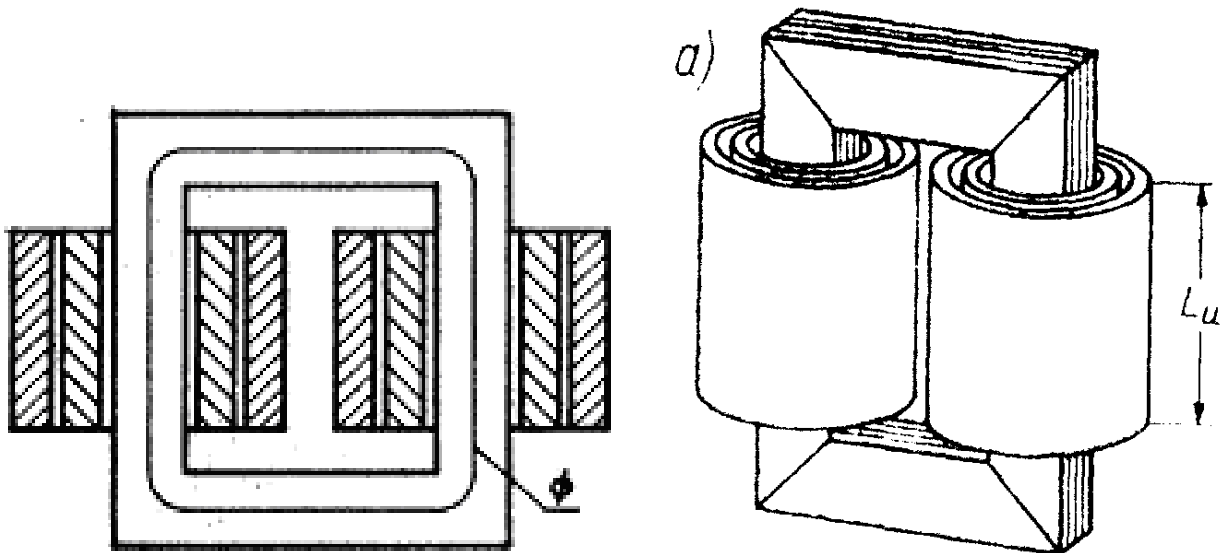
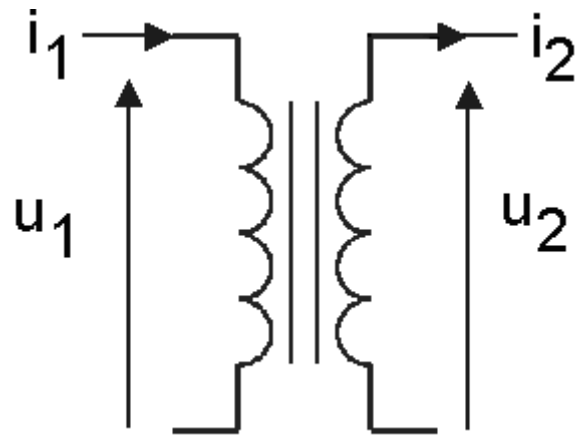
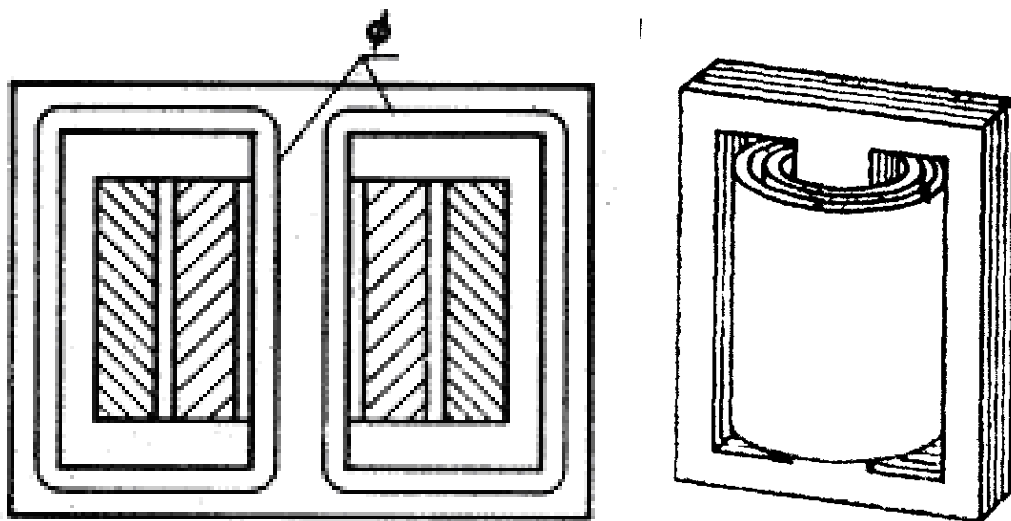


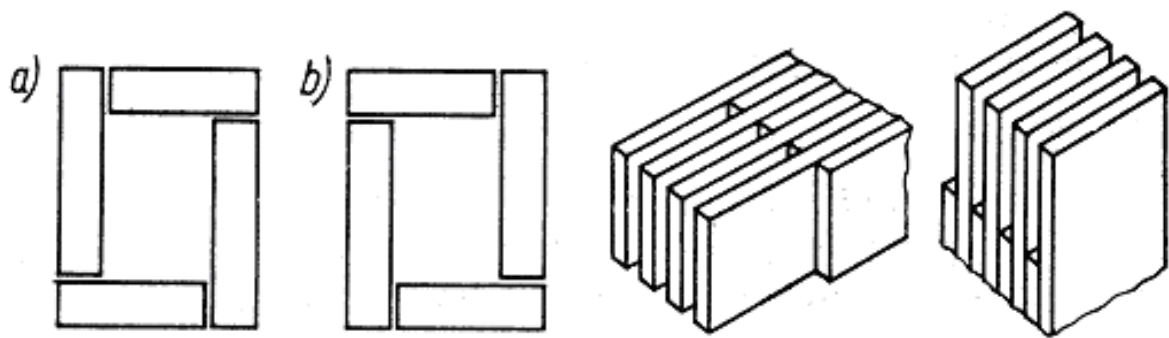
Transformator jednofazowy



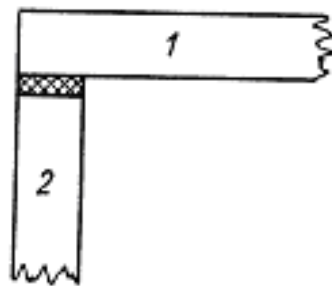
Jednofazowy transformator rdzeniowy



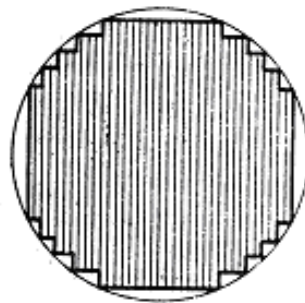
Jednofazowy transformator płaszczowy



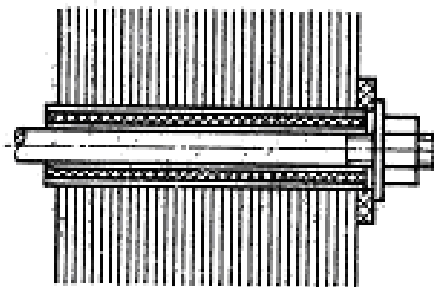
Blachy transformatora jednofazowego układane na zakładkę



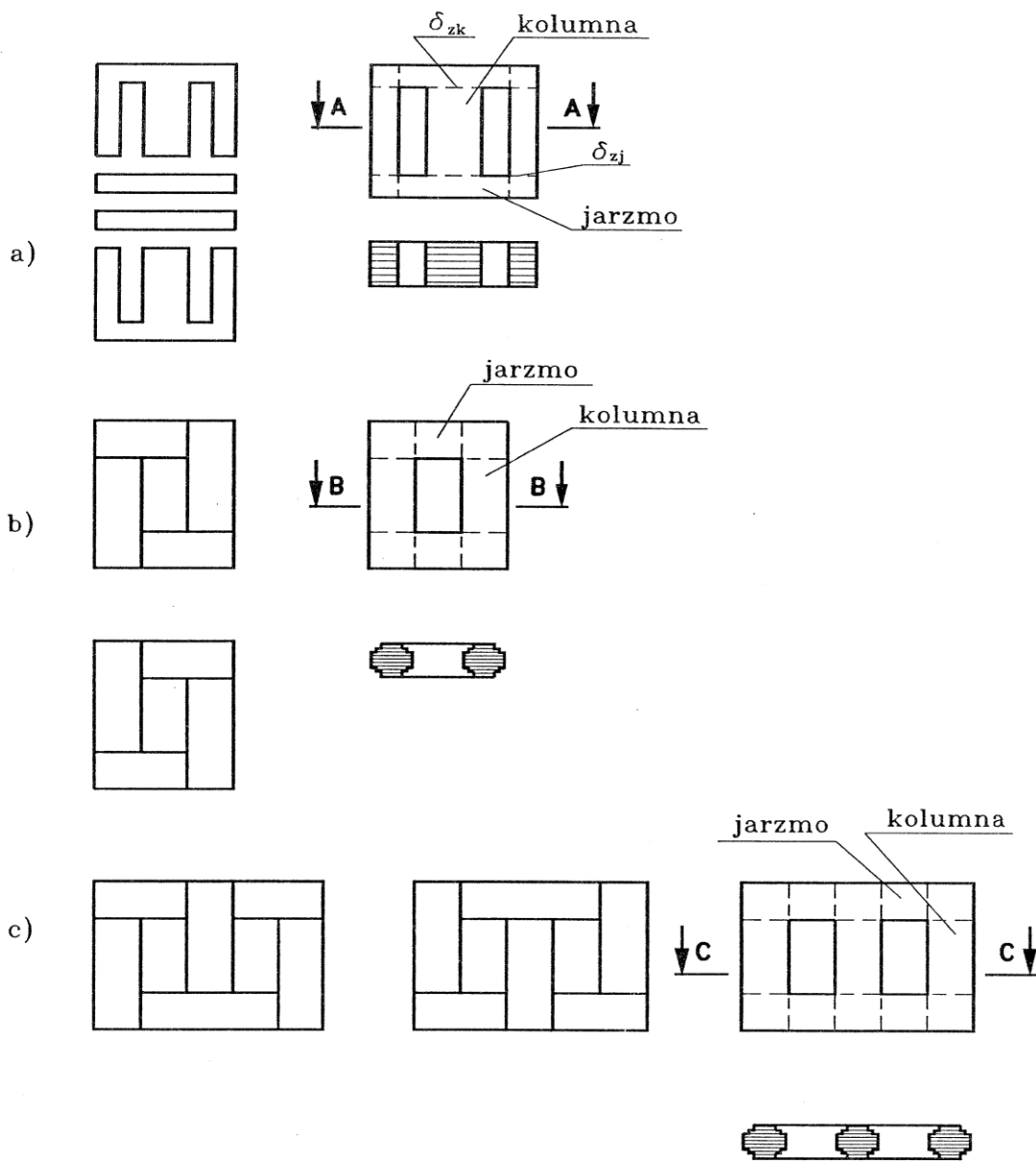
Połączenie jarzma kolumną na styk

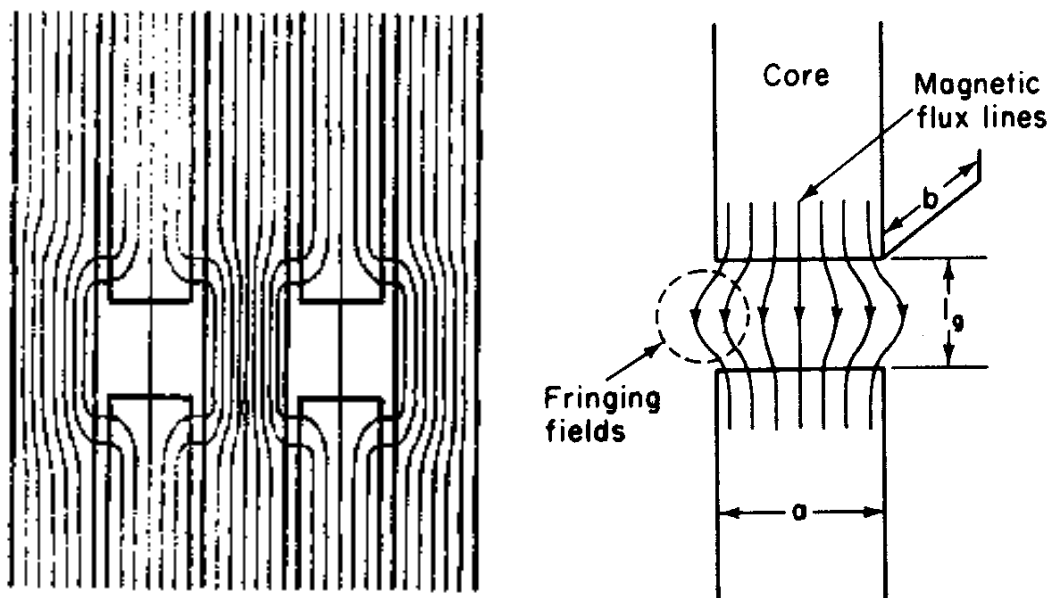


Przekrój kolumny rdzenia transformatora

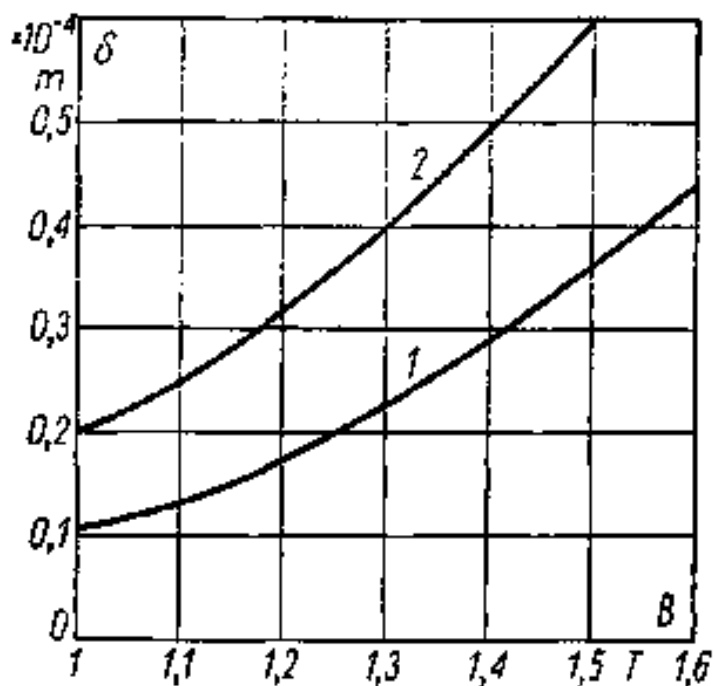


Mocowanie pakietu blach za pomocą śruby





Przebieg strumienia w miejscu zaplatania rdzenia



Wartości zastępczej szczeliny w funkcji indukcji dla blachy walcowanej na zimno o grubości 0,35 mm przy zaplataniu pojedynczymi blachami (1) i dla blachy walcowanej na gorąco (2)

**Założenie:**

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t$$

Wartość chwilową siły elektromotorycznej indukowanej w uzwojeniu składającego się z  $z$  zwojów można obliczyć z zależności:

$$e = \frac{d\psi}{dt} = z \frac{d\Phi}{dt}$$

Po obliczeniu pochodnej:

$$e = z\omega\Phi_m \cos \omega t$$

Wartość maksymalna:

$$E_m = z\omega\Phi_m$$

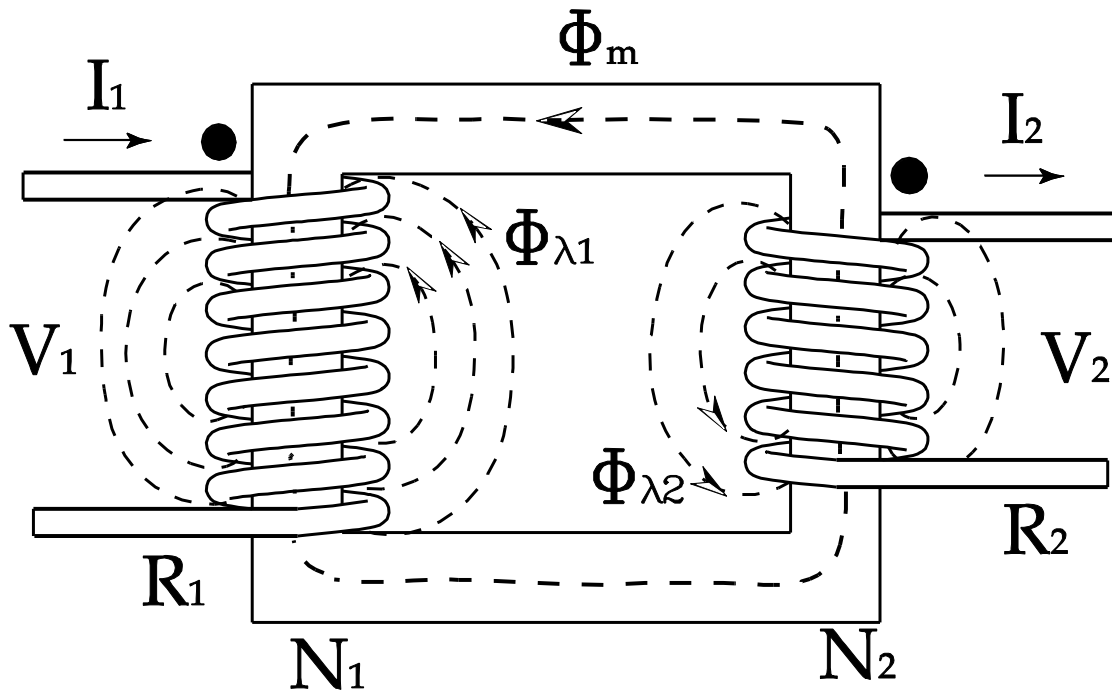
Wartość skuteczna:

$$E = 4.44zf\Phi_m$$

W przypadku transformatora jednofazowego siły elektromotoryczne indukowane przez część wspólną strumienia:

$$E_1 = 4.44z_1f\Phi_m$$

$$E_2 = 4.44z_2f\Phi_m$$



Poza strumieniem wspólnym każde z uzwojeń wytwarza strumień rozproszenia, który nie ma części wspólnej pomiędzy uzwojeniami. Ze strumień rozproszenia związana wartość reaktancji rozproszenia poszczególnych uzwojeń.

Pierwsze uzwojenie zasilone jest napięciem  $\underline{U}_1$ . Równanie dla tego obwodu ma postać:

$$\underline{U}_1 = R_1 \underline{I}_1 + jX_1 \underline{I}_1 + \underline{E}_1$$

Uzwojenie strony wtórnej może być obciążone impedancją, na której mamy napięcie  $\underline{U}_2$ . Równanie dla tego obwodu przyjmuje postać:

$$\underline{E}_2 = R_2 \underline{I}_2 + jX_2 \underline{I}_2 + \underline{U}_2$$

gdzie:

$R_1$ - rezystancja uzwojenia pierwotnego

$X_1$ - reaktancja rozproszenia uzwojenia pierwotnego

gdzie:

$R_2$ - rezystancja uzwojenia wtórnego

$X_2$ - reaktancja rozproszenia uzwojenia wtórnego

$\underline{I}_1$  –prąd strony pierwotnej

$\underline{I}_2$  –prąd strony wtórnej

$\underline{U}_2$  – napięcie na zaciskach strony wtórnej

Wartości sem po obu stronach transformatora są do siebie proporcjonalne i różnią się jedynie liczbą zwojów, stąd równanie strony wtórnej możemy pomnożyć przez przekładni e zwojową zdefiniowaną jako:

$$\mathcal{G}_z = \frac{z_1}{z_2}$$

otrzymamy:

$$\mathcal{G}_z \underline{E}_2 = \frac{\mathcal{G}_z^2}{\mathcal{G}_z} R_2 \underline{I}_2 + \frac{\mathcal{G}_z^2}{\mathcal{G}_z} jX_2 \underline{I}_2 + \mathcal{G}_z \underline{U}_2$$

$$\mathcal{G}_z \underline{E}_2 = \frac{\underline{I}_2}{\mathcal{G}_z} R_2 \mathcal{G}_z^2 + \frac{\underline{I}_2}{\mathcal{G}_z} jX_2 \mathcal{G}_z^2 + \mathcal{G}_z \underline{U}_2$$

podstawiając we wzorze nowe zmienne strony wtórnej (sprowadzone na stronę pierwotną) otrzymamy:

$$\underline{E}'_2 = \underline{I}'_2 R'_2 + j \underline{I}'_2 X'_2 + \underline{U}'_2$$

przy czym:

$$\underline{E}'_2 = \underline{E}_1$$

otrzymamy komplet równań opisujących pracę transformatora w stanach ustalonych:

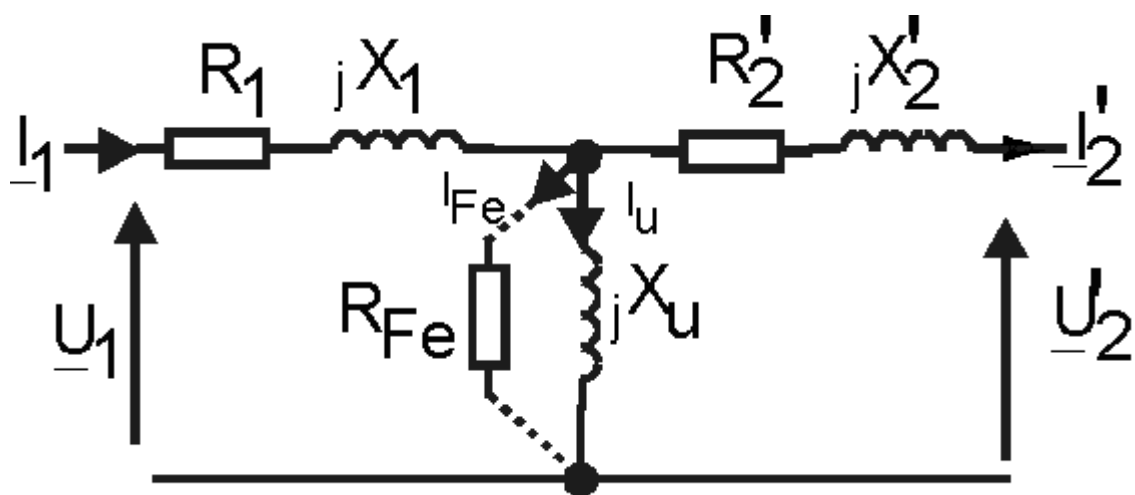
$$\underline{U}_1 = R_1 \underline{I}_1 + jX_1 \underline{I}_1 + \underline{E}_1$$

$$\underline{E}_1 = \underline{I}'_2 R'_2 + j \underline{I}'_2 X'_2 + \underline{U}'_2$$

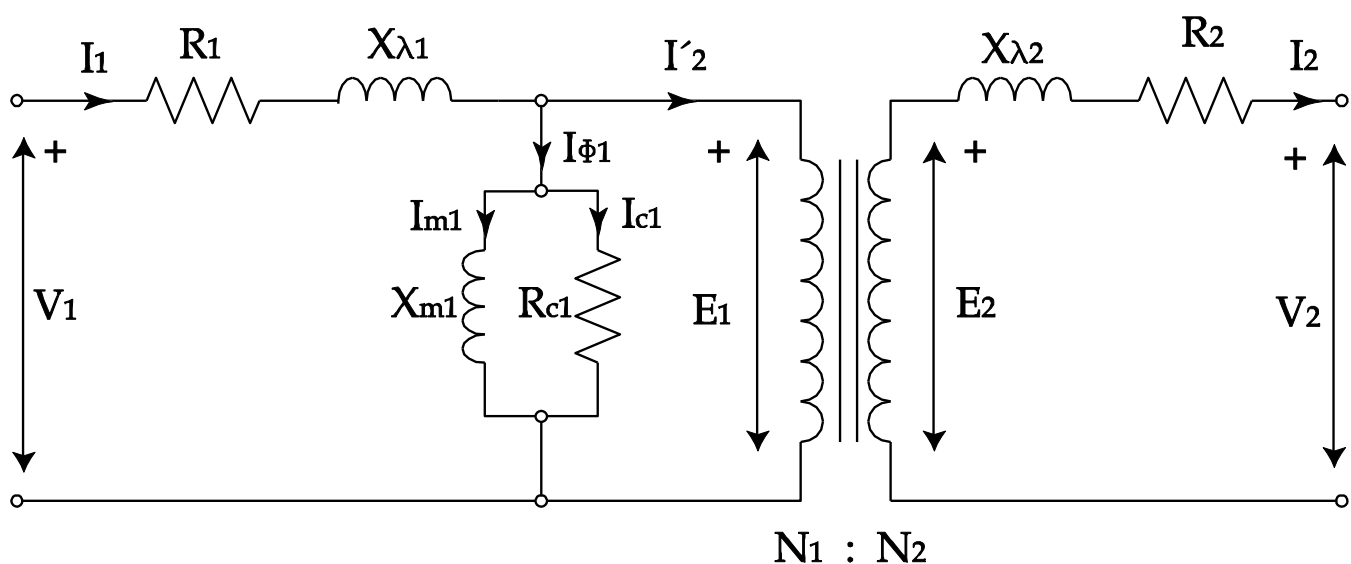
Przyjmując, że:

$$\underline{E}_1 = j \underline{I}_\mu X_\mu$$

uzyskujemy schemat zastępczy transformatora w postaci:



Wartość rezystancji  $R_{FE}$  dodano tu dla umożliwienia uwzględnienia strat na histerezę i prądy wirowe w rdzeniu transformatora





Równania transformatora można także zapisać dla dowolnego stanu pracy w postaci równań różniczkowych wynikających z założenia liniowości obwodu magnetycznego:

$$u_1 = R_1 i_1 + \frac{d\psi_1}{dt} \quad u_2 = R_2 i_2 + \frac{d\psi_2}{dt}$$

$$\psi_1 = L_1 i_1 + M i_2 \quad \psi_2 = L_2 i_2 + M i_1$$

gdzie:

$$L_1 = L_{s1} + L_{m1} \quad L_{s1} = z_1^2 \Lambda_{s1}$$

$$L_{m1} = z_1^2 \Lambda \quad L_2 = L_{s2} + L_{m2}$$

$$L_{s2} = z_2^2 \Lambda_{s2} \quad L_{m2} = z_2^2 \Lambda$$

Przy czym:

$L_1$  – indukcyjność własna uzwojenia pierwotnego

$L_2$  – indukcyjność własna uzwojenia wtórnego

$L_{s1}$  – indukcyjność związana ze strumieniem rozproszenia uzwojenia pierwotnego

$L_{s2}$  – indukcyjność związana ze strumieniem rozproszenia uzwojenia wtórnego

$L_{m1}$  – indukcyjność uzwojenia pierwotnego związana ze strumieniem głównym (wspólnym)

$L_{m2}$  – indukcyjność uzwojenia wtórnego związana ze strumieniem głównym (wspólnym)

Jeśli pomnożymy równania wirnika przez wartość przekładni zwojowej otrzymamy:

$$u_2 \mathcal{G} = R_2 i_2 \frac{\mathcal{G}^2}{\mathcal{G}} + \frac{d\psi_2 \mathcal{G}}{dt}$$

$$\mathcal{G} = \frac{z_1}{z_2}$$

Oznaczmy:

$$u_2' = u_2 \mathcal{G} \quad \psi_2' = \psi_2 \mathcal{G}$$

$$i_2' = \frac{i_2}{\mathcal{G}} \quad R_2' = R_2 \mathcal{G}^2$$

$$L_2' = L_2 \mathcal{G}^2 \quad L_{s2}' = L_{s2} \mathcal{G}^2$$

$$L_{m2}' = L_{m2} \mathcal{G}^2 = z_2^2 \Lambda \left( \frac{z_1}{z_2} \right)^2 = L_{m1}$$

Równania strumieniowo - prądowe przyjmują postać:

$$\psi_2 \mathcal{G} = L_2 i_2 \mathcal{G} + M i_1 \mathcal{G} \quad \psi_2' = L_2' i_2' + L_{m1} i_1$$

$$M_1 \mathcal{G} = z_1 z_2 \Lambda \frac{z_1}{z_2} = z_1^2 \Lambda = L_{m1}$$

Komplet równań transformatora dla wielkości sprowadzonych do strony pierwotnej przy założeniach liniowości modelu przyjmuje postać:

$$u_1 = R_1 i_1 + \frac{d\psi_1}{dt} \quad u_2' = R_2' i_2' + \frac{d\psi_2'}{dt}$$

$$\psi_1 = L_1 i_1 + L_{m1} i_2' \quad \psi_2' = L_2' i_2' + L_{m1} i_1$$

Po podstawieniu równań strumieniowo – prądowych do równań napięciowych otrzymamy:

$$u_1 = R_1 i_1 + (L_{s1} + L_{m1}) \frac{di_1}{dt} + L_{m1} \frac{di_2'}{dt}$$

$$u_2' = R_2' i_2' + (L_{s2}' + L_{m1}) \frac{di_2'}{dt} + L_{m1} \frac{di_1}{dt}$$

$$u_1 = R_1 i_1 + L_{s1} \frac{di_1}{dt} + L_{m1} \frac{d(i_1 + i_2')}{dt}$$

$$u_2' = R_2' i_2' + L_{s2}' \frac{di_2'}{dt} + L_{m1} \frac{d(i_1 + i_2')}{dt}$$

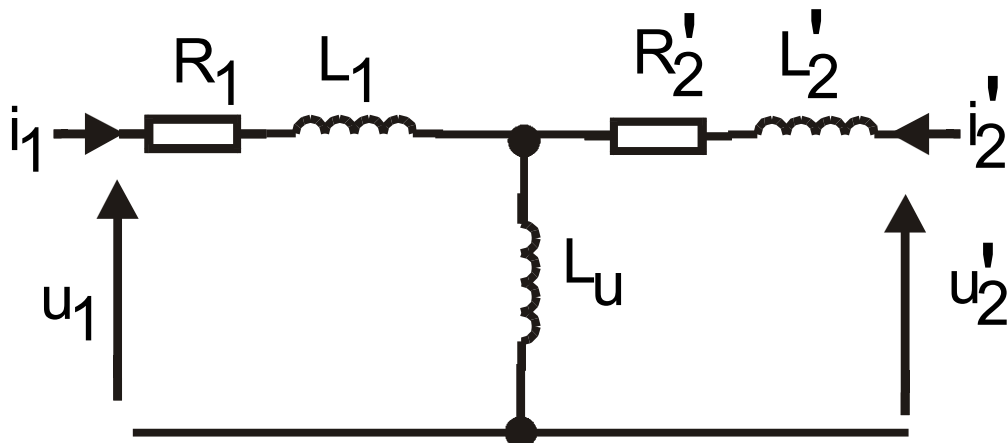
Podstawiając:

$$i_\mu = i_1 + i_2' \quad L_\mu = L_{m1}$$

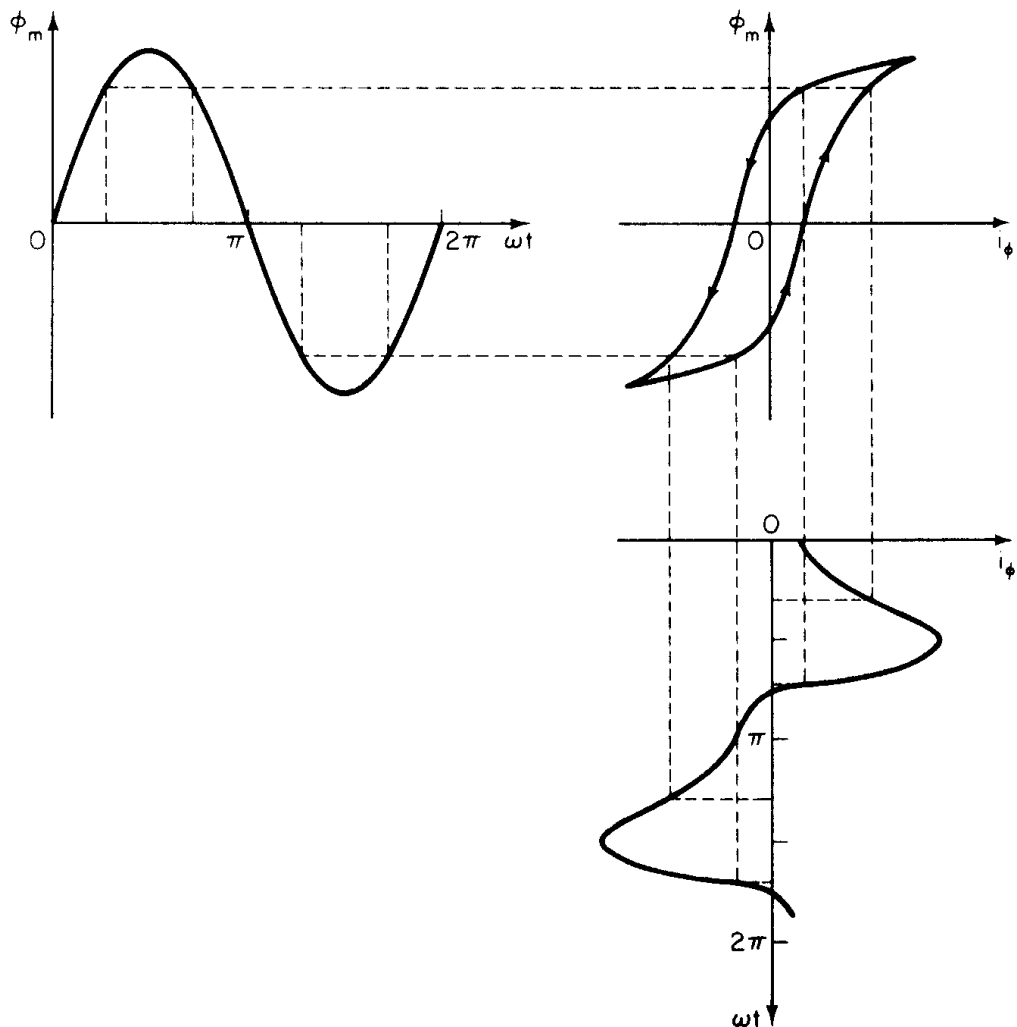
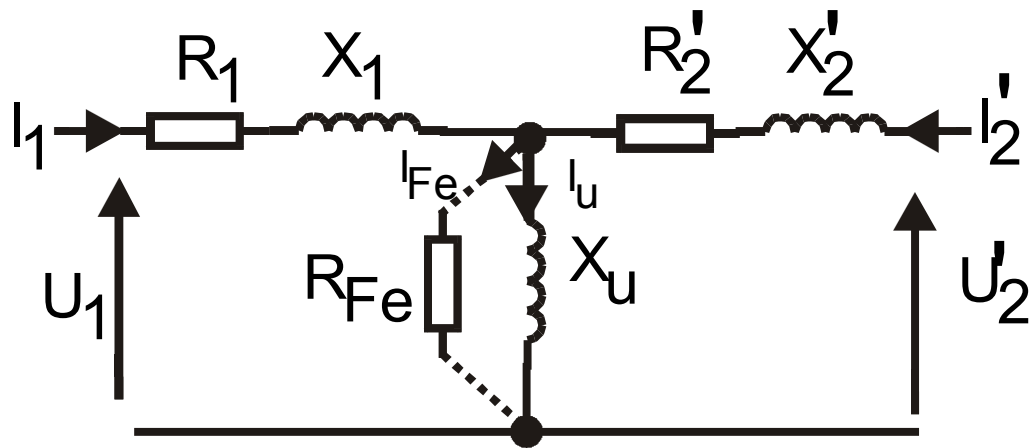
Otrzymamy postać równań na podstawie której możemy narysować schemat zastępczy:

$$u_1 = R_1 i_1 + L_{s1} \frac{di_1}{dt} + L_\mu \frac{di_\mu}{dt}$$

$$u_2' = R_2' i_2' + L_{s2}' \frac{di_2'}{dt} + L_\mu \frac{di_\mu}{dt}$$

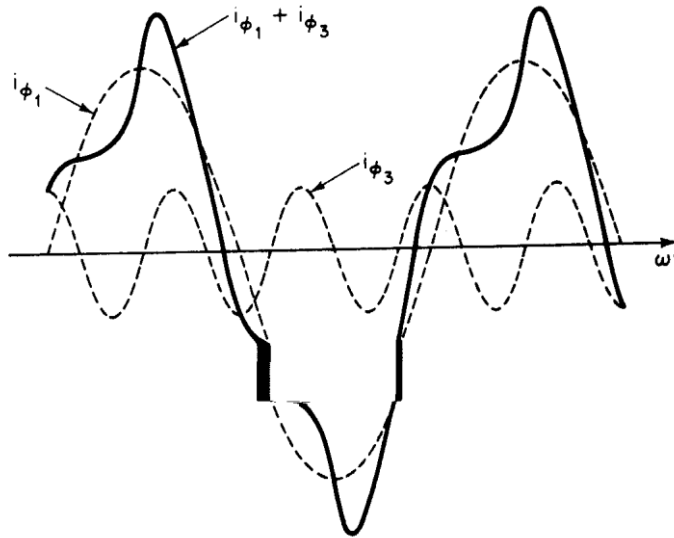


Przy zasilaniu sinusoidalnym, w stanie ustalonym schemat zastępczy można przedstawić w postaci:



Kształt prądu magnesującego uwzględniający nieliniową zależność pomiędzy natężeniem pola i indukcją magnetyczną ferromagnetycznego rdzenia transformatora

Skład harmoniczny prądu magnesującego:



$$i_f = I_{f1m} \sin \omega t - I_{f3m} \sin 3\omega t + I_{f5m} \sin 5\omega t - \dots$$

$$m_v = \frac{I_{fmv}}{I_{fm1}}$$

$$i_f = I_{f1m} (1 - m_3 + m_5 - m_7 + m_9 - \dots)$$

$$I_f = \frac{I_{f1m}}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + m_3^2 + m_5^2 + m_7^2 + m_9^2 + \dots}$$

$$I_f = \frac{I_{f1m}}{\sigma_f}$$

Współczynnik szczytu krzywej prądu magnesującego ma wartość:

$$\sigma_f = \frac{I_m}{I} = \sqrt{2} \frac{1 - m_3 + m_5 - m_7 + m_9 - \dots}{\sqrt{1 + m_3^2 + m_5^2 + m_7^2 + m_9^2 + \dots}}$$

### Straty w żelazie:

Straty mocy wywołane histerezą:

$$\Delta P_h = k_h f B_m^x$$

f – częstotliwość

$B_m$  - wartość maksymalna indukcji

$K_h$  – stała zależna od składu chemicznego i obróbki

Dla blachy anizotropowej (walcowana na zimno):

$$B_m < 1.45T - x=2$$

$$1.45 < B_m < 1.6T - x=2.25$$

$$B_m = 1.7T(\text{nasycenie}) - x=2.6$$

Wartość stratności jak i indukcji nasycenia zależy od kierunku magnesowania (anizotropia!)

– indukcja nasycenia w zależności od kierunku magnesowania:

$$\text{Zimno walcowana} = 1.5 \div 1.8T$$

$$\text{Gorąco walcowana} = 1.4 \div 1.6$$

Straty mocy wywołane prądami wirowymi:

$$\Delta P_w = k_w f^2 B_m^2$$

W praktyce straty wyznacza się na podstawie tzw. stratności (straty mocy w jednostce masy), podawanej przy określonej częstotliwości i indukcji (zwykle 50Hz i 1T (lub 1.5T))

- $p_{1.0} \cong 0.4W/kg$
- -  $p_{1.5} \cong 0.8 \div 1.0W/kg$
- dla blachy walcowanej na gorąco:
- $p_{1.0} \cong (4) 1.3 \div 0.8W/kg$

Typowa grubość blach: 0.35 ÷ 0.5 mm  $\Delta P_w \cong 0.25P_{fe}$ ,  $\Delta P_h \cong 0.75P_{fe}$

Technologia najnowsza: blachy amorficzne (szybkie studzenie gorącego metalu na podłożu - uzyskuje się bardzo małe grubości blach przy indukcji nasycenia ok.2.1T, od razu tworzy się warstwa izolacyjna (w postaci tlenku) – materiał bardzo drogi, o bardzo małej stratności – istotna wada – materiał bardzo kruchy – trudna obróbka.

Blachy nanokrystaliczne- bardzo mała stratność. Udział strat od prądów wirowych zwykle jest rzędu 40%-50% strat całkowitych w żelazie

Współczynnik wypełnienia rdzenia:

$$k = \frac{S_{fe}}{S_{fe} + S_{izol}}$$

k=0.9÷0.95 – blachy gorąco walcowane

k=0.98 – blachy zimnowalcowane

Wartość średnia napięcia dla półokresu

$$E_{sr} = \frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} e dt$$

$$E_{sr} = -\frac{2}{T} z \int_{\Phi}^{-\Phi} d\varphi = \frac{4}{T} z \Phi_m$$

Współczynnik kształtu:

$$\sigma_k = \frac{E}{E_{sr}}$$

Wartość rzeczywista siły elektromotorycznej indukowanej w uzwojeniach transformatora:

$$E = 4\sigma_k f z \Phi_m$$

dla sinusoidy:

$$\sigma_k = 1.11$$

Obliczanie strat mocy w żelazie:

$$\Delta P_{\dot{z}} = k_p (p_k m_k + p_j m_j)$$

$k_p$  – współczynnik strat dodatkowych w żelazie

(1.2..1.5- w zależności od sposobu zaplatania rdzenia)

$p_k, p_j$  – stratności odpowiadające indukcyjnościom w jarzmach i w kolumnach

$m_k, m_j$  – masy kolumn i jarzm

Składowa czynna prądu biegu jałowego:

$$I_{ocz} = \frac{\Delta P_{\dot{z}}}{E} \approx \frac{\Delta P_{\dot{z}}}{U}$$

Obliczanie prądu magnesującego:

$$Q = k_q (q_k m_k + q_j m_j)$$

$q_j, q_k$  – pobór jednostkowy mocy biernej dla uzyskania maksymalnych indukcyjności (z charakterystyk dla danego materiału)

$k_q$  – współczynnik doświadczalny (2..7) (zależny np. od indukcyjności maksymalnej, niezgodności kierunku magnesowania, nierównomiernego rozkładu indukcyjności, nieciągłości obwodu magnetycznego, naprężeń mechanicznych itp.)

$$I_{\mu} = \frac{Q}{E} \approx \frac{Q}{U} \quad I_o = \sqrt{I_{ocz}^2 + I_{\mu}^2}$$

Obliczanie wartości prądu magnesującego z prawa przepływu

Wartość maksymalna:

$$I_{fm} \mathcal{Z} = \sum H_x l_x$$

Wartość skuteczna:

$$I_f = \frac{\sum H_x l_x}{\mathcal{Z} \sigma_s}$$

$\sigma_s$  – współczynnik szczytu (dla sinusoidy  $\sigma_s \cong 1.41$ )

Największy wpływ na spadek napięcia magnetycznego ma grubość szczeliny powietrznej  $\delta$ , stąd istnieje dążność do minimalizacji grubości szczeliny powietrznej transformatora poprzez odpowiednie zaplatanie rdzeni i jarzm transformatora.



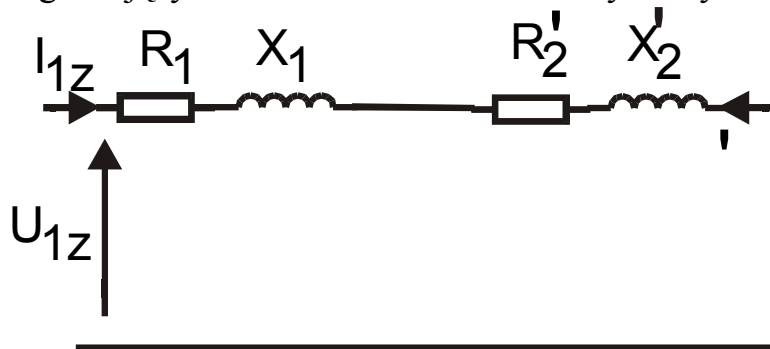
Pomińmy spadek napięcia magnetycznego w rdzeniu, wówczas:

$$I_f = \frac{H_\delta \delta}{z \sigma_s} \quad H_\delta = \frac{B_\delta}{\mu_0} = \frac{\Phi}{S \mu_0}$$
$$\Phi = \frac{U}{4.44 z f} \quad I_f = \frac{U \delta}{4.44 z^2 \sigma_s f S \mu_0} = c \delta$$

$$i_o = \frac{I_o}{I_n} 100\% \approx 0.5..5\%$$

### Zwarcie pomiarowe transformatora:

Pomijając prąd magnesujący w czasie stanu zwarcia otrzymamy schemat uproszczony:



Napięcie zwarcia:

$$\underline{U}_{1z} = \underline{I}_{1n} (R_1 + R'_2 + jX_1 + jX'_2)$$

$$\underline{U}_{1z} = \underline{I}_{1n} (R_z + jX_z)$$

$R_z, X_z$  – rezystancja i reaktancja zwarcia

Wartość skuteczna napięcia zwarcia:

$$U_{1z} = I_{1n} \sqrt{R_z^2 + X_z^2}$$

Procentowe napięcie zwarcia:

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

Czynne napięcie zwarcia:

$$U_{rz} = U_{1z} \cos \varphi_z$$

Bierne napięcie zwarcia:

$$U_{rx} = U_{1z} \sin \varphi_z$$

Kąt zwarciaowy określony jest zależnością:

$$\operatorname{tg} \varphi_z = \frac{X_z}{R_z}$$

Impedancja znamionowa:

$$Z_n = \frac{U_{fn}}{I_{fn}}$$

Wartość względna impedancji zwarciaowej:

$$z_{zr} = \frac{Z_z}{Z_n} = \frac{Z_z I_{fn}}{Z_n I_{fn}} = \frac{U_z}{U_n} = u_{zr}$$

Wartość względna rezystancji i reaktancji zwarciaowej:

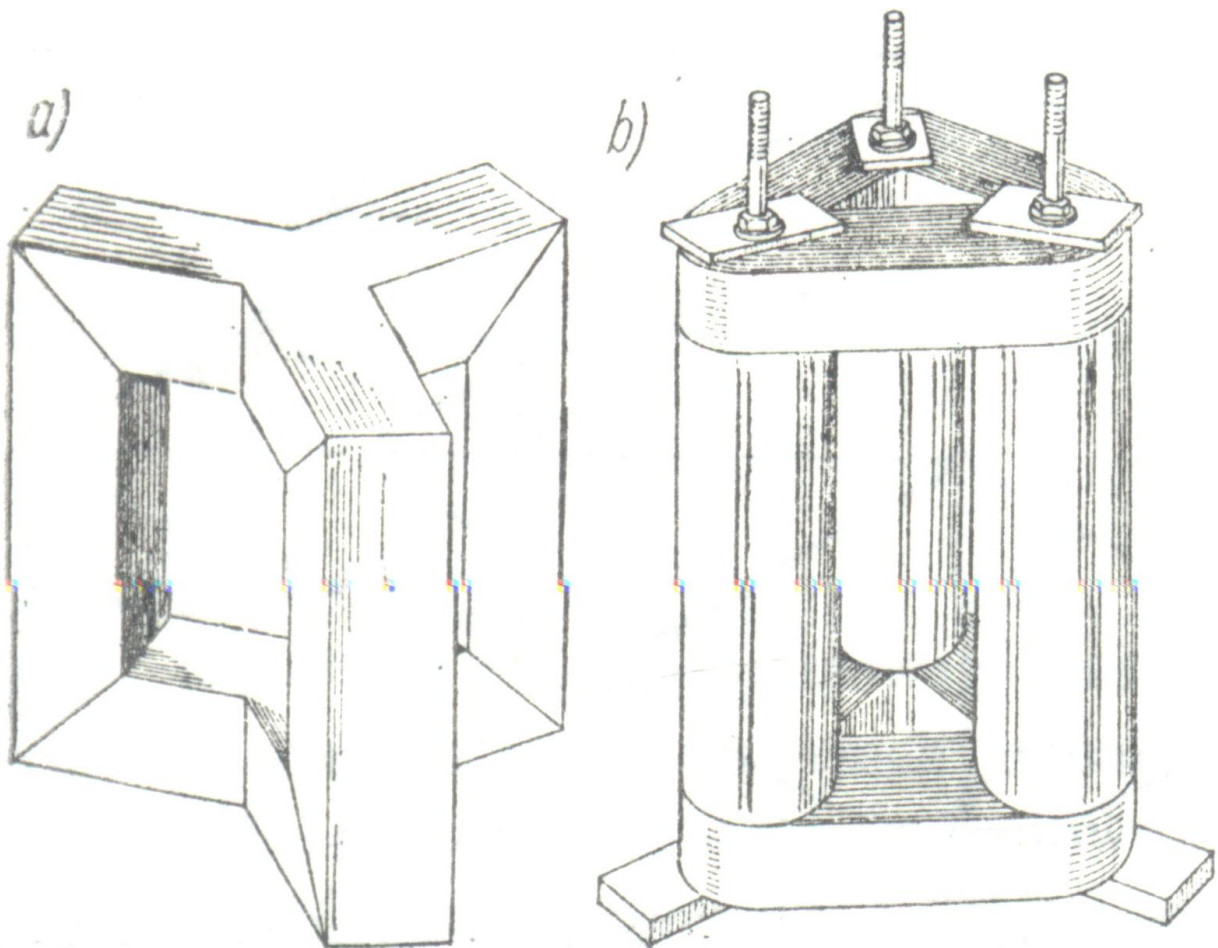
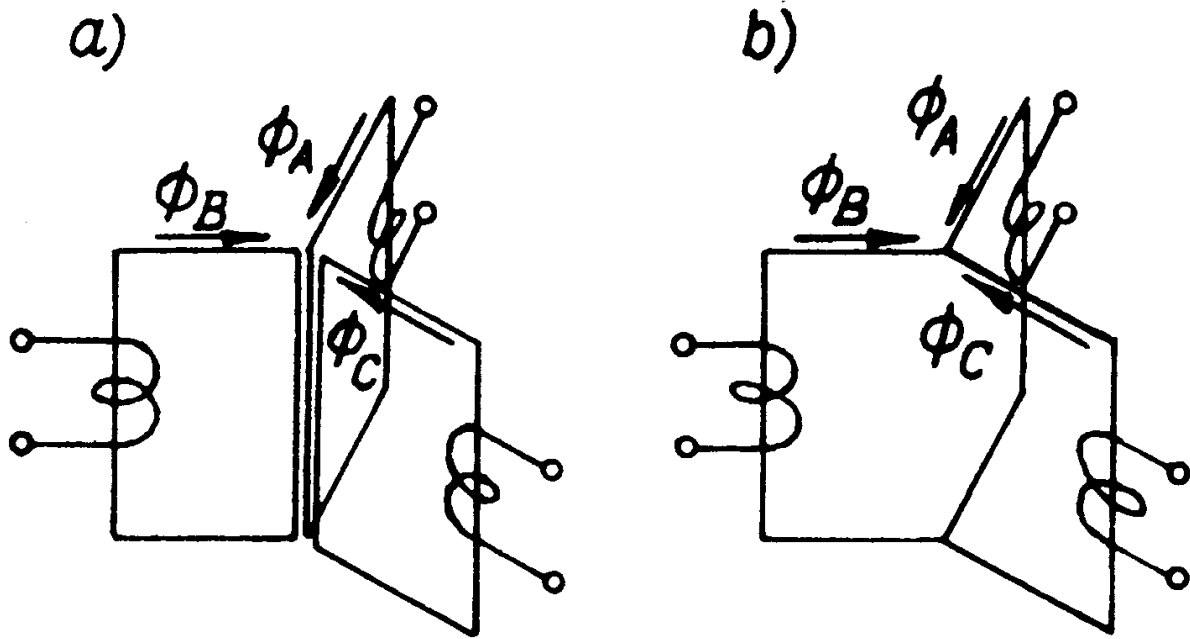
$$r_{zr} = \frac{R_z}{Z_n} = u_{R_z r} \quad x_{zr} = \frac{X_z}{Z_n} = u_{X_z r}$$

Straty obciążeniowe (straty w uzwojeniach):

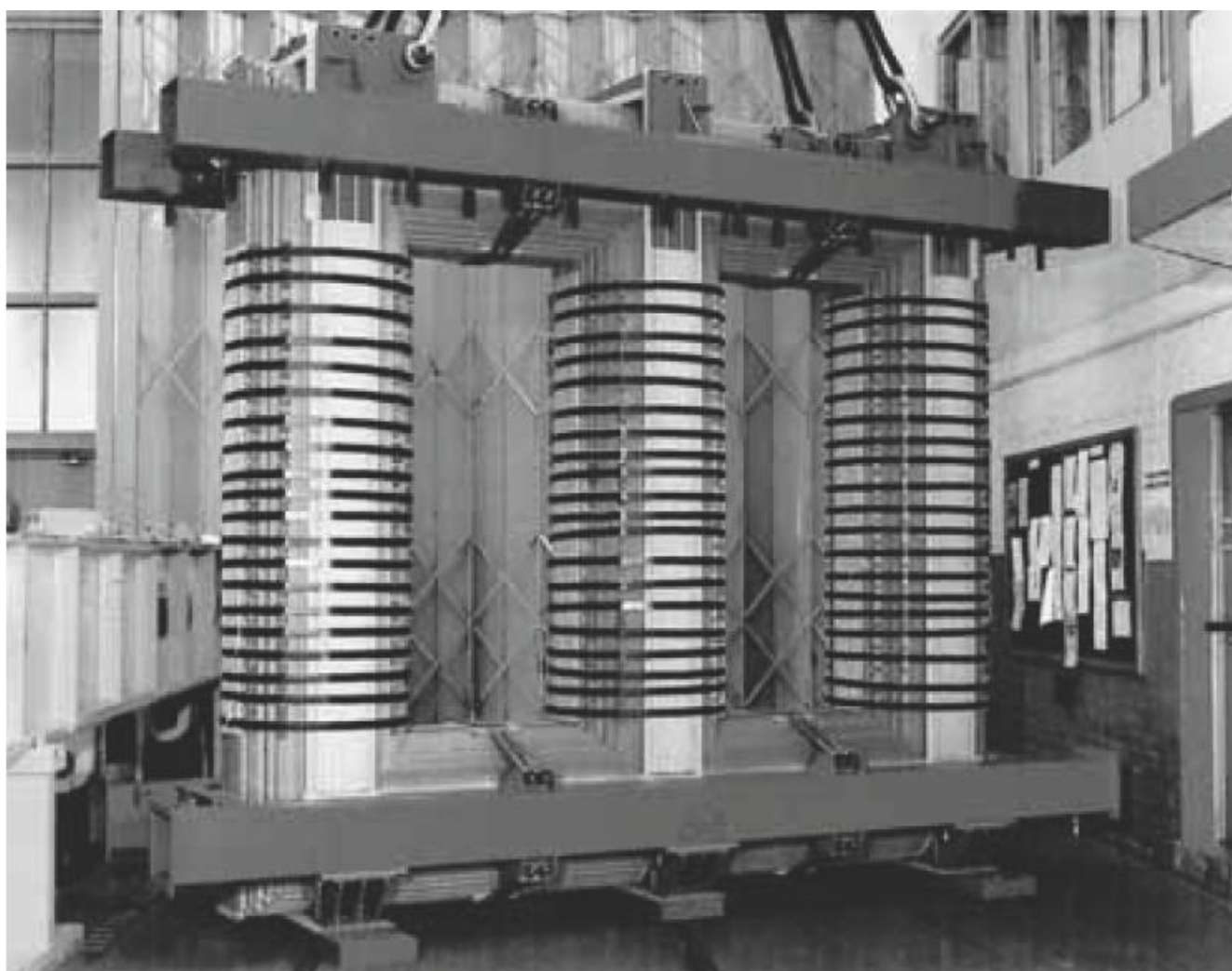
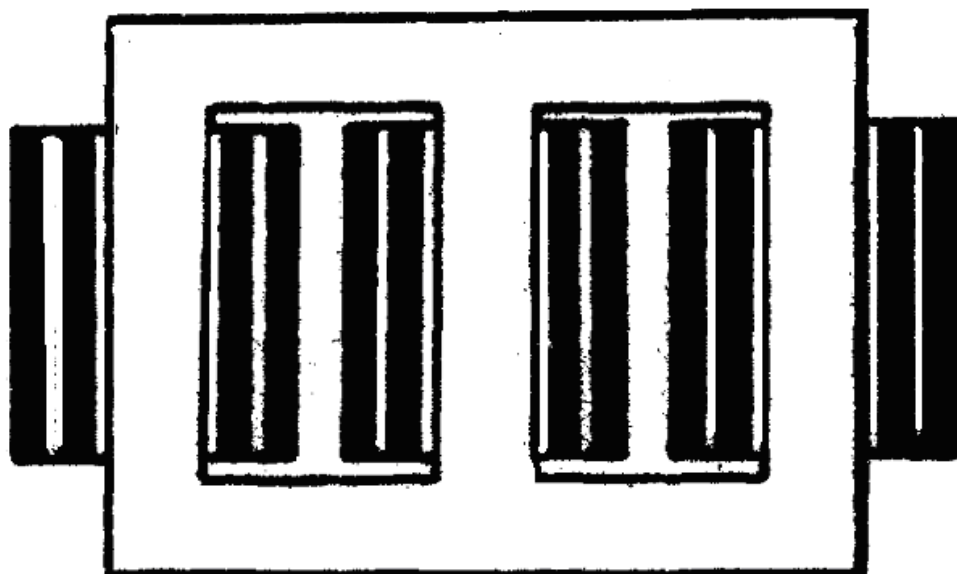
$$\Delta P_{Cu} = k R_z I_n^2$$

k – współczynnik strat dodatkowych (wynikających ze zjawiska związanego z nierównomiernym rozkładem prądu w przekroju przewodnika)

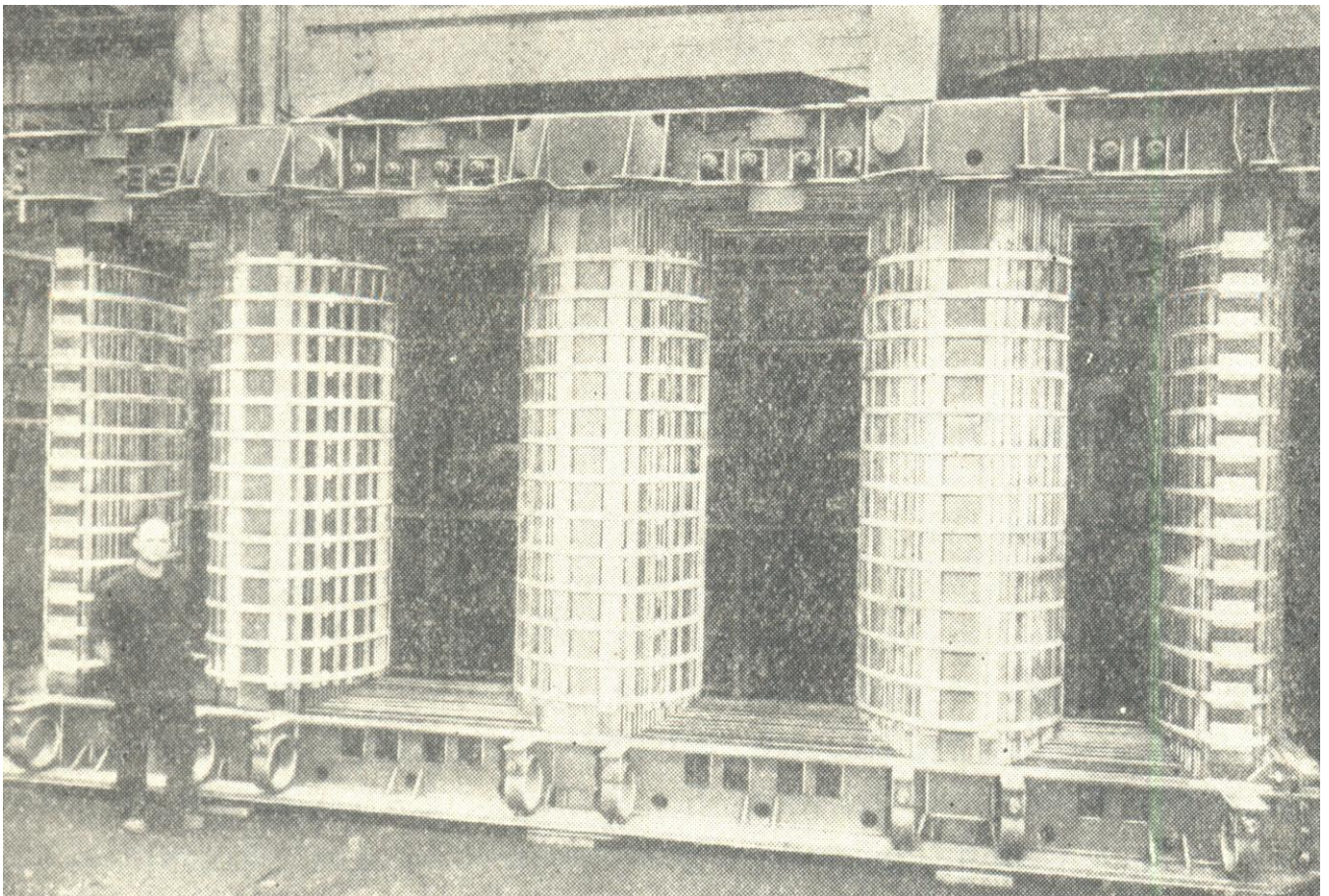
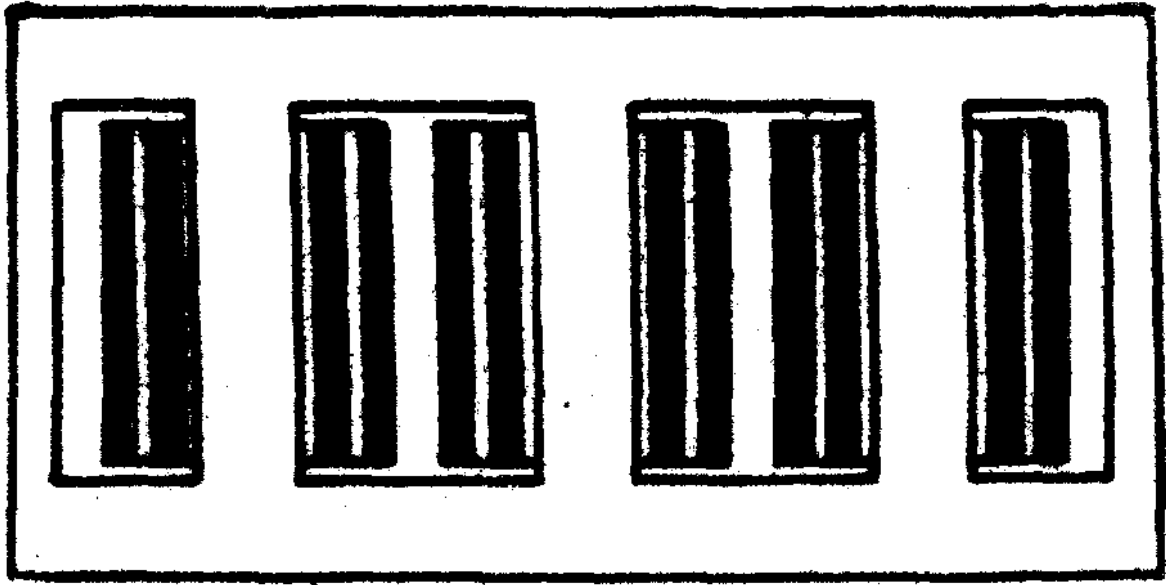
# Transformatory trójfazowe



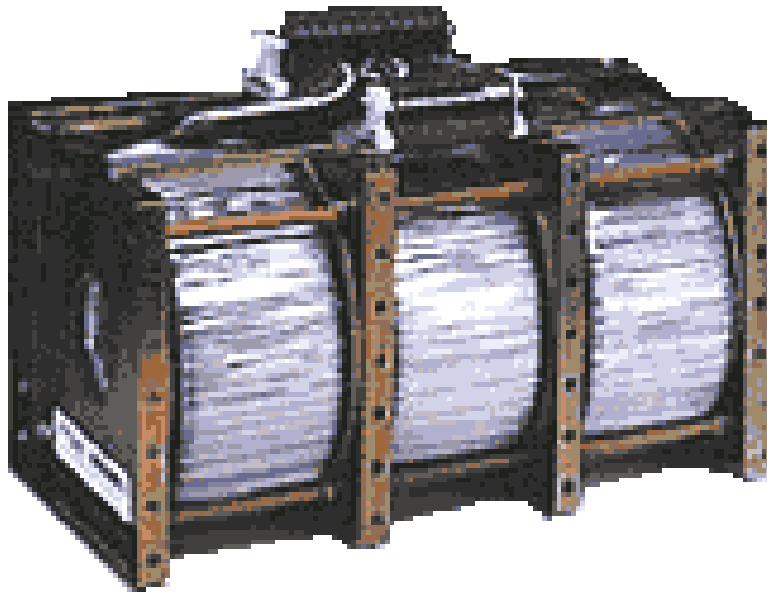
Rdzeń trójfazowy symetryczny



Transformator trójfazowy kolumnowy



Transformator trójfazowy płaszczowy



Toroidalny transformator trójfazowy firmy Trafber

Sposoby połączeń:

Y- gwiazda –+ przewód zerowy: przy sinusoidalnym napięciu fazowym prąd magnesujący zawiera 3 – harmoniczną – bez przewodu zerowego strumień jest odkształcony, napięcie indukowane (fazowe) zawiera 3 harmoniczną – odbiornik połączony na napięcie fazowe ma odkształcone napięcie

$$U_p = \sqrt{3}U_f \quad I_p = I_f$$

D – trójkąt – 3 harmoniczną prądu mogą płynąć, tłumiąc 3 –harmoniczną w strumieniu, zatem prąd przewodowy i napięcia są sinusoidalne, prąd 3 harmoniczną zamyka się wewnątrz trójkąta! W dużych transformatorach z układem połączeń Yy stosuje się wewnętrzne dodatkowe uzwojenie połączone w trójkąt (bez wyprowadzonych końcówek – tylko w celu tłumienia 3-harmoniczną w strumienia

$$U_p = U_f \quad I_p = \sqrt{3}I_f$$

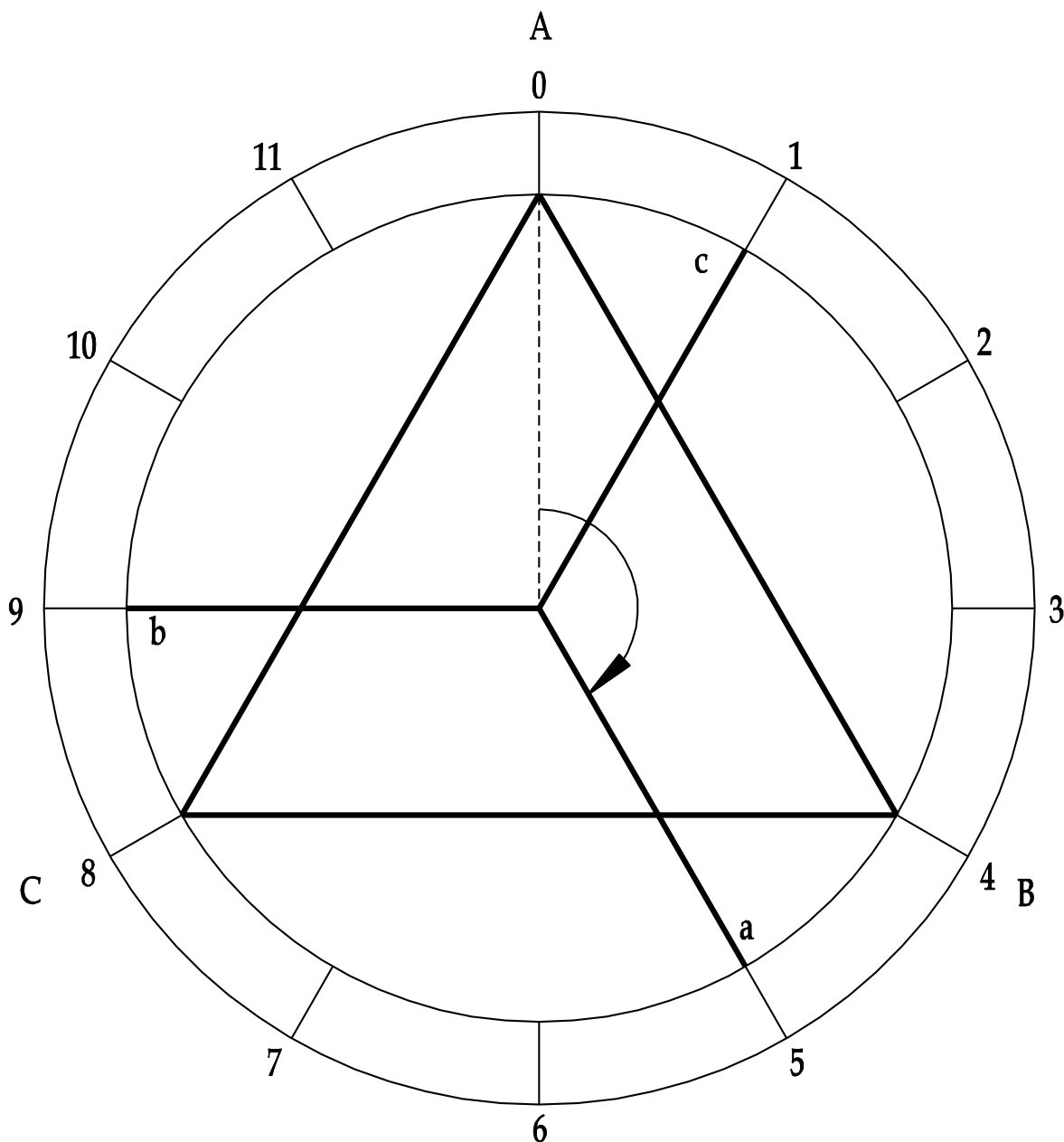
z – zygzak - umożliwia niesymetryczne obciążenie transformatora

$$U_p = \sqrt{3}U_{fz} \quad I_p = I_f$$

$$U_{fz} = 2 \frac{U}{2} \cos \frac{\pi}{6} = \frac{\sqrt{3}}{2} U \approx \frac{U}{1.15}$$

U – napięcie fazowe, jakie wystąpiłoby, gdyby obydwie połowki uzwojenia zygzaka stanowiły jedną fazę – o 15% większe zużycie miedzi na budowę zygzaka!

## Grupy połączeń transformatorów trójfazowych



Przesunięcie godzinowe – kąt pomiędzy wektorem napięcia strony górnej i strony dolnej (liczony zgodnie z kierunkiem ruchu wskazówek zegara liczony w godzinach)

$$1h - 30^\circ = \pi/6 \text{ rad}$$

Yy, Dd – 0, 2, 4, 6, 8, 10

Yd, Yz – 1, 3, 5, 7, 9, 11

Dz – 0, 2, 4, 6, 8, 10

Zalecenia PN : 0, 5, 6, 11



### Przekładnia transformatora

- stosunek napięcia górnego do napięcia dolnego międzyprzewodowego w stanie jałowym:

$$\mathcal{G} = \frac{U_{g0}}{U_{d0}} \quad \mathcal{G}_{Dd} = \mathcal{G}_z \quad \mathcal{G}_{Yy} = \mathcal{G}_z$$

$$\mathcal{G}_{Dy} = \frac{U_{gf}}{U_{df} \sqrt{3}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \mathcal{G}_z \quad \mathcal{G}_{Yd} = \frac{U_{gf} \sqrt{3}}{U_{df}} = \sqrt{3} \mathcal{G}_z$$

$$\mathcal{G}_{Dz} = \frac{U_{gf}}{U_{df} \frac{\sqrt{3}}{2} \sqrt{3}} = \frac{2}{3} \mathcal{G}_z \quad \mathcal{G}_{Yz} = \frac{U_{gf} \sqrt{3}}{U_{df} \frac{\sqrt{3}}{2} \sqrt{3}} = \frac{2}{\sqrt{3}} \mathcal{G}_z$$

Obciążenie transformatora:

Strata napięcia – wektor będący różnicą wektorów napięć obciążonej strony wtórnej i strony pierwotnej:

$$\underline{\Delta U} = \underline{U}'_2 - \underline{U}_1$$

Spadek napięcia – różnica algebraiczna pomiędzy wartościami skutecznymi napięcia strony wtórnej (sprowadzonego do strony pierwotnej) i napięciem strony pierwotnej. Przy pominięciu gałęzi poprzecznej schematu zastępczego, dla danego kąta przesunięcia pomiędzy napięciem a prądem strony wtórnej  $\cos\varphi_2$ , spadek napięcia można wyrazić zależnością:

$$\Delta U = U'_2 - U_1 \approx U_{R_z} \cos\varphi_2 + U_{X_z} \sin\varphi_2$$

lub z dokładnego wzoru:

$$\Delta U = U_{R_z} \cos \varphi_2 + U_{X_z} \sin \varphi_2 + \\ + \frac{1}{2} (U_{X_z} \cos \varphi_2 - U_{R_z} \sin \varphi_2)^2$$

Zmienność napięcia – spadek napięcia przy obciążeniu prądem znamionowym  $I_n$  przy danym  $\cos \varphi_2$ , przy znamionowym napięciu pierwotnym i znamionowej częstotliwości.

Z uwagi na zależność spadku napięcia od charakteru obciążenia i wartości prądu obciążenia w praktyce wynika potrzeba regulacji napięcia. Najczęściej zmienia się przekładnię transformatora w stanie beznapięciowym lub pod obciążeniem w zakresie  $\pm 5\%$  poprzez stosowanie przełącznika zaczeów.

Dla transformatorów dużych (blokowych i sieciowych) – regulacja pod obciążeniem -  $\pm 20\%$

**Klasa izolacji (klasy ciepłoodporności)– dopuszczalne przyrosty temperatury:**

Klasa A -  $60^\circ$

Klasa E -  $65^\circ \div 75^\circ$

Klasa B -  $70^\circ \div 80^\circ$

Klasa F -  $85^\circ \div 100^\circ$

Klasa H -  $105^\circ \div 125^\circ$

(tolerancje w nawiasach zależą od sposobu pomiaru, typu i wielkości maszyny – dokładne dane podano w Normach)

Klasa A i E: jedwab, bawełna, papier, preszpan, tekstolit bawełniany, emalie, lakiery na bazie asfaltu, oleju lnianego, żywicy ftalowej i in.

Wyższe klasy – melamina, polwinył, włókna i tkaniny szklane, azbestowe, tkanina oklejana mika; materiały do opiekania na gorąco – mikanity (warstwy miki na podłożu nośnym, klejone lepiszczami); lakiery nasycające na bazie żywic epoksydowych, poliestrowych, poliuretanowych, silikonowych i innych.

W transformatorach energetycznych rolę dielektryka oprócz izolacji podstawowej stanowi także olej transformatorowy – jednocześnie jest czynnikiem chłodzącym.

## Wyposażenie transformatorów energetycznych:

Do wyposażenia transformatorów energetycznych można zaliczyć:

- Konserwator oleju – ograniczenie styku oleju z powietrzem (rozpuszczanie tlenu w oleju – przyspieszenie procesu starzenia izolacji, pogorszenie właściwości izolacyjnych oleju itp...), umożliwienie zmian objętości oleju pod wpływem temperatury, - zamiast konserwatora: kadź hermetyczna z poduszką azotową –USA) – konserwator trójkomorowy z ochroną azotową, transformatory hermetyczne z poduszką powietrzną itp...
- radiatory
- wentylatory
- chłodnice powietrzne i wodne
- rura wybuchowa (>2MVA) –zawór bezpieczeństwa, który ma zapobiegać możliwości rozsadzenia kadzi wskutek zbyt dużego ciśnienia wewnętrznego, przy uszkodzeniach połączonych z gwałtownym wydzielaniem gazu z oleju
- przełącznik gazowo – podmuchowy (przełącznik Buchholtza z 1921r) podstawowe urządzenie sygnalizacyjne sygnalizujące: przeskok w układzie izolacyjnym, zwarcia międzyzwojowe, intensywne wyładowania niezupełne, iskrzenie na połączeniach toru prądowego, większe lokalne przegrzania, nieszczelności kadzi powodujące wyciek oleju – umieszczony w rurze łączącej kadź transformatora z konserwatorem oleju – zasada działania wykorzystuje fakt termicznego rozkładu oleju, którego część wydziela się w postaci gazu.
- wskaźniki temperatury i poziomu oleju
- przekładniki prądowe i napięciowe
- szafy sterownicze
- przepusty transformatorowe
- zawory
- układy pomiarowo – diagnostyczne

## Oznaczenia końcówek transformatorów

- jednofazowe: A-X; a-x
- trójfazowe A-X, B-Y, A-Z, a-x, b-y, c-z,  $a_1-x_1$ ,  $b_1-y_1$ ,  $c_1-z_1$ ,  $a_2-x_2$ ,  $b_2-y_2$ ,  $c_2-z_2$ ,

Rodzaje pracy transformatorów:

- podwyższające napięcie (elektrowniane – generatorowe, blokowe- moc rzędu setek MVA, przy wysokim napięciu wtórnym do 400kV)
- obniżające napięcie (zwykle dwustopniowo: np. 220/15 kV(sieciowe -duże moce rzędu dziesiątek i setek MVA) +220/0.4 kV (220/0.231kV) – rozdzielcze moc ok. 63..1600kVA)
- przekazujące energię w kierunku zależnym od pracy układu energetycznego (np. sprzęgające – dołączenia sieci o różnych wartościach wysokich napięć np. 220/400kV

## Praca równoległa transformatorów:

- 1) przy sieci wtórnej nieobciążonej w uzwojeniach transformatorów nie płyną żadne prądy poza prądami jałowymi w prądach pierwotnych  
Ze wzrostem prądu obciążenia zewnętrznego transformatory obciążają się równomiernie i osiągają swe prądy znamionowe jednocześnie
- 2) Prądy transformatorów są ze sobą w fazie (prąd obciążenia jest równy sumie algebraicznej prądów transformatorów – lub inaczej : moc pozorna wszystkich odbiorników równa się sumie arytmetycznej mocy pozornych transformatorów)

### Warunek 1):

- równość przekładni – nierówność przekładni pociąga za sobą istnienie prądów wyrównawczych, ograniczonych tylko impedancją wewnętrzną transformatorów. Dopuszcza się odchyłkę przekładni równą 0.1 procentowego napięcia zwarcia, z tym, że nie może być większa niż 0.5%)
- taka sama grupa połączeń transformatorów- napięcia między zaciskami jednoimiennymi powinny być ze sobą w fazie- wartości chwilowe odpowiednich napięć międzyzaciskowych muszą być w każdej chwili sobie równe

### Warunek 3) –

Zgodność faz prądów-

Pokrywają się trójkąty zwarcia –

W praktyce spełnione jedynie dla nieznacznych różnic mocy znamionowych transformatorów-

Stosunek mocy znamionowych nie może przekraczać 1:3

### Warunek 2)

:-równomierne obciążanie się transformatorów:

$$\frac{I^{(1)}}{I_n^{(1)}} = \frac{I^{(2)}}{I_n^{(2)}} = \frac{I^{(3)}}{I_n^{(3)}} = \dots$$

Dla uproszczonego schematu zastępczego:

$$\underline{I}^{(1)} \underline{Z}_z^{(1)} = \underline{I}^{(2)} \underline{Z}_z^{(2)} = \underline{I}^{(3)} \underline{Z}_z^{(3)} = \dots$$

Biorąc pod uwagę, że:

$$u_{z\%}^{(i)} = \frac{I_n^{(i)} Z_z^{(i)}}{U_n}$$

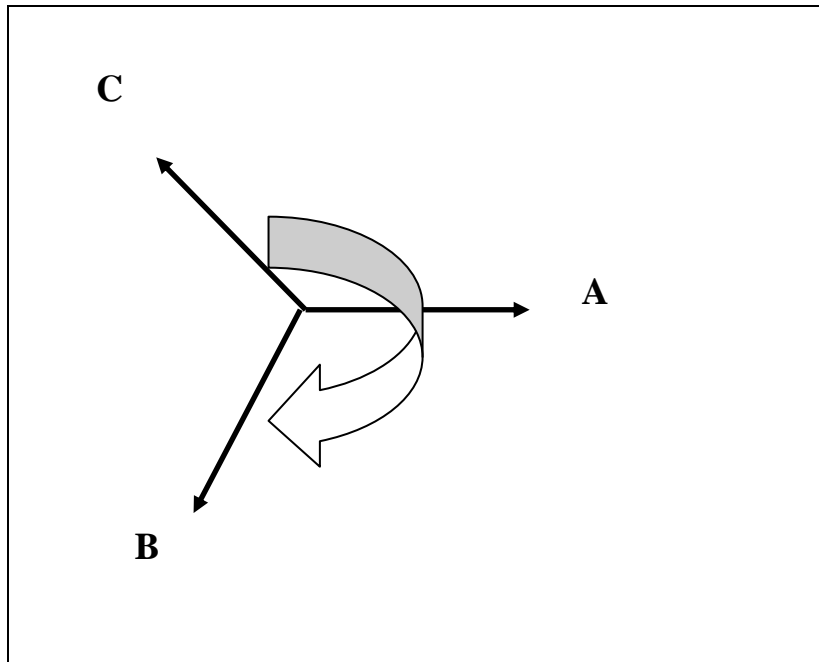
Otrzymamy dla wartości bezwzględnych:

$$\frac{I^{(1)}}{I_n^{(1)}} u_z^{(1)} = \frac{I^{(2)}}{I_n^{(2)}} u_z^{(2)} = \frac{I^{(3)}}{I_n^{(3)}} u_z^{(3)} = \dots$$

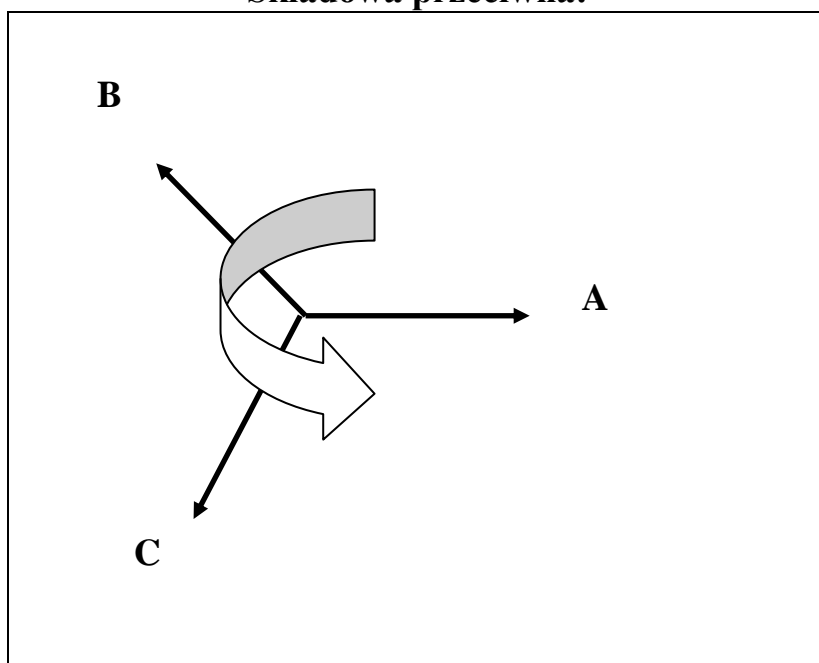
Warunek 2) będzie zatem spełniony, gdy napięcia zwarcia transformatorów przeznaczonych do pracy równoległej będą jednakowe.

Przepisy polskie dopuszczają odchyłkę  $\pm 10\%$  napięcia zwarcia

**Niesymetria obciążenia:**  
Metoda składowych symetrycznych:  
**Składowa zgodna:**



**Składowa przeciwna:**



$$\begin{bmatrix} \underline{I}^{(1)} \\ \underline{I}^{(2)} \\ \underline{I}^{(0)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_A \\ \underline{I}_B \\ \underline{I}_C \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \underline{I}_A \\ \underline{I}_B \\ \underline{I}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}^{(1)} \\ \underline{I}^{(2)} \\ \underline{I}^{(0)} \end{bmatrix}$$

gdzie:

$$a = e^{j2\pi/3} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$a^2 = e^{j4\pi/3} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$a + a^2 = -1$$

$$1 + a + a^2 = 0$$

Dla Składowej zgodnej i przeciwnej schemat zastępczy transformatora jest identyczny – zwykle przyjmuje się schemat uproszczony (z pominięciem  $X_\mu$  i  $R_{Fe}$ )

Składowa zerowa może płynąć jedynie wówczas, gdy w układzie połączeń wyprowadzono przewód zerowy.

Zachowanie się transformatora dla tej składowej zależy jest od układu połączeń oraz od budowy rdzenia transformatora. W układach połączeń z wyprowadzonym punktem zerowym po stronie wtórnej ( $Y_{y_0}$ ,  $Y_{z_0}$ ) prądy składowej zerowej płyną jedynie po stronie wtórnej, przy czym prądy tej składowej wytwarzają w rdzeniu strumienie składowej zerowej, które zamykają się w transformatorach 3-kolumnowych przez powietrze (oraz każdą i elementy konstrukcyjne zwiększając straty transformatora), natomiast w transformatorach 5-kolumnowych przez kolumny skrajne

Dla układów połączonych po stronie pierwotnej w trójkąt ( $D_{y_0}$ ) strumienie składowej zerowej wytwarzają w trójkącie s.e.m., które powodują przepływ prądu wewnątrz trójkąta, wytłumiając w ten sposób strumień tej składowej, stąd daje to możliwości pracy takiego układu dla obciążeń niesymetrycznych. Dodatkowo układ umożliwia pracę przy jednej uszkodzonej fazie (otwarty trójkąt).

W dużych transformatorach  $Y_{y_0}$  – dodatkowo nawija się uzwojenie połączone w trójkąt bez wyprowadzania jego końcówek na zewnątrz jedynie po to, by wytłumić składową zerową strumienia.

W połączeniach strony wtórnej w zygzak strumienie składowej zerowej znoszą się, co umożliwia pracę w pełnym zakresie niesymetrycznego obciążenia

### Przykład:

$Y_{y_0}$  – obciążenie 1 –fazowe:

Strona wtórna – prądy fazowe są równe:

$$I_a = I$$

$$I_b = I_c = 0$$

Składowe symetryczne dla strony wtórnej dla tego przypadku są równe:

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_w^{(1)} \\ \underline{I}_w^{(2)} \\ \underline{I}_w^{(0)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\underline{I}_w^{(1)} = \underline{I}_w^{(2)} = \underline{I}_w^{(0)} = \frac{1}{3} I$$

$$\underline{I}_p^{(1)} = -\underline{I}_w^{(1)} \frac{1}{\mathcal{G}} = -\frac{1}{3} \frac{1}{\mathcal{G}} I$$

$$\underline{I}_p^{(2)} = -\underline{I}_w^{(2)} \frac{1}{\mathcal{G}} = -\frac{1}{3} \frac{1}{\mathcal{G}} I \quad \underline{I}_p^{(0)} = 0$$

Prądy fazowe strony pierwotnej:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_p^{(0)} + \underline{I}_p^{(1)} + \underline{I}_p^{(2)} = -\frac{1}{3} \frac{1}{\mathcal{G}} I - \frac{1}{3} \frac{1}{\mathcal{G}} I = -\frac{2}{3} \frac{1}{\mathcal{G}} I$$

$$\underline{I}_B = \underline{I}_p^{(0)} + a^2 \underline{I}_p^{(1)} + a \underline{I}_p^{(2)} = -\frac{1}{3} \frac{1}{\mathcal{G}} I (a^2 + a) = \frac{1}{3} \frac{1}{\mathcal{G}} I$$

$$\underline{I}_C = \underline{I}_p^{(0)} + a \underline{I}_p^{(1)} + a^2 \underline{I}_p^{(2)} = -\frac{1}{3} \frac{1}{\mathcal{G}} I (a^2 + a) = \frac{1}{3} \frac{1}{\mathcal{G}} I$$



**Sprawność transformatora:**

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_j + \Delta P_{obc}} \quad P_2 = mU_2 I_2 \cos \varphi_2$$

$\Delta P_j$  - straty jałowe

Straty obciążeniowe: 
$$\Delta P_{obc} = mI_1^2 R_z = mI_2^2 \frac{1}{g^2} R_z$$

$$\eta = \frac{mU_2 I_2 \cos \varphi_2}{mU_2 I_2 \cos \varphi_2 + \Delta P_j + mI_2^2 \frac{1}{g^2} R_z}$$

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{\Delta P_j}{mU_2 I_2 \cos \varphi_2} + \frac{I_2}{U_2 \cos \varphi_2} \frac{1}{g^2} R_z}$$

Przy danym  $I_2$  - sprawność maleje ze zmniejszaniem się współczynnika mocy strony wtórnej  
Przy stałym współczynniku mocy sprawność zależy jedynie od  $I_2$ .

Wartość maksymalna sprawności występuje gdy:

$$\frac{d\eta}{dI_2} = 0$$

$$\frac{d}{dI_2} \left( 1 + \frac{\Delta P_j}{mU_2 I_2 \cos \varphi_2} + \frac{I_2}{U_2 \cos \varphi_2} \frac{1}{g^2} R_z \right) = 0$$

$$-\frac{\Delta P_j}{mU_2 I_2^2 \cos \varphi_2} + \frac{1}{U_2 \cos \varphi_2} \frac{1}{g^2} R_z = 0$$

$$\Delta P_j = \frac{1}{g^2} R_z mI_2^2 = \Delta P_{obc}$$

Sprawność energetyczna:

$$\eta_e = \frac{\sum_1^k t_i P_{2i}}{\sum_1^k t_i P_{2i} + \Delta P_j \sum_1^k t_i + \sum_1^k t_i \Delta P_{(obc)i}}$$

## Wybrane stany nieustalone transformatora:

Założenia:

- amplituda napięcia na zaciskach pierwotnych ma wartość stałą niezależnie od zjawisk zachodzących w transformatorze
- zwarcie występuje równocześnie na wszystkich trzech zaciskach wtórnych (trójfazowe zwarcie symetryczne lub transformator jednofazowy)
- Stan zwarcia udarowego analizujemy jako włączenie transformatora przy zwartych zaciskach wtórnych

Dla schematu uproszczonego:

$$\underline{Z}_z = R_z + jX_z = R_z + j\omega L_z$$

$$u_1 = R_z i_z + \frac{d\Psi_z}{dt} \quad \Psi_z = L_z i_z$$

Napięcie zasilające:

$$u_1 = U_{1m} \sin(\omega t + \alpha_z)$$

Rozwiązanie takiego równania jest sumą dwóch składowych (periodycznej i aperiodycznej):

$$i_z = i_{zp} + i_{za}$$

Składowa periodyczna:

$$i_{zp} = \frac{U_{1m}}{Z_z} \sin(\omega t + \alpha_z - \varphi_z)$$

Składowa aperiodyczna:

$$i_{za} = \frac{U_{1m}}{Z_z} \sin(\alpha_z - \varphi_z) e^{-\frac{t}{T_z}}$$

Stała czasowa:

$$T_z = \frac{L_z}{R_z}$$

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

$$e^{-\frac{t}{T_z}} = 1$$

Największa wartość prądu udarowego:

$$i_z = 2\sqrt{2}I_z$$

Gdzie  $I_z$  jest wartością skuteczną prądu zwarcia w stanie ustalonym.

W transformatorach rzeczywistych ( $R_z > 0$ ):

$$i_z = k2\sqrt{2}I_z$$

$k=1.08..1.3$  dla małych transformatorów

$k=1.7-1.85$  dla dużych transformatorów

Tak duża wartość prądu udarowego może powodować:

- nadmierne grzanie się uzwojeń
- rozrywanie uzwojeń pod wpływem oddziaływania sił dynamicznych

### Prąd włączenia transformatora:

(załączenie transformatora przy rozwartych uzwojeniach strony wtórnej)

Podobnie jak przy zwarciu równania stanu dynamicznego przyjmują postać:

$$u_1 = R_0 + \frac{d\Psi_0}{dt}$$

$$\Psi_z = L_0 i_z$$

$$u_1 = U_{1m} \sin(\omega t + \alpha_0)$$

W stanie jałowym wartość indukcyjności  $L_0$  nie jest stała i zależy od stanu nasycenia maszyny, stąd dla potrzeb analizy równanie dynamiki zapiszemy dla strumieni:

$$U_{1m} \sin(\omega t + \alpha_z) = \frac{R_0}{L_0} \Psi + \frac{d\Psi}{dt}$$

W stanie jałowym:

$$\frac{R_0}{L_0} \Psi \ll \frac{d\Psi}{dt}$$

Dla uproszczenia analizy możemy przyjąć, że  $L_0$  w tym równaniu jest stałe (natomiast przy wyznaczaniu prądu z wartości strumienia analizę wykonamy zgodnie z krzywą magnesowania rdzenia)

Podobnie jak przy zwarcu otrzymamy dwie składowe strumieni (periodyczną i aperiodyczną):

$$\Psi_{0p} = \Psi_{pm} \sin(\omega t + \alpha_z - \varphi_z)$$

Składowa aperiodyczna:

$$\Psi_{0a} = C e^{-\frac{t}{T_0}}$$

Stała całkowania można wyznaczyć z warunków początkowych z uwzględnieniem strumienia rewanentu magnetycznego

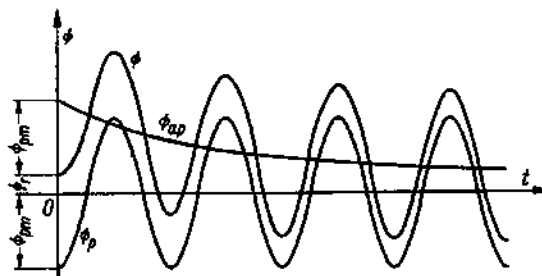
Podobnie jak przy zwarcu stan przejściowy zależy od chwili włączenia transformatora do sieci.

W najkorzystniejszym przypadku od razu powstaje strumień sinusoidalny równa strumieniowi w stanie jałowym (ustalonym).

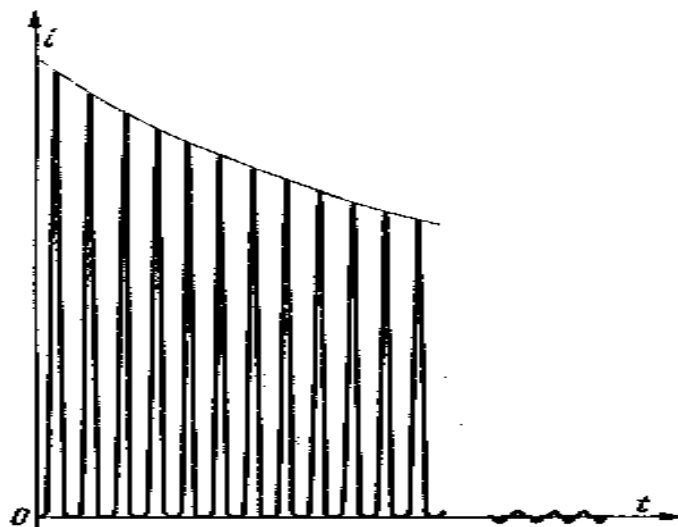
W najgorszym przypadku strumień może osiągnąć wartość:

$$\Psi_{\max} \approx 2\Psi_u + \Psi_r$$

Ponad dwukrotny wzrost strumienia powoduje silne nasycenie rdzenia i duży wzrost prądu (nawet do  $150I_0 > I_n$ ) co może prowadzić do zadziałania zabezpieczeń.



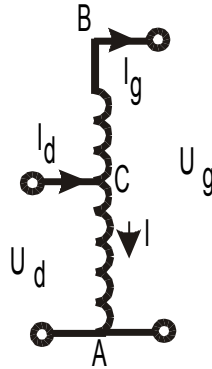
Strumień w rdzeniu przy najbardziej niekorzystnym włączeniu transformatora



Przebieg prądu włączenia transformatora

## Transformatory specjalne

- transformatory trójuzwojeniowe: dwa różne napięcia odbiorcze – zamiast dwóch jednostek dwuuzwojeniowych – istnieje możliwość rozdzielania parametrów zwarciovych (rezystancji i reaktancji zwarcia ) poprzez wykonanie trzech prób zwarcia ( $Z_{12}, Z_{23}, Z_{13}$ )
- Autotransformator – część uzwojenia jest wspólna dla strony górnego i dolnego napięcia



Dla  $I_g=0$  – stan jałowy:

$$U_d = U_{AC} = U_{AB} \frac{z_{AC}}{z_{AB}} = \frac{U_g}{\mathcal{G}}$$

Przekładnia autotransformatora:

$$\mathcal{G} = \frac{z_{AB}}{z_{AC}} = \frac{z_g}{z_d}$$

Przy pominięciu strat wywołanych prądem  $I$ , to otrzymamy:

$$U_d I_d = U_g I_g \quad I_d = \frac{U_g}{U_d} I_g = \mathcal{G} I_g \quad \underline{I}_d = \underline{I}_g + \underline{I}$$

W przybliżeniu:

$$I = I_d - I_g = I_d - \frac{I_d}{\mathcal{G}} \quad I = I_d \frac{\mathcal{G}-1}{\mathcal{G}}$$

Jeśli przekładnia jest bliska jedności, to prąd  $I$  jest bardzo mały, a więc na autotransformator potrzeba mniej miedzi- stąd czasami stosuje się nazwę transformator oszczędnościowy

Nie uwzględniając strat:

$$S = U_d I_d = U_g I_g$$

$S$ - jest tzw. mocą przechodnią transformatora

Moc własna autotransformatora (decyduje o wymiarach):  $S' = U_d I = S \frac{\mathcal{G}-1}{\mathcal{G}}$