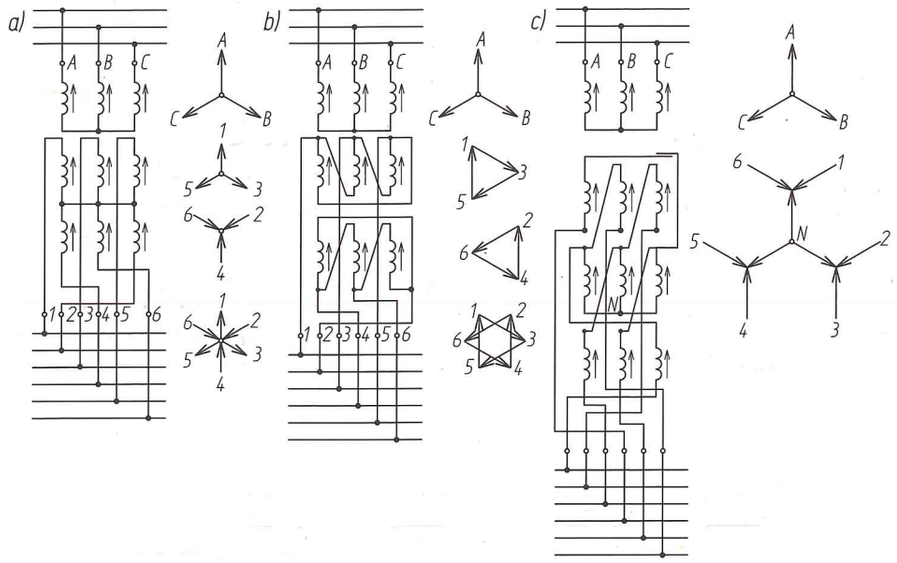
Szczególnie groźne dla przekładnika prądowego jest rozwarcie strony wtórnej przy zasilaniu strony pierwotnej. W takiej sytuacji całkowity przepływ strony pierwotnej staje się przepływem magnesującym. W związku z tym napięcie znacznie wzrasta — do wartości, na jaką pozwala nasycenie rdzenia, który w związku z dużą wartością indukcji silnie się nagrzewa (straty w stali proporcjonalne do kwadratu indukcji). Powstaje więc niebezpieczeństwo zarówno porażenia elektrycznego, jak i uszkodzenia przekładnika. **Dlatego nie wolno nawet na krótką chwilę rozewrzeć strony wtórnej przekładnika prądowego, a jeżeli wystąpi konieczność wymiany miernika, należy specjalnym zwieraczem zewrzeć uzwojenie wtórne.**

Ze względu na przeznaczenie — podobnie, jak w przypadku przekładników napięciowych — rozróżnia się **przekładniki prądowe pomiarowe** (klasa od 0,1 do 3) oraz **zabezpieczeniowe** o dopuszczalnych wyższych wartościach błędów

przetwarzania. Różnią się one budową i działaniem (różnie reagują na przetężenia i zwarcia). Przekładniki pomiarowe przy przetężeniach i zwarciach szybko się nasycają i chronią układy pomiarowe od zbyt dużych wartości prądów po stronie wtórnej. Przekładniki zabezpieczeniowe ulegają natomiast nasyceniu w mniejszym stopniu i kierują prądy przeciążeniowe oraz zwarcia do urządzeń zabezpieczających.

4.8.4. Transformator do zmiany liczby faz

Do zasilania urządzeń wielofazowych o liczbie faz różnej od trzech, istnieje konieczność zmiany układu trójfazowego na inny. Układy takie stosuje się przede wszystkim do zasilania obwodów z prostownikami (6 i 12 faz) i przetwornicami, a także w obwodach przeznaczonych do celów specjalnych. Spośród wielu rozwiązań najbardziej typowe przedstawiono na **rysunku 4.64**. Wykresy obok schematów są topograficznymi wykresami napięć obowiązującymi przy założeniu, że wszystkie uzwojenia mają taki sam kierunek nawinięcia.

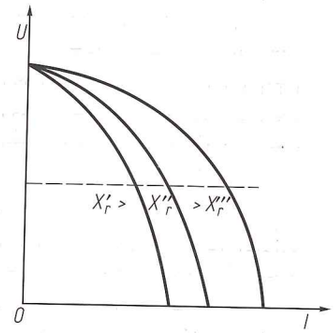


Rys. 4.64. Zamiana układu 3-fazowego na układ 6-fazowy: a) połączenie w podwójną gwiazdę; b) połączenie w podwójny trójkąt; c) połączenie widełkowe

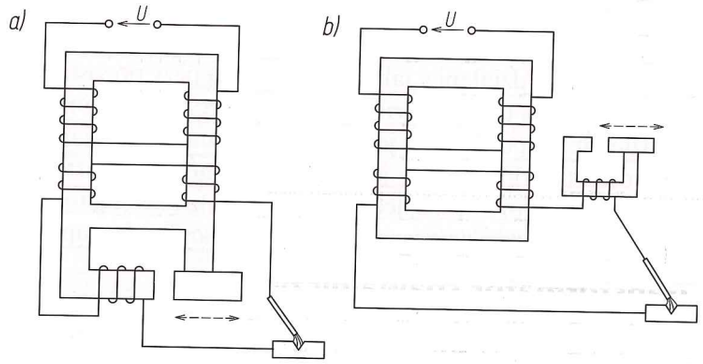
4.8.5. Transformator spawalniczy

W urządzeniach spawalniczych do zasilania łuku elektrycznego mogą być wykorzystywane **transformatory** nazywane **spawalniczymi**. Transformator taki musi zapewnić ciągłość palenia się łuku elektrycznego oraz uniemożliwiać przepływ prądu o zbyt dużej wartości w przypadku zwarcia elektrod. Niezbędna

jest również regulacja prądu spawania. Korzystne jest tutaj znaczne opadanie charakterystyki zewnętrznej $U = f(I)$ transformatora (**rys. 4.65**), co uzyskuje się przez zwiększenie reaktancji rozproszenia (strumienia rozproszenia). Tak więc transformatory spawalnicze powinny mieć dużą reaktancję rozproszenia. Ogranicza ona prąd zwarcia oraz ułatwia utrzymanie ciągłości palenia się łuku w obwodzie prądu przemiennego. Dużą reaktancję rozproszenia transformatora spawalniczego uzyskuje się przez odpowiednią konstrukcję transformatora (**rys. 4.66**). Przewodność magnetyczną strumienia rozproszenia można zmieniać (a tym samym zmieniać kształt charakterystyki zewnętrznej) przez zmianę położenia przesuwanego rdzenia umieszczonego na drodze strumienia rozproszenia (rys. 4.66a). Zmianę charakterystyki można również uzyskać przez przełączenie liczby zwojów strony pierwotnej lub wtórnej albo przez zastosowanie dodatkowego dławika o regulowanej szczelinie powietrznej (przewodności magnetycznej — rys. 4.66b). Dzięki dużej reaktancji rozproszenia napięcie zwarcia transformatora spawalniczego stanowi kilkadziesiąt procent napięcia znamionowego (50÷80%), co powoduje, że prąd zwarcia (przy zwarciu elektrod) nie przekracza dwukrotnej wartości prądu znamionowego.



Rys. 4.65. Charakterystyka zewnętrzna transformatora spawalniczego (przy różnych reaktancjach rozproszenia $X_r' > X_r'' > X_r'''$)



Rys. 4.66. Transformator spawalniczy: a) o regulowanej reaktancji rozproszenia; b) z dodatkowym dławikiem o regulowanej szczelinie powietrznej

4.8.6. Transformatory stosowane w układach elektronicznych i automatyki

Dużą grupę stanowią, oprócz transformatorów energetycznych, transformatory małej mocy powszechnie stosowane w układach elektronicznych i urządzeniach sterowania automatycznego. Są to głównie transformatory jednofazowe o mocach od 2 do 500 VA i częstotliwości napięcia zasilania od kilkudziesięciu Hz do setek kHz.

Podziału na transformatory energetyczne i transformatory stosowane w układach elektronicznych i automatyki można dokonać, przyjmując za kryterium przenoszoną moc. Przy takim podziale najbardziej są widoczne różnice konstrukcyjne (p. 4.4.1 i 4.4.2) poszczególnych grup. Bardziej istotny jest jednak sposób pracy tych transformatorów. Transformatory energetyczne nie są zwykle w pełni obciążone. Stąd, przy doborze ich konstrukcji zwraca się uwagę na koszty eksploatacyjne, a więc i na koszt energii pobieranej podczas pracy w stanie jałowym. W transformatorach zasilających urządzenia elektroniczne problem strat mocy na ogół nie jest brany pod uwagę. Spadki napięcia nie odgrywają takiej roli, jak w transformatorach energetycznych, a są one spowodowane głównie rezystancją uzwojeń, gdyż spadki napięcia powstające na skutek indukcyjności rozproszenia są zwykle pomijalnie małe. Obie grupy transformatorów różnią się wartością prądu magnesującego, który w transformatorach zasilających urządzenia elektroniczne i automatyki jest dużo większy (w jednostkach względnych) niż w transformatorach energetycznych.

Wymieniając różnice, nie można pominąć konsekwencji wynikających z masy i objętości transformatorów zasilających urządzenia elektroniczne. Jeśli pominąć koszty eksploatacji, na pierwszy plan wysuwa się koszt zużytych materiałów, głównie magnetycznych i przewodzących. Zmniejszenie kosztu tych materiałów wiąże się ze zmniejszeniem masy transformatorów. Trwałość transformatorów urządzeń elektronicznych jest na ogół mniejsza niż transformatorów energetycznych. Wynosi ona zwykle od 50 000 do 100 000 h (50 000 h to 14 lat eksploatacji po 10 h na dobę).

Zależnie od przeznaczenia konstrukcje transformatorów mogą być różne, lecz zarówno ich zasada działania, jak i schemat zastępczy pozostają bez zmian. Pewien wyjątek stanowią tu transformatory pracujące w szerokim zakresie częstotliwości, gdzie nie do pominięcia jest pojemność między zwojami, warstwami i cewkami uzwojeń (uwzględnia się je również w schemacie zastępczym transformatora). Transformatory pracujące w szerokim zakresie częstotliwości wprowadzają zniekształcenia napięcia wyjściowego w stosunku do napięcia pierwotnego. Są to zniekształcenia:

- amplitudowe, zmieniające przekładnię napięciową;
- fazowe, zmieniające kąt przesunięcia fazowego między napięciem wtórnym a pierwotnym;
- nieliniowe, wynikające z różnego stanu nasycenia rdzenia transformatora (różne wartości prądu magnesującego w zależności od częstotliwości).

4.9. Typowe uszkodzenia transformatorów energetycznych

Objawy uszkodzenia	Możliwe przyczyny	Niektóre sposoby wykrywania i usuwania usterek
1. Przeciekanie oleju	1.1. Nieszczelne spoiny kadzi	Po demontażu transformatora nieszczelności pospawać
	1.2. Nieszczelne przepusty	Wymienić przekładki lub przepust
2. Silne grzanie się	2.1. Poziom oleju za niski	Po sprawdzeniu szczelności spoin uzupełnić olej
	2.2. Uszkodzenie obiegu oleju lub w chłodnicy	Sprawdzić czystość oleju i wskaźniki jego przepływu, sprawdzić działanie wentylatora w komorze lub chłodnicy
	2.3. Nadmierne obciążenie	Sprawdzić wskazania amperomierzy, czy obciążenie jest symetryczne; w przypadku asymetrii sprawdzić, czy mieści się w dopuszczalnych granicach; zbadać uzwojenia i czynne elementy żelazne
	2.4. Zwarcie w zwojach albo między blachami	
3. Nienormalne brzęczenie	3.1. Luźne połączenie śrub	Sprawdzić wskazania przyrządów, sprawdzić czy brzęczenie występuje również w stanie jałowym, sprawdzić dokręcenie śrub na zewnątrz kadzi. Jeżeli po ewentualnym dokręceniu śrub, zmianie obciążenia lub napięcia brzęczenie nadal występuje, to sprawdzić przyczyny wewnątrz kadzi po demontażu
	3.2. Rozluźnienie połączenia jarzma z kolumnami	
	3.3. Drgania skrajnych blach rdzenia	
	3.4. Zbyt luźne osadzenie uzwojeń na rdzeniu	
	3.5. Nadmierne lub niesymetryczne obciążenie	
	3.6. Praca przy podwyższonym napięciu	
4. Bulgocące szmery wewnątrz transformatora	4.1. Drgania magnetyczne unoszą zatrzymane pęcherzyki powietrza	Odpowietrzyć olej
	4.2. Statyczne wyładowania i przeskoki	Skontrolować stan izolacji
5. Trzaski wewnątrz transformatora	5.1. Przepięcia i wyładowania powierzchniowe do kadzi	Sprawdzić stan izolacji
	5.2. Przerwa w uziemieniu	Sprawdzić połączenia stali czynnej z pokrywą transformatora lub kadzi