

MASZYNY ELEKTRYCZNE

1) Wyjaśnić powstawanie pola wirującego kołowego w maszynie elektrycznej

Premienny prąd elektryczny pływający przez uzwojenie umieszczone w stojanie silnika powoduje powstanie przemennego pola magnetycznego.

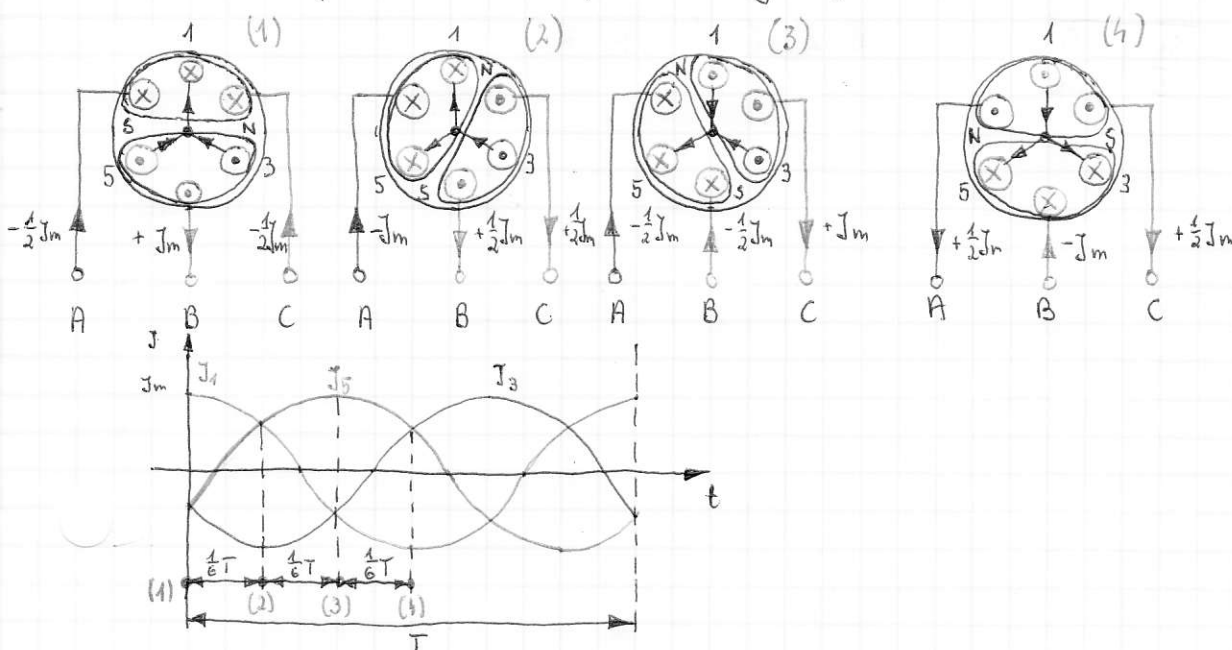
Wektor tego pola ~~wiruje~~ ^{pulsuje} z częstotliwością prądu pływającego przez uzwojenie.

Zasilanie trzech uzwojeń stojana napięciem trójfazowym, powoduje powstanie trzech pól pulsujących z tą samą częstotliwością, ale przesuniętych w fazie.

Dodając wektory pól pulsujących otrzymuje się wypadkowy wektor pola wirującego wokół osi obrotu.

Przebiegi poszczególnych faz są przesunięte względem siebie o kąt 120°

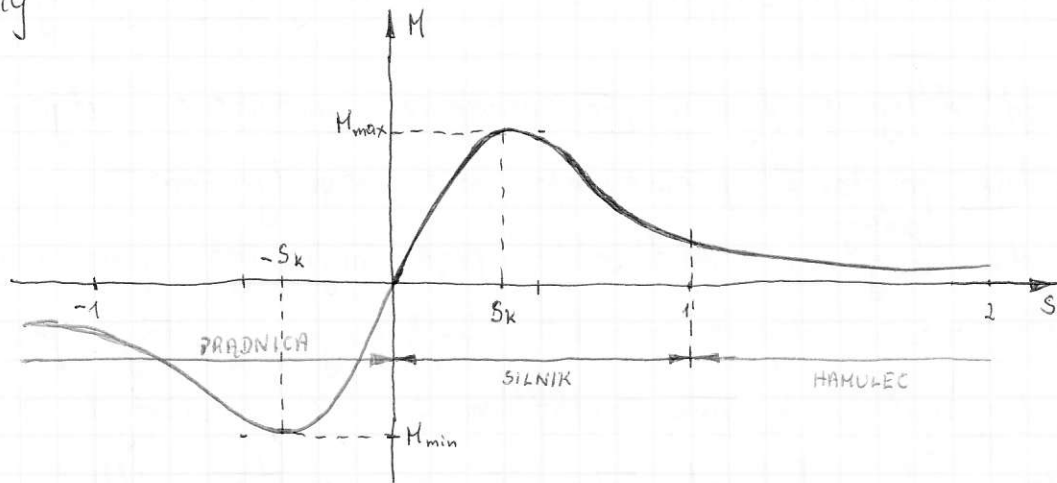
Mechanizm powstawania pola wirującego



Prędkość synchroniczna pola wirującego obliczana jest ze wzoru:

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \text{ [obr/min]}$$

2) Narysować charakterystykę mechaniczną silnika indukcyjnego i zaznaczyć zakresy pracy



Wzór Klossa

$$\frac{M}{M_k} \approx \frac{2 + \beta s_k}{\frac{s_k}{s} + \frac{s}{s_k + \beta s_k}}$$

$$\beta = \frac{2R_1}{C_1 R_2'}$$

$$\frac{M}{M_k} \approx \frac{2}{\frac{s_k}{s} + \frac{s}{s_k}}$$

$$\beta = 2 \quad C_1 = 1 \quad R_1 = R_2'$$

3) Dlaczego przy wyznaczaniu parametrów podłączonych transformatora pomija się straty w żelazie?

Parametry podłóżne transformatora wyznacza się w stanie zwarcia, w którym uzwojenie wtórne jest zwarte, a uzwojenie pierwotne zasila się napięciem niższym od napięcia znamionowego (zasilenie uzwojenia pierwotnego napięciem U_n , przy zwartych zaciskach uzwojenia wtórnego doprowadziłoby do zniszczenia izolacji i deformacji konstrukcji niszczących transformator.).

Moc pobierana przez transformator w stanie zwarcia $P_z = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{Cu}$ pokrywa straty w rdzeniu i obu uzwojeniach. Ponieważ napięcie zwarcia jest małe, a mały jest również strumień magnetyczny w rdzeniu; w konsekwencji tego straty mocy w rdzeniu są bardzo małe w porównaniu do strat w uzwojeniach.

Dlatego w praktyce pomija się straty w rdzeniu i przyjmuje się że moc pobierana jest w przybliżeniu równa stracie mocy w uzwojeniach $P_z \approx \Delta P_{Cu}$.

~~Parametry poprzeczne~~ R_{Fe} ~~X_{Fe}~~ ~~X_{μ}~~

~~$R_{Fe} = \frac{\Delta P_{Fe}}{I_n^2}$~~ ~~$X_{\mu} = \frac{U_n}{I_n}$~~

$$Z_z = \frac{U_z}{I_n} \quad Z_z = \sqrt{R_z^2 + X_{s1}^2}$$

$$R_z = \frac{\Delta P_{Cu}}{I_n^2} \approx \frac{P_z}{I_n^2}$$

$$X_{s1} = \sqrt{Z_z^2 - R_z^2}$$

h) a) Parametry poprzeczne

~~$Z_z = \frac{U_z}{I_n}$~~ ~~$Z_z = \frac{U_n}{I_n}$~~

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

$$R_{Fe} \approx \frac{U_1^2}{P_0} \approx \frac{E_1^2}{\Delta P_{Fe}}$$

~~$R_z = \frac{\Delta P_{Cu}}{I_n^2}$~~ ~~$X_{s1} = \sqrt{Z_z^2 - R_z^2}$~~

$$\beta = \frac{U_1}{U_{20}} \quad \Delta P_{Fe} \approx P_0$$

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{U_1 I_0}$$

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

$$I_{Fe} = \frac{\Delta P_{Fe}}{E_1} \approx \frac{P_0}{U_1}$$

4) Dlaczego przy wyznaczaniu parametrów poprzecznych transformatora pomija się straty w uzwojeniach?

Parametry poprzeczne transformatora wyznacza się dla stanu jałowego w którym zaciski uzwojenia wtórnego są rozwarłe ($I_2 = 0$), a w uzwojeniu pierwotnym płynię stosunkowo mały prąd $I_1 = 1-10\% I_n$. Moc pobierana przez transformator w stanie jałowym pokrywa straty w rdzeniu ΔP_{Fe} i straty w uzwojeniu pierwotnym ΔP_{Cu1} . Ponieważ prąd I_1 jest mały, straty mocy w uzwojeniu są bardzo małe w porównaniu ze stratami w rdzeniu. Dlatego w praktyce przyjmuje się że moc transformatora jest w przybliżeniu równa mocy traconej w rdzeniu $P_0 \approx \Delta P_{Fe}$ a straty w uzwojeniach pomija się.

5) Co to jest znamionowa zmienność napięcia transformatora?

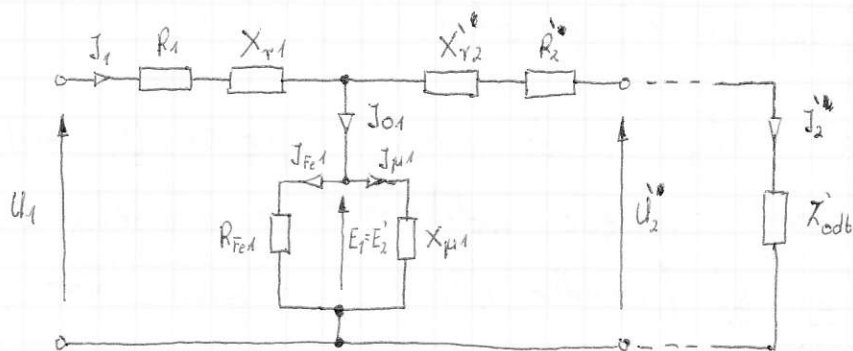
Transformator podczas ^{pracy} normalnej pracy przy napięciu pierwotnym U_1 o prawie stałej wartości i zmiennym obciążeniu. Przy wzroście obciążenia prądy I_1 i I_2 rosną, w związku z czym rosną spadki napięć w uzwojeniu pierwotnym i uzwojeniu wtórnym oraz napięcie wtórne nieco maleje.

Dla określenia spadków napięć w uzwojeniach transformatora operuje się tzw. zmiennością napięcia:

$$\Delta U\% = \frac{U_{20} - U_{2n}}{U_{20}} \cdot 100\% \quad , \quad \text{gdzie} \quad \begin{array}{l} U_{20} - \text{napięcie wtórne stanu jałowego} \\ U_{2n} - \text{napięcie wtórne obciążenia znamionowego} \end{array}$$

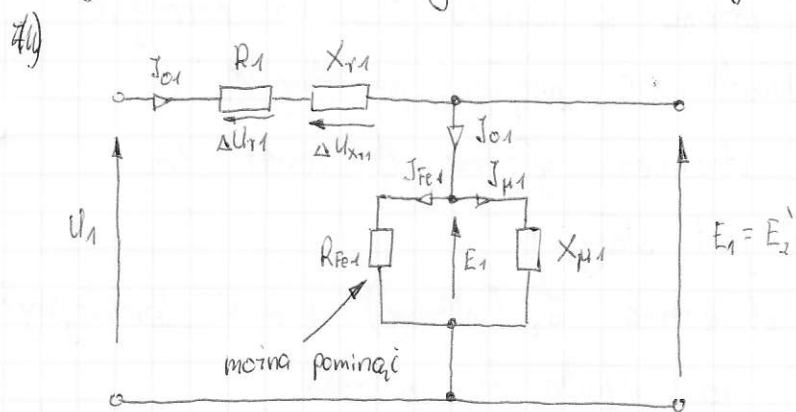
W prawidłowo zaprojektowanym transformatorze zmienność napięcia nie powinna przekraczać kilku procent napięcia znamionowego.

6) Narysować schemat zastępczy transformatora

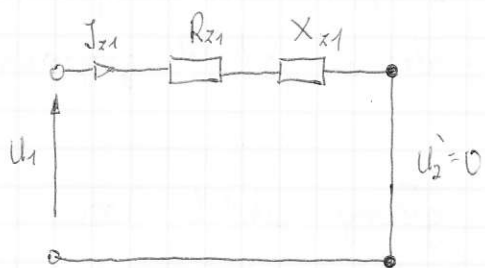


~~40)~~

a) schemat zastępczy w stanie jałowym - dławik idealny



b) schemat zastępczy w stanie zwarcia - cewnik o stałej impedancji



$$R_{z1} = R_1 + R_2'$$

$$X_{x1} = X_{r1} + X_{r2}'$$

~~RFe1 || Xmu1~~

7) Wyjaśnić dlaczego wzrost prądu po stronie wtórnej transformatora powoduje wzrost prądu na stronie pierwotnej.

Przy zasilaniu transformatora stałym co do wartości napięciem $U_1 = \text{const}$ i stałej częstotliwości $f = \text{const}$ napięcia indukowane w uzwojeniach są praktycznie stałe $E_1 = E_2$ (niewielka kilku % zmiana opisana przez znamionową zmienność napięcia).

Jeżeli napięcia indukowane są stałe to strumień główny Φ który indukuje te napięcia jest również praktycznie stały.

Strumień główny powstaje w rdzeniu w wyniku działania przepływu wypadkowego \mathcal{Q}_w na który składa się przepływ pierwotny \mathcal{Q}_1 i przepływ wtórny \mathcal{Q}_2 . Skoro strumień główny $\Phi = \text{const}$ to przepływ wypadkowy również jest stały.

Dlatego wzrostowi prądu obciążenia I_2 (wtórny) musi towarzyszyć wzrost prądu pierwotnego I_1 co wynika ze związku

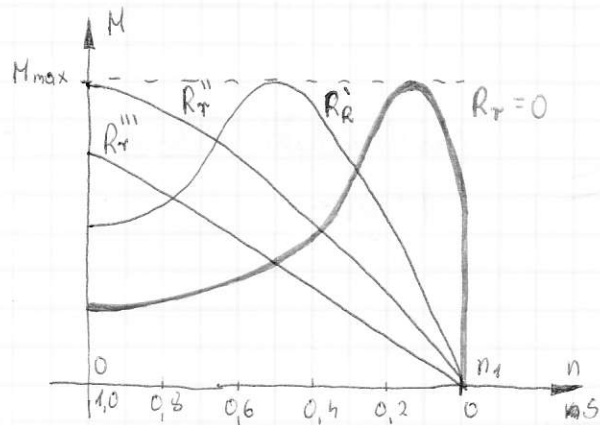
$$I_1 x_1 - I_2 x_2 = \mathcal{Q}_w \approx \text{const.}$$

Zmiana prądu wtórnego wywołuje zmianę prądu pierwotnego za pośrednictwem strumienia głównego Φ w rdzeniu wskutek sprzężenia magnetycznego obu stron transformatora.

Wzrost prądu wtórnego osłabia strumień główny wskutek czego zmniejsza się E_1 i nie jest zachowana równowaga $E_1 = E_2$.

W celu wyrównania tych wartości popłynię dodatkowy prąd ~~wspomagający~~ wspomagający strumień główny dodatkowym strumieniem dzięki któremu strumień wypadkowy nie zmieni się.

8) Narysować charakterystykę mechaniczną maszyny indukcyjnej w zależności od rezystancji w obwodzie wirnika



$$R_r > R_r' > R_r'' > R_r'''$$

$n=0 \rightarrow$ duży prąd I_1

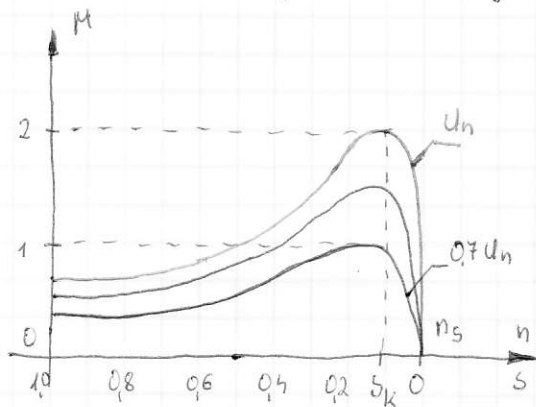
$$S_k \approx \pm \frac{R_2}{X_{s2}}$$

$$M_k \approx \pm \frac{m_1}{\omega_{1m}} \frac{U_1^2}{2X_{s2}}$$

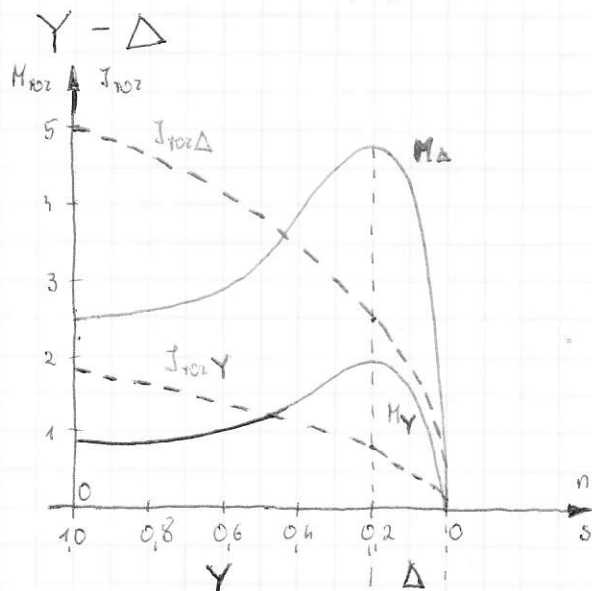
X_{s2} - reaktancja rozproszona wirnika

$$M = \frac{P}{\omega}, \quad \omega - \text{prędkość obrotu}$$

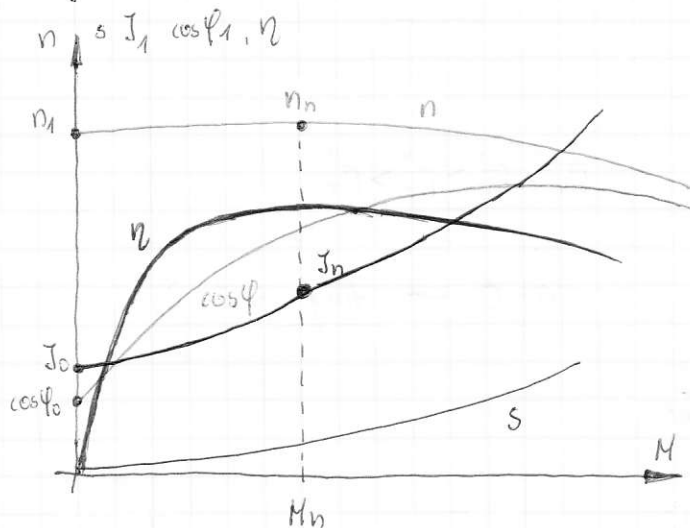
9) Narysować charakterystykę mechaniczną maszyny indukcyjnej w zależności od napięcia zasilającego



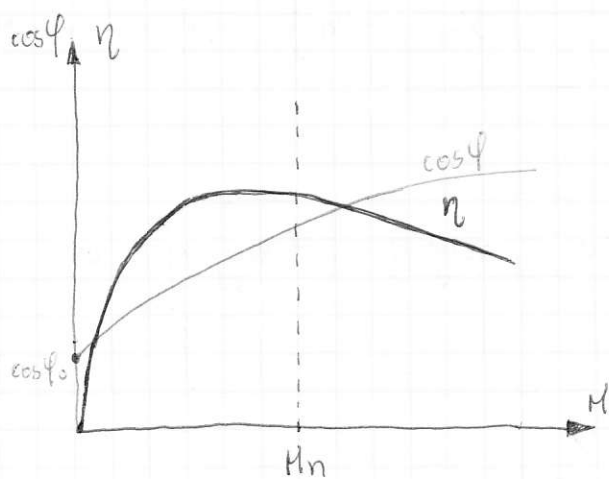
10) Narysować charakterystykę momentu i prądu rozruchowego przy przełączeniu



g) Narysować charakterystyki współczynnika $\cos \varphi$, sprawności η w funkcji obciążenia



Charakterystyki ruchowe silnika indukcyjnego



Charakterystyki $\cos \varphi$ i η w funkcji M

10) Wymienić warunki pracy równoległej transformatorów trójfazowych.

- a) Jednakowe przekładnie - przekładnie transformatorów muszą być jednakowe aby pomiędzy transformatorami nie płynął prąd wyrównawczy I_w , który jest wynikiem różnicy SEM indukowanych we wtórnych uzwojeniach.
- transformatory mogą pracować równolegle jeśli procentowa odchyłka przekładni lub napięć wtórnych nie przekracza $0,5\%$ $\rightarrow I_w = (2-7\%) I_n$
- b) Jednakowe napięcia zwarcia - zapewniają, że transformatory są obciążone proporcjonalnie do swoich mocy znamionowych, gdyby tak nie było transformator o mniejszym napięciu zwarcia osiągnie ~~napięcie~~ obciążenie znamionowe ~~q~~ podczas gdy inny transformator o wyższym napięciu zwarcia pozostanie niedociążony. Dlatego współpracujące transformatory nie będą mogły być obciążone mocą równą sumie mocy znamionowych poszczególnych trafo.
- do pracy równoległej mogą być dopuszczone transformatory których napięcia zwarcia mogą się różnić nie więcej niż o 10% wartości średniej.
 - w praktyce stosuje się zasadę że transformator o mniejszej mocy znamionowej ~~ma~~ powinien mieć większe napięcie zwarcia, w ten sposób przy nieprzeciążeniu żadnego z transformatorów, nie wykorzystana moc jest mniejsza

- c) zbliżone wartości mocy znamionowych - od mocy znamionowych transformatorów zależy współczynnik mocy przy zwarciu, jeśli moce znamionowe są różne to współczynniki mocy zwarcia nie są jednakowe a w wyniku czego prądy przepływające przez współpracujące trafo są nie są w fazie. Konsekwencją tego jest zmniejszenie się dopuszczalnego obciążenia transformatorów w stosunku do sumy algebr. ich mocy znamionowych
- jeśli moce znamionowe nie są jednakowe to stosunek mocy znamionowych transformatorów nie może być większy od 3.

d) SEM indukowane w uzwojeniach wtórnych transformatorów przeznaczonych do pracy równoległej muszą być w fazie.

- jeżeli zwroty wektorów SEM nie będą zgodne spowoduje to powstanie różnicy potencjałów na uzwojeniach wtórnych transformatora i przepływ bardzo dużych prądów wyrównawczych przekraczających dopuszczalny prąd znamionowy np. przy przesunięciu wektorów o 30° różnica pomiędzy SEM wynosi $0,52 U_n$ dla trafo 3-fazowych
- w transformatorach trójfazowych bezwzględnie musi być przestrzegany warunek jednakowych grup połączeń. wtedy wektory SEM są w fazie.

11) Co to jest grupa połączeń transformatora?

Grupę połączeń transformatora nazywa się przesunięcie kątowe między wektorami odpowiadających sobie napięć strony górnej i dolnej np. U_{AB} i U_{ab} wyrażone w godzinach ($1h = 30^\circ$).

W zależności od sposobu połączeń uzwojeń strony górnej i dolnej transformatora wyróżnia się grupy połączeń:

- połączenie w gwiazdę - Y - strona górna ; y - strona dolna
- połączenie w trójkąt - D ; d
- połączenie w zigzaki - Z

Możliwa jest realizacja grup połączeń: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11.

Do pracy równoległej Polska norma zaleca grupy 0, 5, 11:

- Yy0, Dy5, Yd5, Dy11, Yd11, Yz11

Kąt wyznaczany pomiędzy napięciami oznacza o ile napięcie dolne opóźnia się w fazie względem napięcia górnego.

12) Wyjaśnić dlaczego przy rozruchu silnika indukcyjnego za pomocą przełącznika gwiazda - trójkąt moment i prąd rozruchowy są 3-krotnie mniejsze.

Przełączenie uzwojeń silnika indukcyjnego z Δ na Y powoduje 3-krotne zmniejszenie się prądu rozruchowego i momentu rozruchowego.

Występuje to ponieważ w połączeniu w gwiazdę napięcie ^{na zaciskach} ~~fazowe~~ silnika jest $\sqrt{3}$ razy mniejsze od napięcia przy połączeniu w trójkąt.

Przy połączeniu w gwiazdę również impedancja uzwojeń jest $\sqrt{3}$ razy mniejsza zatem:

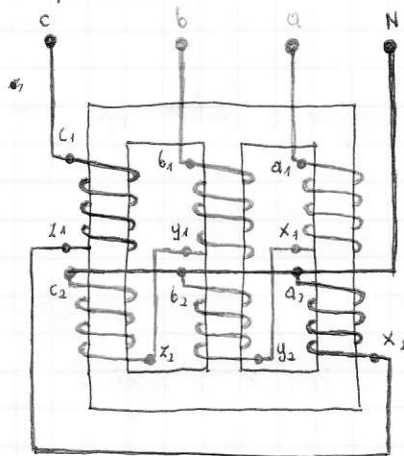
- stosunek prądów rozruchowych
$$\frac{I_{roz Y}}{I_{roz \Delta}} = \frac{U_s \cdot Z_z}{\sqrt{3}(U_s \cdot Z_z)} = \frac{U_s \cdot Z_z}{\sqrt{3}U_s \cdot \sqrt{3}Z_z} = \frac{1}{3}$$
- stosunek momentów rozruchowych
$$\frac{M_{roz Y}}{M_{roz \Delta}} = \frac{\left(\frac{U_s}{\sqrt{3}}\right)^2}{U_s^2} = \frac{1}{3}$$

13) Wyjaśnić na czym polega połączenie w zigzak transformatora trójfazowego

Połączenie uzwojeń w zigzak polega na tym, że uzwojenie każdej kolumny po stronie wtórnej podzielone jest na dwie ^{równe} sekcje. W jedną fazę połączone są sekcje znajdujące się na osobnych kolumnach. przy czym jedno z tych ~~połączeń~~ sekcji są odwrócone. Takie rozmieszczenie odwraca wskazy napięcia połączonej sekcji

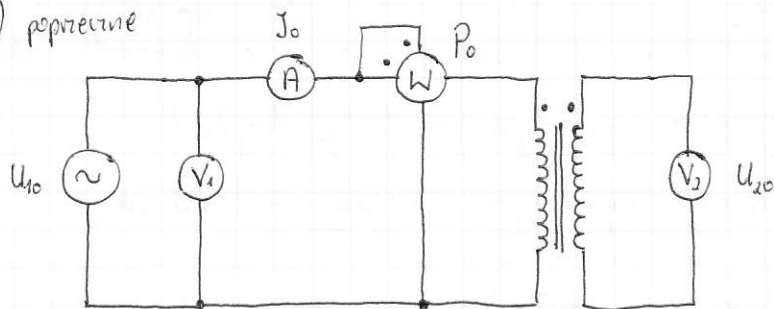
• $\frac{U_{\text{zigzak}}}{U_{\text{gwiazda}}} = \frac{\sqrt{3}}{2}$, $U_{\text{zig}} = U_{\text{gw}} \Leftrightarrow$ stosunek liczby zwojów w zigzak do gwiazdy jak $1: \frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{2}{\sqrt{3}} \Rightarrow$ ok 15% większa.

• przekładnia $\vartheta \approx \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{z_1}{z_2}$



14) Wymaczenie parametrów poprzecznych transformatora i podwójnych transformatora

a) poprzeczne

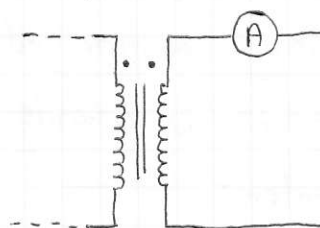


$$R_{Fe} \approx R_{NE} = \frac{U_{10}^2}{P_0} \approx \frac{E_1^2}{\Delta P_{Fe}}$$

$$X_{\mu} \approx X_{NE} = \sqrt{Z_{NE}^2 - R_{Fe}^2}$$

$$X_{\mu} \approx \frac{U_{10}}{I_0} \approx \frac{E_1}{I_{\mu}}$$

b) podwójne



$$(R_{1cu} + R_{2cu}) \approx R_{NE} = \frac{P_2}{I^2}$$

$$(X_{L1} + X_{L2}) \approx X_{NE} = \sqrt{Z_{NE}^2 - R_{NE}^2}$$

$$Z_{NE} = \frac{U_1}{I_1}$$

$$U_2\% = \frac{U_1}{230V} \cdot 100\%$$

15) Wyjaśnij jaki jest prąd pobierany z sieci i moment rozruchowy silnika indukcyjnego przy ~~rozruchu~~ rozruchu:

a) dławikiem (rozrusznik stojanowy)

b) autotransformatorem (zmiana wartości napięcia zasilającego)

Ad a) Wprowadzenie do uzwojeń silnika indukcyjnego dodatkowej impedancji na każdej z faz powoduje, zgodnie z prawem Ohma, zmniejszenie się prądu pobieranego przez silnik podczas rozruchu.

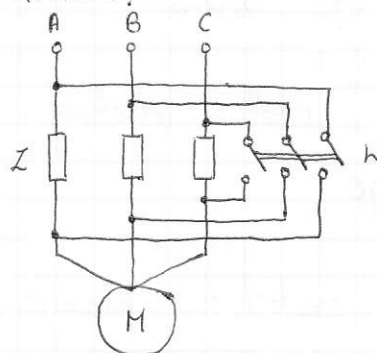
Wartość prądu rozruchowego jest proporcjonalna do napięcia na silniku, natomiast moment rozruchowy jest zależny od kwadratu napięcia na impedancji silnika. Spadek napięcia na dodatkowej impedancji musi być w fazie ze spadkiem napięcia na wirniku.

$$M_r = f\left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2$$

$$M_r' = M_r \cdot \left(\frac{U'}{U_n}\right)^2$$

$$I_r = I_s = f\left(\frac{U_2}{U_1}\right)$$

$$I_r' = I_r \cdot \frac{U'}{U_n}$$



Ad b) Włączenie do uzwojeń silnika autotransformatora pozwala na sterowanie napięciem ~~dotarczającym~~ na uzwojeniach silnika.

Zmniejszenie napięcia za pomocą autotransformatora powoduje

zmniejszenie się prądu rozruchowego i momentu rozruchowego z kwadratem tego napięcia.

$$M_r = f\left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2$$

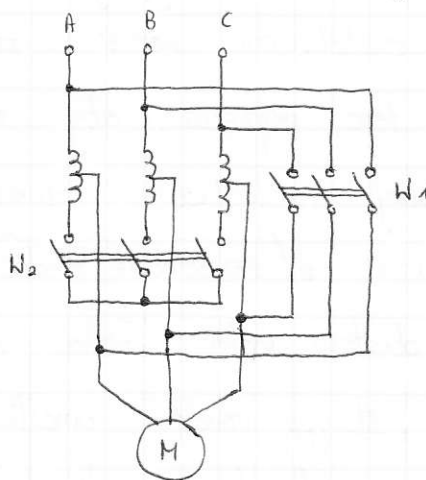
$$I_r = f\left(\frac{U_2}{U_1}\right)$$

$$I_r' = \frac{I_{gr}}{\mathcal{U}}$$

$$I_r' = I_r \cdot \left(\frac{1}{\mathcal{U}}\right)^2$$

$$M_r' = M_r \cdot \left(\frac{1}{\mathcal{U}}\right)^2$$

$$U_r = \frac{1}{\mathcal{U}} U_s \quad \text{— napięcie rozruchowe}$$



16) Co to jest znamionowe napięcie zwarcia transformatora

Napięcie zwarcia transformatora jest to napięcie pierwotne które daje przy zwarciu uzwojenia wtórnego przepływ prądów znamionowych. Najczęściej wyraża się je jako procentowe napięcie zwarcia

$$\Delta U_{zw} = \frac{U_{zw}}{U_n} \cdot 100\%$$

Przy zwarciu transformatora zasilanego napięciem znamionowym U_n prąd przed zwarciem I_{zw} , który jest tyle razy większy od prądu znamionowego I_n , ile razy napięcie znamionowe U_n jest większe od napięcia zwarcia U_{zw}

$$\frac{I_{zw}}{I_n} = \frac{U_n}{\Delta U_{zw}}$$

17) Regulacja prędkości obrotowej silnika przez zmianę częstotliwości napięcia zasilającego

- Regulacja częstotliwości napięcia zasilającego umożliwia regulację prędkości synchronicznej pola wirującego, która wyrażona jest wzorem:

$$n_s = \frac{60f}{p}$$

Zmiana prędkości wirowania pola powoduje zmianę prędkości obrotowej wirnika silnika indukcyjnego

Zmianie częstotliwości napięcia zasilającego powinna towarzyszyć zmiana wartości tego napięcia aby ~~zachować~~ zachować stały strumień Φ

Do regulacji częstotliwości wymagana jest przetwornica częstotliwości lub prądnica synchroniczna (regulowane źródło zasilania)

- Regulację obrotów można uzyskać również przez zmianę liczby par biegunów pola wirującego, stosując uzwojenia umożliwiające przełączanie lub umieszczając nierównoległe uzwojenia nawinięte dla różnych liczb par biegunów. Taka regulacja jest stosowana do skokowej zmiany prędkości np. gdy silnik ma pracować przy kilku podst. prędkościach

18) Wymienić sposoby rozruchu silników indukcyjnych.

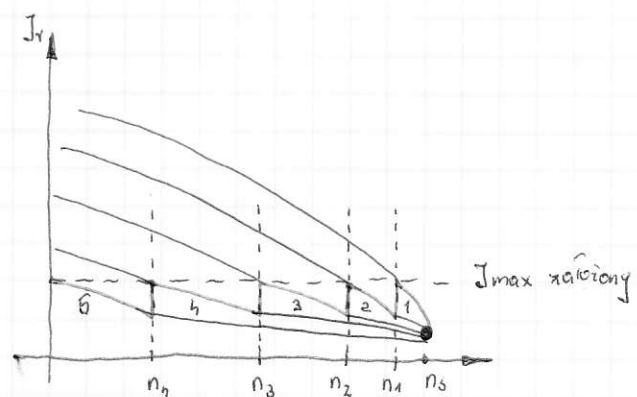
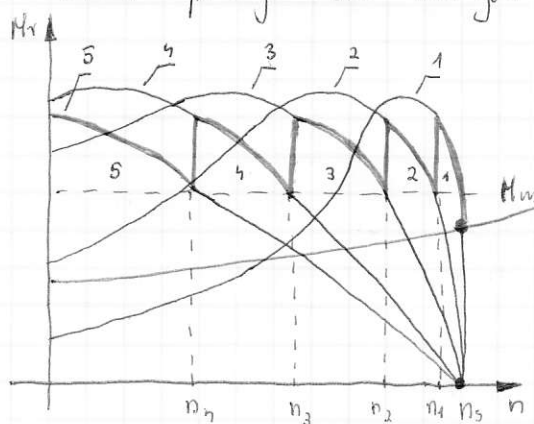
- rozruch za pomocą dławika
- rozruch za pomocą autotransformatora
- rozruch za pomocą wielostopniowego rozrusznika
- rozruch bezpośredni

Rozruch za pomocą wielostopniowego rozrusznika polega na zmianie skokowej oporu dołączanego do ~~uzwojeń~~ pierścieni ślizgowych podczas rozruchu.

Opór zmienia się od wartości ustalonej największej aż do oporu samego uzwojenia. Zwiększanie oporu obwodu wirnika nie wpływa na zmianę wartości momentu maksymalnego, jedynie ~~je~~ chwila osiągnięcia go zostaje przesunięta w kierunku mniejszej prędkości obrotowej.

Przykład rozruchu na przez ~~5 do 5~~ stopni 5-stopniowy rozrusznik.

- włączenie silnika na stopniu 5 o największym oporze
- silnik rośnie i w miarę wzrostu obrotów jego moment maleje
- przełączenie rozrusznika na stopień 4 o zmniejszonym oporze
- następuje skok momentu do wartości odpowiadającej danym obrotom dla tego stopnia
- prędkość obrotowa dalej rośnie a moment maleje
- kolejne przełączenia stopni powodują skoki momentu rozruchowego
- ostatni stopień 1 - w tym położeniu pierścienie silnika są zwarte i silnik pracuje bez żadnych dodatkowych oporów.



Rozruch bezpośredni jest najprostszym sposobem rozruchu silników indukcyjnych. Jest stosowany w silnikach małej mocy ze względu na dużą prąd rozruchu.

Polega na rozruchu silnika przy parametrach znamionowych (napięcie i częstotliwość znamionowa). Wirnik silnika jest nieruchomy w początkowej fazie a prąd rozruchowy ma bardzo dużą wartość nawet 10-krotnie większą od prądu znamionowego. Moment rozruchowy w początkowej fazie może być mniejszy od momentu ~~obciążenia~~ znamionowego.

Rozruch bezpośredni powoduje duże spadki napięcia sieci zasilającej a w konsekwencji zmniejszenie się momentu rozruchowego, który zależy od kwadratu napięcia, co wydłuża czas rozruchu lub w krytycznym przypadku uniemożliwia rozruch.