

Elektrotechnika i elektronika

Metalurgia, Inżynieria Materiałowa
II rok

Silnik indukcyjny (asynchroniczny)
Materiały do wykładów

1. Wstęp

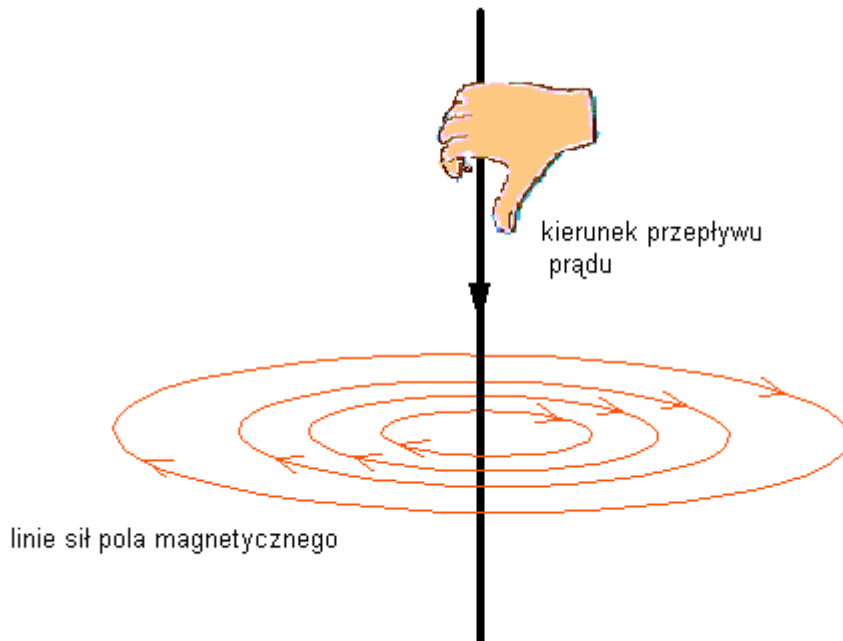
Maszyny indukcyjne są maszynami prądu przemiennego. Następuje w nich przetwarzanie energii elektrycznej w energię mechaniczną (praca silnikowa maszyny) lub energii mechanicznej w elektryczną (praca generatorowa maszyny).

Maszyny indukcyjne mają prostą budowę i w związku z tym charakteryzują się dużą niezawodnością, łatwością obsługi oraz małym kosztem. Z tych powodów są one szeroko stosowane w różnych dziedzinach techniki, najczęściej jako silniki, rzadziej jako prądnice.

2. Podstawy fizyczne działania silnika indukcyjnego.

Podczas przepływu prądu elektrycznego przez przewodnik wytwarza się wokół niego pole magnetyczne. Kierunek linii sił tego pola wyznaczony może być zgodnie z regułą śruby prawoskrętnej, lub za pomocą prawej dłoni, której kciuk wskazuje kierunek przepływu prądu, zaś zagięte cztery pozostałe palce – kierunek linii pola magnetycznego.

Sytuację tą przedstawia poniższy rysunek.



Rys. 1 – Pole magnetyczne wokół przewodnika z prądem.

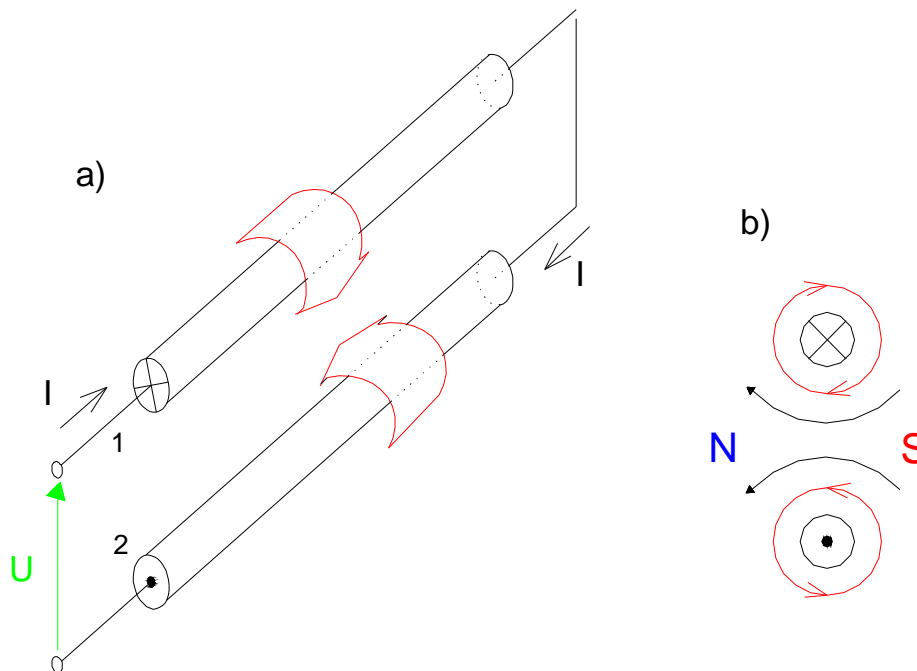
Schematycznie kierunek przepływu w przekroju przewodnika oznacza się krzyżykiem albo kropką.



Rys. 2 – Schematyczne przedstawienie kierunku przepływu prądu w przewodniku.

Jeżeli prąd będzie wpływał do przewodnika, od strony obserwatora, fakt ten będzie oznaczony krzyżykiem (na rysunku 1 – od strony ręki). Natomiast jeżeli będzie następował przepływ prądu w stronę obserwatora, to oznaczeniem będzie kropka.

Założmy że do dwóch kawałków przewodnika tworzącego układ tak jak na rysunku 3a, przyłożone zostało napięcie U . W takim obwodzie popłynie zatem prąd I , wpływając do górnego przewodnika (punkt 1 – co umownie obrazuje krzyżyk) i wypływając (punkt 2, umowna kropka) z dolnego z powrotem do źródła napięcia U . Wokół obu przewodników – dolnego i górnego wytworzone zostanie pod wpływem przepływającego prądu pole magnetyczne. Kierunek linii sił tego pola, zgodny z przedstawioną wcześniej regułą, został zaznaczony czerwonymi strzałkami. W układzie takim wytworzone zostają zatem dwa bieguny magnetyczne (jedna para).



Rys. 3 – Pole magnetyczne w układzie dwóch równoległych przewodników z prądem.

Na rysunku 3b pokazany został ten sam obwód w widoku z przodu. Widać iż pomiędzy przewodnikami, ze względu na zgodne kierunki linii sił pola wytworzone zostaną bieguny magnetyczne (S i N).

3. Budowa i zasada działania trójfazowego silnika indukcyjnego.

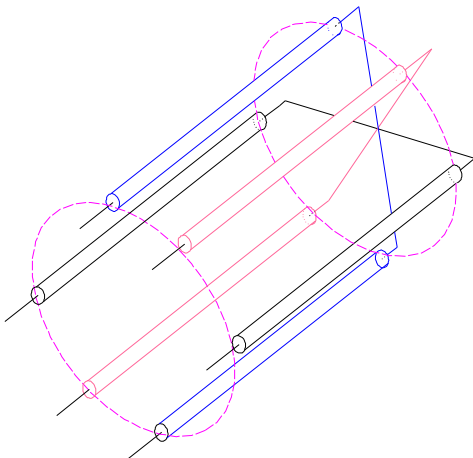
Silnik indukcyjny (asynchroniczny) składa się z dwóch podstawowych części – nieruchomego stojana (inaczej zwanego statorem) i ruchomego wirnika (rotora).

Działanie tego silnika oparte jest na zjawisku indukcji elektromagnetycznej. Pod wpływem przyłożonego do uzwojeń stojana zmiennego napięcia i wywołanego tym przepływu prądu, wytworzone zostaje w stojanie wirujące pole magnetyczne. Dzięki temu w metalowym, przewodzącym wirniku indukuje się siła elektromotoryczna (napięcie) powodująca przepływ przez wirnik prądu, powstanie siły i ruch obrotowy wirnika. Szczegółowo zasada działania silnika asynchronicznego zostanie wyjaśniona w dalszej części instrukcji.

Najpowszechniej w praktyce spotykaną odmianą tych silników są silniki trójfazowe. Od strony zasilania sieć trójfazową tworzą trzy źródła sinusoidalnego napięcia zasilającego, przy czym przesunięcie fazowe między kolejnymi napięciami wynosi $120^\circ \left(\frac{2p}{3}\right)$.

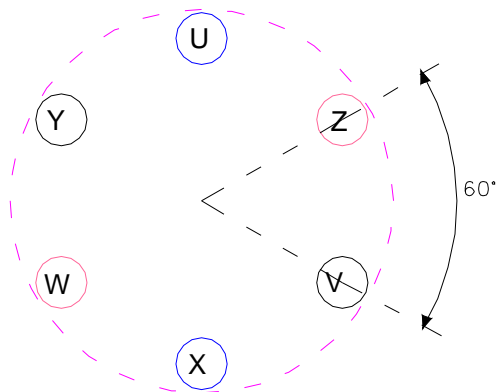
3.1 Stojan silnika indukcyjnego.

Schematycznie budowę stojana w silniku trójfazowym można przestawić jako układ trzech przewodzących ramek, zwojów takich jak na rysunku 3. Początki tych ramek oznaczone są kolejno: U, V, W, zaś końce: X, Y i Z. Ramki te umieszczone są tworząc walec, tak jak na rysunku 5. Krawędzie podstaw tego walca zaznaczono fioletową przerywaną linią. Każda z tych ramek tworzy uzwojenie jednej fazy. Oczywiście w praktyce nawinięte są one wielokrotnie drutem, lub – w przypadku większych mocy – taśmami lub nawet spawane z rur miedzianych. Jednak tu dla jasności opisu przestawione są one w uproszczeniu.



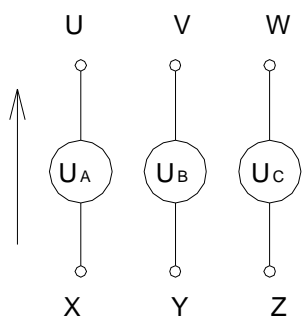
Rys. 4 – Schematyczny układ uzwojeń stojana silnika asynchronicznego.

Każdej parze przewodników, tworzących jedną ramkę odpowiada inny kolor. Ten układ przestrzenny widziany z przodu przedstawiony jest na rysunku 5. Jak widać, wszystkie zwoje są rozstawione na okręgu co 60° .



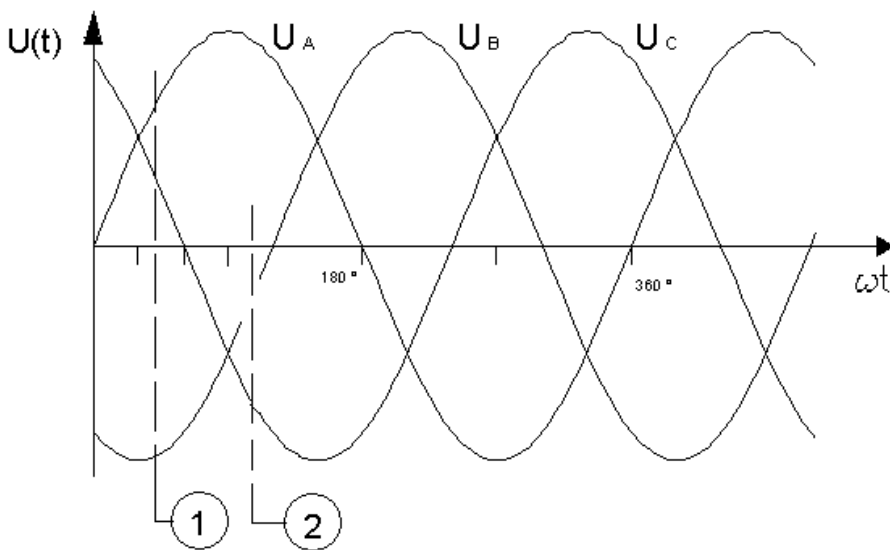
Rys. 5. – Schematyczny przekrój stojana – układ uzwojeń stojana z rysunku 4 widziany z przodu.

Do każdej z tych ramek dołączone zostaje jedno źródło napięcia sinusoidalnego, kolejno: U_A , U_B oraz U_C , według odpowiednich oznaczeń końcówek, tak jak na rysunku 6.



Rys. 6 – Symboliczne oznaczenia źródeł napięcia.

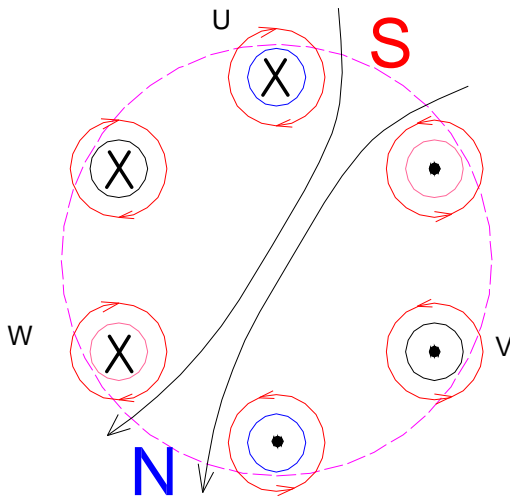
Napięcie w każdym ze źródeł jest przesunięte względem poprzedniego o 120° , tak jak na rysunku 7, tworząc układ trójfazowy.



Rys. 7 – Przebieg napięć w układzie trójfazowym.

Podłączenie do tego układu wspomnianych napięć spowoduje przepływ prądu w każdym z przewodników i powstanie wewnątrz tego walca pola magnetycznego. Prześledźmy zwrot wypadkowego strumienia wewnątrz tego schematycznego stojana silnika dla chwili czasowej oznaczonej na rysunku 7 jako „1”.

Widać, iż napięcie U_A jest dodatnie, a zatem w przyłączonej do tego parze przewodników prąd będzie płynął następująco: wpłynie początkiem tego uzwojenia (końcówką U) i wypłynie końcówką X. A zatem na schematycznym przekroju kierunek prądu zostanie przedstawiony jako krzyżyk w punkcie „U” oraz kropka w punkcie „X”. W przypadku napięcia U_C , które w chwili czasowej „1” również jest dodatnie, sytuacja będzie podobna. Prąd w tej fazie będzie wpływał początkiem uzwojenia – czyli w punkcie „W” i wypływał końcem „Z”. W przypadku napięcia U_C , które w tej samej chwili jest ujemne, sytuacja będzie odwrotna, tj. prąd dla tej fazy wpływał końcem uzwojenia – czyli przez punkt „Y”, natomiast wypływał będzie przez punkt „V”. Efektem przepływu prądu przez każdy z tych przewodników będzie powstanie wokół nich pola magnetycznego według zaprezentowanej w punkcie drugim reguły. Schematycznie sytuacja ta przedstawiona jest na rysunku 8.

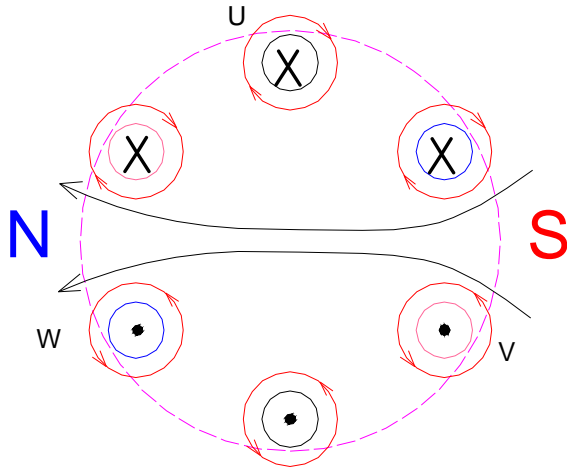


Rys. 8 – układ linii sił pola magnetycznego w stojanie dla chwili czasowej „1” przedstawionej na rys. 7.

Zaznaczono także początki uzwojeń (U, V, W). Zgodność kierunków linii pola magnetycznego wokół przewodów do których wpływa w tej chwili prąd (co oznaczone jest symbolem „X”) spowoduje się ich dodanie, podobnie jak w przypadku pozostałych trzech z których prąd wypływa. Powstanie zatem, jak w przypadku pojedynczej ramki, wypadkowy strumień magnetyczny. Kierunki linii sił pola magnetycznego można przypisać wypadkowemu „magnesowi”, którego bieguny S i N także zostały zaznaczone na rysunku.

Ponieważ układ ten zasilany jest napięciem zmiennym, należy sprawdzić jakie będą dalsze zmiany wypadkowego strumienia magnetycznego. Przeprowadzenie podobnej analizy dla chwili czasowej zaznaczonej na rysunku 7 jako „2’ da efekt przedstawiony na rysunku 9.

Rys. 9 - układ linii sił pola magnetycznego w stanie dla chwili czasowej „2” przedstawionej na rys. 7.

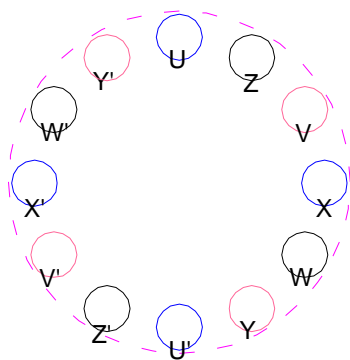


W tym przypadku napięcie U_A ma nadal, jak poprzednio, wartość dodatnią, przez co dla tej fazy sytuacja nie ulega zmianie. Również nie ulega zmianie sytuacja dla fazy B, ponieważ napięcie U_B podobnie jak poprzednio ma wartość ujemną. Natomiast zmiana następuje dla fazy C, z uwagi na to iż napięcie U_C zmieniło znak z dodatniego na ujemny.

Widać iż wypadkowe linie sił pola magnetycznego zmieniły swoje położenie, a za nimi zmieniły swoje położenie bieguny magnetyczne wspomnianego magnes. W ciągu jednego pełnego okresu napięcia sieciowego, od 0 do 360° nastąpi jeden pełny obrót tego wypadkowego strumienia (o kąt 2π). W układzie tym każda z ramek tworzy dwa bieguny magnetyczne (jedną parę).

Oczywiście analiza ta cechuje się znacznymi uproszczeniami, ponieważ zmienia się nie tylko położenie wypadkowego wektora pola magnetycznego, ale także i jego amplituda, niemniej do tego zakresu materiału jest to wystarczające.

Liczbę biegunów magnetycznych w takim układzie można zwiększyć dwukrotnie np. poprzez przecięcie każdej z tych ramek na dwie szeregowo połączone części. I np. dla fazy A będą one oznaczone U – X oraz U' – X'. W efekcie powstanie układ przedstawiony na rysunku 10.



Rys. 10 – układ uzwojeń stojana dla podwojonej liczby biegunów.

W takim przypadku w ciągu jednego okresu napięcia sieciowego wektor wypadkowego strumienia magnetycznego w tym walcu obróci się o kąt π (180°).

Zatem prędkość kątowna wypadkowego strumienia magnetycznego, przy danej częstotliwości napięcia zasilającego f , wyniesie:

$$\omega = \frac{2pf}{p},$$

gdzie p oznacza liczbę par biegunów magnetycznych (dla jednej fazy). Jak wspomniano, dla przypadku z rysunku 6, $p=1$, zaś dla rysunku 10, $p=2$.

Prędkość ω wirowania pola magnetycznego w stojanie nazywana jest także prędkością synchroniczną (i oznaczana jako ω_s), ze względu na to iż narzucana jest częstotliwością napięcia zasilającego.

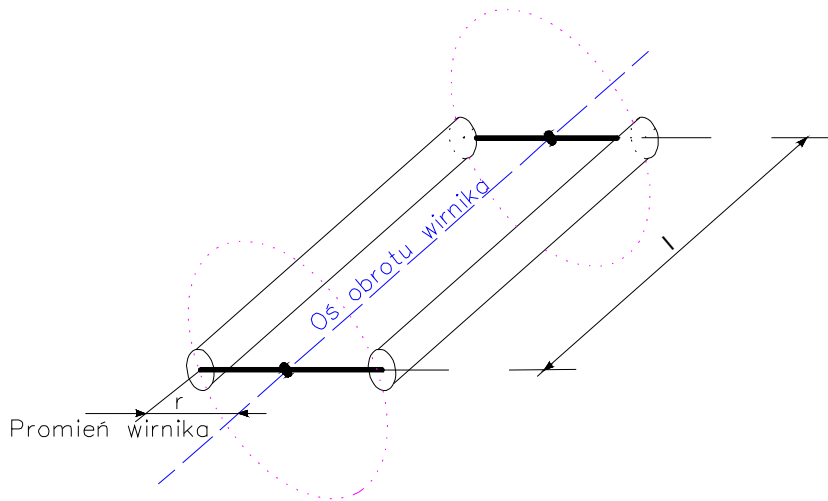
W Polsce, gdzie $f = 50$ Hz, dla $p=1$ można wyliczyć iż $\omega_s = 2\pi f = 100 \pi$ [rad/ s]. Daje to prędkość obrotową n_s wyrażoną w obrotach na minutę równą:

$$n_s = \frac{30\omega}{p} = \frac{3000p}{p} = 3000 \text{ obr/ min.}$$

Dla $p=2$ prędkość $n_s = 1500$ obr/ min., dla $p=3$, $n_s = 1000$ obr /min. itd.

3.2 Wirnik silnika indukcyjnego.

Założmy że do tak skonstruowanego stojana wprowadzi się ułożyskowany wirnik złożony z dwóch równoległych przewodników (w kształcie prętów) połączonych początkami i końcami, przedstawiony na rysunku 11.



Rys. 11 – Schematyczna konstrukcja wirnika.

Po podłączeniu do stojana napięcia trójfazowego, tak jak w punkcie 3.1, wytworzone zostanie w nim wirujące pole magnetyczne. Przecinając umieszczone wewnątrz stojana przewodzące dwa pręty wirnika, pole to spowoduje indukowanie się w nich siły elektromotorycznej, zgodnie z prawem indukcji Faraday'a:

$$SEM = - \frac{df}{dt}$$

Ponieważ pręty te zwarte są końcami, tworzą zamknięty obwód elektryczny. W obwodzie tym popłynie więc prąd elektryczny (o natężeniu I). W

efekcie na przewodzące pręty wirnika, o określonej długości (oznaczonej na rysunku 11 literą l) w polu magnetycznym o indukcji B , będzie działać siła elektrodynamiczna, zgodnie z prawem Ampere'a:

$$F = I B \times l = B I l \sin (I, B).$$

Gdzie: $\sin(\theta, B)$ – sinus kąta zawartego pomiędzy wektorem indukcji a umownym kierunkiem płynącego prądu.

Kierunek tej siły będzie zgodny z kierunkiem ruchu pola wirującego. Można go wyznaczyć można korzystając z reguły lewej dłoni, którą należy ustawić tak aby linie sił pola magnetycznego wchodziły w wewnętrzną stronę dłoni, a wyciągnięte cztery palce pokazywały kierunek i zwrot płynącego prądu. Wtedy wyciągnięty kciuk wskaże kierunek i zwrot siły elektrodynamicznej.

Pod wpływem siły działającej na te przewodniki, oparte na ramieniu o długości r , wytworzy się moment siły $M = F \times r$, powodujący ruch obrotowy wirnika wokół osi obrotu (zaznaczonej na rysunku 11 niebieską przerywaną linią).

Aby więc powstał moment napędowy w silniku indukcyjnym, musi zachodzić przecinanie prętów uzwojenia wirnika przez linie sił wirującego pola magnetycznego. Jeśli $n = n_s$ wirnik będzie dla pola stojana nieruchomy. Zatem prędkość wirowania wirnika (n) musi być mniejsza od prędkości pola wirującego (prędkości synchronicznej n_s). Stąd też silniki indukcyjne nazywane są także asynchronicznymi.

Względną różnicę prędkości n_s pola wirującego (prędkości synchronicznej) i prędkości wirnika nazywa się poślizgiem s .

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{W_s - W}{W_s}$$

lub w procentach:
$$s = \frac{n_s - n}{n_s} * 100\% = \frac{W_s - W}{W_s} * 100\%$$

Operując poślizgiem można określić także prędkość wirnika w następujący sposób:

$s n_s = n_s - n$, a stąd:

$$n = n_s (1 - s).$$

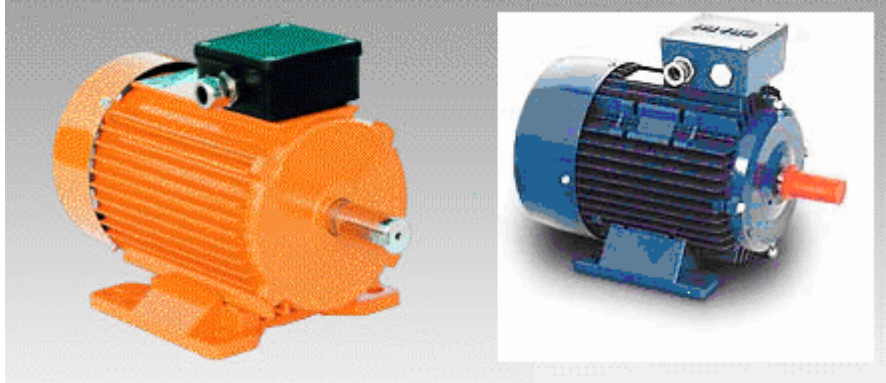
Poślizg silnika przy obciążeniu znamionowym z reguły ma wartość rzędu kilku procent (z reguły w granicach 1,0 do 10%) i jest tym mniejszy, im większa jest moc znamionowa silnika. W początkowym momencie rozruchu, gdy wirnik jest jeszcze nieruchomy, poślizg jest równy jeden (lub procentowo $s = 100\%$). Na biegu jałowym silnika (bez obciążenia) poślizg jest bardzo mały, rzędu 0,5 – 1%.

Definiuje się także poślizg bezwzględny, będący różnicą prędkości wirowania pola w stanie i prędkości obrotowej wirnika.

Dla $n = n_s$, np. w przypadku napędzania silnika innym silnikiem, to poślizg $s = 0$. Jeśli będziemy zewnętrznym silnikiem zwiększać prędkość wirowania silnika indukcyjnego zasilanego z sieci, ponad prędkość synchroniczną, to zacznie on pracować jako prądnica (wejdzie w zakres pracy generatorowej) i oddawać energię do sieci zasilającej.

3.3 Konstrukcja silników indukcyjnych.

Elementy konstrukcyjne silnika, tj. podstawę i obudowę stanowiące kadłub maszyny wykonuje się jako odlew (żeliwny lub ze stopu aluminium). W większych maszynach jest to z reguły konstrukcja spawana. W kadłubie umieszczany jest rdzeń stojana. Właściwe położenie wirnika w stojanie maszyny zapewniają dwie tarcze łożyskowe- w których osadzone są łożyska.

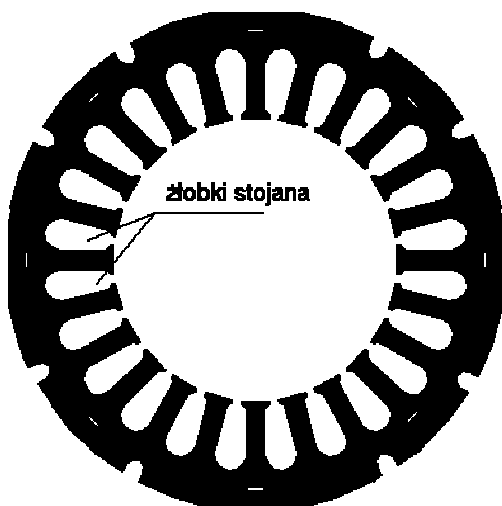


Rys. 12 - Widok silników indukcyjnych małej mocy (kilka kW).

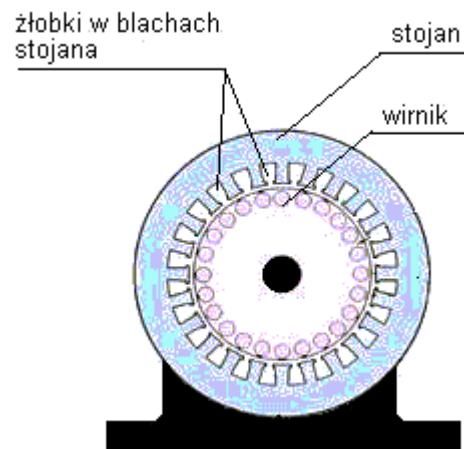
3.3.1 Stojan silnika indukcyjnego.

Powietrze jest dla pola magnetycznego złym przewodnikiem, zatem konieczna jest minimalizacja strat pola elektromagnetycznego wytworzonego przez uzwojenia stojana. Uzwojenie to zatem umieszcza się w specjalnym rdzeniu. Buduje się go z cienkich, odizolowanych od siebie jak kolejne plastry, blach elektrotechnicznych. Cienkie blachy minimalizują straty od prądów wirowych; byłyby one znacznie większe gdyby stojan wykonano np. jako jeden odlew stalowy.

Następnie na wewnętrznej powierzchni takiego rdzenia wycina się żłobki w których prowadzone jest uzwojenie. Schematyczny przekrój rdzenia silnika indukcyjnego przedstawiono na rysunku 13, zaś przekrój z ukazujący stojan i wirnik – na rysunku 14.



Rys. 13 – Przekrój stojana. Widoczne są żłobki w których prowadzone jest następnie uzwojenie.



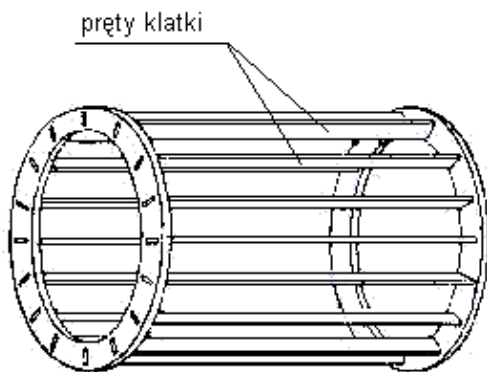
Rys. 14 – Budowa silnika indukcyjnego.

3.3.2 Wirnik silnika indukcyjnego.

Istnieją dwie odmiany silników asynchronicznych, zależnie od budowy wirnika: silnik klatkowy (z wirnikiem klatkowym) oraz silnik pierścieniowy (z wirnikiem pierścieniowym).

Silnik klatkowy.

Wirnik w silniku klatkowym zbudowany jest podobnie jak przedstawiony na rysunku 11 model. Wirnik klatkowy składa się z niez izolowanych prętów, najczęściej aluminiowych (materiał lekki i dobrze przewodzący prąd) połączonych na końcach metalowymi przewodzącymi pierścieniami (najczęściej z aluminium, miedzi, mosiądzu). Widok takiej klatki przedstawia rysunek 15. Dla silników małej mocy często cały wirnik wykonywany jest w postaci jednolitego odlewu.

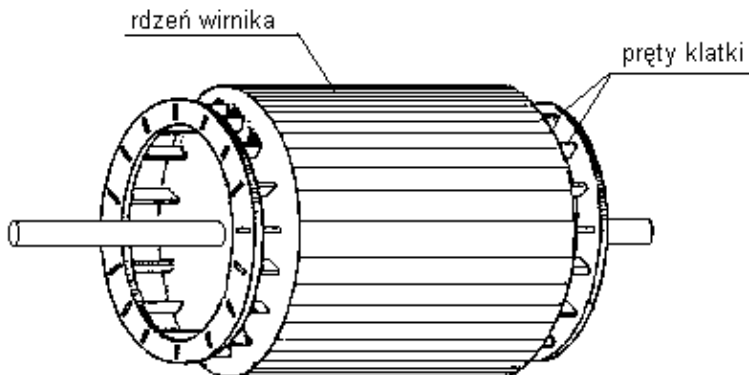


Rys. 15 – Widok klatki wirnika silnika indukcyjnego.

Wykonana w ten sposób klatka stanowi wielofazowe uzwojenie zwarte. Indukowane w takiej klatce napięcia (pod wpływem pola stojana) są małe, prądy natomiast stosunkowo duże ze względu na mały opór elektryczny takiej klatki.

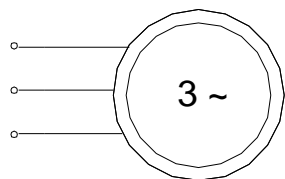
Pręty klatki nie są w praktyce prowadzone równoległe do osi obrotu, lecz z lekkim skosem, a to ze względu na cichszą pracę silnika i łatwiejszy rozruch. Podobnie stojan wirnik także posiada rdzeń z blach elektrotechnicznych ze żłobkami w których prowadzone są pręty klatki lub uzwojenie.

Na duże moce (rzędu setek kW i pojedynczych MW) wykonywane są silniki klatkowe głębokożłobkowe i dwuklatkowe. Posiadają one korzystne charakterystyki rozruchowe.



Rys. 16 – widok wirnika klatkowego.

Symbol trójfazowego silnika indukcyjnego, klatkowego na schematach elektrycznych jest przestawiony na rysunku 17.

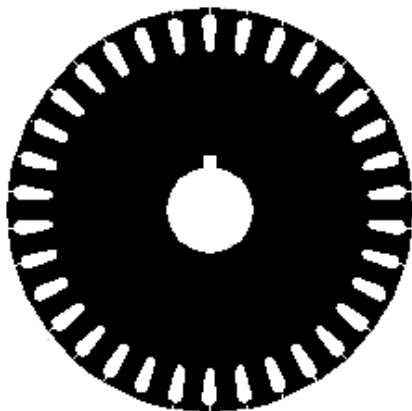


Rys. 17. – symbol silnika klatkowego

Po lewej stronie zaznaczone są przewody sieci zasilającej (w tym przypadku trójprzewodowej). Zasilany jest stojan, symbolicznie przedstawiony jako zewnętrzny, większy okrąg. Wirnik nie ma żadnych wyprowadzeń.

Silnik pierścieniowy.

Wirnik w silniku pierścieniowym posiada uzwojenia nawinięte, podobnie jak stojan, przewodami izolowanymi. Prowadzone są one w żłobkach blach wirnika (widok takiej blachy pokazany jest na rysunku 18).



Rys. 18 – blacha wirnika.

Wszystkie fazy tego uzwojenia najczęściej zwarte są początkami (tworząc połączenie w gwiazdę), i z wyprowadzonymi końcami. Każdy z końców (w przypadku silnika trójfazowego jest ich oczywiście trzy) przyłączony jest do jednego pierścienia (najczęściej miedzianego) osadzonego na wale wirnika i od niego odizolowanego.



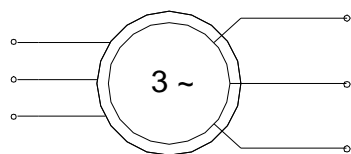
Rreprodukowano za uprzejmą zgodą firmy Elektrocarbon.

Rys. 19 – pierścienie ślizgowe dla trójfazowych silników pierścieniowych.

Na każdym z tych pierścieni ślizga się szczotka węglowa, przyłączona do tabliczki zaciskowej silnika. Dzięki temu do uzwojenia wirnika silnika pierścieniowego można przyłączyć rezystory zewnętrzne, służące np. do rozruchu lub regulacji prędkości obrotowej silnika (patrz rozdział czwarty).

Stosowane jest także skojarzenie uzwojeń wirnika w trójkąt, najczęściej dla silników większych mocy, rzędu dziesiątek kW.

Symbol silnika pierścieniowego na schematach elektrycznych przedstawiony jest na rysunku 20.



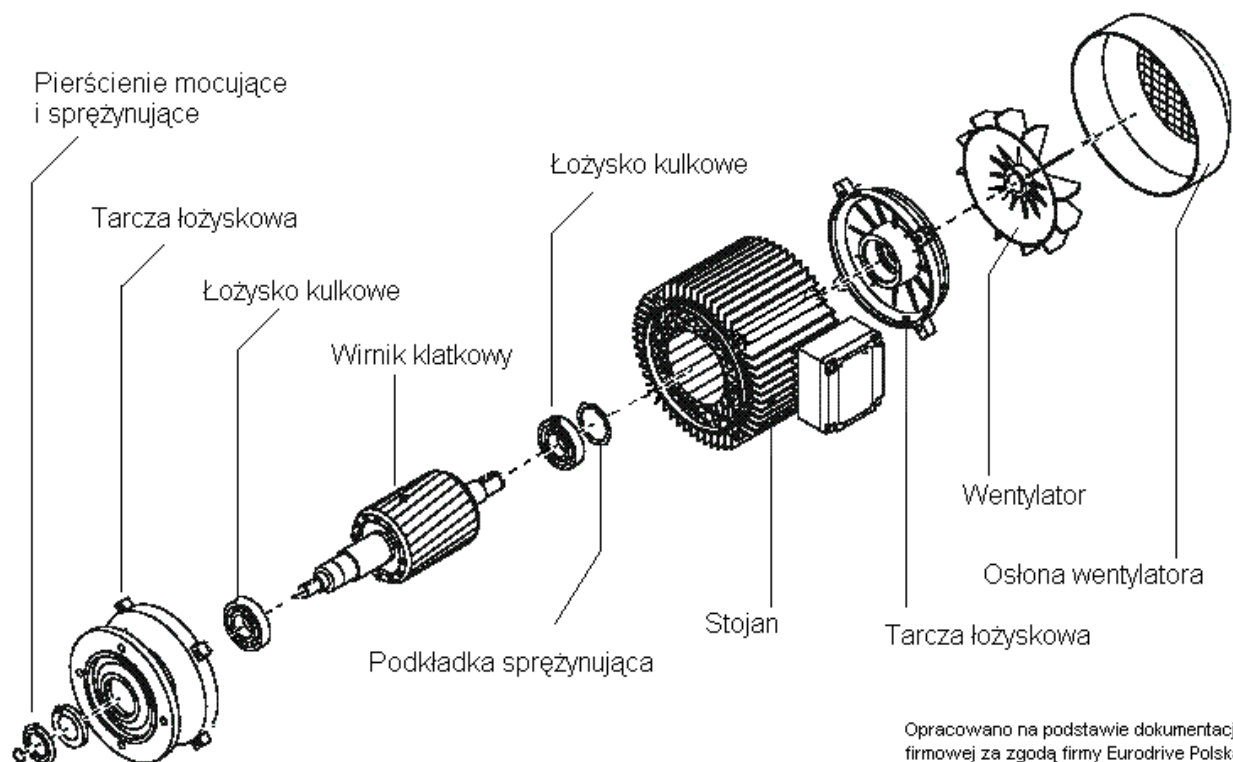
Rys. 20 symbol silnika pierścieniowego.

Uzwojenie stojana zasilane jest podobnie jak w poprzednim przypadku. Natomiast wyprowadzone są jeszcze uzwojenia wirnika (trzy końce). Wirnik symbolicznie oznaczany jest jako mniejszy, wewnętrzny okrąg, tak jak w rzeczywistym silniku, obracający się wewnątrz stojana.

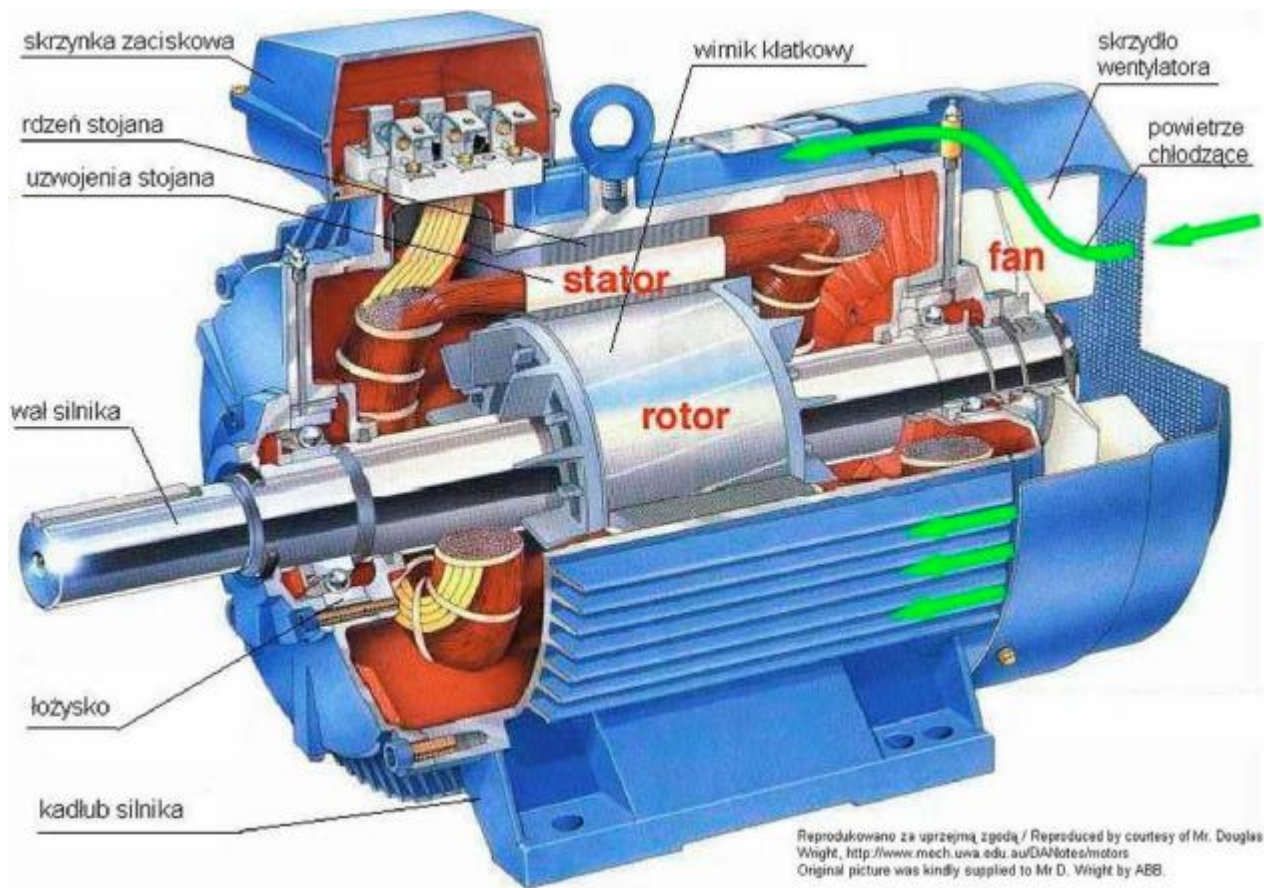
Silniki asynchroniczne pierścieniowe są droższe od klatkowych i w efekcie nie są tak rozpowszechnione.

3.4 Budowa silnika.

Cylindryczny rdzeń wirnika umieszczony jest wewnątrz rdzenia stojana. Między nimi oczywiście występuje szczelina powietrzna. Wirnik silnika indukcyjnego jest umieszczony na łożyskowanym wale, razem z wentylatorem chłodzącym. W przypadku silników klatkowych mniejszych mocy często wykonywany jest jako jeden odlew razem z klatką wirnika.



Rys. 21 budowa silnika klatkowego malej mocy.



Rys. 22 – Budowa wewnętrzna silnika klatkowego (ABB).

Na rysunku 22 przedstawiony jest widok wewnętrzny klasycznego trójfazowego silnika klatkowego. W tylnej jego części widoczny jest wentylator wykonany razem z klatką jako jeden odlew. Uzębrowany kadłub silnika poprawia skuteczność chłodzenia i pomaga w odprowadzaniu ciepła (większa powierzchnia oddająca ciepło).

4 Moc, charakterystyka mechaniczna, rozruch i praca silnika indukcyjnego

4.1 Moment silnika i jego charakterystyka mechaniczna.

Moc czynną pobraną przez silnik indukcyjny podczas pracy można wyznaczyć ze wzoru:

$$P = \sqrt{3} U_p I_p \cos\varphi = 3 U_f I_f \cos\varphi.$$

Gdzie:

U_p, I_p – napięcie i prąd przewodowy stojana

$U_f I_f$ – napięcie i prąd fazowy stojana

φ – kąt przesunięcia fazowego pomiędzy napięciem zasilającym i prądem

Moc pobrana z sieci zmniejsza się o moc strat w uzwojeniach stojana:

$$P - \Delta P_{cu} = P_{el-s}$$

Gdzie:

P – moc pobierana z sieci

ΔP_{cu} – moc strat w uzwojeniu stojana

P_{el-s} – moc pola elektromagnetycznego wytworzonego przez uzwojenie stojana

Moc ta przeniesiona przez pole elektromagnetyczne ze stojana do wirnika zostaje jeszcze pomniejszona przez straty pola w wirniku:

$$\Delta P_w = s P_{el-s}$$

Zatem całkowita moc zamieniona na moc mechaniczną (na wale silnika) wyniesie:

$$P_m = P_{el-s} - s P_{el-s} = P_{el-s} (1 - s)$$

Związek między mocą P a momentem siły M wyraża zależność: $P [W] = M [Nm] \omega [rad /s]$,

a zatem: $M = \frac{P}{\omega}$.

Charakterystyka mechaniczna silnika indukcyjnego ukazuje zależność momentu na jego wale od prędkości obrotowej silnika. Opisana może być różnymi zależnościami. W uproszczeniu, korzystając z równań silnika można napisać iż:

$$M = k U^2 \frac{1}{As + \frac{B}{s}}$$

Gdzie:

k – współczynnik proporcjonalności,

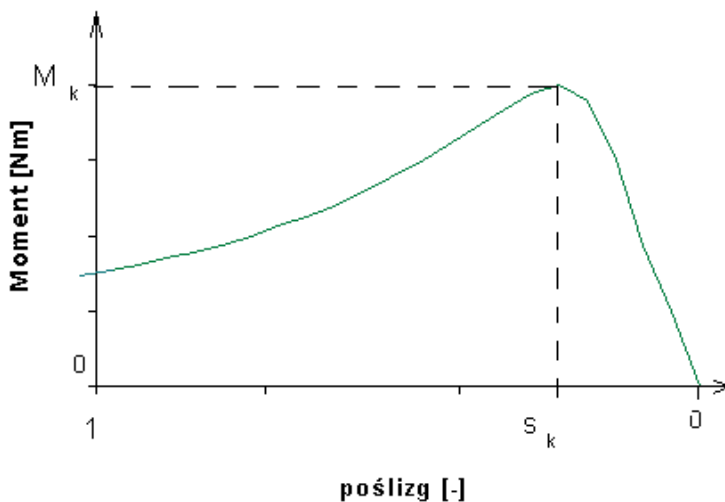
U – wartość skuteczna napięcia zasilającego silnik,

A – stała konstrukcyjna silnika zależna od indukcyjności uzwojeń stojana i wirnika,

B – stała konstrukcyjna zależna od rezystancji obwodu wirnika,

s – poślizg względny silnika (patrz strona 8).

Moment maksymalny silnika nazywany jest momentem krytycznym M_k i występuje on przy poślizgu krytycznym s_k .



Rys. 23 – charakterystyka mechaniczna silnika indukcyjnego.

Wzór opisujący charakterystykę mechaniczną silnika przedstawiany jest także w innych postaciach, jak np. poniższy wzór zwany wzorem Klossa.:

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

gdzie:

M – moment silnika,

M_k – moment krytyczny silnika,

s – poślizg, s_k – poślizg krytyczny

Charakterystyka mechaniczna silnika w obwód elektryczny którego nie dołączono żadnych dodatkowych elementów (dławików, rezystorów, itp.) zasilanego znamionowym napięciem nazywana jest charakterystyką naturalną. Silnik pracuje bowiem wtedy w „naturalnych” warunkach.

4.2 Rozruch silników indukcyjnych.

Rozruch silnika indukcyjnego obejmuje okres przejściowy od postoju do stanu pracy ustalonej, przy prędkości wirowania wirnika odpowiadającej narzuconym warunkom zasilania i obciążenia. Rozruch silnika jest możliwy wtedy, gdy w okresie rozruchu występuje nadwyżka momentu elektromagnetycznego nad momentem mechanicznym, czyli tzw. moment dynamiczny.

4.2.1 Rozruch bezpośredni.

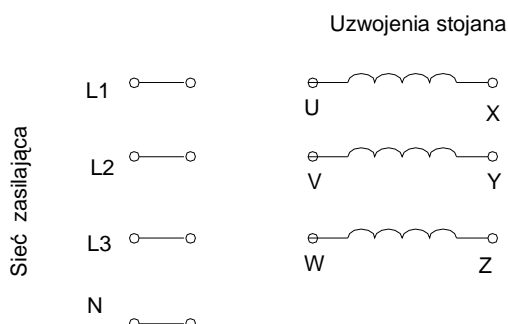
Rozruch bezpośredni polega na załączeniu silnika ze zwartym uzwojeniem wirnika bezpośrednio do sieci na napięcie znamionowe przy częstotliwości znamionowej. W początkowej fazie rozruchu wirnik jest nieruchomy (poślizg silnika s=1). Pobierany jest wówczas duży prąd rozruchowy, kilkukrotnie (4 – 10) większy od prądu znamionowego silnika, zaś początkowy moment rozruchowy może być mniejszy od momentu znamionowego. Duży początkowy prąd rozruchowy silnika jest niepożądany, dla samego silnika i sieci zasilającej, powodując grzanie uzwojeń silnika duże spadki napięcia w sieci zasilającej, objawiające się np. przygasaniem żarówek.

Ze względu na te ograniczenia dopuszcza się rozruch bezpośredni silników o małych mocach jednostkowych, rzędu kilku – kilkunastu kW, zależnie od sztywności sieci zasilającej. Dodatkowym ograniczeniem w takim rozruchu jest mały początkowy moment rozruchowy silnika, co powoduje iż moment obciążenia (moment od napędzanej maszyny) przy prędkości równej zero powinien być mały aby nie spowodować utknięcia (zatrzymania) silnika. W efekcie, w praktyce, rozruch bezpośredni jest dokonywany bez obciążenia lub przy obciążeniu bardzo niewielkim.

Ze względu na szereg wad tej metody rozruchu w układach praktycznych stosuje się różne sposoby i urządzenia pomocnicze do rozruchu silników dzięki którym następuje zmniejszenie prądu rozruchowego. Przy tym często utrzymuje się lub nawet zwiększa moment rozruchowy silnika.

4.2.2 Rozruch z zastosowaniem przełącznika gwiazda – trójkąt.

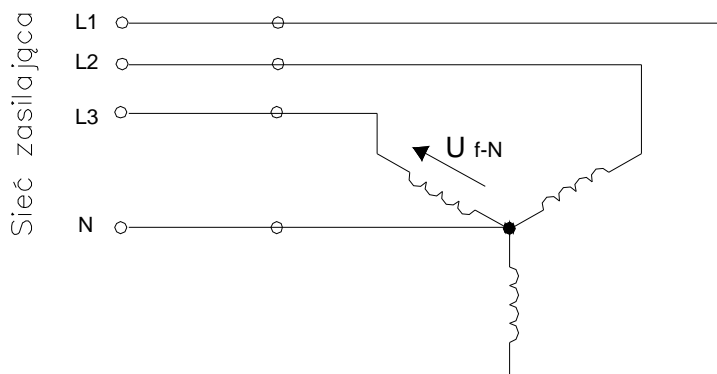
Mając do dyspozycji trójfazowy silnik indukcyjny, na jego tabliczce zaciskowej znajdują się wyprowadzenia uzwojeń stojana, których początki oznaczono U, V, W oraz końce X, Y, Z. Dołączane jest ono do sieci zasilającej, o fazach oznaczonych L1, L2, L3 i przewodzie neutralnym N.



Rys. 24 – oznaczenia punktów przyłączeniowych w sieci trójfazowej oraz końcówek uzwojenia stojana.

Uzwojenie stojana silnika trójfazowego może być łączone w dwóch konfiguracjach, jako gwiazda lub trójkąt.

Połączenie w gwiazdę realizowane jest poprzez połączenie początków (lub końców) uzwojeń do wspólnego punktu, a pozostałych trzech końców do kolejnych faz sieci zasilającej, tak jak na rysunku 25.

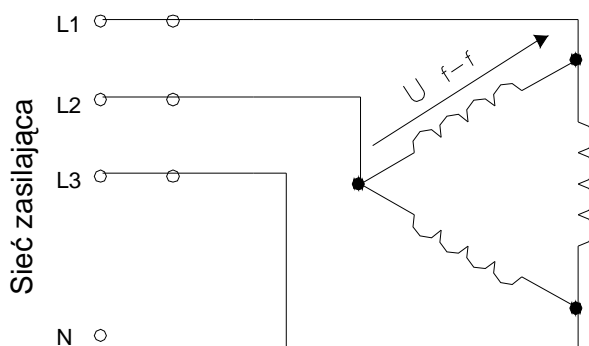


Rys. 25 – połączenie uzwojeń stojana w gwiazdę (Y).

Warto zaznaczyć iż każde uzwojenie stojana podłączone jest jednym końcem do przewodu neutralnego N, a drugim do przewodu fazowego (L1, L2 lub L3). Na każdym z tych uzwojeń występuje zatem napięcie fazowe, oznaczone jako U_{f-N} . Połączenie punktu wspólnego wszystkich uzwojeń z punktem neutralnym N nie jest konieczne.

Połączenie w trójkąt realizowane jest poprzez łączenie kolejno końca uzwojenia poprzedniej fazy z początkiem uzwojenia następnej fazy (przy oznaczeniach jak na

rysunku może to być: punkt Z łączony z V, Y z U, X z W, albo też W z Y, V z X oraz U z Z). Punkty połączeniowe uzwojeń łączone są następnie do kolejnych faz sieci zasilającej, tak jak na rysunku 26. Punkt neutralny N nie jest w tym przypadku wykorzystywany.



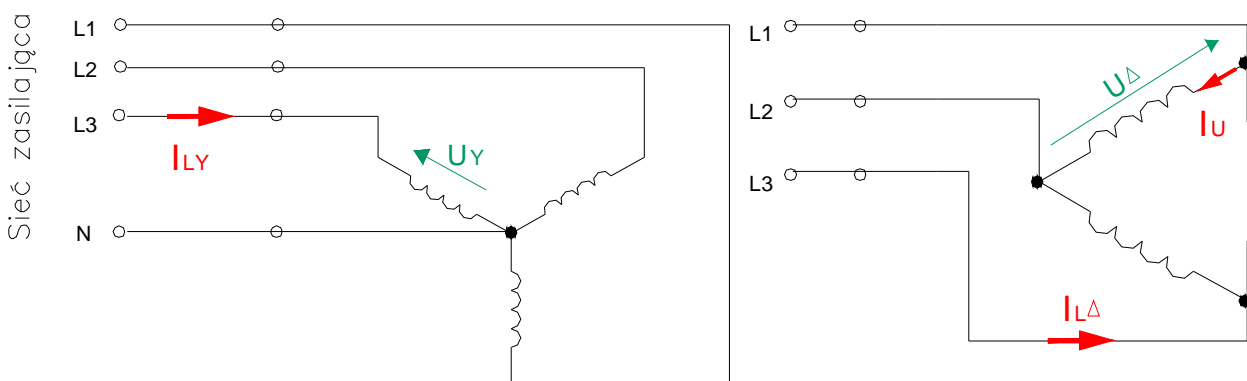
Rys. 26 – Połączenie uzwojeń stojana w trójkąt (oznaczane Δ lub D).

W tym układzie każde uzwojenie podłączone jest początkiem do jednego a końcem do innego przewodu fazowego. A zatem, na każdym z tych uzwojeń panuje napięcie międzyfazowe, oznaczone na rysunku jako U_{f-f} (w literaturze stosuje się oznaczeni U).

Na wykorzystaniu tych dwóch układów połączeń oparty jest rozruch silnika indukcyjnego z zastosowaniem przełącznika gwiazda – trójkąt. Rozruch ten może być realizowany tylko w silnikach indukcyjnych mających wyprowadzone na tabliczkę zaciskową sześć zacisków uzwojenia stojana.

Przełącznik gwiazda – trójkąt stosowany jest w celu zmniejszenia prądu pobieranego z sieci w chwili rozruchu, przez zmniejszenie napięcia na zaciskach uzwojenia stojana. W pierwszej fazie rozruchu uzwojenie stojana połączone jest w gwiazdę, a następnie, po osiągnięciu przez silnik prędkości obrotowej (z reguły min. 50% prędkości znamionowej) uzwojenia stojana przełączane są w trójkąt.

Oznaczmy napięcia międzyfazowe (między dwoma dowolnymi fazami L1, L2 lub L3) sieci zasilającej, jako U , tak jak na rysunku 27.



Rys. 27 - Prądy i napięcia dla połączenia uzwojeń w gwiazdę i trójkąt.

Przy połączeniu uzwojeń stojana w gwiazdę, na każdym z nich będzie występować napięcie U_Y , przy czym zgodnie z zależnościami w układach trójfazowych:

$$U_Y = \frac{U}{\sqrt{3}}$$

Ponieważ uzwojenia stojana są symetryczne, to impedancja każdego z nich jest jednakowa, i wynosi Z . Widać także iż w tym układzie, prąd płynący przez każde z uzwojeń jest równy prądowi pobieranemu z sieci (płynącemu przez każdy przewód fazowy).

Zatem przy rozruchu silnika połączonego w gwiazdę prąd pobierany z sieci wyniesie:

$$I_{LY} = \frac{U_Y}{Z} = \frac{U}{Z\sqrt{3}}$$

W przypadku trójkąta, na każdym z uzwojeń odłoży się napięcie U_Δ , przy czym:
 $U_\Delta = U$.

Prąd płynący przez każde z uzwojeń wyniesie:

$$I_u = \frac{U_\Delta}{Z} = \frac{U}{Z}$$

Ale, ponieważ nasz odbiornik (uzwojenie stojana) połączony jest w trójkąt, zatem prąd pobierany z sieci (prąd przewodowy) $I_{L\Delta}$ wyniesie:

$$I_{L\Delta} = \sqrt{3} I_u$$

A stąd:

$$I_{L\Delta} = \sqrt{3} \frac{U}{Z}$$

Stosunek prądów rozruchowych pobieranych z sieci dla połączenia w gwiazdę i trójkąt jest równy:

$$\frac{I_{LY}}{I_{L\Delta}} = \frac{\frac{U}{Z\sqrt{3}}}{\frac{U\sqrt{3}}{Z}} = \frac{1}{3} \quad \text{z} \quad 3 I_{LY} = I_{L\Delta}$$

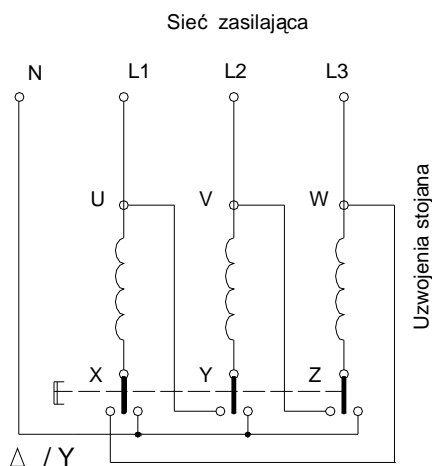
Z powyższego wynika, że zastosowanie przełącznika Y/ Δ powoduje trzykrotne zmniejszenie prądu rozruchowego pobieranego z sieci. W rzeczywistości ten stosunek może być większy, ponieważ nie uwzględniono w tych rozważaniach jeszcze innych czynników.

Ponieważ moment rozruchowy jest proporcjonalny do kwadratu napięcia zasilającego (patrz strona 14) stosunek momentu rozruchowego przy połączeniu w gwiazdę do momentu rozruchowego przy połączeniu w trójkąt jest równy:

$$\frac{M_Y}{M_\Delta} = \left(\frac{U_Y}{U_\Delta} \right)^2 = \left(\frac{\frac{U}{\sqrt{3}}}{U} \right)^2 = \frac{1}{3}$$

Zatem moment rozruchowy silnika również maleje trzykrotnie, co jest zjawiskiem niekorzystnym.

W realizacji praktycznej schemat takiego przełącznika wyglądać może tak jak na rysunku 28.



Rys. 28 – przełącznik gwiazda /trójkąt

4.2.3 Rozruch za pomocą autotransformatora

Ten sposób rozruchu stosuje się do silników o dużej mocy. Zadaniem autotransformatora jest zmniejszanie napięcia doprowadzanego do silnika do wartości 50 – 75% napięcia znamionowego $(0,5...0,75)U_n$.

4.2.4 układy miękkiego rozruchu silnika (soft - start).

Charakterystyczną cechą układu przełącznika gwiazda – trójkąt jest jego prostota. Jednak jego podstawową wadą jest fakt iż nie on eliminuje całkowicie uderzeń mechanicznych jakie mają miejsce bezpośrednio po załączeniu obciążonego silnika do sieci oraz po przełączeniu z gwiazdy w trójkąt.

Szybki w ostatnich latach rozwój energoelektroniki spowodował powstanie urządzeń do łagodnego rozruchu silników indukcyjnych, nazywane układami „soft - start” (miękkiego rozruchu)

Ich zasada działania opiera się na regulacji mocy dostarczanej do odbiornika, dokonywanej poprzez zmianę skutecznej wartości napięcia podawanego na odbiór. W roli elementów sterujących stosuje się najczęściej tyrystory. Możliwe jest dzięki temu dokładne sterowanie procesem rozruchu silnika z jednoczesnym śledzeniem szeregu parametrów, jak prąd rozruchowy, moment silnika, prędkość obrotowa, itp.

Dzięki wykorzystaniu tych urządzeń znacznie redukuje się prąd rozruchu oraz udary mechaniczne silników, jego wału i negatywny wpływ tych procesów na urządzenia napędzane.

4.2.5 Rozruch silników asynchronicznych pierścieniowych

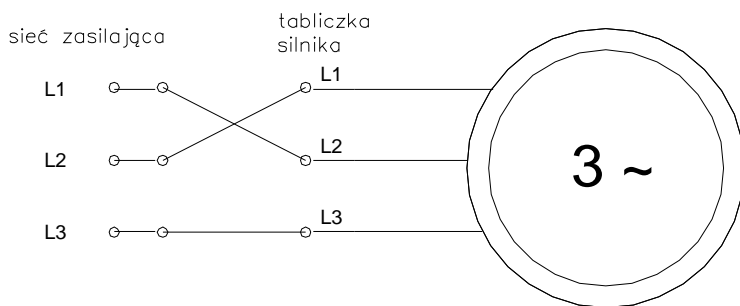
Dołączenie do uzwojeń wirnika w silniku pierścieniowym powoduje spadek prądu wirnika, a zatem spadek prądu pobieranego z sieci. Mniejszy jest jednak także moment rozruchowy silnika.

Wpływ dodatkowych rezystorów w obwodzie wirnika omówiony został w punkcie 4.3.2.

4.3 Regulacja prędkości obrotowej silników indukcyjnych.

4.3.1 Zmiana kierunku wirowania silnika.

Z przedstawionej zasady działania silnika indukcyjnego wiadomo iż wirnik silnika wiruje zgodnie z kierunkiem wirowania pola magnetycznego wytworzonego w stojanie. Chcąc zatem zmienić kierunek wirowania wirnika (i wału silnika) należy zmienić kierunek wirowania pola magnetycznego w maszynie, który, jak wiemy, narzucony jest kolejnością faz sieci zasilającej silnik. Zatem zmianę kierunku wirowania wirnika silnika można otrzymać przez zmianę kolejności faz sieci zasilającej silnik, co w praktyce realizuje się przez zamianę dwóch dowolnych faz uzwojenia stojana z dwoma fazami sieci zasilającej, np. zamiast łączenia faz sieci z silnikiem L1-L1 i L2-L2 łączymy L1-L2 i L2-L1, tak jak na rysunku 29.



Rys. 29 – zmiana kierunku wirowania silnika poprzez zamianę faz zasilających.

4.3.2 Regulacja prędkości obrotowej silnika indukcyjnego.

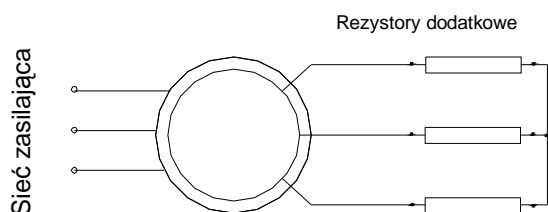
Silniki indukcyjne pracują często w napędach elektrycznych, gdzie wymagana jest wymaga się nastawianej prędkości wirowania. Z zależności $\omega_m = \omega_s(1-s)$ wynika, że nastawianie prędkości wirowania silnika indukcyjnego można zrealizować przez zmianę prędkości synchronicznej ω_s pola magnetycznego maszyny lub przez zmianę poślizgu s . Nastawianie prędkości przez zmianę prędkości synchronicznej jest ekonomiczne, gdyż nie powoduje zwiększenia strat w maszynie. Natomiast nastawianie prędkości wirowania przez zmianę poślizgu nie jest ekonomiczne, bowiem moc elektryczna tracona w obwodzie uzwojenia wirnika jest proporcjonalna do poślizgu.

Stosuje się następujące metody regulacji prędkości obrotowej silników indukcyjnych.

- Przez zmianę częstotliwości f napięcia U zasilającego stojan możliwe jest nastawianie (ciągłe lub skokowe) prędkości w zakresie od postoju ($\omega=0$) do prędkości znamionowej (ω_n). Aby strumień w maszynie był niezmienny, zmianom częstotliwości f powinny odpowiadać proporcjonalne zmiany napięcia zasilającego (w przybliżeniu stosunek

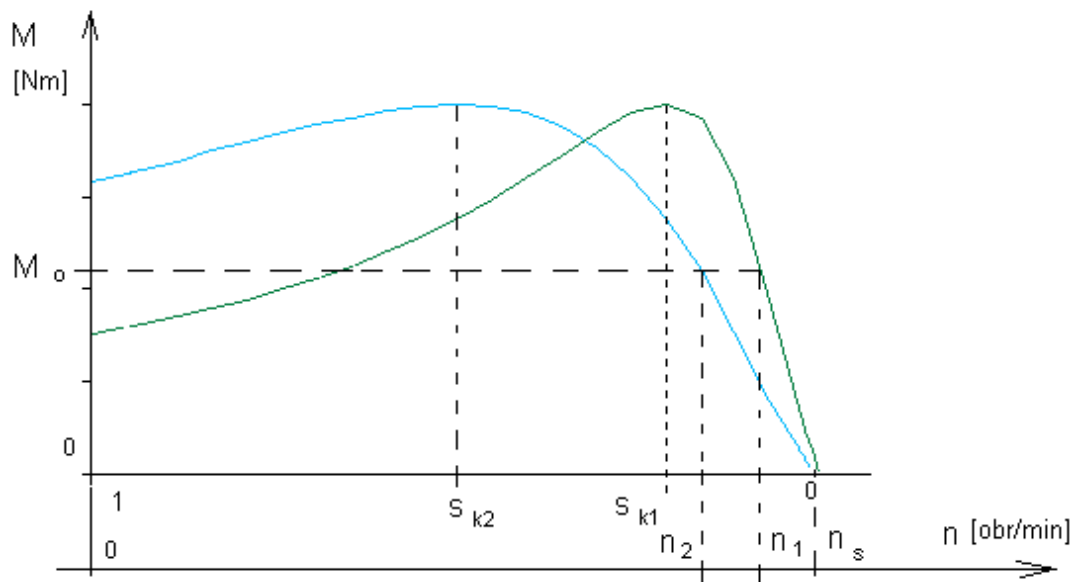
$U/f=\text{const}$). Możliwa jest zatem także regulacja ponad prędkość znamionową, jednak rzadko stosowana z uwagi na wytrzymałość mechaniczną silnika i wytrzymałość elektryczną izolacji.

- Przez zmianę liczby par biegunów magnetycznych w stojanie (patrz strona 6) p możliwe jest skokowa regulacja prędkości obrotowej silnika. Wtedy na stojanie jest nawinięte jedno uzwojenie o przełączalnej liczbie par biegunów, albo kilka uzwojeń niezależnych, każde o innej liczbie par biegunów. Silniki takie nazywane są silnikami wielobiegunowymi.
- Przez zmianę napięcia U zasilającego uzwojenia stojana przy stałej częstotliwości, możliwa jest zmiana prędkości kątowej silnika w zakresie od warunków dla zasilania znamionowego do poślizgu krytycznego.
- Przez włączenie impedancji dodatkowej w obwód stojana. Możliwa jest wtedy regulacja prędkości kątowej silnika w wąskim zakresie. Wadą tej metody są straty w maszynie rosnące w miarę zmniejszania prędkości kątowej.
- W silnikach pierścieniowych możliwa jest regulacja prędkości przez dołączenie dodatkowych rezystancji szeregowo w obwód wirnika, tak jak na rysunku 30.



Rys. 30 – rezystory szeregowo w obwodzie wirnika silnika pierścieniowego.

Dołączenie szeregowej rezystancji w szereg z uzwojeniem wirnika spowoduje spadek prądu płynącego w wirniku, a więc (patrz strona 8) spadek siły elektrodynamicznej działającej na wirnik a za tym spadek momentu i spadek prędkości obrotowej w stosunku do silnika tak samo obciążonego, ale bez rezystancji w wirniku. Charakterystyka mechaniczna silnika zmieni się, tak jak na rysunku 31.



Rys. 31 - wpływ rezystancji szeregowych w wirniku na charakterystykę mechaniczną silnika pierścieniowego.

Charakterystyka naturalna silnika przedstawiona jest kolorem zielonym. Silnik został obciążony momentem obciążenia M_o , i jego prędkość przy tym obciążeniu wynosi n_1 . Po dołączeniu rezystorów dodatkowych w obwód wirnika silnik ma charakterystykę sztuczną (przedstawiona kolorem niebieskim). W porównaniu do charakterystyki naturalnej ma ona łagodniejszy przebieg, i w zakresie normalnej, stabilnej pracy silnika (od poślizgu krytycznego s_{k2} do biegu jałowego, czyli $s=0$) szerszy jest zakres zmian prędkości. Przy tym samym co w poprzednim przypadku obciążeniu silnika momentem M_o ustali się prędkość wirowania silnika n_2 , mniejsza n_1 .

Jednak ten sposób regulacji jest niezbyt ekonomiczny, ze względu na wytracanie części mocy na rezystorach dodatkowych, co obniża sprawność takiego układu.

Obecnie ze względu na rozwój energoelektroniki i techniki mikroprocesorowej, silniki indukcyjne powszechnie zasilają się z urządzeń zwanych falownikami. Umożliwiają one oprócz regulacji prędkości obrotowej, także śledzenie szeregu parametrów silnika (temperatura uzwojeń, prąd pobierany, itp.), kontrolę rozruchu i hamowania, co znacznie wydłuża czas ich eksploatacji oraz niezawodność układów napędowych.

5 Eksploatacja silników.

Dane i warunki eksploatacyjne silników zawarte są w dokumentacjach technicznych producentów. Natomiast podstawowych danych dostarcza zawsze tabliczka znamionowa silnika, która zawiera najczęściej:

- moc znamionową silnika (moc użyteczną na wale silnika)
- napięcie znamionowe uzwojenia stojana – w przypadku silników trójfazowych jest to napięcie międzyfazowe,
- układ połączeń stojana
- prąd znamionowy uzwojenia stojana
- częstotliwość znamionową napięcia zasilającego silnik,
- znamionowy współczynnik mocy $\cos \varphi$
- znamionową prędkość obrotową wirnika, podawaną najczęściej w obr./min.
- inne dane, jak nazwa producenta, oznaczenie silnika, typ, rodzaj pracy, temperaturę pracy, itp.

Literatura.

Z. Gogolewski, Z. Kuczewski: Napęd elektryczny, WNT Warszawa 1972.

S. Kaniewski, S. Roszczyk, J. Jaczewski, Z. Manitiusz – Silniki indukcyjne asynchroniczne, PWN, Warszawa, 1956.

A. M. Plamitzer – Maszyny elektryczne, WNT, Warszawa, 1976.

J. Węglarz – Maszyny elektryczne, WNT, Warszawa, 1962.

Z. Stein: Maszyny i napęd elektryczny, WSiP Warszawa 1985.