

# **INSTALACJE ELEKTRYCZNE**

## **część 8**

# ZAKRES WYKŁADU

- 1) Budowa i podział transformatorów
- 2) Zasada działania transformatorów
- 3) Analiza pracy transformatora
- 4) Transformatory energetyczne
- 5) Sprawność transformatorów
- 6) Klasyfikacja układów połączeń stacji
- 7) Układy szynowe
- 8) Układy bezszynowe
- 9) Rozwiązania konstrukcyjne stacji i rozdzielni
- 10) Potrzeby własne stacji
- 11) Urządzenia automatyki stacji

# TRANSFORMATORY

**Transformatorem** nazywamy statyczne urządzenie elektryczne, działające na zasadzie indukcji elektromagnetycznej wzajemnej, przetwarzające układ napięć i prądów przemiennych na układ napięć i prądów przemiennych najczęściej o innych wartościach, przy zachowaniu stałej częstotliwości.

Potrzeba transformacji w układach prądu przemiennego występuje zarówno w systemie elektroenergetycznym (SEE) przy przesyłaniu energii elektrycznej na duże odległości oraz jej rozdzielaniu, jak też w zakładach przemysłowych i w gospodarstwach domowych. Istnieje więc zapotrzebowanie na wiele różnych rodzajów transformatorów.

Oprócz zastosowań w układach elektroenergetycznych, w których występują w większości transformatory wielkich mocy, używa się również liczne odmiany transformatorów do zastosowań specjalnych. Należą do nich głównie transformatory pomiarowe zwane przekładnikami, transformatory spawalnicze i prostownikowe, autotransformatory, przesuwniki fazowe, a także transformatory miniaturowe stosowane w układach automatyki, elektroniki i przesyłania informacji.

Zakres mocy stosowanych obecnie transformatorów jest bardzo szeroki. Do największych zalicza się transformatory siłowe budowane obecnie na moce rzędu 1 GVA, zaś transformatory w układach elektronicznych – na moc rzędu kilku 1 VA lub nawet poniżej. Napięcia stosowanych transformatorów – zależnie od przeznaczenia – wynoszą od kilku woltów do setek kilowoltów.

Pomimo tak dużej różnorodności stosowanych obecnie typów transformatorów oraz zakresu ich mocy i napięć, pociągającej za sobą mnogość rozwiązań konstrukcyjnych, to zasada ich działania jest zawsze taka sama.

## BUDOWA I PODZIAŁ TRANSFORMATORÓW

Każdy transformator składa się z następujących podstawowych elementów:

- a) z rdzenia ferromagnetycznego stanowiącego obwód magnetyczny
- b) z dwóch obwodów elektrycznych:
  - uzwojenia pierwotnego oraz
  - uzwojenia wtórnego

**Obwód magnetyczny** – tworzy rdzeń złożony z pakietu blach transformatorowych o grubości 0,3 do 0,5 mm, wzajemnie od siebie odizolowanych, np. warstwą lakieru, krzemu, papieru, szkła wodnego itp. Części rdzenia, na których są umieszczone uzwojenia, nazywa się kolumnami lub słupami, a części łączące kolumny od góry i od dołu – jarzmami. Przestrzeń między kolumną a jarzmem nazywa się oknem. Izolacja oddzielająca blachy transformatorowe ogranicza przepływ prądów wirowych i zapobiega nadmiernemu nagrzewaniu się rdzenia. W układach rzeczywistych spotyka się szereg typów transformatorów o różnorodnej konfiguracji obwodu magnetycznego.

**Obwód elektryczny** – stanowią uzwojenia wykonane w układzie współśrodkowym (cylindrycznym) lub krążkowym z przewodów miedzianych, podzielone na połówki i umieszczone na obu kolumnach rdzenia.

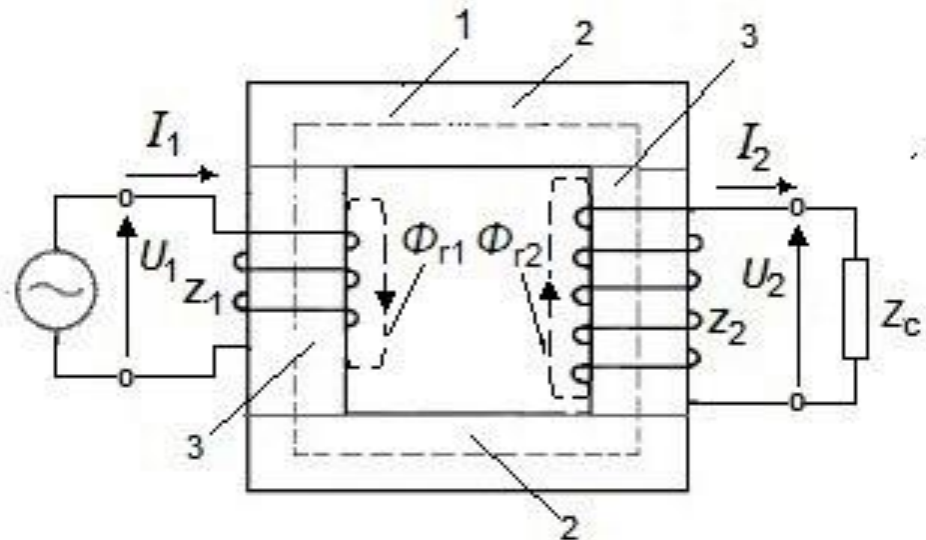
Uzwojenie górnego napięcia jest najczęściej podzielone na kilka cewek, oddzielonych od siebie szczelinami umożliwiającymi lepsze chłodzenie. Uzwojenie dolnego napięcia jest dokładnie odizolowane od uzwojenia górnego napięcia

Poniżej transformator jednofazowy, w którym na obu kolumnach umieszczone są dwa niezależne uzwojenia o znanej liczbie zwojów oraz jarzma: górne i dolne łączące obie kolumny.

W tym przypadku stroną pierwotną transformatora stanowi uzwojenie, do którego podłączone jest źródło transformowanej energii elektrycznej, tzw. uzwojenie pierwotne o liczbie zwojów  $z_1$ . Stroną wtórną o liczbie zwojów  $z_2$  jest uzwojenie, do którego przyłączony jest odbiornik energii elektrycznej o impedancji  $Z_c$ .

Oznaczenia:

- 1 – główny strumień magnetyczny  $\Phi$ ,
- $\Phi_{r1}$  – strumień rozproszenia uzwojenia pierwotnego,
- $\Phi_{r2}$  – strumień rozproszenia uzwojenia wtórnego.
- 2 – jarzmo górne i dolne,
- 3 – kolumny.
- $z_1$  – liczba zwojów uzwojenia pierwotnego,
- $z_2$  – liczba zwojów uzwojenia wtórnego.



Ze względu na kształt obwodu magnetycznego transformatory jednofazowe dzieli się na:

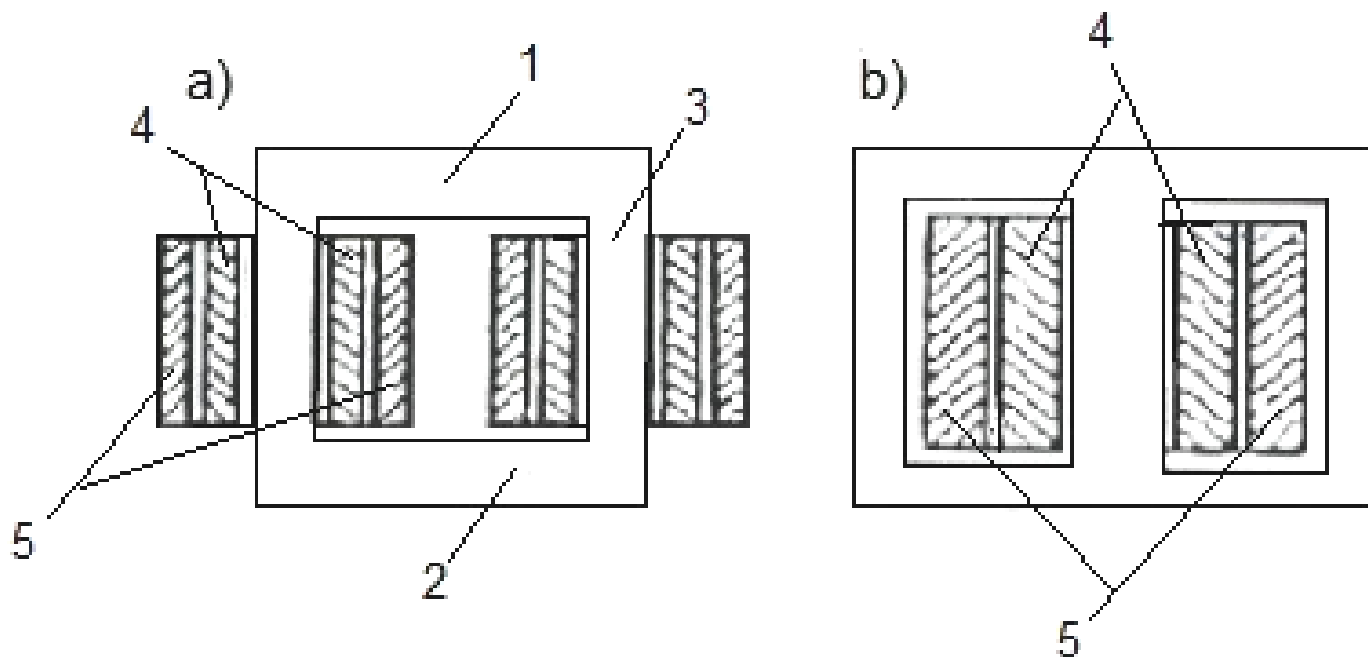
- 1) transformatory rdzeniowe,
- 2) transformatory płaszczone.

**W transformatorze rdzeniowym** uzwojenia pierwotne i wtórne są dzielone na połówki i umieszczone na obu kolumnach. Pola przekroju kolumn i jarzm są wówczas jednakowe.

**W transformatorach płaszczyznych** oba uzwojenia – pierwotne i wtórne – są umieszczone tylko na kolumnie środkowej. Pole przekroju tej kolumny jest około dwukrotnie większe niż pola przekrojów kolumn zewnętrznych i jarzm.

Strumień magnetyczny zamykający się w kolumnie środkowej jest dwukrotnie większy niż strumienie zamykające się przez kolumny i jarzma skrajne.

Liczba zwojów uzwojenia wynika z wartości napięcia znamionowego transformatora i wymiarów rdzenia.



Oznaczenia:

a) rdzeniowy,

b) płaszczowy,

1 jarzmo górne,

2 – jarzmo dolne,

3 – kolumna,

4 – uzwojenie wtórne,

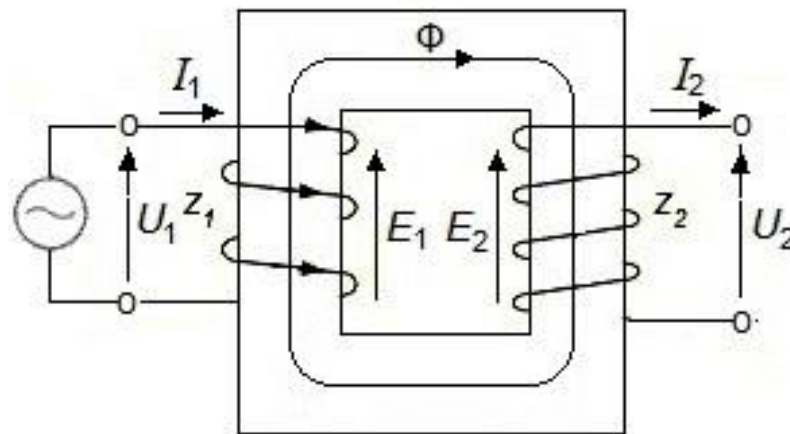
5 – uzwojenie pierwotne.

Ze względu na różnice w budowie transformatory dzieli się na trzy grupy:

- 1) **Transformatory energetyczne** – nazywane również transformatorami mocy, stosuje się przy przesyłach i rozdzielniach energii elektrycznej;
- 2) **Transformatory małej mocy** – stosowane w urządzeniach elektrycznych i elektronicznych, w automatyce, łączności, telemechanice;
- 3) **Transformatory specjalne** – budowane dla różnych celów specjalnych, np. przekładniki pomiarowe, transformatory spawalnicze, probiercze, prostownikowe, bezpieczeństwa.

## ZASADA DZIAŁANIA TRANSFORMATORÓW

Istotę działania transformatora jednofazowego można wyjaśnić na przykładzie transformatora idealnego (tzn. bez strat i rozprożeń magnetycznych), o rozwartych zaciskach uzwojenia wtórnego – w stanie jałowym



Po przyłożeniu do zacisków uzwojenia pierwotnego o liczbie zwojów  $z_1$  napięcia sinusoidalnie zmiennego o skutecznej wartości  $U_1(t) = U_m \cos \omega t$  i o częstotliwości  $f_1$  popłynie w nim prąd  $I_1$  zwany prądem biegu jałowego  $I_0$ . Pod wpływem prądu magnesującego  $I_\mu = I_0$  zostanie wzbudzony w rdzeniu transformatora strumień magnetyczny  $\Phi(t) = \Phi_m \sin \omega t$ , opóźniony w fazie o kąt  $\pi/2$  w stosunku do źródłowego napięcia  $U_1$  i wartości maksymalnej strumienia  $\Phi_m$ .

Strumień magnetyczny  $\Phi(t)$  skojarzony z uzwojeniami: pierwotnym o liczbie zwojów  $z_1$  i wtórnym o liczbie zwojów  $z_2$ , umieszczonymi na kolumnie rdzenia, indukuje w nich, zgodnie z prawem indukcji elektromagnetycznej, napięcia (sem)  $e_1$  (i analogicznie  $e_2$ ) o wartościach chwilowych:

$$e_1 = -z_1 \frac{d\Phi(t)}{dt} = \omega z_1 \Phi_m \cos\omega t$$

Wartości skuteczne tych napięć indukowanych w uzwojeniu pierwotnym i wtórnym wynoszą:

$$E_1 = 4,44 z_1 \Phi_m f$$
$$E_2 = 4,44 z_2 \Phi_m f$$

Iloraz indukowanego napięcia w uzwojeniu pierwotnym  $E_1$  i napięcia w uzwojeniu wtórnym  $E_2$  określa przekładnię napięciową transformatora, równą przekładni zwojowej  $n_z$ :

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{z_1}{z_2} = n_z$$

Przekładnia jest parametrem transformatora określającym jego zdolność do zmiany wartości napięcia i prądu przy stałej częstotliwości. Siły elektromotoryczne indukowane w obu uzwojeniach pozostają do siebie w stosunku liczb zwojów i wartości napięć obu uzwojeń:

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{z_1}{z_2}$$

W przypadku obciążenia transformatora idealnego, pod wpływem siły elektromotorycznej  $E_2$  o przebiegu przesuniętym w stosunku do strumienia  $\Phi$  o kąt  $\varphi = \pi/2$ , w uzwojeniu wtórnym pojawi się prąd  $I_2$  o przebiegu przesuniętym w stosunku do przebiegu  $E_2 = U_2$  o kąt fazowy  $\varphi_2$ , zależny od charakteru odbiornika  $Z_{\text{obc}}$ . Oprócz przepływu  $\Theta_1 = I_1 z_1$  pojawi się w transformatorze również przepływ  $\Theta_2 = I_2 z_2$ , który wytworzy strumień przeciwdziałający, w wyniku czego wypadkowy strumień  $\Phi$  oraz siła elektromotoryczna  $E_1$ , będą mniejsze niż w stanie jałowym transformatora idealnego.

Ponieważ napięcie źródła energii transformowanej jest nadal takie same i równe  $U_1$ , popłynie w sieci dodatkowy prąd  $I_1$ . W wyniku tego przepływu wypadkowy strumień magnetyczny  $\Phi$  zachowa swoją poprzednią wartość. Tak więc w transformatorze idealnym prąd obciążenia zależy wyłącznie od  $Z_{\text{obc}}$  i od  $E_2$ .

Ponieważ w transformatorze idealnym moc pozorna  $S_1 = S_2$ , można wyciągnąć wniosek, że:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{z_2}{z_1}$$

co oznacza, że po podwyższeniu napięcia za pomocą transformatora prąd się nie zmniejsza, a przy jego obniżaniu prąd wzrasta.

Oprócz podstawowego zadania (zmiana wartości napięcia i prądu przy stałej częstotliwości) transformator może pełnić również **inne funkcje**, np.:

- 1) izolować od siebie galwanicznie obwody elektryczne (np. transformator separacyjny);
- 2) służyć jako filtr do eliminacji składowych stałych prądu i napięcia, przy zachowaniu składowych przemiennych;
- 3) wzajemnie dopasowywać parametry dwóch części obwodu elektrycznego, aby uzyskać optymalne warunki ich współpracy;
- 4) jako czwórnik o odpowiedniej impedancji może być włączony między źródło i odbiornik, np. w celu ograniczenia prądu zwarcia.

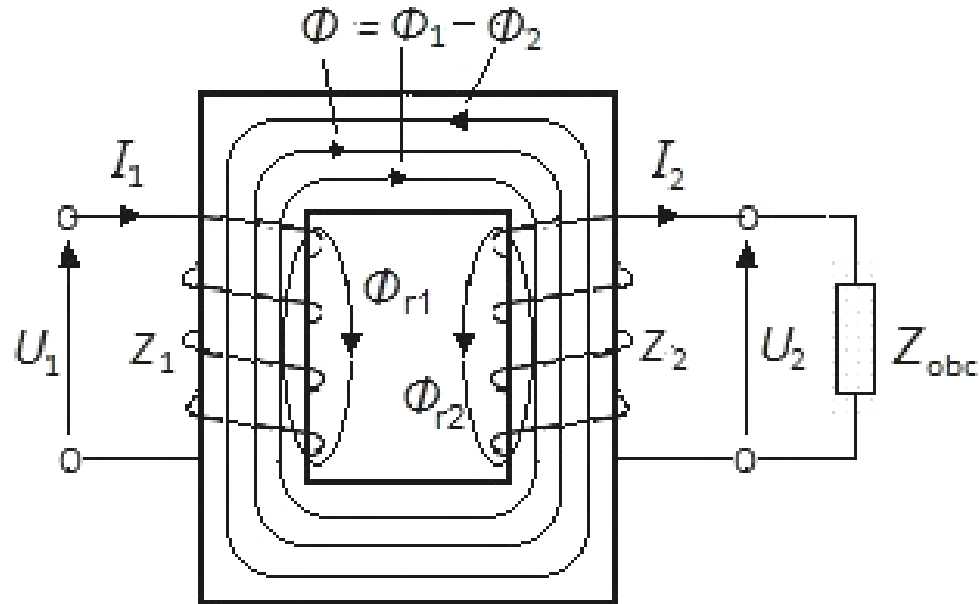
## TRANSFORMATOR RZECZYWISTY

W transformatorze rzeczywistym o przekładni 1:1 ( $z_1 = z_2$ ) do zacisków uzwojenia wtórnego jest przyłączony odbiornik,. W zamkniętym obwodzie tego uzwojenia, pod wpływem siły elektromotorycznej  $E_2$ , popłynie prąd przemienny  $I_2$ .

Powstały przepływ  $\Theta_2$  w uzwojeniu wtórnym wytworzy strumień rozproszenia  $\Phi_{r2}$ . Zmieni się również wartość prądu  $I_1$  w uzwojeniu pierwotnym i wartość strumienia rozproszenia  $\Phi_{r1}$  wytworzonego przez przepływ pierwotny  $\Theta_1$ .

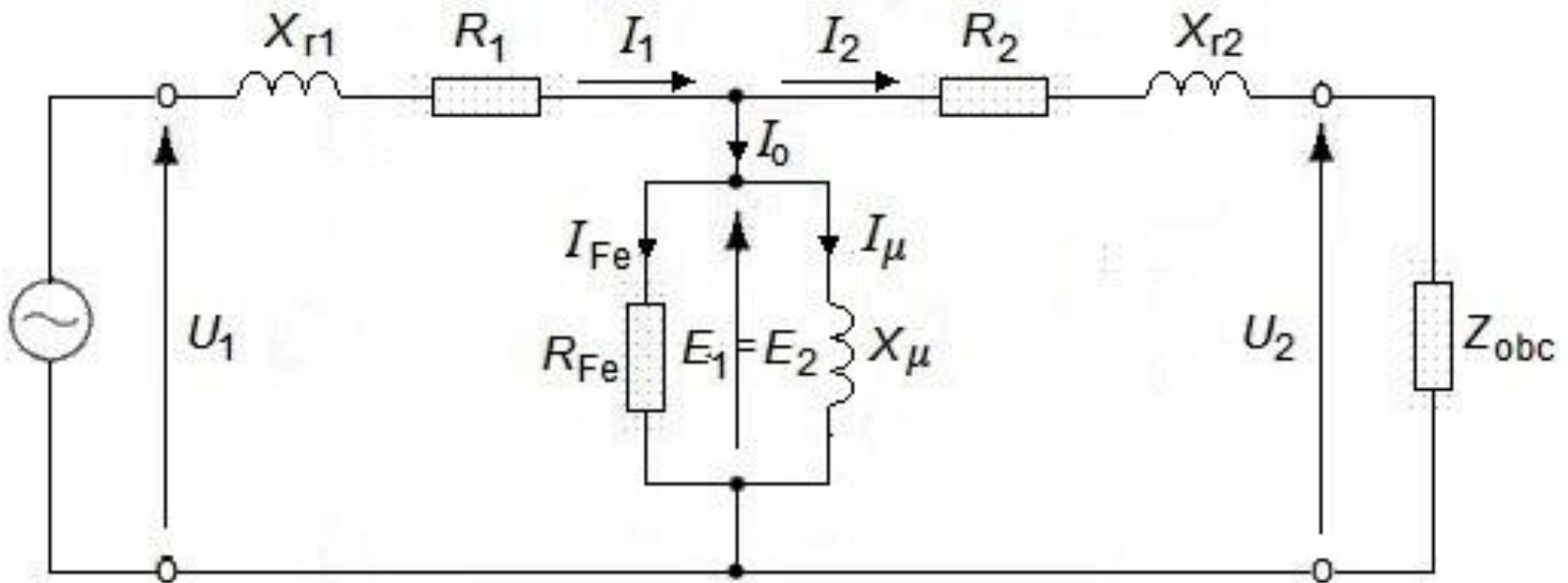
W tym czasie, gdy w uzwojeniach pierwotnym i wtórnym płyną prądy  $I_1$  i  $I_2$ , strumień magnetyczny  $\Phi$  zamykający się przez rdzeń transformatora jest strumieniem wypadkowym powstałym w wyniku działania dwóch przepływów –  $\Theta_1$  i  $\Theta_2$ . W powstałym układzie energia elektryczna dostarczana do uzwojenia pierwotnego przy napięciu  $U_1$  i prądzie  $I_1$  zostaje przetworzona na energię elektryczną otrzymywaną z uzwojenia wtórnego przy napięciu  $U_2$  i prądzie  $I_2$ .

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



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

W efekcie, wytworzony w rdzeniu rzeczywisty strumień magnetyczny  $\Phi$  sprzężony z dwoma uzwojeniami będzie nieco mniejszy niż w transformatorze idealnym. Wynika stąd następujący wniosek: nie cała energia bierna bierze udział w wytwarzaniu siły elektromotorycznej. Schemat zastępczy transformatora rzeczywistego, o przekładni 1 : 1, ułatwiający opis analityczny bez konieczności każdorazowego przeliczania poszczególnych wielkości, przedstawia rysunek:



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

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

W układzie:

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

Straty mocy występujące w uzwojeniach pierwotnym i wtórnym transformatora rzeczywistego są związane z przepływem prądów w obwodach o określonej rezystancji. Są to tzw. straty w miedzi oraz straty w rdzeniu magnetycznym, czyli straty histerezy i wiropądowe.

Straty w rdzeniu ( $\Delta P_{Fe}$ ) są sumą strat mocy wywołane histerezą obwodu magnetycznego ( $\Delta P_h$ ) i strat mocy wywołane prądami wirowymi ( $\Delta P_w$ ), czyli:

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

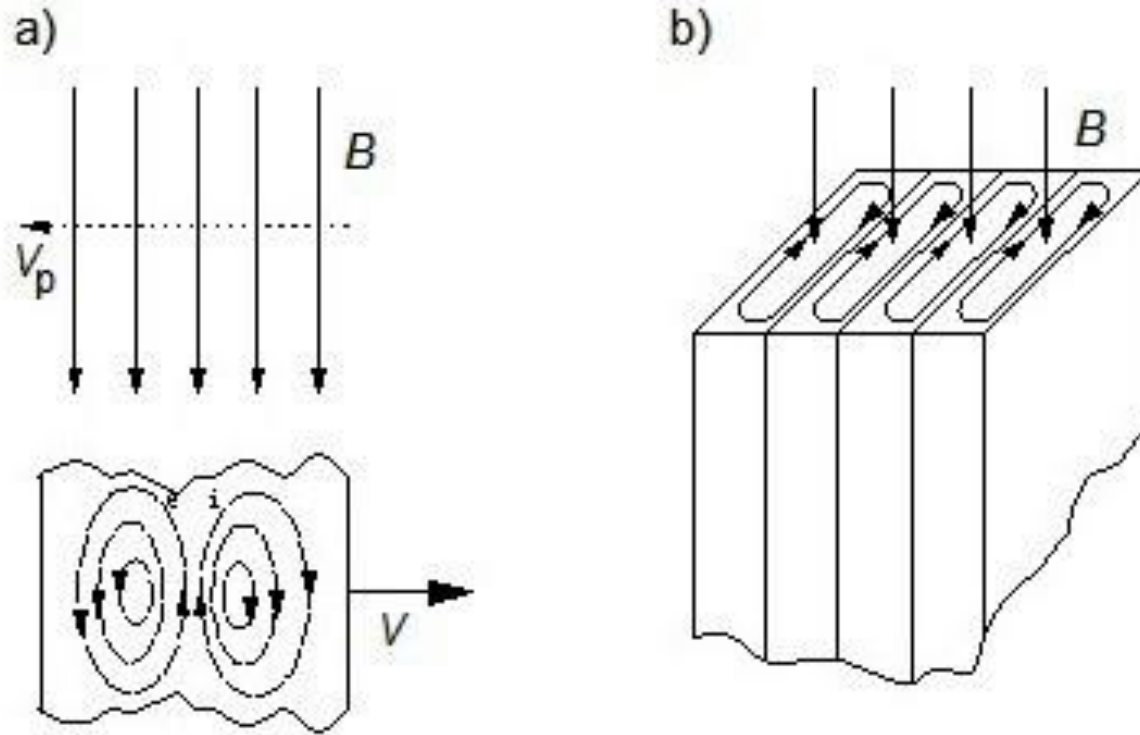
Straty histerezowe ( $\Delta P_h$ ) związane są z magnesowaniem rdzenia ferromagnetycznego i wynikają z istnienia pętli histerezy magnetycznej. Sinusoidalnie zmienny strumień magnetyczny wywołuje dwukrotne przemagnesowanie rdzenia w ciągu okresu.

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

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

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

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



Powstawanie prądów wirowych: ( a ) w masie metalowej, ( b ) w pakiecie blach

Z punktu widzenia zjawiska prądów wirowych jest sprawą obojętną, czy masa metalowa znajdująca się w ruchu jest umieszczona w stałym (lub zmiennym) polu magnetycznym, czy też zmienne w czasie pole magnetyczne przenika nieruchomą masę metalową. W transformatorach mamy np. do czynienia z nieruchomym rdzeniem ferromagnetycznym, umieszczonym w zmiennym polu magnetycznym. Prądy wirowe są w większości urządzeń elektrycznych zjawiskiem niepożądanym, gdyż powodują występowanie strat energii zamienianej na ciepło.

W celu ograniczenia prądów wirowych rdzenie maszyn i urządzeń elektrycznych wykonuje się z blach bądź specjalnych materiałów ferromagnetycznych o dużej rezystywności. Blachy te są od siebie odizolowane cienkim papierem i czasami lakierowane. Prądy wirowe zamykają się w obrębie każdej blachy, napotykając na swej drodze większą rezystancję ze względu na znacznie mniejszy przekrój. Straty wiroprądowe są proporcjonalne do kwadratu grubości blach, do kwadratu częstotliwości i do kwadratu amplitudy indukcji magnetycznej, a odwrotnie proporcjonalne do rezystywności blachy.

Zwiększenie około 5-krotnie rezystywności stali można uzyskać przez dodatek krzemu, w ilości około 2,5 do 4,5 [%].

## ANALIZA PRACY TRANSFORMATORA

### Stan jałowy

Transformator znajduje się w stanie pracy jałowej wówczas, gdy jedno uzwojenie przyłączone jest do źródła zasilania, a drugie jest otwarte. Stan ten często określa się również w praktyce jako „stan jałowy transformatora”, w którym:

- w uzwojeniu pierwotnym płynie prąd, który nazywa się prądem jałowym  $I_o$ ,
- w uzwojeniu wtórnym (nie obciążonym) prąd  $I_2 = 0$ ,  $Z_{obc} = \infty$ .

Prąd, który płynie w uzwojeniu pierwotnym, można wyrazić zależnością:

$$I_1 = I_o = I_{Fe} + I_{\mu}$$

gdzie:

$I_{Fe}$  – składowa czynna prądu jałowego  $I_o$ ;

$I_{\mu}$  – składowa bierna prądu jałowego  $I_o$ .

Pod wpływem prądu magnesującego  $I_{\mu} = I_o$  zostanie wzbudzony w rdzeniu transformatora strumień magnetyczny  $\Phi(t) = \Phi_m \sin \omega t$ , opóźniony w fazie o kąt  $\pi/2$  w stosunku do źródłowego napięcia  $U_1$  i wartości maksymalnej  $\Phi_m$ . Prąd  $I_o$  wytwarza strumień magnetyczny, który jest sumą strumienia głównego  $\Phi$  i strumienia rozproszenia  $\Phi_{r1}$ . Strumień główny  $\Phi$  skojarzony z uzwojeniami – pierwotnym o liczbie zwojów  $z_1$  i wtórnym o liczbie zwojów  $z_2$  – indukuje w obu uzwojeniach siły elektromotoryczne  $E_1$  i  $E_2$  o wartościach skutecznych, określone zależnościami:

$$E_1 = 4,44 z_1 \Phi_m f \quad E_2 = 4,44 z_2 \Phi_m f$$

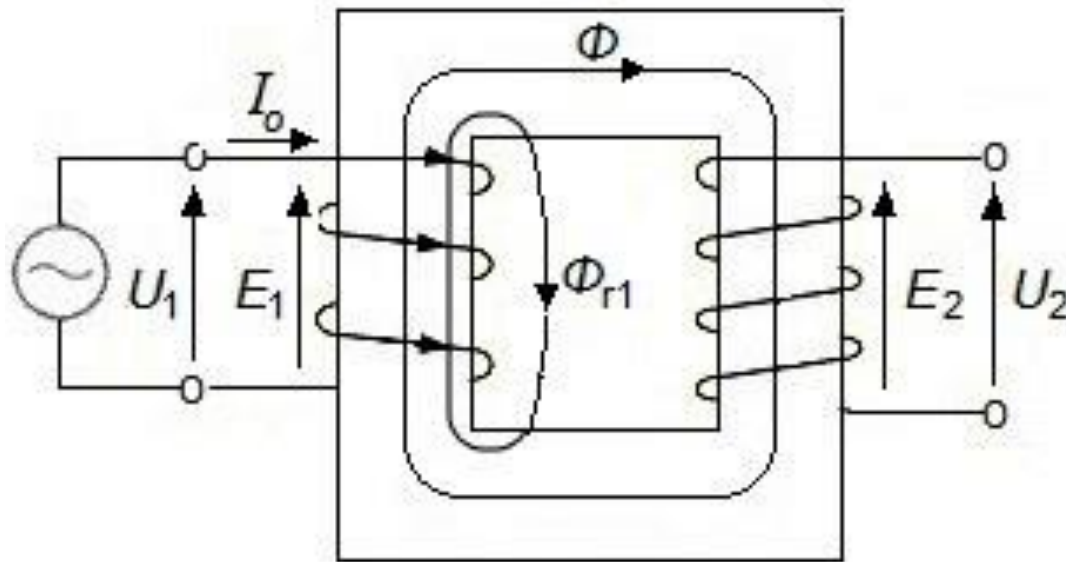
gdzie:

$E_1, E_2$  – wartości skuteczne sił elektromotorycznych, w V (w uzwojeniu pierwotnym i wtórnym);

$z_1, z_2$  – liczby zwojów uzwojeń odpowiednio pierwotnego i wtórnego;

$\Phi_m$  – amplituda sinusoidalnie zmiennego strumienia głównego, w Wb;

$f$  – częstotliwość, w Hz.



W transformatorach mocy prąd stanu jałowego stanowi 1% prądu znamionowego transformatorów dużej mocy i 10% prądu znamionowego transformatorów małej mocy. Współczynnik mocy transformatora w stanie jałowym  $\cos\varphi \approx 0,1$ .

Moc czynna  $P_o$  pobierana przez transformator w stanie jałowym jest przetwarzana w całości na ciepło. Wydzielana energia cieplna jest skutkiem strat mocy w rdzeniu, strat w uzwojeniu pierwotnym i strat w izolacji. Straty w izolacji i uzwojeniu pierwotnym są pomijalne w porównaniu ze stratami w rdzeniu. Straty mocy w rdzeniu są określone zależnością:

$$\Delta P_{Fe} = k_h B^2 f + k_w B^2 f^2 = \Delta P_h + \Delta P_w$$

przy czym:

$k_h, k_w$  – stałe o wartościach zależnych od rodzaju materiału rdzenia;  
 $\Delta P_w$  – straty, których przyczyną są prądy wirowe.

A zatem można przyjąć, że moc czynna pobierana przez transformator w stanie jałowym  $P_o$  jest związana ze stratami w rdzeniu, czyli:

$$P_o \approx \Delta P_{Fe}$$

Straty w rdzeniu stanowią 0,15% mocy znamionowej transformatorów dużych i ok. 1,5% małych transformatorów.

Transformator w stanie jałowym jest zasilany napięciem o wartości skutecznej  $U_1$ . Amplituda strumienia magnetycznego powstającego pod wpływem tego napięcia wynosi:

$$\Phi_m = \frac{E_1}{4,44fZ_1} \approx \frac{U_1}{4,44fZ_1}$$

Strumień ten jest liniowo zależny od napięcia  $U_1$ . Wartość natężenia prądu pobieranego przez transformator w stanie jałowym wynosi:

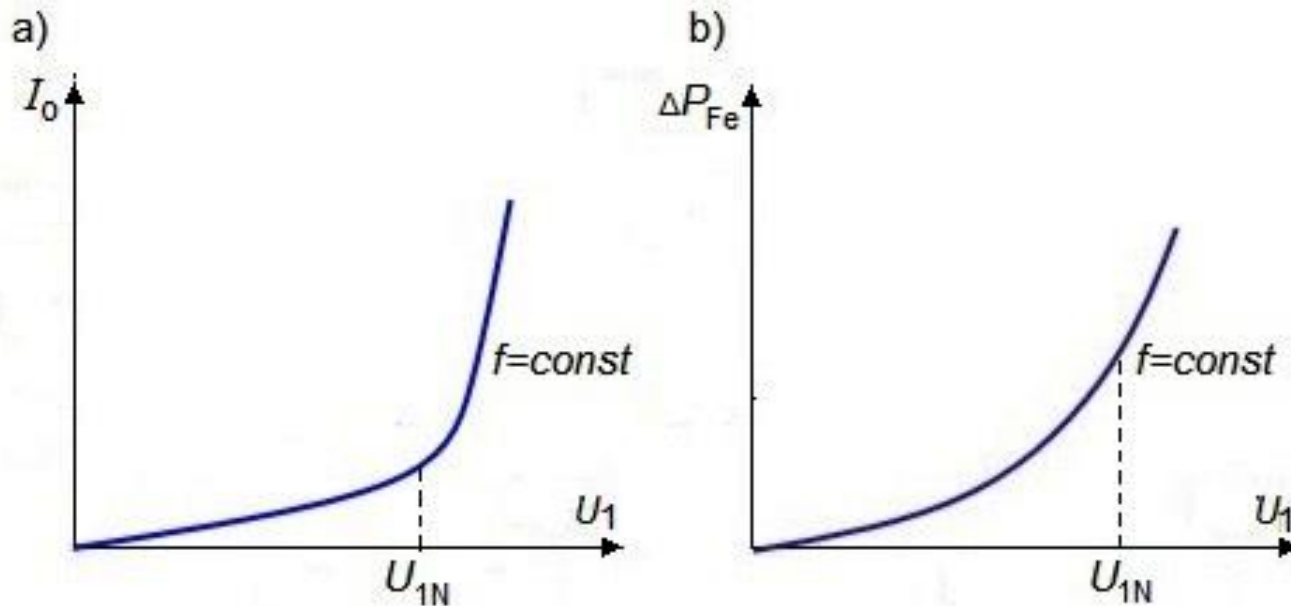
$$I_0 \approx I_\mu = \frac{E_1}{X_\mu} \approx \frac{U_1}{X_\mu}$$

gdzie:

$I_\mu$  – prąd magnesujący; składowa prądu biegu jałowego wytwarzająca strumień główny, w A;

$X_\mu$  – reaktancja indukcyjna uzwojenia pierwotnego związana ze strumieniem głównym, w  $\Omega$ .

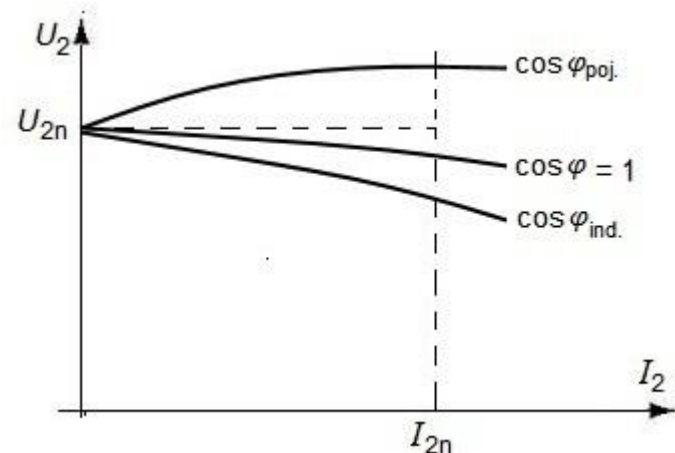
W transformatorach z rdzeniem stalowym wielkość  $X_{\mu}$  zależy od stanu nasycenia obwodu magnetycznego, a więc również od wartości napięcia zasilania, któremu odpowiada pewien strumień magnetyczny ( $U \approx E = c_c \Phi$ ). Znając wartość tego strumienia, można wyznaczyć wartość prądu  $I_{\mu}$  z charakterystyki magnesowania obwodu, czyli z zależności  $\Phi = f(I_{\mu})$ . Z charakterystyki stanu jałowego transformatora, którą określa zależność  $I_0 = f(U_1)$  wynika, że praca transformatora przy napięciu wyższym niż znamionowe powoduje znaczny wzrost prądu jałowego.



Z charakterystyki  $\Delta P_{Fe} = f(U_1)$  przedstawionej na rysunku wynika, że **zasilanie transformatora napięciem wyższym niż znamionowe powoduje znaczny wzrost strat w rdzeniu, natomiast zmniejszenie częstotliwości poniżej znamionowej (przy znamionowym napięciu) powoduje nadmierne nagrzewanie się rdzenia, ze względu na wzrost strat histerezowych oraz wzrost prądu jałowego na skutek zmniejszenia się wartości  $X_\mu$ .**

## Stan obciążenia

Transformator znajduje się w stanie obciążenia wówczas, gdy jedno uzwojenie przyłączone jest do źródła zasilania, a do zacisków drugiego przyłączony jest odbiornik. Od charakteru impedancji tego odbiornika zależy faza prądu wtórnego  $I_2$  i wartość napięcia wtórnego  $U_2$ . Napięcie wtórne osiąga wartość największą, przekraczającą nawet wartość znamionową wówczas, gdy transformator jest obciążony odbiornikiem o charakterze pojemnościowym. **Jeżeli transformator jest obciążony odbiornikiem o charakterze indukcyjnym, to przy wzroście obciążenia napięcie wtórne maleje, natomiast przy odbiorniku pojemnościowym – rośnie.** Wpływ charakteru obciążenia na wartość napięcia wtórnego, przy znamionowym napięciu pierwotnym i stałej wartości współczynnika mocy odbiornika, przedstawiono na rysunku:



W celu utrzymania stałego poziomu napięcia zapewniającego prawidłową pracę zasilanych odbiorników niezbędna jest regulacja napięcia. Regulacja taka może odbywać się przez utrzymanie stałej wartości strumienia magnetycznego, dzięki zmianie liczby zwojów uzwojenia pierwotnego.

Wartość strat w stanie obciążenia transformatora wynosi:

$$\Delta P = \Delta P_{\text{Fe}} + \Delta P_{\text{Cu}}$$

gdzie:

$\Delta P_{\text{Cu}}$  – straty w uzwojeniu pierwotnym i wtórnym transformatora, w W.

Sprawność transformatora można określić równaniem:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P} = 1 - \frac{\Delta P}{P_2 + \Delta P}$$

gdzie:

$P_1$  – moc pobierana przez transformator;  $P_1 = U_1 I_1 \cos\varphi_1$ , w W;

$P_2$  – moc oddawana przez transformator;  $P_2 = U_2 I_2 \cos\varphi_2$ , w W.

**Transformator posiada największą sprawność, gdy straty miedzi są równe stratom w żelazie.**

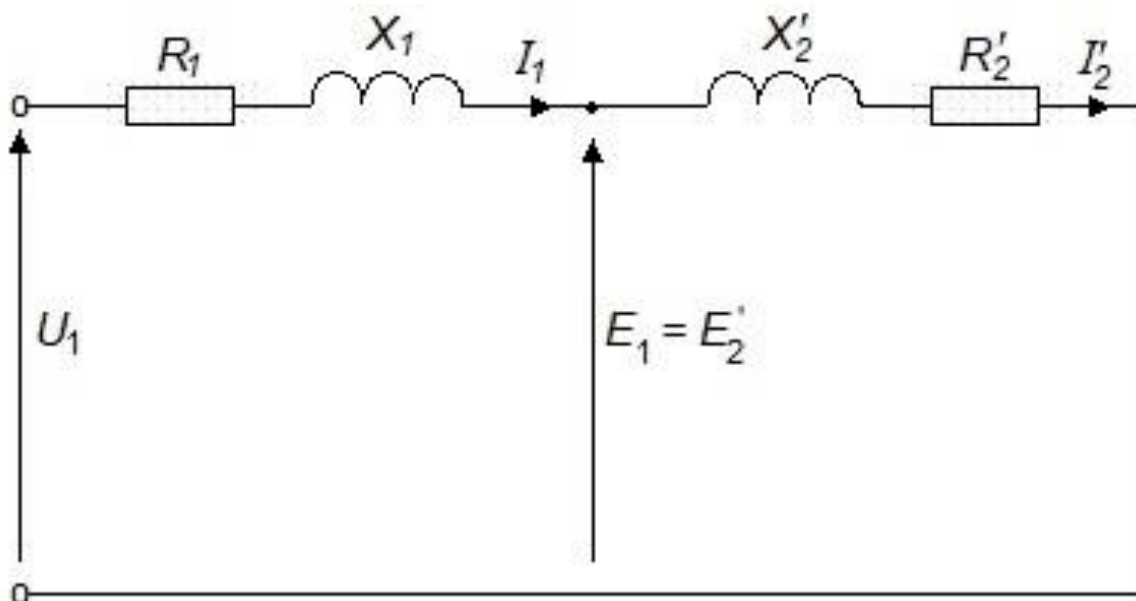
## Stan zwarcia transformatora

Stanem zwarcia transformatora nazywa się stan, w którym jedno z uzwojeń zasilane jest ze źródła energii elektrycznej, natomiast zaciski drugiego uzwojenia są zwarte. Wówczas napięcie na zaciskach uzwojenia zwartego jest równe zeru i chociaż prąd w nim płynie – nie występuje oddawanie mocy na zewnątrz do odbiornika.

Całkowita moc pobierana przez transformator w stanie zwarcia pokrywa wyłącznie powstałe straty. Przetwarza się ona całkowicie na ciepło.

Wyróżnia się dwa rodzaje zwarcia transformatora:

- a) **zwarcie awaryjne** – występuje w praktyce przy pełnym napięciu zasilającym,
- b) **zwarcie pomiarowe** – realizowane w warunkach laboratoryjnych – pozwala wyznaczyć szereg danych charakterystycznych transformatora na podstawie przeprowadzonych pomiarów.



Jeżeli napięciu na uzwojeniu wtórnym jest równe zero, to napięcie na uzwojeniu pierwotnym rozkłada się jedynie na impedancjach uzwojeń transformatora. Indukowana siła elektromotoryczna  $E_1 = E'_2$  jest równa w przybliżeniu połowie napięcia pierwotnego  $U_1$ . **W stanie zwarcia pomiarowego napięcie  $E_1$  wynosi kilka procent napięcia znamionowego.**

Prąd magnesujący  $I_{\mu}$ , 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  $X_{\mu}$  w schemacie zastępczym transformatora, czyli przerwę w gałęzi poprzecznej.

Straty w rdzeniu  $\Delta P_{Fe}$  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 stanowią one ułamek procenta strat znamionowych w rdzeniu.

Oznacza to bardzo dużą rezystancję  $R_{Fe}$  w schemacie zastępczym, czyli przerwę w gałęzi  $R_{Fe}$ . Stąd wynika, że przerwa występuje w całej gałęzi poprzecznej w schemacie zastępczym transformatora w stanie zwarcia. Wartość prądu

$$I_o = I_{\mu} + I_{Fe} \approx 0.$$

W schemacie zastępczym transformatora w stanie zwarcia pozostają więc tylko połączone szeregowo rezystancje  $R_1$ ,  $R'_2$  i reaktancje  $X_1$ ,  $X'_2$ .  
przy czym:

$$R_1 + R'_2 = R_z - \text{rezystancja zwarcia};$$

$$X_1 + X'_2 = X_z - \text{reaktancja zwarcia}.$$

Impedancja zwarcia transformatora wynosi:

$$Z_z = \sqrt{R_z^2 + X_z^2}$$

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 to zapisać w postaci:

$$U_N = Z_z \cdot I_z$$

Napięcie zwarcia transformatora  $U_z$  to napięcie, które przyłożone do strony pierwotnej, przy zwartej stronie wtórnej, powoduje przepływ prądu znamionowego.

Stąd  $I_z = I_N$ . Napięcie zwarcia można obliczyć z zależności:

$$U_z = Z_z I_N$$

gdzie:

$I_N$  – prąd znamionowy w uzwojeniu zasilanym;

$Z_z$  – impedancja zwarcia sprowadzona na stronę uzwojenia zasilanego.

Napięcie zwarcia można wyrazić w procentach wartości napięcia znamionowego odpowiedniej strony transformatora:

$$u_z\% = \frac{U_z}{U_n} 100\%$$

W transformatorach energetycznych wymagana wartość napięcia zwarcia wynosi:

$$U_z = (0,03 \div 0,15) U_n, (3\% - 15)\% U_n$$

Po zwarcu awaryjnym uzwojenia wtórnego transformatora, przez kilka lub kilkanaście sekund trwa w transformatorze stan przejściowy. Stan ten przechodzi następnie w stan ustalony charakteryzujący się ustalonym prądem zwarcia, określonym zależnością:

$$I_z = \frac{U_1}{Z_z}$$

gdzie:

$U_1$  – napięcie znamionowe po stronie pierwotnej transformatora, w V;

$Z_z$  – impedancja zwarcia transformatora, w  $\Omega$ .

Napięcie zwarcia decyduje o: zakresie wahań napięcia strony wtórnej przy zmianach obciążenia, wartości prądu przy zwarcu, przydatności do pracy równoległej z innymi transformatorami.

Ustalona wartość prądu zwarcia dla dowolnej strony transformatora wynosi:

$$I_z = \frac{U_n}{Z_z} = I_n \frac{100}{u_z\%}$$

Z zależności tej wynika, że ustalony prąd zwarcia może być około  $8 \div 25$  razy większy niż prąd znamionowy

Moc pobierana w czasie zwarcia równa jest sumie strat:

$$P_z = \Delta P_{Cu} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_{iz} = U_z I_N \cos \varphi_2$$

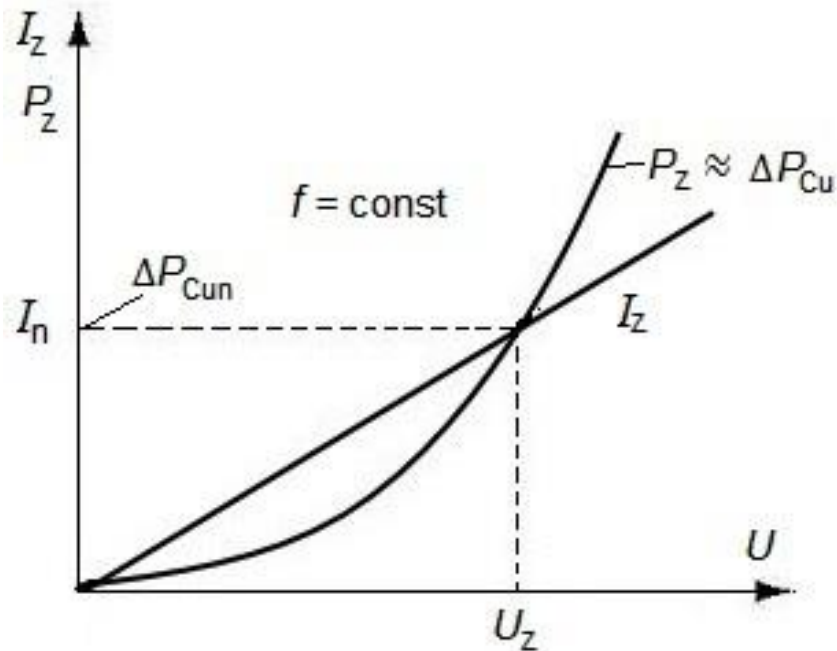
przy czym:

- straty w izolacji  $\Delta P_{iz}$  są pomijalnie małe,
- straty w uzwojeniach  $\Delta P_{Cu}$  zależą od wartości prądu, natomiast,
- straty w rdzeniu  $\Delta P_{Fe}$  zależą pośrednio od wartości napięcia zasilania.

Można przyjąć, że moc pobierana przez transformator w stanie zwarcia jest w przybliżeniu równa stratom w jego uzwojeniach (stratom w miedzi):

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

Charakterystykę zwarcia transformatora wyznacza się przyjmując, że rezystancja  $R_1 \approx R_2$ , natomiast straty w uzwojeniu strony pierwotnej są tego samego rzędu co straty w uzwojeniu strony wtórnej.



Charakterystyki zwarcia transformatora  
 $I_z = f(U), P_z = f(U)$ .

## TRANSFORMATORY ENERGETYCZNE

Transformatory energetyczne wielkich mocy stanowią podstawową grupę spośród wszystkich stosowanych transformatorów. Znajdują szerokie zastosowanie w systemie elektroenergetycznym – w podsystemach przesyłowym i rozdzielczym.

Pod względem mocy znamionowych transformatory energetyczne dzieli się na 3 grupy:

**I grupa** – transformatory o mocy większej niż 100 MVA lub transformatory o górnym napięciu nie mniejszym niż 220 kV,

**II grupa** – transformatory o mocy większej od 1600 kVA nie zaliczane do grupy I,

**III grupa** – transformatory o mocy nie większej niż 1600 kVA.

Bardzo dużą rolę w funkcjonowaniu systemu elektroenergetycznego spełniają trójfazowe transformatory energetyczne (zwane transformatorami mocy).

Ze względu na ich zastosowanie, charakterystykę i parametry pracy, transformatory energetyczne dzieli się na trzy podstawowe grupy:

- 1) **Transformatory blokowe** – stosowane w elektrowniach w celu podwyższenia napięcia wytworzonego w generatorze (nawet do 25 kV) do poziomu napięcia sieci przesyłowej (220 kV, 400 kV). Moc transformatora blokowego przekracza 1000 MVA;
- 2) **Transformatory sieciowe** – stosowane jako sprzęgające sieci przesyłowe lub jako transformatory obniżające napięcie sieci przesyłowej do wartości napięcia sieci rozdzielczej. Ich moce przekraczają 500 MVA;
- 3) **Transformatory rozdzielcze** – stosowane do obniżania napięcia sieci rozdzielczej do wartości napięcia 400/230 V. Moce transformatorów rozdzielczych wynoszą od 40 do 630 kVA, natomiast transformatory zasilające zakłady przemysłowe – od 250 do 1600 kVA.

## TRANSFORMATORY TRÓJFAZOWE

Przy przesyłaniu i rozdzielaniu energii elektrycznej w systemie elektroenergetycznych zasadniczą funkcję spełniają układy trójfazowe napięć i prądów. Znaczenie układów trójfazowych wynika z możliwości ekonomicznego wytwarzania, przetwarzania oraz przesyłania energii elektrycznej, a także z możliwości łatwego wytworzenia pól wirujących w maszynach elektrycznych trójfazowych prądu przemiennego.

Do przetwarzania napięć i prądów układów trójfazowych wykorzystuje się transformatory trójfazowe. To dzięki nim energia elektryczna stała się bardziej dostępna, gdyż umożliwiają one przesyłanie dużych energii na duże odległości przy niewielkich stratach.

Konieczność stosowania transformatorów przy przesyłaniu energii wynika stąd, że tę samą moc pozorną  $S$  można przesyłać liniami elektroenergetycznymi przy niskim napięciu  $U_1$  i dużym prądzie  $I_1$  lub przy wysokim napięciu  $U_2$  i małym prądzie  $I_2$ . Wynika to z zależności:

$$S = U_1 I_1 = U_2 I_2$$

Elektrownie podstawowe systemu elektroenergetycznego wytwarzają energię elektryczną o napięciu do 25 kV przy prądzie rzędu tysięcy amperów. Przesyłanie energii elektrycznej o takich parametrach powodowałoby ogromne straty (proporcjonalnie do kwadratu natężenia prądów).

Zasadniczy sposób zmniejszenia tych strat, przy użyciu transformatorów energetycznych, polega na podwyższeniu napięcia w liniach przesyłowych a następnie – stopniowemu obniżaniu w liniach rozdzielczych do poziomów napięć wymaganych dla zakładów przemysłowych i odbiorców do zasilania elektrycznych urządzeń na napięcie 230 lub 400 V.

Funkcjonowanie systemu elektroenergetycznego w takim układzie dostawy energii elektrycznej z elektrowni do odbiorców wymaga korzystania:

- 1) z systemowych stacji (NN),
- 2) wielu stacji rozdzielczych (WN)
- 3) rozlicznych stacji transformatorowych, zamieniających średnie napięcie (rozdzielcze) na powszechnie stosowane w instalacjach odbiorczych (230/400 V).

Transformatory są stosowane nie tylko w energetyce zawodowej, lecz także wszędzie tam, gdzie zachodzi potrzeba zmiany wartości napięcia lub prądu w obwodach prądu przemiennego.

## TRÓJFAZOWY UKŁAD TRANSFORMACJI

Trójfazowy układ transformacji można utworzyć przez zestawienie i odpowiednie połączenie ze sobą trzech transformatorów jednofazowych lub stosując równoważny układ trójkolumnowy.

Rdzenie transformatorów trójfazowych mogą być wykonane jako symetryczne, w których strumienie magnetyczne każdej fazy mają równe drogi w kolumnach lub wykonane jako asymetryczne, po umieszczeniu wszystkich trzech kolumn rdzenia w jednej płaszczyźnie. Strumienie magnetyczne każdej fazy w układzie asymetrycznym mają różne drogi w kolumnach.

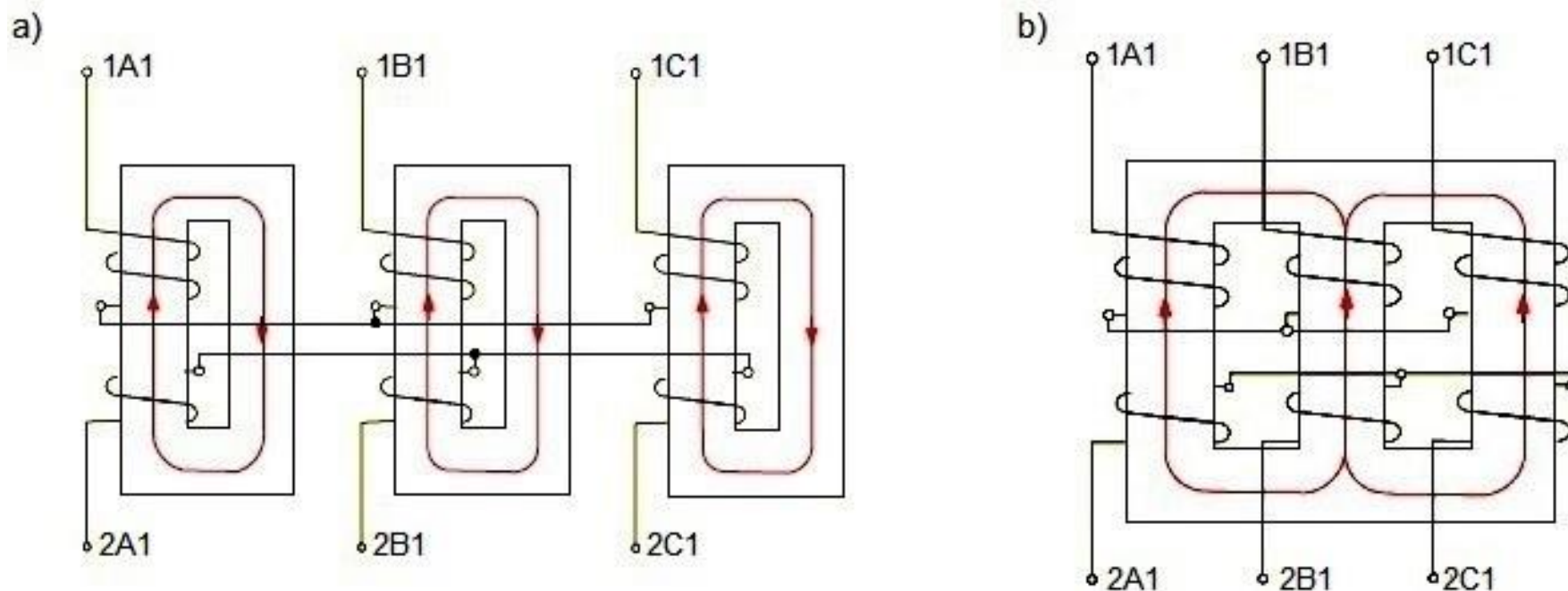
Rdzenie transformatorów wykonuje się z blach transformatorowych o grubości 0,3 do 0,5 mm, pokrytych cienką warstwą materiału izolacyjnego (najczęściej lakieru, papieru lub szkła wodnego), złożone w pakiety. Odizolowanie od siebie poszczególnych blach ogranicza przepływ prądów wirowych i zapobiega nadmiernemu nagrzewaniu się rdzenia. Na każdej kolumnie umieszcza się uzwojenie pierwotne i wtórne wykonane z przewodów miedzianych izolowanych.

Na kolumnach rdzenia są osadzone uzwojenia pierwotne i wtórne transformatora, wykonane z przewodów miedzianych izolowanych najczęściej oprzędem lub oplotem z taśm

Uzwojenie górnego napięcia jest podzielone na kilka cewek, między którymi pozostawia się szczeliny umożliwiające lepsze chłodzenie. Uzwojenie dolnego napięcia powinno być dokładnie odizolowane od uzwojenia górnego napięcia. Aby zmniejszyć straty powstające w wyniku nierównomiernego rozkładu prądu w przewodzie o dużym przekroju (zjawisko naskórkowości), stosuje się przewody dzielone na kilka gałęzi równoległych.

Poszczególne gałęzie muszą mieć jednakowe rezystancje (czyli jednakowe długości) oraz jednakowe reaktancje (muszą być jednakowo położone względem strumienia rozproszenia).

Zastosowanie odpowiedniego sposobu nawijania uzwojenia (dzielenie na cewki oddzielone przekładkami) znacznie polepsza warunki chłodzenia uzwojenia. Dla ułatwienia chłodzenia rdzenia między pakietami blach zostawia się wolne przestrzenie, które tworzą kanały wentylacyjne pozwalające na obieg czynnika chłodzącego.



## Trójfazowy układ transformacji

- a) składający się z trzech połączonych transformatorów jednofazowych,
- b) stosowany jako równoważny układ trójkolumnowy transformatora trójfazowego.

## CHŁODZENIE TRANSFORMATORÓW

Ze względu na rodzaj czynnika chłodzącego transformatory energetyczne dzieli się na następujące grupy:

- transformatory powietrzne (chłodzone powietrzem),
- transformatory olejowe (chłodzone olejem),
- transformatory suche.

**1) Transformatory powietrzne** są najczęściej chłodzone w obiegu otwartym, w którym powietrze chłodzące jest pobierane bezpośrednio z otoczenia transformatora. Transformatory takie są stosowane przeważnie w pomieszczeniach zagrożonych pożarem;

**2) Transformatory olejowe**, rdzeń wraz z uzwojeniami, są umieszczone w kadzi wypełnionej olejem transformatorowym. Kadź transformatora jest wykonana z blachy, przy czym dno i pokrywa są wzmocnione (zawsze grubsze od ścianek bocznych). Nagrzany w czasie pracy transformatora olej ma mniejszą gęstość i wskutek konwekcji unosi się, by następnie płynąć wzdłuż ścianek kadzi lub wewnątrz rurek chłodzących wychodzących na zewnątrz i opadać w kierunku dna w miarę obniżania się temperatury. Olej oddaje ciepło do otoczenia przez ścianki kadzi. Wypełnia on kanały chłodzące w rdzeniu i między uzwojeniami spełniając jednocześnie rolę czynnika chłodzącego i izolacyjnego.

Właściwości fizykochemiczne **oleju transformatorowego** muszą spełniać wysokie wymagania. Stąd stały nadzór nad jakością oleju stanowi niezwykle ważny element w eksploatacji transformatorów.

W transformatorach małej mocy wystarcza chłodzenie naturalne oleju, które uzyskuje się przez zwiększenie zewnętrznej powierzchni kadzi, np: rury chłodzące, radiatory itp.

W transformatorach dużej mocy stosuje się chłodzenie olejowe z przewietrzaniem wymuszonym za pomocą wentylatorów powietrznych wzmagających ruch powietrza, a więc przyspieszających odbieranie ciepła od kadzi.

W transformatorach blokowych najwyższej mocy stosuje się chłodzenie wodno – olejowe, przy którym olej jest przetaczany w obiegu przez znajdującą się na zewnątrz chłodnicę wodną.

**3) Transformatory suche** – rdzeń z uzwojeniami znajduje się w powietrzu lub w izolacji żywicznej. Stosowane coraz częściej o mocach nawet do 4 MVA.

## UKŁADY I GRUPY POŁĄCZEŃ TRANSFORMATORÓW TRÓJFAZOWYCH

W transformatorach trójfazowych stosowane są trzy układy połączeń: w gwiazdę, trójkąt i zygzak. Połączenia te posiadają określone symbole graficzne i literowe oraz znormalizowane oznaczenia końcówek wyprowadzeń uzwojenia pierwotnego i wtórnego. Oznaczenia te są następujące:

- a) końce uzwojeń transformatora oznacza się dużymi literami A, B, C, a przewód neutralny – N,
- b) 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 napięcia, 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.

Uzwojenie pierwotne i wtórne transformatora są zwykle łączone w gwiazdę (Y,y) lub w trójkąt (D, d), co oznacza się odpowiednimi.

Układ gwiazda-zygzak (Y,z) spotyka się często w układach oświetleniowych ze względu na wynikającą z tego rozwiązaniem większą równomierność obciążenia po stronie wtórnej.

Układ połączeń	Schemat połączeń	Symbol graficzny	Oznaczenie literowe uzwojenie		Wyszczególnienie
			górne	dolne	
Gwiazda			Y	y	<p>Początki lub końce uzwojenia są wyprowadzone i przyłączone do zacisków. Początkami uzwojeń na jednej kolumnie nazywa się umownie zaciski, które dla pewnej wybranej chwili mają wyższy potencjał od drugich zacisków w parach przynależnych do danego uzwojenia.</p> $U = \sqrt{3} \cdot U_f, \quad I = I_f$
Trójkąt			D	d	<p>Powstaje przez połączenie końca pierwszej fazy z początkiem drugiej, końca drugiej z początkiem trzeciej, a końca trzeciej z początkiem pierwszej.</p> $U = U_f, \quad I = \sqrt{3} \cdot I_f$
Zygzak			—	z	<p>Układ ten umożliwia rozłożenie przepływu wywołanego prądem jednej fazy na dwie kolumny. Połączenie w zygzak tworzy się, łącząc szeregowo dwie połówki uzwojenia umieszczone na dwóch kolumnach w sposób cykliczny (obie połówki uzwojenia muszą być połączone przeciwnie). Wolne końce jednych połówek łączy się w gwiazdę, natomiast wolne końce drugich połówek wyprowadza się na tabliczkę zaciskową.</p> $U_f = \frac{\sqrt{3}}{2} U, \quad I_f = I$

## PRZEKŁADNIE I GRUPY POŁĄCZEŃ TRANSFORMATORA

Przekładnią napięciową transformatora trójfazowego  $n_z$  nazywa się stosunek wartości skutecznych znamionowych napięć międzyprzewodowych (międzyfazowych) strony wyższego napięcia  $U_1$  i niższego napięcia  $U_2$ . Jest to często wartość inna niż wartość przekładni zwojowej określającej stosunek liczby zwojów  $z_1$  i  $z_2$ .

W zależności od układu połączeń uzwojeń transformatora przekładnię napięciową  $n_u$  można wyrazić za pomocą przekładni zwojowej  $z_1/z_2$  w następujący sposób:

$$\text{Dla układu Yy przekładnia napięciowa } n_u = \frac{U_1}{U_2} = \frac{U_{1f}}{U_{2f}} \approx \frac{z_1}{z_2}$$

$$\text{Dla układu Dy przekładnia napięciowa } n_u = \frac{U_1}{U_2} = \frac{U_{1f}}{\sqrt{3}U_{2f}} \approx \frac{z_1}{\sqrt{3}z_2}$$

Dla układu Yd przekładania napięciowa  $n_u = \frac{U_1}{U_2} = \frac{\sqrt{3}U_{1f}}{U_{2f}} \approx \frac{\sqrt{3}z_1}{z_2}$

Dla układu Yz przekładnia napięciowa  $n_u = \frac{U_1}{U_2} = \frac{\sqrt{3}U_{1f}}{\frac{3}{2}U_{2f}} \approx \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{z_1}{z_2}$

Dla układu Dz przekładnia napięciowa  $n_u = \frac{U_1}{U_2} = \frac{U_{1f}}{\frac{3}{2}U'_{2f}} \approx \frac{2}{3} \frac{z_1}{z_2}$

gdzie:

$U_1, U_2$  – napięcie międzyprzewodowe;

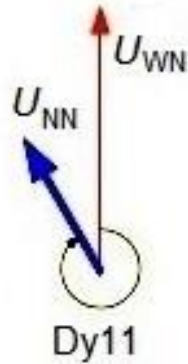
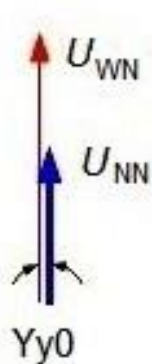
$U_{1f}, U_{2f}$  – napięcie fazowe;

$U'_{2f}$  – napięcie połowy zwojów fazy przy połączeniu w zygzak.

## GRUPY POŁĄCZEŃ TRANSFORMATORA

Grupą połączeń transformatora nazywany jest kąt między wektorami górnego i dolnego napięcia, wyrażony w godzinach. Zestawiając różne układy połączeń uzwojeń po obu stronach transformatora, otrzymuje się różne grupy połączeń transformatorów trójfazowych. Ma to istotny wpływ na charakter magnesowania rdzenia transformatora trójfazowego.

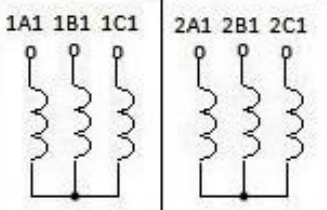
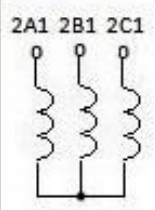
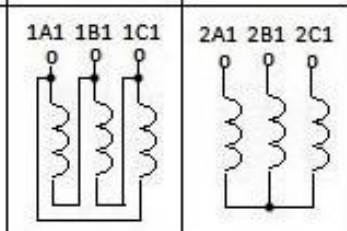
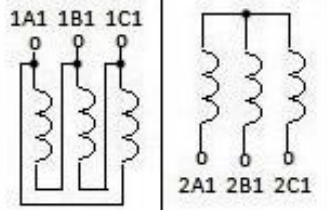
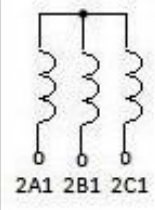
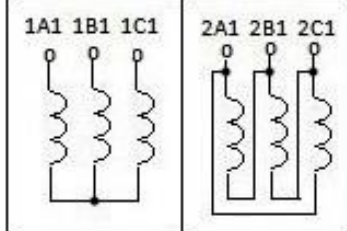
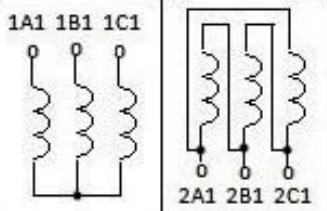
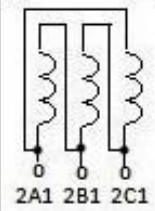
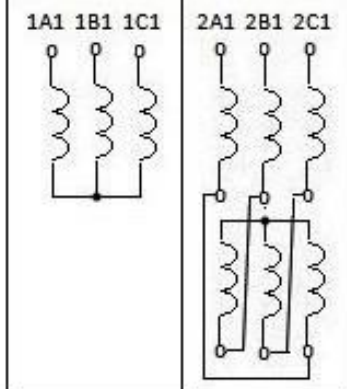
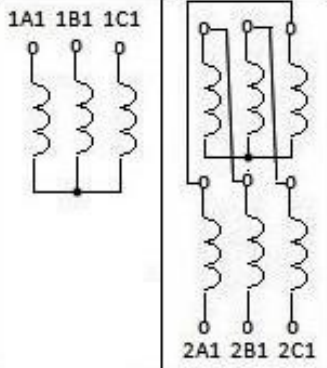
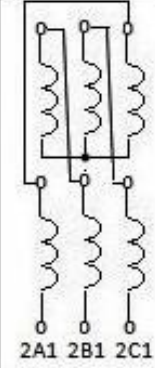
W zależności od sposobu połączeń obu uzwojeń transformatora można uzyskać różne przesunięcia fazowe między napięciami po stronie wysokiego i niskiego napięcia



Dla układów gwiazda, trójkąt i zygzak kąty przesunięcia fazowego są zawsze wielokrotnością kąta  $30^\circ$ . Kątowi  $30^\circ$  odpowiada jedna godzina, dlatego wygodniej jest podawać przesunięcie fazowe między napięciami jako tzw. przesunięcie godzinowe (np. grupa Dy11 = kątowi przesunięcia fazowego  $330^\circ$ ). 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.

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, którego jedno z uzwojeń jest połączone w gwiazdę, natomiast drugie w trójkąt. Równie dużo grup połączeń można uzyskać przy łączeniu jednego z uzwojeń transformatora w gwiazdę, a drugiego w zygzak.

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

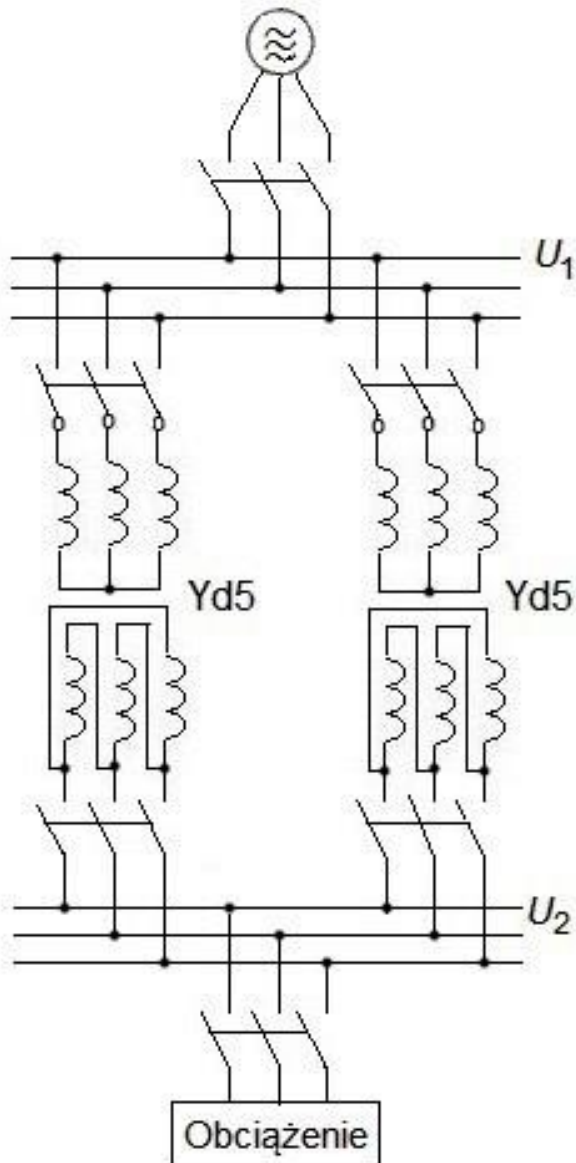
Praca równoległa transformatorów wymaga ograniczenia grup połączeń. Zaleca się stosowanie tylko następujących grup połączeń: Yy9, Dy5, Yd5, Yz5, Dy11, Yd11 oraz Yz11

Przy różnych prądach przewodowych prądy fazowe układu połączeń w trójkąt są  $\sqrt{3}$  razy mniejsze niż układu połączeń w gwiazdę lub 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. Porównując połączenie gwiazdy z zygzakiem, dochodzi się do wniosku, że przy takich samych prądach znamionowych przekroje przewodów są takie same, a stosunek liczby zwojów na jednej kolumnie zygzaka jest taki sam, jak stosunek sumy napięć obu połówek zygzaka do napięcia fazowego gwiazdy np:

$$\frac{Z_z}{Z_g} = \frac{2U}{U_f} = \frac{2 \frac{U_f}{\sqrt{3}}}{U_f} = \frac{2}{\sqrt{3}} \approx 1,15$$

Liczba zwojów połączenia w zygzak  $z_z$  jest więc przy takim samym napięciu międzyfazowym  $2\sqrt{3}$  razy większa od liczby zwojów połączenia w gwiazdę  $z_g$ . Koszty budowy transformatora trójfazowego o różnych układach połączeń uzwojeń można oszacować, porównując wartości napięć międzyfazowych dla tego samego transformatora, przy zastosowaniu różnych układów połączeń.

## PRACA RÓWNOLEGLA TRANSFORMATORÓW



Często zachodzi potrzeba wykorzystania co najmniej dwóch transformatorów pracujących w układzie równoległym.

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 przyłączone również do wspólnych szyn zbiorczych.

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.

Transformatory spełniające warunki pracy równoległej obciążają się proporcjonalnie do ich mocy znamionowych.

Ponadto przy pracy równoległej jest możliwa bardziej elastyczna eksploatacja 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  $\cos\varphi$  ze względu na pobór prądu magnesującego (o charakterze indukcyjnym).

Dla zapewnienia poprawnej pracy równoległej transformatorów pod względem ekonomicznym oraz dla stworzenia możliwości pełnego wykorzystania ich mocy znamionowych konieczne jest spełnienie następujących warunków:

- równość przekładni transformatorów ( $\pm 0,5\%$ ),
- jednakowe grupy połączeń,
- równość napięć zwarcia ( $\pm 10\%$ ),
- stosunek mocy znamionowych nie większy niż 3 : 1.

**Zalety:**

- mniejsze koszty eksploatacyjne,
- łatwiejszy transport,
- większa niezawodność pracy układu,
- mniejszy koszt rezerwy.

**Wady:**

- wyższe koszty inwestycyjne,
- potrzebna większa powierzchnia do zainstalowania i eksploatacji.

## SPRAWNOŚĆ TRANSFORMATORÓW

Sprawnością transformatora nazywa się stosunek mocy czynnej wydawanej  $P_2$  do mocy czynnej pobieranej  $P_1$ :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_{\text{Fe}} + \Delta P_{\text{Cu}}}$$

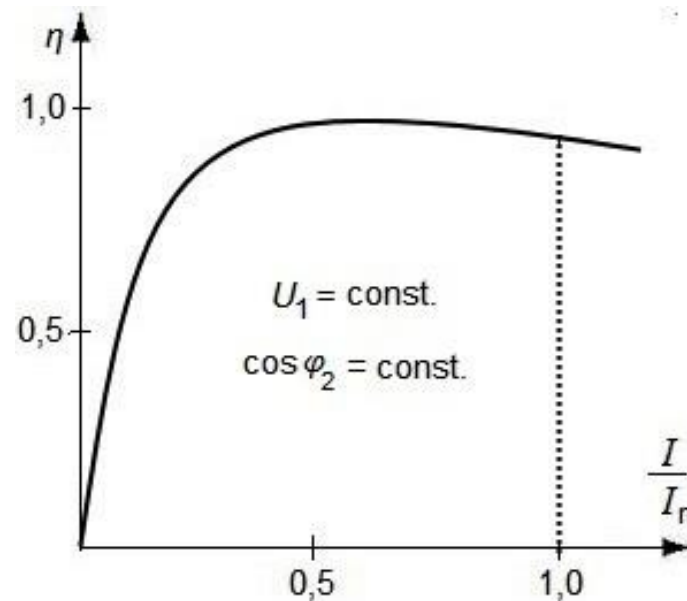
Przy obciążeniu prądem znamionowym  $I_n$ :

$$\eta = \frac{U_n I_n \cos \varphi_n}{U_n I_n \cos \varphi_n + \Delta P_{0n} + \Delta P_{zn}}$$

Przy obciążeniu prądem  $I$ :

$$\eta = \frac{k U_n I_n \cos \varphi_n}{k U_n I_n \cos \varphi_n + \Delta P_{0n} + k^2 \Delta P_{zn}}$$

gdzie:  $k = \frac{I}{I_n}$



Charakterystyka sprawności transformatora

Straty mocy w uzwojeniach  $\Delta P_{Cu}$ , przy obciążeniu dowolnym prądem  $I$ , oblicza się według wzoru:

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

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

$$\Delta P_{\text{Cu}} = \Delta P_{\text{fe}}$$

Wykorzystując tę zależność można napisać:

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

Zatem maksymalna sprawność transformatora wystąpi przy obciążeniu:

$$I_{2(\eta_{\text{max}})} = I_{\text{N}} \sqrt{\frac{\Delta P_{\text{Fe}}}{\Delta P_{\text{CuN}}}}$$

Wynika stąd, że jeżeli transformator pracuje z maksymalną sprawnością przy obciążeniu mocą znamionową, to znamionowe straty w stanie zwarcia muszą być równe znamionowym stratom jałowym.

W praktyce transformatory pracują przy obciążeniu mniejszą mocą od znamionowej, dlatego straty jałowe powinny być mniejsze od strat obciążeniowych:

$$\Delta P_{\text{Fe}} = (0,2 \div 0,7) \Delta P_{\text{Cu}}$$

# STACJE ELEKTROENERGETYCZNE

## POJĘCIA I DEFINICJE PODSTAWOWE

Stacje elektroenergetyczne posiadają pewien specyficzny zbiór pojęć oraz definicji podstawowych, a mianowicie:

**Rozdzielnica** – to podstawowy zespół szyn zbiorczych, pól i urządzeń rozdzielczych, zabezpieczeniowych, pomiarowych, sterowniczych i sygnalizacyjnych, które wraz z elementami izolacyjnymi, wsporczymi i osłonowymi, tworzą układ zdolny do rozdzielania energii elektrycznej, przy jednym napięciu znamionowym;

**Rozdzielnia** – to wyodrębniona część stacji elektroenergetycznej zajmująca wydzielone pomieszczenie, zespół pomieszczeń lub wydzielony teren, gdzie znajduje się zespół urządzeń rozdzielczych o określonym napięciu wraz z urządzeniami pomocniczymi;

**Pole rozdzielcze** – to zespół aparatów zabezpieczeniowych, łączeniowych, sterowniczych pomiarowych oraz innych urządzeń pomocniczych związanych z rozdziałem i przesyłem energii elektrycznej. Wyposażenie pola zależy od spełnianej przez nie funkcji, od napięcia znamionowego i wymaganej niezawodności pracy;

---

**Szyny zbiorcze** to zespół szyn sztywnych lub przewodów, do których przyłączone są elektrycznie poszczególne pola rozdzielcze.

## STACJE ELEKTROENERGETYCZNE

Stacja elektroenergetyczna jest podstawowym węzłem sieci elektroenergetycznej, składającym się z zespołu urządzeń elektroenergetycznych służących do przetwarzania lub transformacji energii elektrycznej dla celów przesyłania w systemie, rozdziału energii elektrycznej w sieciach rozdzielczych i obniżania napięcia do poziomu, na którym możliwe jest stosowanie elektrycznych urządzeń powszechnego użytku.

W dużych stacjach występują ponadto wydzielone pomieszczenia wyposażone w odpowiednią aparaturę kontrolno - pomiarową, urządzenia i elementy sterownicze oraz wskaźniki stanu połączeń i pracujących elementów stacji. Głównymi urządzeniami w stacjach elektroenergetycznych są rozdzielnice, transformatory i nastawnie.

Przesyłanie, rozdział i odbiór energii elektrycznej wymaga korzystania:

- a) z systemowych stacji elektroenergetycznych (NN),
- b) stacji rozdzielczych (WN)
- c) rozlicznych stacji transformatorowych zamieniającymi średnie napięcie (SN) na napięcie powszechnie stosowane w instalacjach odbiorczych (230/400 V).

Z rozdzielaniem energii elektrycznej w stacji wiążą się takie funkcje jak: regulacja napięcia w sieci, kompensacja mocy biernej, utrzymanie warunków zwarciovych na właściwym poziomie oraz wyłączanie i włączanie elementów sieci (linii i transformatorów).

Stacje elektroenergetyczna można scharakteryzować za pomocą takich danych jak: funkcja stacji, napięcie lub napięcia znamionowe, prąd lub prądy znamionowe, wytrzymałość zwarciova, liczba pól rozdzielnic, liczba transformatorów.

## OBWODY I URZĄDZENIA STACJI ELEKTROENERGETYCZNEJ

W skład stacji (rozdzielni) elektroenergetycznej wchodzi następujące obwody i urządzenia:

1) **obwody główne** – składające się z doprowadzonych do stacji linii elektroenergetycznych, rozdzielnic głównej oraz przyłączonych do szyn zbiorczych urządzeń głównych stacji;

2) **obwody wtórne (niskonapięciowe)** – obejmujące wszystkie elementy, w których w warunkach normalnych płyną prądy proporcjonalne do prądów w obwodach głównych. W skład obwodów pomocniczych wchodzi układy zabezpieczeń, automatyki, pomiarów, telesterowania i telepomiarów;

3) **urządzenia pomocnicze** – umożliwiające prawidłową pracę stacji. Do urządzeń pomocniczych zalicza się instalacje i dodatkowe źródła prądu, instalacje sprężonego powietrza, oświetlenie i ogrzewanie elektryczne;

4) **instalacje ochronne** – to stosowane elementy ochrony przeciwporażeniowej, odgromowej, przeciwprzebieciowej i przeciwpożarowej.

## KLASYFIKACJA UKŁADÓW POŁĄCZEŃ STACJI ELEKTROENERGETYCZNYCH

Układy połączeń stacji elektroenergetycznych można podzielić, ze względu na budowę, na dwie zasadnicze grupy: na układy szynowe (zawierające wyodrębnione szyny zbiorcze) i układy bezszynowe.

W obrębie układów szynowych wyróżnia się układy:

- a) jednosystemowe,
- b) dwusystemowe,
- c) trójsystemowe.

Dodatkowo każdy układ szynowy stacji może być sekcjonowany (dzielony na sekcje) oraz uzupełniony o dodatkowe pomocnicze (obejściowe) szyny zbiorcze.

W obrębie układów bezszynowych wyróżnia się układy:

- a) blokowe,
- b) mostkowe,
- c) wielobokowe.

Układy połączeń stacji elektroenergetycznych można sklasyfikować następująco:

## **Układ szynowy:**

### **1) jednosystemowy**

- niesekcjonowany,
- niesekcjonowany z szyną pomocniczą,
- sekcjonowany,
- sekcjonowany z szyną pomocniczą;

### **2) dwusystemowy**

- niesekcjonowany,
- niesekcjonowany z szyną pomocniczą,
- sekcjonowany,
- sekcjonowany z szyną pomocniczą;

### **3) trójsystemowy**

- niesekcjonowany,
- niesekcjonowany z szyną pomocniczą,
- sekcjonowany,
- sekcjonowany z szyną pomocniczą.

## Układ bezszynowy:

### 1) blokowy

- jednoblokowy,
- dwublokowy;

### 2) mostkowy typu H

- uproszczony,
- pełny;

### 3) wieloblokowy.

## UKŁADY SZYNOWE

### **Pola rozdzielcze**

Rozdzielnica jest podstawowym elementem stacji elektroenergetycznej, złożona z pól rozdzielczych spełniających określone funkcje. Wyposażenie takiego pola zależy, oprócz spełnianej przez nie funkcji, także od napięcia znamionowego i wymaganej niezawodności pracy.

W zależności od przeznaczenia w stacjach elektroenergetycznych wyróżnia się następujące pola:

- 1) liniowe,
- 2) transformatorowe,
- 3) łączników szyn (sekcyjne i systemowe),
- 4) pomiarowe,
- 5) potrzeb własnych,
- 6) ograniczników przepięć (odgromnikowe),
- 7) inne, wg potrzeb.

Wymaga się zachowania ustalonej kolejności instalowania podstawowych aparatów:

a) w polach liniowych: SZ – OS – W – PI – PU – OL,

b) w polach transformatorowych: SZ – OS – W – PI – OT,

gdzie:

SZ – szyny zbiorcze;

OS – odłącznik szynowy;

W – wyłącznik;

PI – przekładnik prądowy;

PU – przekładnik napięciowy;

OL – odłącznik liniowy;

OT – odłącznik transformatorowy.

W uzasadnionych przypadkach dopuszcza się zastosowanie innej kolejności.

## POLA LINIOWE

Pola liniowe łączą linie elektroenergetyczne do szyn zbiorczych. Pola te mogą być napowietrzne lub kablowe, dopływowe (zasilające) i odpływowe (odbiorcze).

W stacjach średniego napięcia (SN) pola liniowe wyposaża się, zamiast wyłącznika, w bezpieczniki i rozłączniki lub bezpieczniki i odłączniki. W uproszczonym rozwiązaniu rozłącznik przerywa prąd roboczy, a bezpiecznik prąd zwarciový. Możliwe są dwa sposoby współpracy rozłącznika z bezpiecznikiem, tj. praca niezależna obu urządzeń lub pobudzenie rozłącznika poprzez wybijak bezpiecznika w rozłączniku bezpiecznikowym. Dalsze uproszczenie przedstawia rysunek 1a, gdzie odłącznik przerywa prądy jałowe (pojemnościowe linii), a obciążenie wyłącza się w stacji na końcu linii.

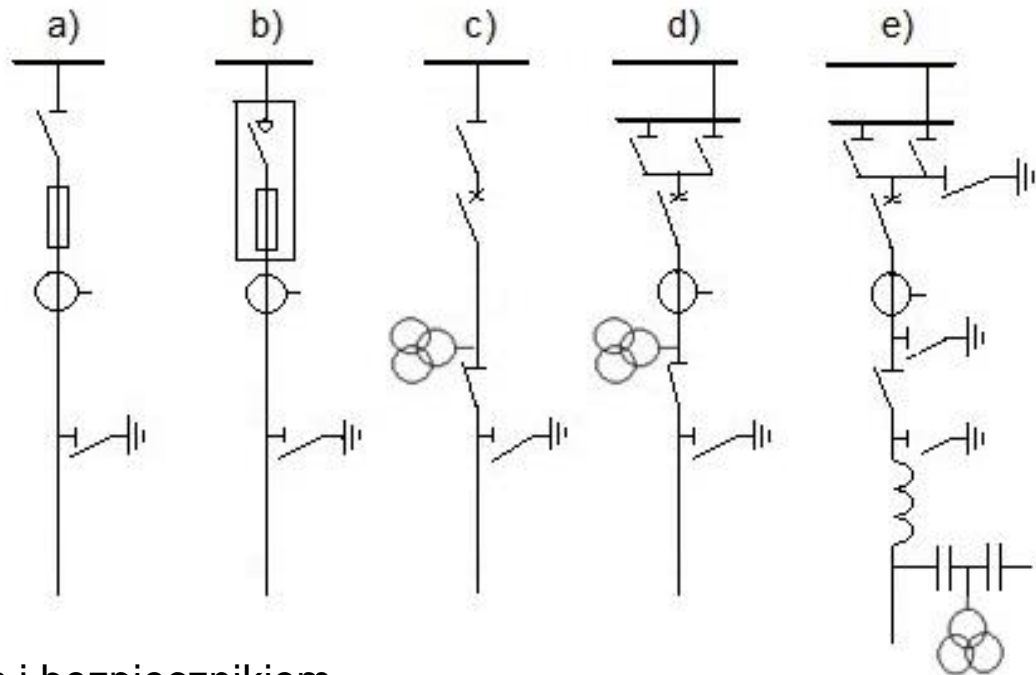
Pola liniowe odpływowe 110 kV w układzie z pojedynczym i podwójnym systemem szyn zbiorczych wyposaża się w przekładniki napięciowe za przekładnikami prądowymi. Umożliwia to przeprowadzenie synchronizacji lub stwierdzenie napięcia w linii.

W polach liniowych stacji wysokich napięć i najwyższych napięć oraz w rozdzielniach średniego napięcia z rozdzielnicami jednoczłonowymi stosowane są zawsze odłączniki od strony szyn zbiorczych, przed wyłącznikami, nazywane odłącznikami szynowymi.

W polach liniowych, w których możliwe jest pojawienie się napięcia z obydwu stron wyłącznika oraz w liniach napowietrznych stosuje się odłączniki za wyłącznikami, zwane odłącznikami liniowymi. Dostęp do wyłącznika jest możliwy po wyłączeniu pola zarówno od strony szyn, jak i od strony linii. W ten sposób zapewnia się również ochronę przed przepięciami pochodzenia atmosferycznego. W liniach kablowych, zasilanych tylko z szyn zbiorczych, wystarcza tylko jeden odłącznik, zainstalowany pomiędzy szynami a wyłącznikiem.

Przekładniki napięciowe kondensatorowe w tym polu i w innych polach liniowych 220 kV i 400 kV są często instalowane za odłącznikiem liniowym (patrząc od strony szyn zbiorczych), gdyż są również wykorzystywane jako połączenie urządzeń wysokiej częstotliwości z linią.

W polach liniowych 220 kV, z racji uciążliwości stosowania uziemiaczy przenośnych, stosuje się powszechnie noże uziemiające na odłącznikach, a gdy nie ma takiej możliwości – uziemniki. Najczęściej stosuje się noże uziemiające tylko na jednym z odłączników szynowych.



### Pola liniowe

- a) SN uproszczone z odłącznikiem i bezpiecznikiem,
- b) SN uproszczone z rozłącznikiem i bezpiecznikiem (rozłącznikiem bezpiecznikowym),
- c) 110 kV odpywowe (odbiorcze) w układzie z pojedynczym systemem szyn zbiorczych,
- d) 110 kV odpywowe (odbiorcze) w układzie z podwójnym systemem szyn zbiorczych,
- e) 220 kV odpywowe (odbiorcze) w układzie z podwójnym systemem szyn zbiorczych.

W polach rozdzielnic dwuczłonowych wyłącznik jest instalowany na specjalnym członie ruchomym (wózku). Przy wysuniętym członie ruchomym tworzą się widoczne przerwy izolacyjne, dzięki czemu możliwe jest w tych rozwiązaniach wyeliminowanie odłączników.

Stosowane są specjalne blokady uniemożliwiające przykładowo wysunięcie wózka przy załączonym wyłączniku.

Przekładniki są instalowane poza członem ruchomym. Konstrukcje rozdzielnic dwuczłonowych w stacjach o podwójnym systemie szyn zbiorczych wykonuje się przeważnie w wersji z odłącznikami, rzadziej spotykane są dwa pola z wyłącznikami

Oznaczenia:

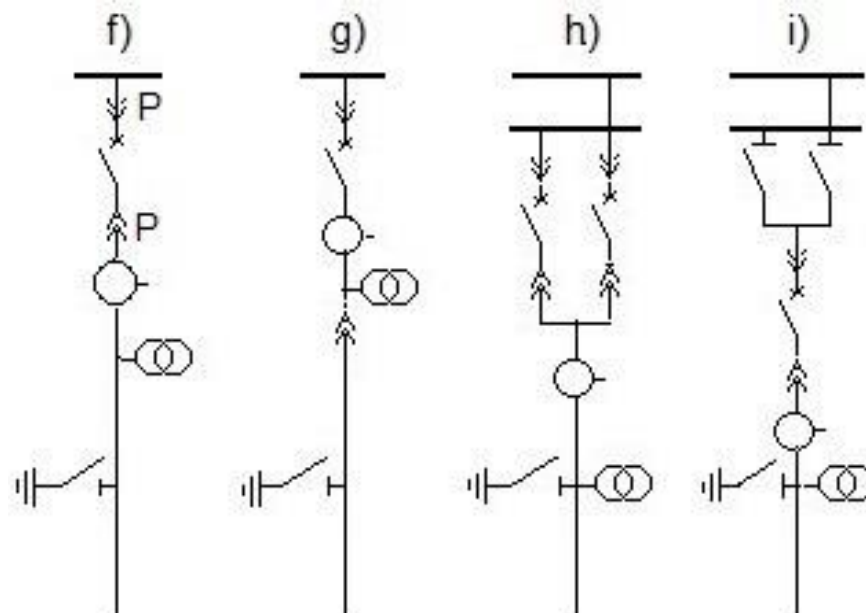
P – połączenie szczękowe części stałej z częścią ruchomą,

f – w układzie z pojedynczym systemem szyn zbiorczych i wyłącznikiem w członie ruchomym,

g – w układzie z wyłącznikiem i kompletem przekładników w członie ruchomym,

h – w układzie z podwójnym systemem szyn zbiorczych i dwoma wyłącznikami na jedno pole,

i – w układzie z podwójnym systemem szyn zbiorczych.



## POLA TRANSFORMATOROWE

Pola transformatorowe służą do połączenia uzwojeń transformatora z układem szyn zbiorczych. Kolejność umieszczania elementów obwodu głównego w polu transformatora jest taka sama jak w polach liniowych.

Pole transformatorowe SN dla transformatora dwuuzwojeniowego w rozdzielnicy z podwójnym systemem szyn zbiorczych przedstawia rysunek 3b. W polu tym występują dwa odłączniki szynowe umożliwiające przyłączenie transformatora do określonego systemu szyn zbiorczych.

Jeżeli przewiduje się pracę transformatora przy wyłączonym uzwojeniu jednego napięcia, to wymagany jest odłącznik transformatorowy dla transformatora trójuzwojeniowego. Możliwe jest wtedy pojawienie się na wyłączniku napięcia pochodzącego od transformatora pracującego jako dwuuzwojeniowy. Dostęp do wyłącznika jest możliwy dopiero po otwarciu obu odłączników znajdujących się bezpośrednio przy nim.

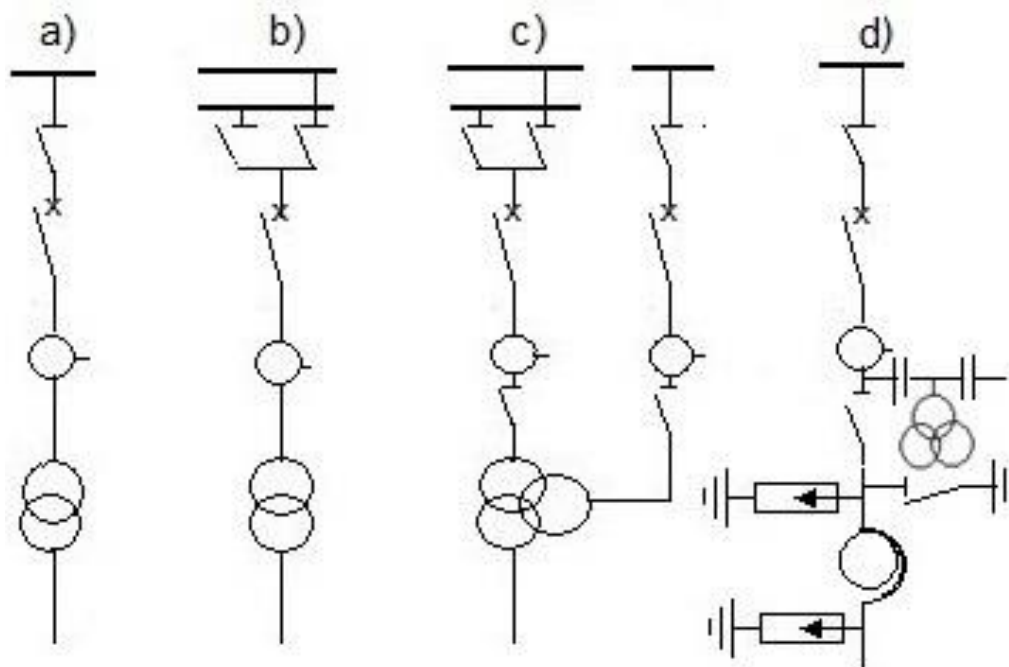
Podobnie jak w polach liniowych, stosuje się powszechnie pola transformatorowe uproszczone.

W zależności od mocy znamionowej transformatora i wymagań odbiorców, wyłącznik może być zastąpiony układem rozłącznik – bezpiecznik lub odłącznik bezpiecznik.

Pola transformatorowe w stacjach średnich, wysokich i najwyższych napięć są wyposażone w wyłączniki.

W polach transformatorowych z transformatorami dwuuzwojeniowymi odłączniki instaluje się jedynie od strony szyn zbiorczych. Natomiast w przypadku transformatorów trójuzwojeniowych odłączniki należy instalować po obydwu stronach wyłączników. Dostęp do wyłącznika jest możliwy dopiero po otwarciu obydwu odłączników, zarówno od strony szyn, jak i od transformatora, który po wyłączeniu jednego uzwojenia może nadal pracować jako dwuuzwojeniowy.

Podobne rozwiązania stosuje się w polach transformatorowych WN i NN. Pola te zawierają ograniczniki przepięć usytuowane bezpośrednio przy transformatorze lub chroniące punkt neutralny transformatora oraz odłączniki w punkcie neutralnym umożliwiające zmianę wartości składowej symetrycznej zerowej prądu zwarciovego.



Oznaczenia:

- a) SN w rozdzielnicy z pojedynczym systemem szyn zbiorczych,
- b) SN dla transformatora dwuuzwojeniowego z rozdzielnicą z podwójnym systemem szyn zbiorczych,
- c) SN dla transformatora trójuzwojeniowego,
- d) WN i NN dla autotransformatora.

Pole liniowe i transformatorowe stacji średnich napięć, zwłaszcza stacji pracujących w sieciach komunalnych, wyposaża się często jedynie w bezpieczniki i rozłącznik, przeznaczony do włączania i wyłączania prądów roboczych. Dalszym uproszczeniem rozwiązania jest zastosowanie odłączników zamiast rozłączników, co jest typowym rozwiązaniem w terenowych stacjach słupowych.

Prądy obciążeniowe są wtedy włączane po stronie niskiego napięcia, a odłącznik musi mieć zdolność łączeniową wystarczającą do przzerwania prądu pracy jałowej transformatora. Ze względu na niewielkie wartości prądów znamionowych bezpieczników wysokiego napięcia, rozwiązanie pól transformatorowych z bezpiecznikami może być stosowane tylko przy stosunkowo niewielkich mocach znamionowych transformatorów.

## POLA POMIAROWE I ODGROMNIKOWE

W niektórych rozdzielnicach stosuje się pola pomiarowe wyposażone w odłącznik, zabezpieczenie oraz przekładniki napięciowe i ewentualnie w przekładniki prądowe.

W rozwiązaniach praktycznych w poszczególnych polach stosuje się od 2 do 4, a niekiedy nawet więcej, szeregowo połączonych przekładników prądowych lub jeden przekładnik wielordzeniowy, o różnych mocach znamionowych i klasach dokładności poszczególnych uzwojeń.

Przekładniki prądowe i napięciowe umieszcza się w taki sposób, aby zwarcie wewnętrzne w przekładniku mogło być wyłączone przez wyłącznik lub bezpiecznik zainstalowany w tym polu i nie powodowało zakłóceń w pracy innych elementów rozdzielnicy.

Przekładniki napięciowe średniego napięcia przyłącza się do szyn za pośrednictwem odłączników i bezpieczników chroniących szyny przed zwarciami w samych przekładnikach. W rozdzielniach o napięciu znamionowym 110 kV i wyższym przekładniki napięciowe przyłącza się do szyn za pomocą odłączników. W przypadkach zwarć w uzwojeniach pierwotnych przekładników muszą w tych układach działać wyłączniki w polach zasilających.

Przekładniki napięciowe pojemnościowe o napięciu 220 kV i 400 kV są często instalowane przed odłącznikiem liniowym, od strony linii.

Pola odgromnikowe stosuje się w przypadku potrzeby stosowania ochrony przed wyładowaniami atmosferycznymi stacji transformatorowej. Jeżeli ochrona przed przepięciami jest konieczna, wówczas ochronniki przeciwprzepięciowe umieszcza się w specjalnie przygotowanym polu przyłączonym do szyn zbiorczych przez odłącznik.

Ze względów eksploatacyjnych korzystne jest szerokie stosowanie uzienników umożliwiających łatwe uzimianie odpowiednich fragmentów linii i rozdzielnic podczas przeglądów konserwacyjnych i prac remontowych aparatów i urządzeń wysokiego napięcia. W stacjach o napięciu znamionowym od 110 kV do 400 kV stosuje się taką liczbę uzienników, aby całkowicie wyeliminować stosowanie uzieniaczy przenośnych.

## UKŁADY BEZSZYNOWE

Układy bezszynowe – blokowe i mostkowe – należą do najprostszych układów stacji i stosowane są w obiektach zasilanych jedną lub dwiema liniami, bez konieczności rozdzielenia energii na większą liczbę odpyływów na danym poziomie napięcia. W układach tych przed transformatorem najczęściej stosuje się tylko rozłącznik lub odłącznik, rzadziej wyłącznik.

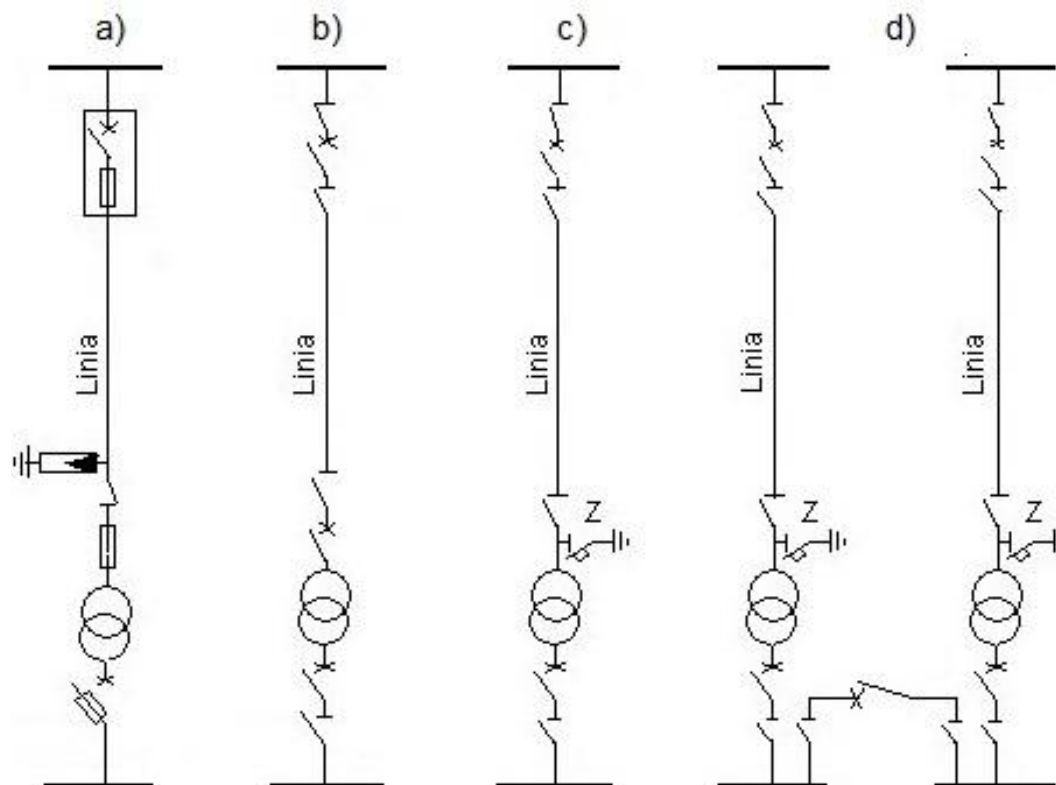
**Układy blokowe** charakteryzują się szeregowym połączeniem wszystkich elementów obwodu głównego – bez pośrednictwa szyn zbiorczych. Rozwiązania takie stosuje się w oddziałowych stacjach transformatorowo-rozdzielczych SN/nn w zakładach przemysłowych (przy promieniowym układzie sieci rozdzielczej SN) oraz w jednoblokowych stacjach wiejskich SN/nn, zasilanych na ogół z odczepu od napowietrznej linii magistralnej SN. Jednym z typowych przykładów układu jednoblokowego są terenowe stacje słupowe.

Układy blokowe dla sieci 110 kV mogą być realizowane w trzech rozwiązaniach: z wyłącznikiem oraz w układach uproszczonych ze zwiernikiem lub odłącznikiem. Układ z wyłącznikiem jest w obrębie układów blokowych rozwiązaniem najlepszym pod względem eksploatacyjnym, dlatego jest najczęściej stosowanym układem.

W razie zakłóceń w pracy transformatora, zadziałanie zwiernika powoduje metaliczne zwarcie z ziemią, a w konsekwencji zadziałanie stosownych zabezpieczeń w stacji zasilającej i wyłączenie linii. Jest to znaczna uciążliwość w eksploatacji stacji elektroenergetycznej, dlatego rozwiązanie to stosowane jest obecnie bardzo rzadko.

Układ z odłącznikiem ma bardzo ograniczone zastosowanie do krótkich linii 110 kV wyposażonych w specjalne łącze teletechniczne od zabezpieczeń do wyłącznika, które w razie zwarcia w transformatorze przekazuje impuls do stacji zasilającej i powoduje wyłączenie linii.

Niezawodność pracy stacji o układzie z dwoma blokami można znacznie zwiększyć stosując poprzeczne połączenie linii w stacji odbiorczej. Połączenie to polega na zainstalowaniu odłącznika lub wyłącznika z odłącznikami. W ten sposób uzyskuje się najprostszы układ mostkowy H, który umożliwia wzajemne rezerwowanie zarówno linii, jak i transformatorów. Możliwości eksploatacyjne zależą od rodzaju zastosowanych łączników.



Oznaczenia: Układ jednoblokowy:

- a) dla sieci SN zasilającej terenową stację słupową,
- b,c) dla sieci 110 kV z wyłącznikiem i w układzie uproszczonym ze zwiernikiem.
- d) układ dwublokowy ze zwiernikiem, Z – zwiernik

## UKŁADY MOSTKOWE

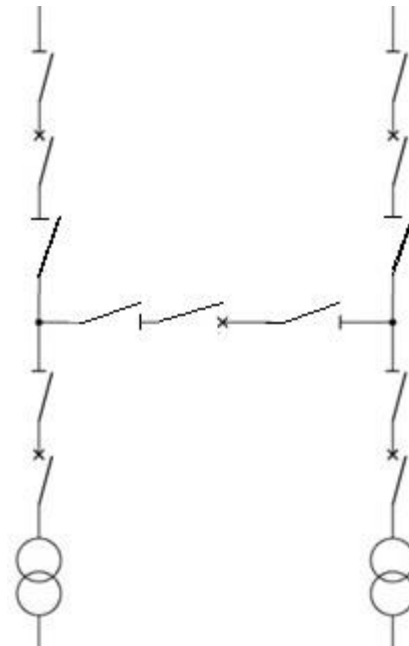
Układ mostkowy jest odpowiednio rozbudowanym układem z dwoma blokami linia-transformator. Układy takie stosuje się głównie w rozdzielniach 110 kV i w małych rozdzielniach 220 kV zasilanych dwiema liniami elektroenergetycznymi. Zastosowanie w układzie z dwoma blokami linia-transformator poprzecznego połączenia linii w stacji odbiorczej, umożliwia z jednej strony wzajemne rezerwowanie zarówno linii jak i transformatorów, z drugiej – znacznie zwiększa niezawodność pracy stacji.

W zależności od rodzaju i liczby zainstalowanych łączników w połączeniu poprzecznym (poprzeczce) oraz polach liniowych i transformatorowych powstają układy o zróżnicowanych właściwościach i możliwościach eksploatacyjnych. Połączenie realizowane poprzez zastosowanie dwóch odłączników lub wyłącznika z odłącznikami tworzy się układ mostkowy H.

W zależności od rodzaju i liczby zainstalowanych łączników w polach liniowych i transformatorowych oraz poprzeczce rozróżnia się układy:

- 1) niepełne, wyposażone w trzy wyłączniki ( w polu poprzecznym i w polach liniowych)
- 2) pełne H, z pięcioma wyłącznikami (jednym w polu poprzecznym i czterema w polach liniowych i transformatorowych).

- Liczba zainstalowanych wyłączników rozróżnia następujące układy:
- H1 – jednowyłącznikowe (wyłącznik znajduje się w poprzeczce);
  - H2 – dwuwyłącznikowe (wyłączniki umieszcza się albo w polach liniowych albo w polach transformatorowych);
  - H3 – trójwyłącznikowe (wyłączniki znajdują się w polach liniowych lub w poprzeczce albo w polach transformatorowych i poprzeczce);
  - H4 – czterowyłącznikowe (wyłączniki są usytuowane w polach liniowych i polach transformatorowych);
  - H5 – pięciowyłącznikowe (jak w układzie H4 i dodatkowo w poprzeczce).



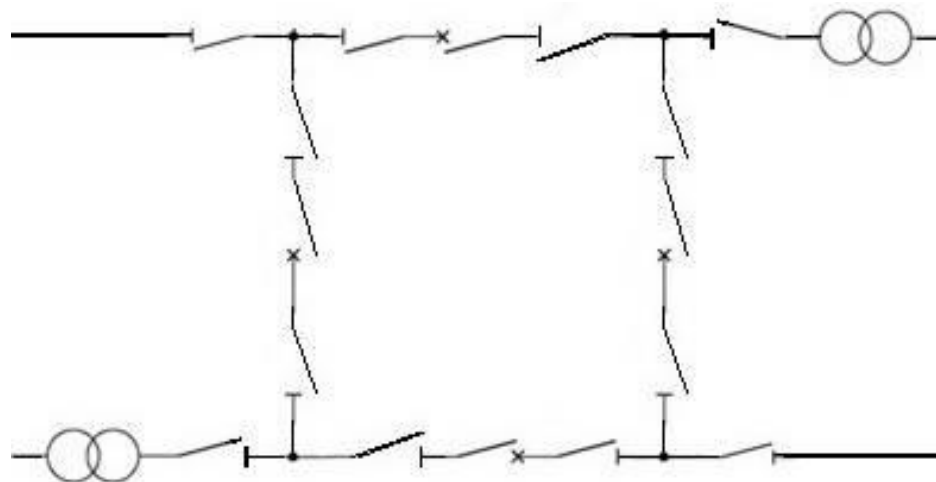
Układ mostkowy pełny H5

W układach mostkowych – w zależności od potrzeb oraz okoliczności – możliwa jest praca:

- a) dwóch linii i dwóch transformatorów, przy otwartej poprzeczce;
- b) dwóch linii i dwóch transformatorów, przy zamkniętej poprzeczce (praca równoległa);
- c) dwóch linii i jednego transformatora,
- d) jednej linii i dwóch transformatorów,
- e) jednej linii i jednego transformatora,
- f) dwóch linii – przy przelotowym przesyle energii przez poprzeczkę.

## UKŁADY WIELOBLOKOWE

Układy wieloblokowe stosuje się w rozdzielniach najwyższych napięć 400 kV. Najczęściej są to rozwiązania o kształcie czworoboku z dwiema liniami oraz z dwoma transformatorami (rys.6) oraz w kształcie trójkąta z dwiema liniami i jednym transformatorem. W Rosji, USA i Kanadzie w rozdzielniach najwyższych napięć spotyka się układy o kształcie sześcioboku z dwoma lub trzema transformatorami oraz odpowiednio z czterema lub trzema liniami. Niezależnie od kształtu wieloboku w każdym jego boku znajduje się wyłącznik i dwa odłączniki. Linie i transformatory są przyłączone do wierzchołków wieloboku. W normalnych warunkach stacja pracuje przy zamkniętych wszystkich łącznikach.



W przypadku zakłócenia w pracy linii lub transformatora w układzie czworoboku powoduje działanie dwóch wyłączników zlokalizowanych w polach bezpośrednio z nimi związanych, przy zachowaniu ciągłości pracy wszystkich pozostałych elementów układu. Natomiast zwarcie w dowolnym wyłączniku powoduje w następstwie zadziałanie włączników zlokalizowanych w sąsiednich bokach wieloboku, a w konsekwencji wyłączenie dwóch pól przylegających do uszkodzonego wyłącznika. Powrót do normalnego stanu pracy układu nie sprawia jednak trudności.

Czynności łączeniowe przy użyciu odłączników możliwe są jedynie w stanie bezprądowym.

Układy wieloblokowe cechują następujące zalety:

- a) możliwość rezerwowania wyłączników
- b) wykonywanie wyłącznikami wszelkich czynności łączeniowych związanych ze zmianą układu połączeń stacji,
- c) duża niezawodność pracy stacji.

Do wad układów wieloblokowych zalicza się w szczególności:

- a) ograniczoną możliwość rozbudowy układu połączeń rozdzielni,
- b) konieczność doboru aparatury na pełne obciążenie węzła,
- c) skomplikowany układ zabezpieczeń (wymagający zmian nastawień przy zmianie układu pracy).

## ROZDZIELNICE Z SZYNAMI LUB POŁĄCZENIAMI OBEJŚCIEWYMI

Ze względu na układ szyn zbiorczych można wyróżnić następujące rozdzielnice:

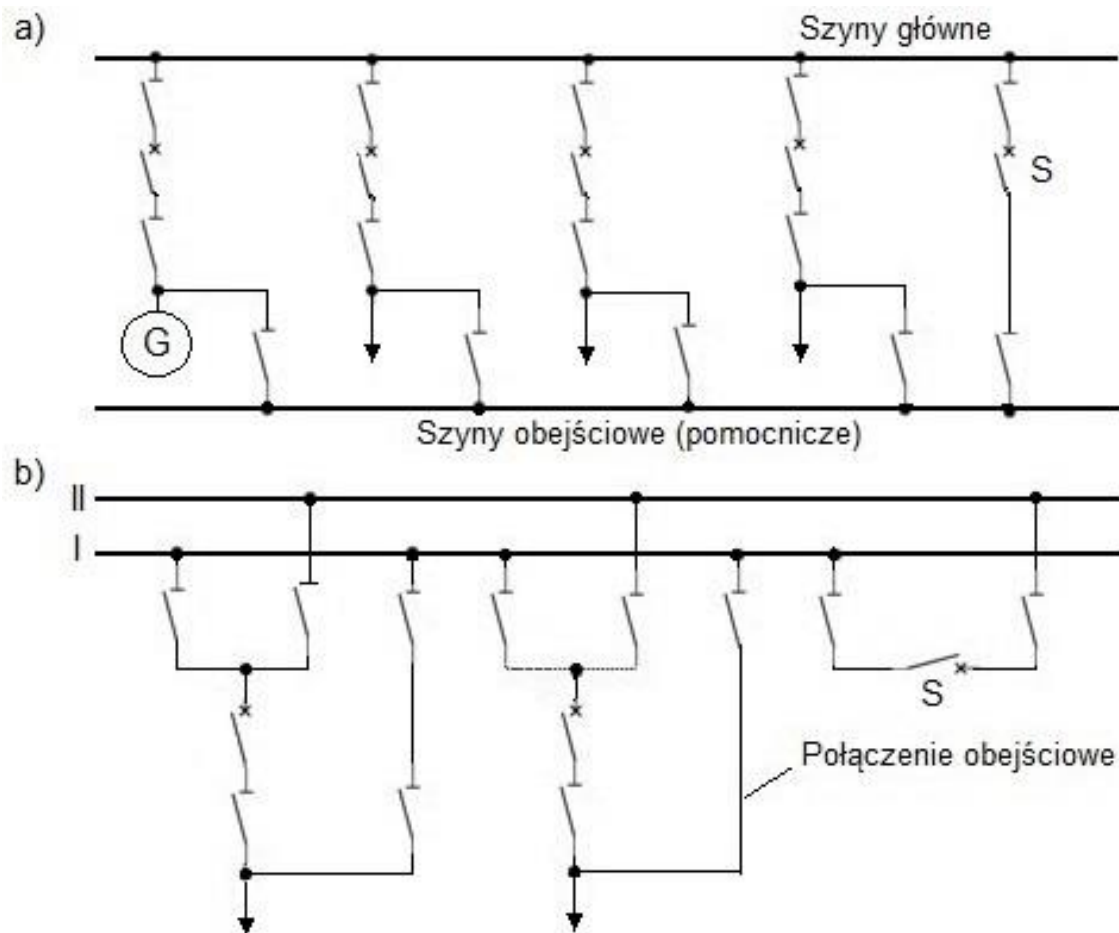
- a) z pojedynczym systemem szyn zbiorczych,
- b) z pojedynczym sekcjonowanym systemem szyn zbiorczych,
- c) z podwójnym systemem szyn zbiorczych,
- d) z podwójnym sekcjonowanym systemem szyn zbiorczych,
- e) z połączeniami obejściowymi.

Pojedyncze i podwójne systemy szyn zbiorczych charakteryzują się następującymi właściwościami:

- 1) Pojedynczy system szyn zbiorczych jest układem najtańszym, w którym uszkodzenie jakiegokolwiek elementu powoduje wyłączenie z ruchu całej rozdzielni. Również rozbudowa układu wymaga wyłączenia całej rozdzielnicy na czas rozbudowy. Dlatego też stosuje się bardzo często podział systemu na sekcje. Liczba sekcji najczęściej odpowiada liczbie pól zasilających;
- 2) Podwójny system szyn zbiorczych charakteryzuje się wysokim stopniem elastyczności i wysoką niezawodnością.

W zależności od liczby wyłączników w polu i ewentualnego sekcjonowania poszczególnych systemów, można uzyskać układ o bardzo dużych możliwościach dokonywania połączeń zarówno w warunkach ruchowych jak i awaryjnych.

Rozdzielnice z połączeniami obejściowymi, pozwalają na przeprowadzenie remontu wyłącznika w dowolnym polu bez przerwy w pracy rozdzielnicy, poprzez połączenie na czas remontu danego pola z szynami zbiorczymi za pośrednictwem tzw. „połączenia obejściowego”. W przypadku szyn obejściowych, remontowany wyłącznik zostaje zastąpiony przez wyłącznik sprzęgła poprzecznego S.



## Układy obejściowe rozdzielnic

a) pojedynczy układ szyn zbiorczych z szynami obejściowymi,

b) podwójny układ szyn zbiorczych z połączeniem obejściowym; S – sprzęgło poprzeczne.

## ROZWIĄZANIA KONSTRUKCYJNE STACJI I ROZDZIELNI

### Wymagania ogólne

Stacje i rozdzielnie elektroenergetyczne dzieli się pod względem konstrukcyjnym na wewnętrzne i napowietrzne. Stacje wewnętrzne można podzielić na: osłonięte z izolacją powietrzną i hermetyzowane z izolacją gazową ( $\text{SF}_6$ ). Ze względu na duże koszty przystosowania urządzeń do obwodu głównego i układów sterowniczych, a także do warunków napowietrznych, stacje hermetyzowane buduje się powszechnie jako wewnętrzne, w specjalnie do tego celu wybudowanych pomieszczeniach.

**Stacje napowietrzne** wykonywane są jako:

- a) **średniowysokie**, w których aparatura łączeniowa jest umieszczona na wysokości nie mniejszej niż 3 m, a pozostałe urządzenia stacji znajdują się za ogrodzeniem.
- b) **wysokie**, w których odłączniki są umieszczone na wysokości 8 ÷ 10 m, a pozostała aparatura jest instalowana w układach pionowych jedna nad drugą.

W rozdzielniach średniowysokich urządzenia powinny być rozmieszczone tak, aby personel obsługi mógł poruszać się bezpiecznie na terenie stacji – z zachowaniem dopuszczalnych odległości do części urządzeń znajdujących się pod napięciem. Natomiast rozdzielnie wysokie zajmują znacznie mniej miejsca, ale są znacznie droższe.

Stacje napowietrzne są stosowane powszechnie, począwszy od 30 kV wzwyż, z wyjątkiem sytuacji gdy:

- a) występuje duże zapylenie terenu,
- b) otaczająca atmosfera zawiera związki gazowe o silnie korodujących właściwościach oraz
- c) w warunkach nadmorskich.

W sieciach rozdzielczych występują stacje napowietrzne SN do 30 kV, na których konstrukcję wsporczą stanowi słup, na której znajduje się transformator o mocy do 630 kVA oraz rozłącznik SN lub odłącznik SN z bezpiecznikami. W dolnej części słupa znajduje się rozdzielnica niskiego napięcia, do której przyłączone są obwody odbiorcze.

Do charakterystycznych cech stacji napowietrznych, w stosunku do wewnątrzowych, należy zaliczyć: łatwość budowy i rozbudowy w stosunkowo krótkim czasie, zajmowanie dużego terenu, przejrzystość układu połączeń stacji, warunki eksploatacyjne zależne od warunków zewnętrznych oraz konieczność posiadania rozbudowanej ochrony odgromowej.

**Stacje wewnętrzne** – stosuje się przede wszystkim dla napięć 30 kV, z wyjątkiem stacji słupowych, oraz tam, gdzie jest to uzasadnione innymi względami. W dużych aglomeracjach miejskich takie rozwiązania stosuje się niekiedy w stacjach 110 kV.

Stacje wewnętrzne, najczęściej o zbyt dużej kubaturze, charakteryzuje niezależność warunków eksploatacji od warunków wpływów zewnętrznych, małe zapotrzebowanie terenu i łatwiejsza lokalizacja, stosunkowo długi cykl budowy, trudność rozbudowy oraz duże skupienie urządzeń sprzyjające występowaniu awarii.

Ogólne wymagania zarówno dla wewnętrznych, jak i napowietrznych stacji elektroenergetycznych w zakresie konstrukcji rozdzielni i całych stacji dotyczą:

- 1) wyboru źródeł i sposobu zasilania stacji, układu szyn zbiorczych, wyposażenia w transformatory, aparaturę rozdzielczą, pomiarową i inną oraz ich rozmieszczenie w obiekcie, w sposób spełniający różnorodne wymagania odbiorców;
- 2) doboru właściwej izolacji rozdzielni i zachowania bezpiecznych odległości pomiędzy częściami czynnymi, a uziemionymi częściami konstrukcji;
- 3) dostosowania rozdzielni do warunków zwarciovych;
- 4) ochrony przed działaniem łuku elektrycznego;
- 5) bezpieczeństwa obsługi.

## ROZDZIELNIE NAPOWIETRZNE 110 KV

Przy napięciu 110 kV i wyższym, koszty budynków rozdzielni wewnętrznych mogą być bardzo wysokie i dlatego budowane są rozdzielnie napowietrzne, w których izolacja między przewodami i między aparatami jest zapewniona przez zachowanie odpowiednich odstępów i odległości w powietrzu.

Rozdzielnie 110 kV energetyki zawodowej i przemysłowej z dwiema liniami i dwoma transformatorami buduje się najczęściej w układzie połączeń H według typowych, standardowych rozwiązań.

Szyny i aparaty są umieszczone na izolatorach w otwartym terenie, odpowiednio ogrodzonym i podzielonym wewnątrz na poszczególne pola rozdzielni. Rozdzielnie napowietrzne otwarte mogą być budowane tam, gdzie nie występują ograniczenia terenowe lub szczególne narażenia środowiskowe oraz wymagania dotyczące ochrony krajobrazu.

Rozdzielnie napowietrzne zajmują stosunkowo duży obszar, lecz są tanie w budowie, nie wymagają skomplikowanych prac budowlano-montażowych, charakteryzują się przejrzystością połączeń oraz łatwością dostępu i rozbudowy.

Wadą rozdzielni napowietrznych jest podatność na wpływy zewnętrzne i uzależnienie czynności eksploatacyjnych od warunków pogodowych, a w trakcie ich budowy występuje znaczne uzależnienie od lokalnych warunków terenowych i spraw własnościowych gruntów.

Nowoczesne rozwiązania w budowie stacji elektroenergetycznych wysokiego napięcia napowietrznych przejawiają się przede wszystkim w tym, że zamiast poszczególnych aparatów (wyłączników, odłączników, przekładników prądowych i napięciowych) stosuje się prefabrykowane modułowe pola rozdzielcze grupujące w jednej konstrukcji (bloku) wszystkie te aparaty lub jedynie niektóre z nich. Moduł zawiera również skrzynkę rozdzielczą z urządzeniami układu sterowania i zabezpieczenia pola.

Zastosowanie modułowych pól rozdzielczych pozwala na uproszczenie projektu stacji, skraca czas budowy i obniża koszty, zmniejsza zapotrzebowanie na teren, zmniejsza liczbę fundamentów, zwiększa przejrzystość układu oraz umożliwia szybką wymianę wyłącznika.

## ROZDZIELNIE WNĘTRZOWE

Pobór mocy w centrach dużych miast jest znaczny, co oznacza konieczność budowy stacji 110 kV możliwie blisko tych obciążeń. W miastach stacje takie mogą być budowane jako wewnętrzne – chociaż struktura tych budowli – w tradycyjnym wykonaniu – jedynie z konieczności może być tolerowana w miejskiej zabudowie. Stacje wewnętrzne mogą być budowane w miejscach, gdzie nie jest możliwa lub nie jest wskazana lokalizacja stacji napowietrznej, ze względu na brak odpowiednio dużego terenu lub inne ograniczenia, takie jak: miejska zabudowa, tereny krajobrazowe, względnie trudne warunki środowiskowe (znaczne zapylenie atmosfery w sąsiedztwie obiektów przemysłowych, tereny nadmorskie, pustynne lub inne).

W stacjach wewnętrznych 110 kV jest stosowana aparatura przeznaczona do pracy w warunkach napowietrznych. Teren potrzebny na budowę takich stacji jest znacznie mniejszy niż stacji napowietrznych, gdyż łączniki, przekładniki i inną aparaturę umieszcza się pod szynami zbiorczymi. Dalsze ograniczenie terenu niezbędnego do budowy stacji można uzyskać przez umieszczenie rozdzielni wysokiego i średniego napięcia w jednym wielokondygnacyjnym budynku.

W warunkach polskich stacje wewnętrzne wysokiego napięcia to głównie stacje miejskie 110 kV.

## POTRZEBY WŁASNE STACJI

Potrzeby własne stacji stanowi określony zespół urządzeń i odbiorników prądu przemiennego oraz prądu stałego zainstalowanych w pomieszczeniach stacji elektroenergetycznej, niezbędny do zapewnienia prawidłowej pracy stacji zarówno w warunkach normalnych, jak i zakłóceń.

Urządzenia potrzeb własnych wraz z urządzeniami obwodów pomocniczych są ważnymi obiektami stacji elektroenergetycznej i mają istotny wpływ na prawidłową pracę urządzeń obwodów głównych i bezpieczeństwo obsługi stacji.

## **BUDYNEK NASTAWNI**

W dużych stacjach elektroenergetycznych występują wydzielone pomieszczenia, w których umieszczone są wskaźniki stanu połączeń i pracujących elementów rozdzielni oraz urządzenia i elementy sterownicze. Pomieszczenie takie nosi nazwę nastawni.

W budynku nastawni znajdują się następujące pomieszczenia:

- 1) dyżurnego – wyposażone w aparaturę sterowniczą i pomiarową,
- 2) przekaźnikowe,
- 3) akumulatorni,
- 4) przetwornic,
- 5) urządzeń potrzeb własnych,
- 6) urządzeń teletechnicznych,
- 7) magazynu sprzętu bhp,
- 8) socjalnych dla obsługi.

Budynki nastawni tradycyjnych są zazwyczaj duże, zwykle dwukondygnacyjne. Na piętrze znajdują się pomieszczenia: dyżurnego, przekaźnikowe i inne pomocnicze, natomiast na parterze – pomieszczenia kablowe, akumulatornia wraz z pomieszczeniami towarzyszącymi oraz część pomieszczeń warsztatowych.

Obecnie, dzięki wykorzystaniu zminiaturyzowanych urządzeń elektronicznych, budynki nastawni, najczęściej parterowy, składa się: z pomieszczenia dla dyżurnego oraz pomieszczeń warsztatowych i magazynowych

Pomieszczenie akumulatorni powinno być oddzielone od pozostałych pomieszczeń za pomocą przedsionka, ogrzewane zgodnie z wymaganiami dla zastosowanych ogniw, suche i odpowiednio wentylowane.

W mniejszych stacjach elektroenergetycznych bez obsługi, w których zabezpieczenia stanowią wyłączniki pierwotne i bezpieczniki, zapotrzebowanie na energię elektryczną ogranicza się jedynie do oświetlenia terenu i budynku rozdzielni wewnętrznej.

## URZĄDZENIA I INSTALACJE POTRZEB WŁASNYCH PRĄDU PRZEMIENNEGO

W stacjach elektroenergetycznych stosuje się następujące urządzenia i instalacje potrzeb własnych prądu przemiennego:

- 1) obwody oświetlenia terenu stacji i budynków stacyjnych oraz obwody gniazd wtyczkowych,
- 2) urządzenia grzewcze pomieszczeń, szafek kablowych, napędów łączników itp.,
- 3) silniki wentylatorów i pomp chłodzenia transformatorów,
- 4) silniki napędów przełączników zaczepów transformatorów,
- 5) prostowniki i agregaty do ładowania baterii akumulatorów,
- 6) silniki sprężarek i innych urządzeń instalacji sprężonego powietrza,
- 7) silniki napędów łączników,
- 8) silniki wentylatorów w pomieszczeniach stacyjnych,
- 9) urządzenia instalacji olejowej,
- 10) urządzenia pomocnicze kompensatorów synchronicznych,) przetwornice do zasilania TEN,
- 11) urządzenia elektryczne w warsztatach,
- 12) zabezpieczenia przekaźnikowe, automatyki, sygnalizacyjne, sterownicze, blokujące i rejestrujące.

## URZĄDZENIA I INSTALACJE POTRZEB WŁASNYCH PRĄDU STAŁEGO

W stacjach elektroenergetycznych stosuje się następujące instalacje i urządzenia potrzeb własnych prądu stałego:

- 1) zabezpieczenia przekaźnikowe,
- 2) urządzenia automatyki,
- 3) rejestratory zakłóceń sieciowych,
- 4) oświetlenie awaryjne,
- 5) silniki napędów łączników,
- 6) urządzenia pomocnicze kompensatorów synchronicznych,
- 7) przetwornice telefonii wielkiej częstotliwości (zasilanie rezerwowe).

## URZĄDZENIA AUTOMATYKI STACJI ELEKTROENERGETYCZNEJ

### Automatyka elektroenergetyczna stacji

Stacje elektroenergetyczne są punktami węzłowymi w systemie elektroenergetycznym, w których wykonuje się czynności związane z prowadzeniem ruchu stacji, przez obsługę wspomaganą urządzeniami automatyki stacyjnej. W stacjach bez stałej obsługi zadania prowadzenia ruchu wykonują urządzenia automatyki.

Automatyka stacyjna obejmuje trzy podstawowe działy:

- 1) automatykę zabezpieczeniową**, której zadaniem jest wyłączanie uszkodzonych elementów sieci, sygnalizowanie (lub wyłączanie) elementów przeciążonych oraz samoczynne przywracanie zasilania przez układy SPZ lub SZR
- 2) automatykę systemową**, do zadań której należy nadzorowanie i regulacja warunków pracy sieci poprzez automatyczną regulację napięcia, samoczynne częstotliwościowe odciążenie i optymalizację parametrów sieci przy zmieniających się warunkach pracy;
- 3) stacyjną automatykę lokalną**, realizującą czynności związane z prowadzeniem ruchu stacji (sterowaniem sekwencjami przełączeń, rejestracją stanów pracy, łączeniem urządzeń pomocniczych)

**Automatyka zabezpieczeniowa** dzieli się na eliminującą, prewencyjną i restytucyjną:

**Automatyka eliminująca** – jest przeznaczona do eliminowania z pracy tych urządzeń i linii, w których wystąpiło uszkodzenie uniemożliwiające prawidłową pracę innych elementów systemu. Do najgroźniejszych uszkodzeń zalicza się wszelkiego rodzaju zwarcia, szczególnie jednak te, przy których występują duże wartości prądów zwarciovych;

**Automatyka prewencyjna** – ma na celu zapobieganie zakłóceniom, jakie mogą wystąpić w pracy systemu elektroenergetycznego, przez wykrywanie, sygnalizację i likwidację zakłóceniovych stanów pracy systemu lub jego elementów, takich jak przeciążenie, nadmierne wahania i odchylenia napięcia oraz częstotliwości

**Automatyka restytucyjna** – ma za zadanie zarówno samoczynną zmianę konfiguracji tych części systemu elektroenergetycznego, w których wystąpiło zakłócenie i działanie automatyki prewencyjnej lub eliminującej, jak również przywrócenie normalnego lub najbardziej optymalnego, w warunkach istniejących ograniczeń, stanu pracy systemu. Do automatyki restytucyjnej zalicza się między innymi układy: samoczynnego ponownego załączania (SPZ) i samoczynnego załączania do pracy elementów rezerwowych (SZR).

**Automatyka systemowa** jest związana z prowadzeniem ruchu systemu elektroenergetycznego, zarówno w stanie pracy normalnej, jak i w stanie zakłóceń.

Obejmuje ona automatykę:

- 1) regulacyjną (ARN, sterowanie mocą bierną),
- 2) prewencyjną (SCO, kołysania mocy, dzielnice sieci)
- 3) optymalizacyjną (utrzymanie optymalnych poziomów napięć, minimalizację strat sieciowych itp.).

**Stacyjna automatyka lokalna** obejmuje:

- 1) automatykę prowadzenia ruchu stacji (np. automatyczną rejestrację zdarzeń, układ komputerowy określający dopuszczalne w danej chwili przeciążenie transformatorów),
- 2) lokalną automatykę łączeniową (sekwencyjne sterowanie łącznikami, automatyczne otwieranie odłącznika transformatorowego w rozdzielnicy o układzie H)
- 3) automatykę urządzeń pomocniczych (sterowanie sprężarkami powietrza, chłodzeniem transformatorów, SZR potrzeb własnych itp.).

# Dziękuję za uwagę



mgr inż. Robert Czak

*tel: 0048 603687444*

*mail: robert.czak@op.pl*