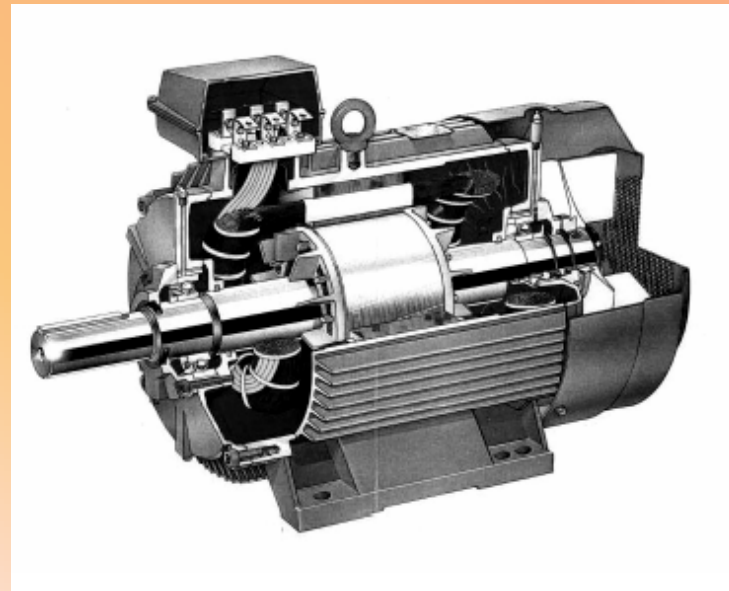


# SILNIKI ASYNCHRONICZNE (INDUKCYJNE) KLATKOWE I PIERŚCIENIOWE



# RODZAJE PÓL MAGNETYCZNYCH

Rodzaje pola magnetycznego:

1. Stałe pole magnetyczne (wektor indukcji stały w czasie i przestrzeni)
2. Zmienne pole magnetyczne
  - pulsujące (oscylacyjne) - zmienne w czasie lecz stałe w przestrzeni,
  - wirujące - stałe w czasie lecz zmienne w przestrzeni

Sposoby wytwarzania pola wirującego:

- wirujący magnes,
- uzwojenie trójfazowe (trójfazowe) rozmieszczone w przestrzeni co  $120^\circ$  elektrycznych i zasilane napięciem trójfazowym,
- uzwojenie dwupasmowe (prostopadłe) zasilane napięciami ortogonalnymi (przesuniętymi w fazie o  $90^\circ$ ).

# MASZYNY INDUKCYJNE

Maszyny indukcyjne są maszynami odwracalnymi:

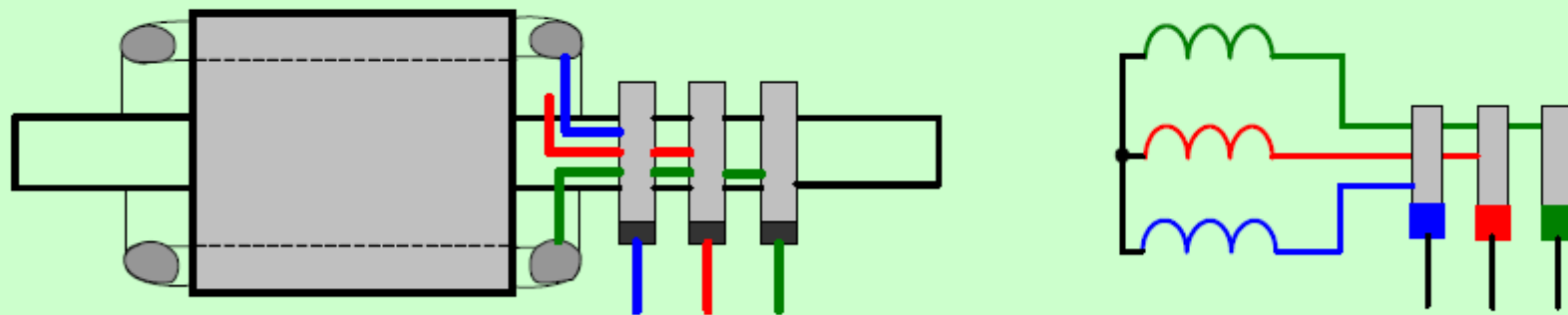
- praca prądnicowa
- praca silnikowa

**W praktyce maszyny asynchroniczne stosowane są jako silniki.**

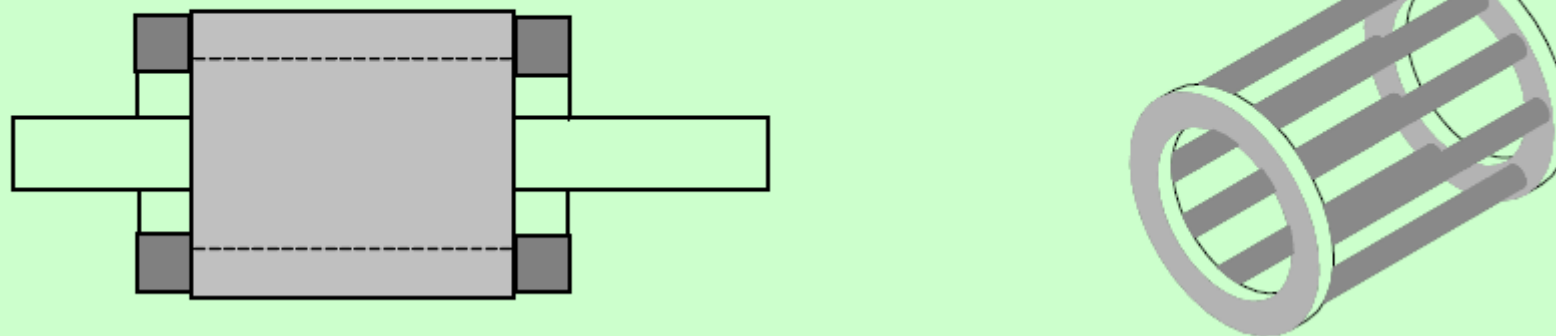
Podział silników indukcyjnych ze względu na rodzaj wirnika:

- klatkowe
- pierścieniowe

## pierścieniowy



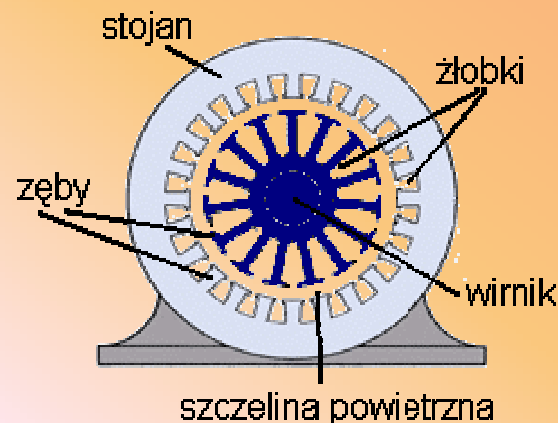
## klatkowy



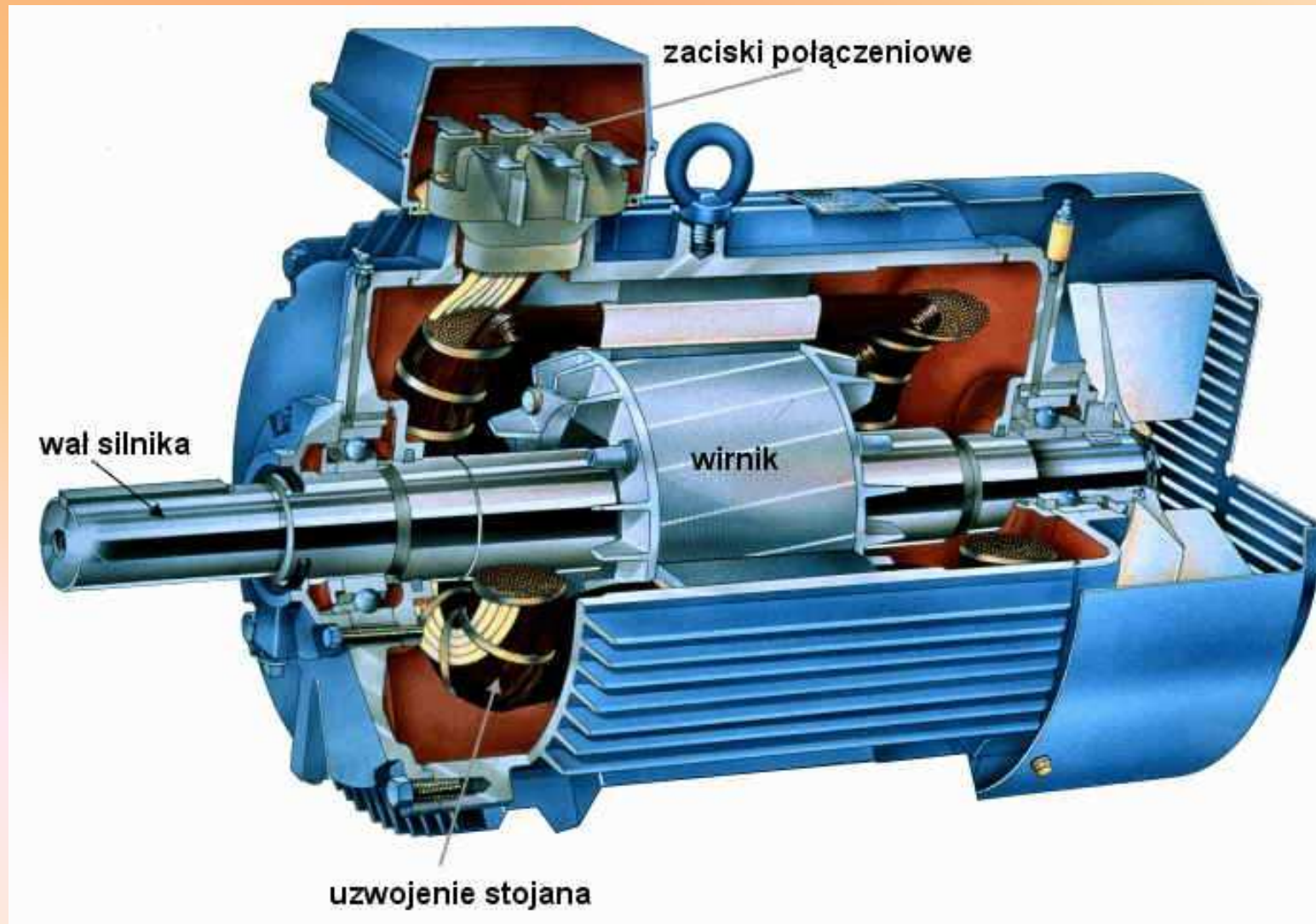
# Budowa maszyn indukcyjnych

Silnik asynchroniczny (indukcyjny) to najbardziej popularny silnik, o najszerszych zastosowaniach ze wszystkich rodzajów silników elektrycznych, wykorzystywany szczególnie w przemyśle, ale również i w sprzęcie domowym. Charakteryzuje się bardzo prostą, i łatwą w utrzymaniu konstrukcją. Moce budowanych obecnie silników asynchronicznych obejmują zakres od ułamków kilowatów do kilku megawatów.

Silnik indukcyjny składa się z dwóch zasadniczych części: nieruchomego stojana i ruchomego (wirującego) wirnika.



# Przekrój silnika indukcyjnego



Na wewnętrznej stronie rdzenia stojana i zewnętrznej stronie rdzenia wirnika wykonuje się specjalne rowki, zwane żłobkami, w których umieszczane są uzwojenia. Część rdzenia pomiędzy sąsiednimi rowkami, nazywana jest zębem. Żłobki i zęby mogą posiadać różne kształty, zwykle ich liczba w stojanie i wirniku jest różna. Pomiedzy stojanem a wirnikiem znajduje się możliwie mała szczelina powietrzna.



Uzwojenie stojana wykonane jest z izolowanego drutu, zaimpregnowane i mocno usztywnione, tak, aby zmniejszyć prawdopodobieństwo uszkodzenia na skutek drgań mechanicznych.

Ze względu na sposób wykonania wirnika rozróżnia się dwa rodzaje silników indukcyjnych: klatkowe i pierścieniowe.

# Budowa silnika indukcyjnego pierścieniowego

W silniku pierścieniowym uzwojenie wirnika wykonane jest podobnie do uzwojenia stojana. Jest ono na stałe połączone z pierścieniami ślizgowymi (stąd nazwa “silnik pierścieniowy”), zwykle trzema, gdyż uzwojenie wirnika najczęściej jest 3-fazowe. Za pośrednictwem przylegających do pierścieni szczotek, uzwojenia wirnika połączone są z dodatkowymi elementami, zwiększającymi rezystancję każdej fazy. (zmianę rezystancji faz stosuje się dla rozruchu, hamowania i zmiany prędkości silnika). Obecnie ze względu na zbyt skomplikowaną budowę konstrukcja ta jest raczej rzadko stosowana.



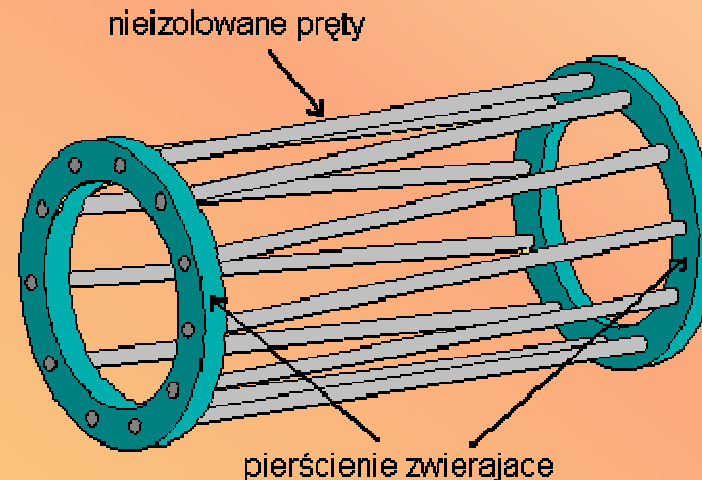
wirnik silnika pierścieniowego



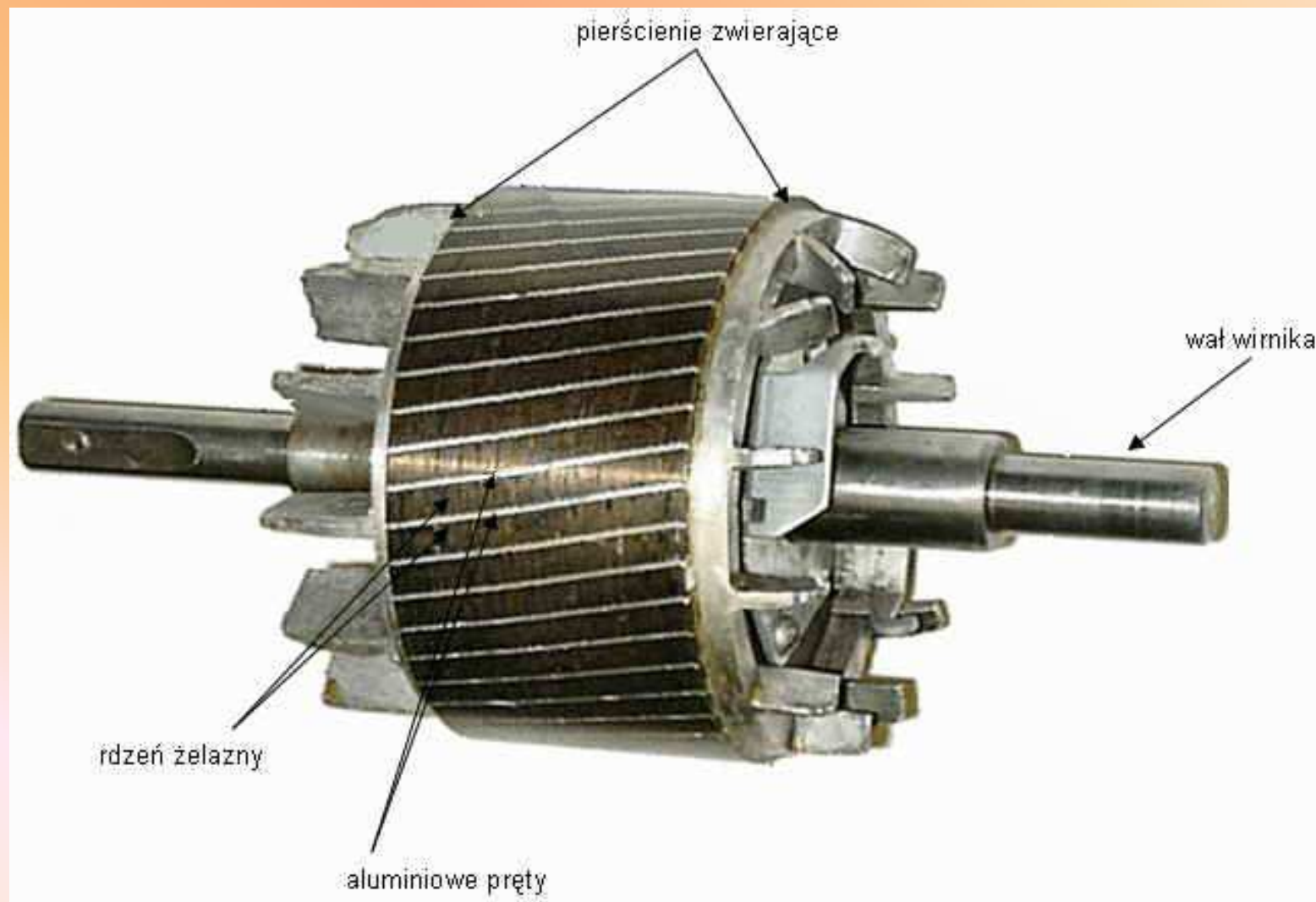
# Budowa silnika indukcyjnego klatkowego

W silniku indukcyjnym klatkowym obwód elektryczny wirnika jest wykonany z nieizolowanych prętów, połączonych po obu stronach wirnika pierścieniami zwierającymi. Konstrukcja to wyglądem przypomina klatkę o kształcie walca (stąd wzięła się nazwa tego silnika).

Obwód magnetyczny wirnika wykonany jest w postaci pakietu blach stalowych z dodatkiem krzemu, wzajemnie odizolowanych, złożonych jedna na drugą.



Obwód elektryczny wirnika jest zawsze zwarty (inna nazwa tego silnika to silnik indukcyjny zwarty) w związku, z czym nie ma możliwości przyłączania dodatkowych elementów, tak jak ma to miejsce w wirniku silnika pierścieniowego. Klatka stanowi wielofazowe uzwojenie wirnika, a za liczbę faz przyjmuje się liczbę prętów, z których jest wykonana.



wirnik silnika klatkowego

Silnik klatkowy ma bardzo prostą, tanią, i łatwą w utrzymaniu konstrukcję. Wykonanie silnika pierścieniowego jest o wiele droższe, ale konstrukcja ta, poprzez możliwość dołączania dodatkowych elementów do uzwojenia wirnika posiada zdecydowanie bogatsze właściwości ruchowe. (układy umożliwiające rozruch i regulacje prędkości silnika) Biorąc jednak pod uwagę coraz większą powszechność elektronicznych urządzeń zasilających (falowniki, softstarty), umożliwiających uzyskanie o wiele lepszych właściwości regulacyjnych, wspomniane zalety silników pierścieniowych przestały być już tak istotne i w ogromnej większości silniki pierścieniowe zostały wyparte przez silniki klatkowe.

# Zasada działania silnika asynchronicznego

Wytworzone przez uzwojenia stojana wirujące pole magnetyczne obraca się wokół nieruchomego wirnika. W wyniku przecinania przez to pole prętów klatki wirnika, indukuje się w nich napięcie (stąd nazwa "silnik indukcyjny") i zaczyna płynąć w nich prąd. (patrz zjawisko indukcji elektromagnetycznej). Przepływ prądu w polu magnetycznym powoduje powstanie siły elektrodynamicznej (patrz zjawisko powstawania siły elektrodynamicznej) działającej stycznie do obwodu wirnika, a zatem powstaje także moment elektromagnetyczny. Jeżeli wartość tego momentu jest większa od wartości momentu obciążenia, to wirnik rusza i zaczyna zwiększać swoją prędkość obrotową. Zwiększanie prędkości wirnika, powoduje że pręty jego klatki przecinane są przez pole magnetyczne z coraz mniejszą prędkością, co skutkuje zmniejszeniem wartości indukowanej siły elektromotorycznej i spadkiem wartości prądu płynącego w prętach klatki, a zatem spada również wartość momentu elektromagnetycznego.

Jeżeli moment ten spadnie do wartości równej momentowi obciążenia, wirnik przestanie przyspieszać i dalej będzie poruszał się ze stałą prędkością. Gdyby nie było żadnego momentu oporowego, wirnik osiągnąłby prędkość równą wartości prędkości wirowania pola, a więc prędkości synchronicznej. W takim przypadku pole wirnika byłoby nieruchome względem pola stojana, a więc ustałoby przecinanie prętów klatki przez pole stojana i nie płynęłyby w nich prądy, nie powstałby moment elektromagnetyczny. Sytuacja taka nie jest jednak możliwa do wystąpienia w rzeczywistym silniku, ponieważ zawsze występuje jakiś moment obciążenia, chociażby moment tarcia w łożyskach czy oporów powietrza (chyba że wirnik będzie napędzany mechanicznie przez jakiś inny silnik). Zatem wirnik osiągnie taką prędkość (zwykle niewiele mniejsza od prędkości synchronicznej), przy której momenty elektromagnetyczny silnika i obciążenia będą miały tę samą wartość. Skoro nie jest to prędkość synchroniczna, musi to być prędkość asynchroniczna, której silnik indukcyjny zawdzięcza swoją drugą nazwę - "silnika asynchronicznego".

Wirnik obraca się z mniejszą prędkością niż stojan. Wartość tej prędkości jest uzależniona od momentu obciążenia - przy większym momencie oporowym wirnik obraca się wolniej, przyspiesza, jeżeli go zmniejszamy. A więc w skrótu prędkości wirnika i stojana są różne, oznacza to, że stojan, a w rzeczywistości pole wirujące wytwarzane przez stojan, obraca się z pewną prędkością względem wirnika. Prędkość tą nazywa się **poślizgiem** i wyraża się wzorem:

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1}$$

lub w %

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \cdot 100\%$$

$n_1$  - prędkość wirowania pola wytworzonego przez stojan

$n$  - prędkość wirowania wirnika

# Moment elektromagnetyczny

Często w praktycznych zastosowaniach silnika istnieje potrzeba szybkiego wyznaczenia wartości momentu elektromagnetycznego, jaki jest on w stanie osiągnąć. Tabliczka znamionowa silnika zwykle nie podaje jego wartości, ale podaje za to inne wartości na podstawie, których bardzo łatwo go wyliczyć. W najprostszej postaci wzoru na moment obrotowy jest to iloczyn siły i ramienia, na jakim działa ta siła.

$$M = F \cdot r$$

Powstająca na obwodzie wirnika siła elektrodynamiczna  $F$ , obracając się razem z wirnikiem wykonuje pracę  $W$ , dostarczając w tym czasie moc  $P$

$$P = \frac{W}{t} = \frac{F \cdot l}{t} = F \cdot v = F \cdot \omega \cdot r = F \cdot \frac{\pi n}{30} \cdot r = \frac{M}{r} \cdot \frac{\pi n}{30} \cdot r = M \cdot \frac{\pi n}{30}$$

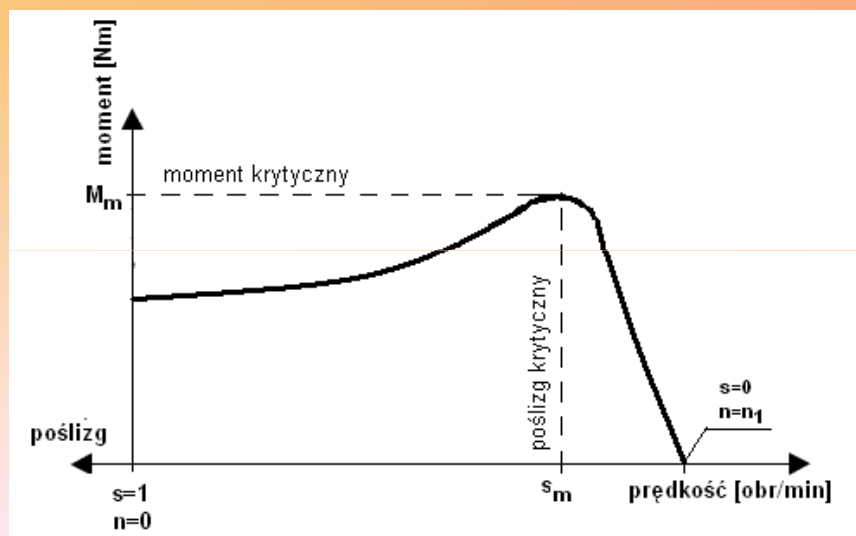
Zatem generowany w tych warunkach moment elektromagnetyczny  $M$  :

$$M = \frac{30P}{\pi n} = 9,55 \frac{P}{n}$$

Wartości mocy znamionowej silnika  $P$  i prędkości asynchronicznej  $n$  podawane są zawsze na tabliczkach znamionowych silników, zatem mając te wartości można łatwo wyliczyć wartość znamionowego momentu silnika.

# Charakterystyka mechaniczna

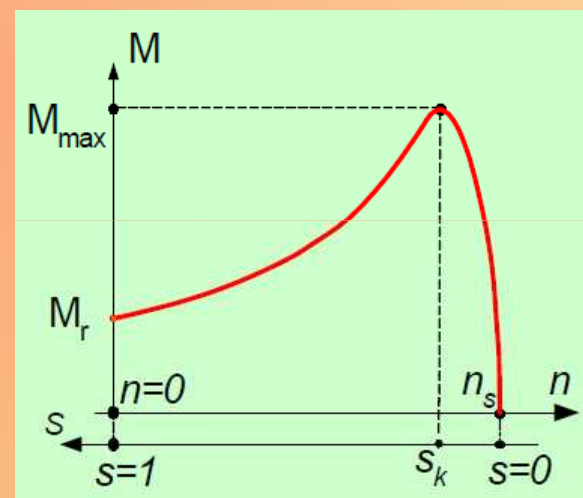
Charakterystyka mechaniczna silnika indukcyjnego ukazuje zależność momentu na jego wale od prędkości obrotowej silnika. Jak już wspomniano wcześniej prędkość obrotową silnika asynchronicznego można wyrazić za pomocą poślizgu.



Charakterystykę mechaniczną silnika można wyrazić za pomocą następującego wzoru:

$$\frac{M}{M_m} = \frac{2}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s}}$$

Wzór ten nazywany jest wzorem Klossa.



$M_r$  - moment rozruchowy

$s_k$  - poślizg krytyczny

$M$  - moment silnika

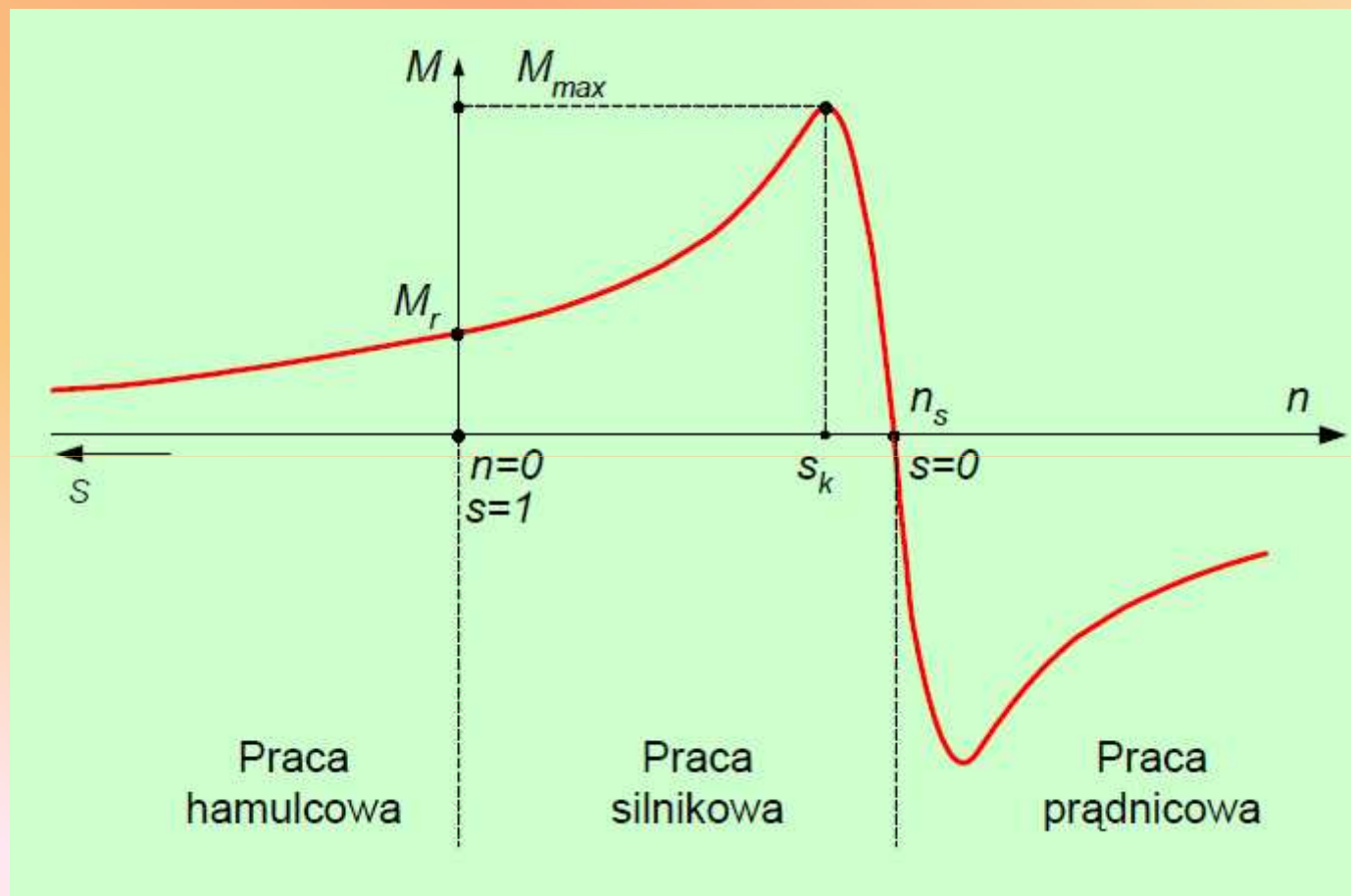
$M_m$  - moment krytyczny silnika

$s$  - poślizg

$s_m$  - poślizg krytyczny



# Rodzaje pracy silników indukcyjnych



Charakterystyka mechaniczna silnika indukcyjnego dla różnych rodzajów jego pracy

# Rozruch silników asynchronicznych

Rozruch bezpośredni

Rozruch gwiazda-trójkąt

Rozruch przez zmianę rezystancji w obwodzie wirnika

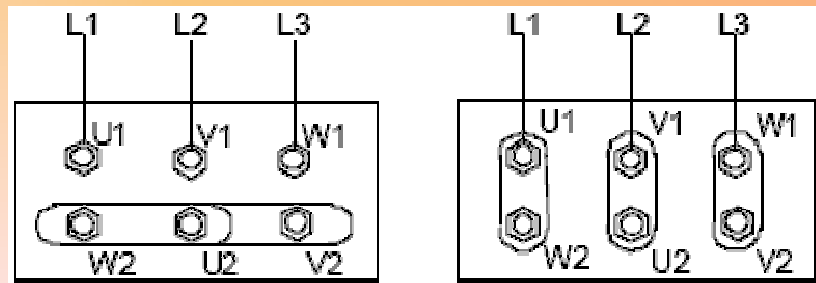
Zastosowanie "softstartu"

# Rozruch bezpośredni

Rozruch silnika jest możliwy, jeżeli powstający w chwili rozruchu moment elektromagnetyczny jest większy niż moment obciążenia. Najprostszym sposobem dokonania rozruchu silnika indukcyjnego jest podłączenie uzwojeń stojana do 3-fazowego źródła zasilania (w przypadku silnika 3-fazowego), jest to tzw. **rozruch bezpośredni**. W tym przypadku pobierany prąd rozruchu jest wielokrotnie większy niż prąd znamionowy (do 8 razy), co powoduje nagrzewanie się uzwojeń, a także może spowodować spadki napięcia sieci zasilającej. Wartość powstającego momentu elektromagnetycznego nie jest zbyt duża, dlatego, aby silnik mógł wystartować nie może być zbyt obciążony. Ze względu na te ograniczenia rozruch bezpośredni stosuje się dla silników o małych mocach (do kilkunastu kW).

# Rozruch gwiazda-trójkąt

Sposobem na zmniejszenie prądu rozruchowego, jest zastosowanie w celach rozruchowych **przełącznika gwiazda - trójkąt**.

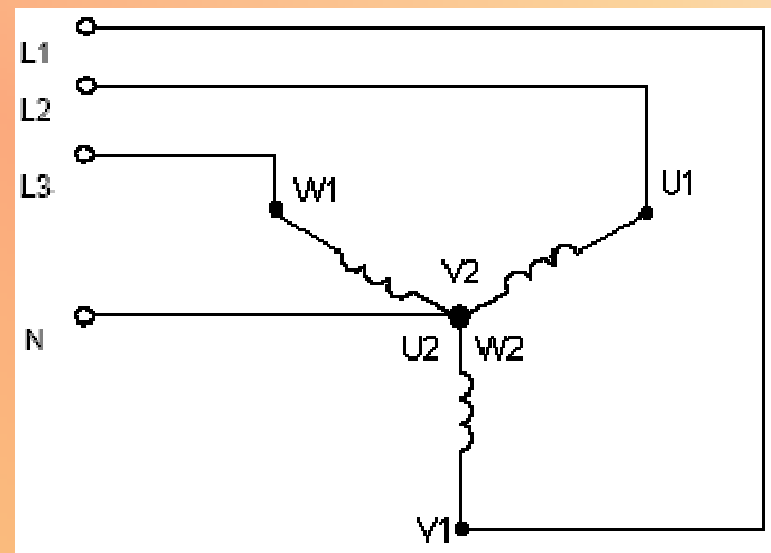


uzwojenia połączone  
w gwiazdę

uzwojenia połączone  
w trójkąt

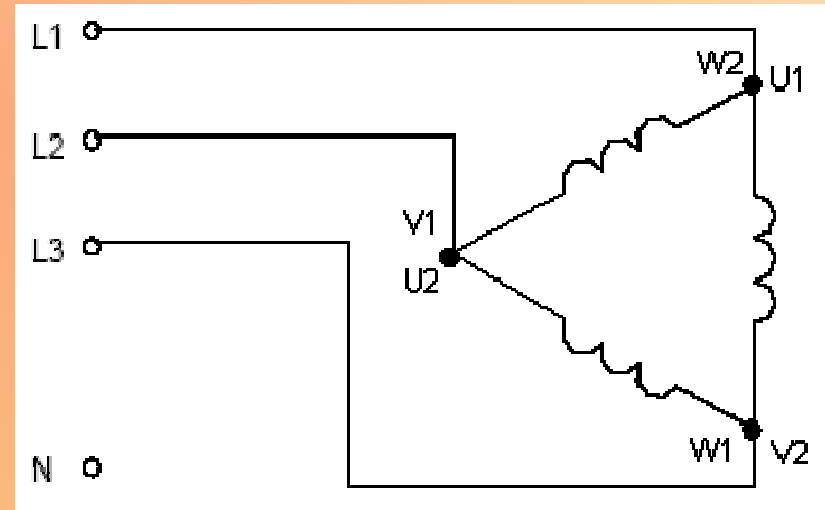
Rozruch ten jest jednak możliwy tylko dla silników 3-fazowych, które mają wyprowadzone 6 zacisków na tabliczce zaciskowej, umożliwiające odpowiednie podłączenie uzwojeń stojana w gwiazdę lub w trójkąt.

Połączenie w gwiazdę polega na połączeniu końców wszystkich trzech uzwojeń do jednego wspólnego punktu, a pozostałych trzech końców do kolejnych faz sieci zasilającej. W ten sposób każde z uzwojeń stojana połączone 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 (czyli w naszych warunkach wynosi ono 230V). Zwykle nie stosuje się połączenie punktu wspólnego wszystkich uzwojeń z punktem neutralnym N ponieważ nie jest ono konieczne.



uzwojenia stojana połączone w gwiazdę

Połączenie w trójkąt polega na połączeniu końca uzwojenia danej fazy z początkami uzwojenia fazy następnej (punkt U2 łączony z V1, V2 z W1 a W2 z U1). Połączone w ten sposób uzwojenia tworzą zamknięty obwód, a jego wygląd przypomina trójkąt. Punkty wspólne uzwojeń łączone są następnie do kolejnych faz sieci zasilającej. W tym połączeniu wcale nie wykorzystuje się punktu neutralnego. Przy połączeniu w trójkąt na każdym z uzwojeń panuje napięcie międzyfazowe (które w naszych warunkach wynosi 400V).



uzwojenia stojana połączone w trójkąt

Przy połączeniu uzwojeń silnika w trójkąt, prąd pobierany przez silnik z sieci jest 3-krotnie większy niż prąd pobierany przy połączeniu w gwiazdę. Także moment elektromagnetyczny a więc i moc silnika w tym przypadku są 3-krotnie większe. Stosując przełącznik gwiazda – trójkąt możemy wystartować silnik połączony w gwiazdę, przez co będzie mniejszy pobór prądu z sieci zasilającej, a następnie po osiągnięciu przez silnik odpowiedniej prędkości obrotowej przełączyć uzwojenia stojana w trójkąt, tak, aby silnik mógł zapewnić pożądaną przez nas moc. W starszych rozwiązaniach przełączenie zwykle dokonywane było ręcznie przez operatora, obecnie w układach stosuje się specjalizowane do tego celu układy styczników i przekaźników dokonujące automatycznego przełączenia po nastawionym wcześniej czasie.

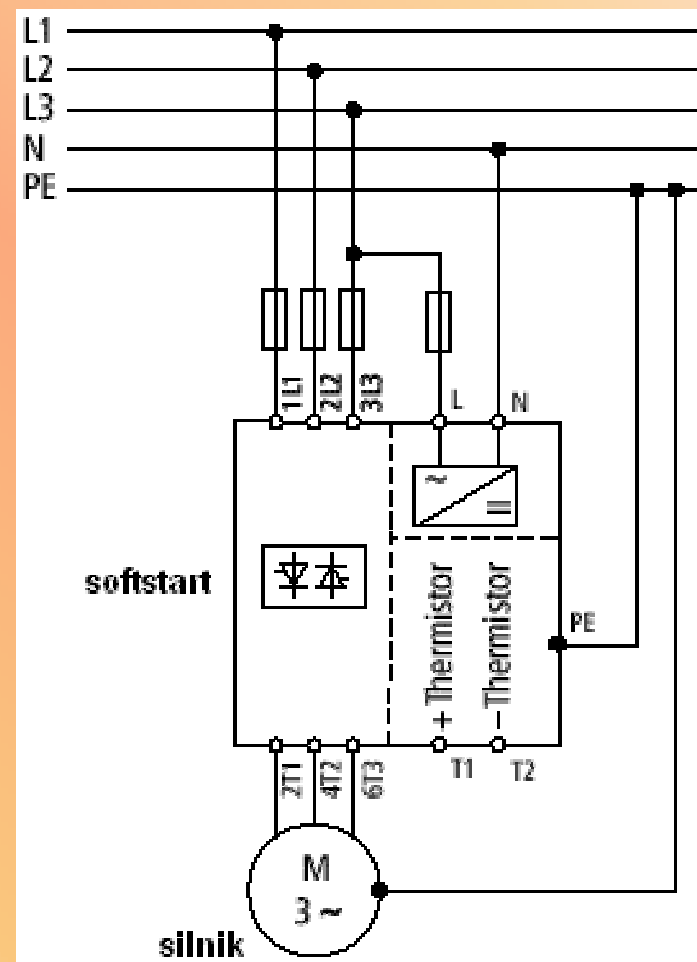
# Rozruch przez zmianę rezystancji w obwodzie wirnika

W przypadku silnika pierścieniowego w celach rozruchowych można stosować dodatkowe rezystory przyłączane do uzwojeń wirnika co powoduje spadek prądu wirnika, a zatem również spadek prądu pobieranego z sieci. Wadą tego rozwiązania, podobnie jak w przypadku rozruchu gwiazda - trójkąt jest mniejszy moment rozruchowy silnika, poza tym jak już wspomniano wcześniej, ze względu na skomplikowaną budowę i koszty utrzymania konstrukcja ta jest obecnie rzadko stosowana.



# Zastosowanie „softstartu”

W nowoczesnych układach napędowych, do łagodnego rozruchu 3-fazowych silników indukcyjnych stosuje się specjalizowane urządzenia, nazywane układami „**soft - start**” (miękkiego rozruchu), które mają za zadanie redukują niekorzystnych zjawisk występujących podczas rozruchu, wpływających na żywotność silników i jakość ich pracy. Ich zasada działania opiera się na, płynnej regulacji napięcia podawanego na uzwojenia (lub jedno z uzwojeń) W roli elementów sterujących stosuje się najczęściej tyrystory. Zwykle urządzenia takie umożliwiają kontrole i możliwość nastawienia wielu parametrów takich jak czas rozruchu, wartość początkowego momentu rozruchowego, kolejności faz i czy temperaturę przegrzania.



schemat podłączenia silnika do sieci 3- fazowej za pośrednictwem softstartu.

# Zmiana prędkości obrotowej silnika

Jak już wspomniano i pokazano wcześniej w silniku indukcyjnym prędkość obrotowa wyraźnie zależy od obciążenia. A więc czy możliwa jest regulacja prędkości przez zmianę obciążenia?

Teoretycznie tak, ale chyba nie o to chodzi.

Chodzi raczej o to, aby istniała możliwość zmiany wartości prędkości obrotowej silnika przy ustalonych już warunkach zasilania i obciążenia. Po przekształceniu przytoczonego wcześniej wzoru na poślizg otrzymujemy wzór na prędkość obrotową silnika indukcyjnego, na podstawie, którego możemy stwierdzić, że będzie ona zależała od:

f - częstotliwości zasilania

p - liczby par biegunów

s - poślizgu

$$n = n_1(1-s) = \frac{60f}{p}(1-s)$$

prędkość obrotowa silnika indukcyjnego

# Zmiana liczby par biegunów

W tym przypadku zmianę prędkości obrotowej silnika osiąga się przez zmianę liczby par biegunów w stojanie. Realizuje się to zwykle umieszczając w stojanie kilka niezależnych uzwojeń o różnych liczbach par biegunów (z reguły nie więcej niż dwa) lub jedno uzwojenie o przełączalnej liczbie par biegunów. Przełączając zasilanie pomiędzy uzwojeniami, otrzyma się pola wirujące z różnymi prędkościami.

W tym przypadku możliwa jest tylko i wyłącznie skokowa regulacja prędkości obrotowej, silniki takie nazywane są silnikami wielobiegowymi, i wykonuje się je wyłącznie jako silniki klatkowe (dla silników pierścieniowych trzeba by również każdorazowo zmieniać liczbę biegunów wirnika). Silniki te znajdują zastosowanie w wszelkiego rodzaju obrabiarkach, zastępując, jeżeli to możliwe, przekładnie mechaniczne

<b>p</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>6</b>	<b>8</b>	<b>10</b>
$n_1$	3000	1500	1000	750	500	375	300
<b>n</b>	2880	1440	960	720	480	360	288

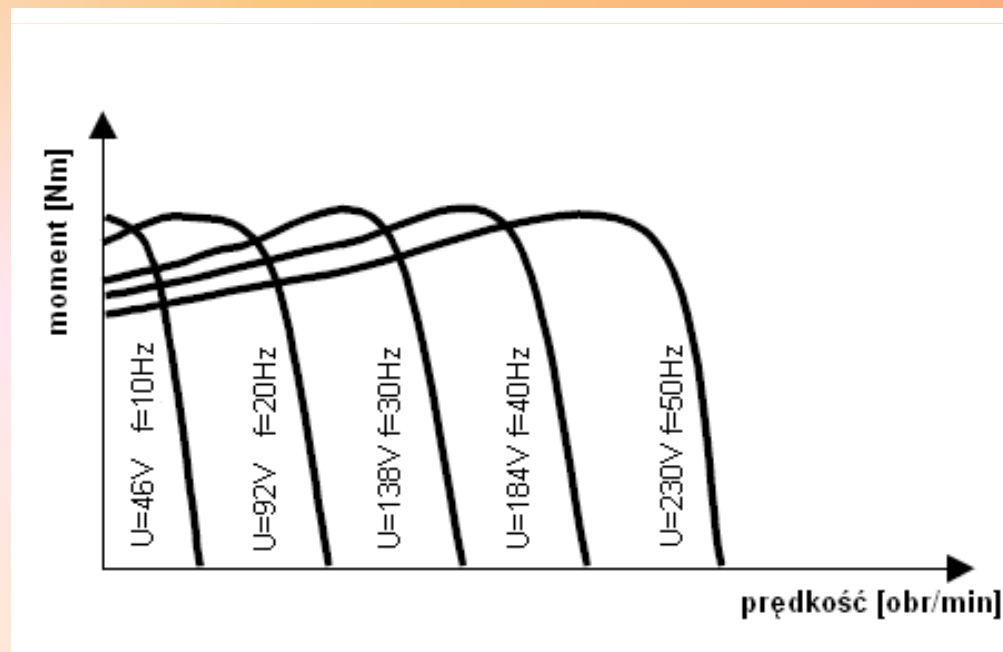
Tabela wartości prędkości synchronicznych (**n**) i typowych prędkości asynchronicznych ( $n_1$ ) dla liczby par biegunów stojana (**p**) (jak łatwo policzyć dla poślizgu  $s=0.04$ ).

# Zmiana rezystancji w obwodzie wirnika

Dla silników pierścieniowych podobnie jak dla celów rozruchowych, podłącza się dodatkowe rezystancje w obwód wirnika, Połączone szeregowo z uzwojeniem wirnika rezystancje spowodują spadek prądu płynącego w wirniku, a więc i spadek powstającej siły elektrodynamicznej działającej na wirnik a co za tym idzie spadek momentu i w końcu spadek prędkości obrotowej silnika.

# Zmiana częstotliwości zasilania

Częstotliwość zasilania wpływa na prędkość wirowania pola magnetycznego wytwarzanego w stojanie, czyli na prędkość synchroniczną silnika. Zmieniając jej wartość możemy płynnie zmieniać prędkość silnika w zakresie od postoju do prędkości nawet przekraczającej prędkość znamionową (przekraczając prędkość znamionową trzeba wziąć pod uwagę wytrzymałość mechaniczną silnika i wytrzymałość elektryczną izolacji).



Charakterystyki mechaniczne przy zachowaniu  $U/f = \text{const.}$

Obecnie ze względu na bardzo dynamiczny rozwój elektroniki, energoelektroniki, i znaczny spadek cen urządzeń mikroprocesorowych, silniki indukcyjne zasila się z urządzeń zwanych falownikami. Urządzenia te w najprostszycy rozwiązaniach bazują właśnie na zasadzie zachowywania stałej wartości stosunku  $U/f$ , a oprócz regulacji prędkości obrotowej, pozwalają na kontrolę wielu parametrów silnika, co zdecydowanie poprawia jakość funkcjonowania takiego silnika i wydłuża czas jego eksploatacji.



falownik i silnik

# Hamowanie silników indukcyjnych

Elektryczne hamowanie silnikiem występuje wówczas, gdy moment elektromagnetyczny silnika działa w kierunku przeciwnym do kierunku prędkości obrotowej.

Przy trójfazowym zasilaniu silnika indukcyjnego możemy zastosować jeden z trzech rodzajów hamowania. Są to:

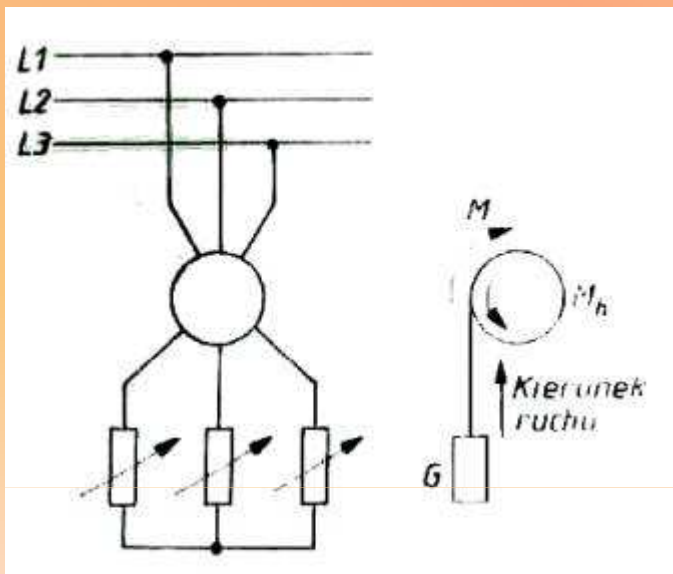
- **hamowanie naturalne** (praca hamulcowa), zwane także hamowaniem przeciwprądem lub hamowaniem prądem sieci, występujące przy prędkości wirowania przeciwnej do kierunku wirowania pola magnetycznego;
- **hamowanie prądnicowe** (ze zwrotem energii do sieci), zwane nadsynchronicznym, które występuje przy prędkości wirnika większej od prędkości wirowania pola magnetycznego,
- **hamowanie dynamiczne**, czyli hamowanie prądem stałym.

Przy rozpatrywaniu każdego z rodzajów hamowania należy zwrócić uwagę na zakresy prędkości obrotowych oraz nachylenie charakterystyki mechanicznej silnika i urządzenia hamowanego. Okoliczności te w istotny sposób wpływają na ekonomiczność hamowania, gdyż energia hamowania, jaką pobiera silnik w formie energii mechanicznej, może być oddawana do sieci w postaci energii elektrycznej lub tracona w silniku i włączonych w obwód wirnika opornikach.

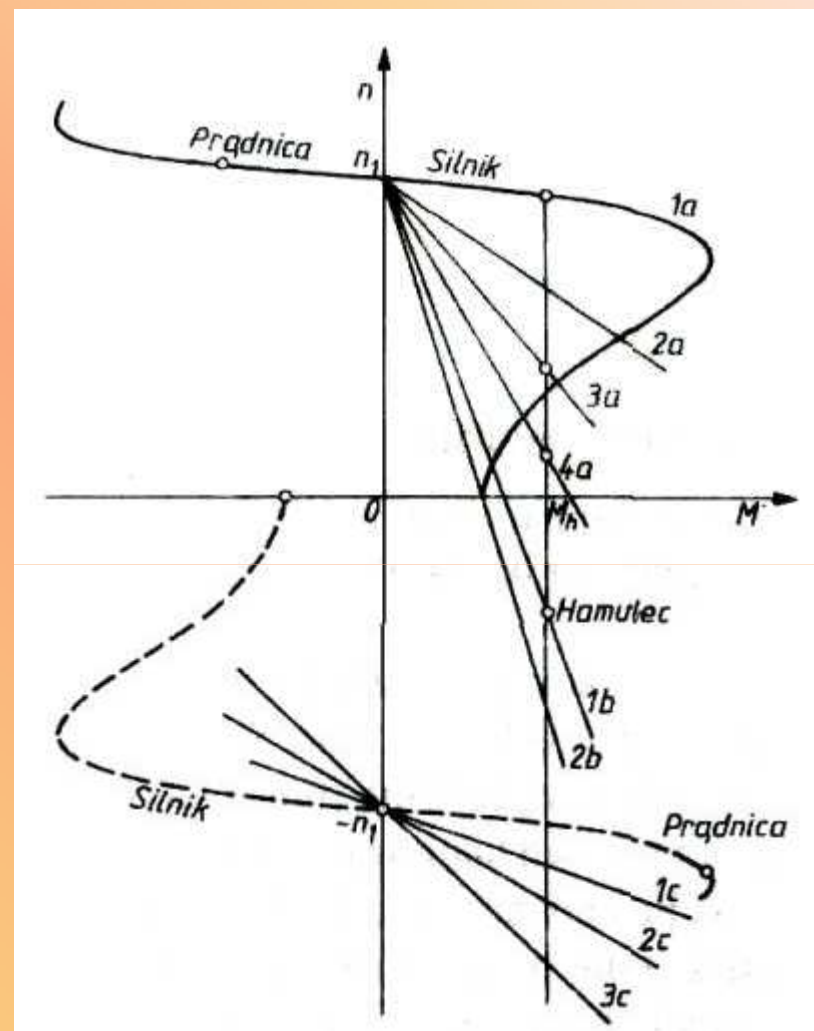
# Hamowanie naturalne

Hamowanie przeciwwprędem występuje wówczas, gdy wirnik jest napędzany w kierunku przeciwnym do kierunku wirowania pola magnetycznego. Stan taki może wystąpić wówczas, gdy moment  $M$  wytworzony w silniku stanie się mniejszy od momentu hamującego  $M_h$  na skutek włączenia dużej rezystancji w obwód wirnika. Na rysunku 1 pokazano układ połączeń silnika pierścieniowego napędzającego dźwig podnoszący ciężar. Moment od ciężaru oznaczmy przez  $M_h$ . Na rysunku 2 krzywa 1a jest charakterystyką mechaniczną naturalną  $n = f(M)$  silnika, a proste 2a, 3a i 4a są charakterystykami mechanicznymi (na części prostoliniowej charakterystyki) przy dodatkowych, coraz to większych rezystancjach włączonych w obwód wirnika. Można tak zwiększyć rezystancje w wirniku, że maszyna przejdzie na charakterystyki odpowiadające prostym 1b, 2b itd. Po przejściu przez 0 prędkość obrotowa zmieni kierunek uzyskując wartości ujemne, odpowiadające punktom przecięcia prostych 1b i 2b z prostą momentu hamującego  $M_h$  pochodzącego od ciężaru  $G$ , czyli będzie pracować z poślizgiem  $s > 1$ .





Rys. 1. Układ połączeń silnika pierścieniowego napędzającego dźwig



Rys. 2. Hamowanie naturalne i prądnicowe maszyną indukcyjną

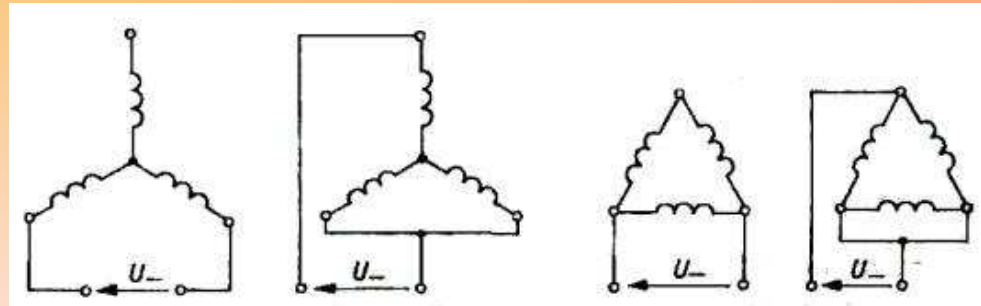
Ciążar zaczyna być opuszczany w dół z prędkością zależną od wartości rezystancji włączonej w obwód wirnika. Wirnik obraca się w kierunku przeciwnym do kierunku wirowania pola magnetycznego, maszyna pracuje w zakresie pracy hamulcowej. Moc pobrana przez maszynę pracującą w tym zakresie jest zużyta na straty. Większość tych strat wydziela się w oporniku regulacyjnym w postaci ciepła, co jest poważną wadą tego hamowania. Dalsze nachylenie charakterystyki  $n = f(M)$  poprzez dalsze zwiększanie rezystancji regulacyjnych powoduje utracenie stabilności pracy. Jest to podstawowa wada (obok nadmiernego nagrzewania się uzwojeń) hamowania w zakresie pracy hamulcowej.

# Hamowanie prądnicowe

Przypadek hamowania prądnicowego może wystąpić np. przy opuszczaniu ciężaru w dół za pomocą silnika normalnie podnoszącego ciężar do góry. Do zrealizowania wyżej wymienionego przypadku hamowania zamienia się w maszynie indukcyjnej kierunek wirowania strumienia przez skrzyżowanie dwóch przewodów doprowadzających napięcie do silnika. W konsekwencji tego zmienia się znak wytworzonego w maszynie momentu i zależność  $M = f(n)$  ma przebieg jak na rys. 2. Charakterystyki  $M = f(n)$  przecinają prostą  $M_h$  (obrazującą obciążenie) w zakresie pracy prądnicowej przy prędkości nadsynchronicznej, ujemnej w stosunku do prędkości, jakie występowały przy podnoszeniu ciężaru. Włączając odpowiednie rezystancje w obwód wirnika, uzyskuje się proste 1c, 2c, 3c, które w punktach przecięcia z prostą  $M_h$  wyznaczają odpowiednie prędkości. Przy takim sposobie hamowania maszyna indukcyjna pracuje jako prądnica i przekazuje do sieci moc uzyskaną od napędzającego ją, opadającego ciężaru G. Jest to zaleta hamowania nadsynchronicznego; jego wadą jest możliwość hamowania tylko przy dużych prędkościach obrotowych. Innym przypadkiem pracy prądnicowej jest praca silnika indukcyjnego przyłączonego do sieci i napędzanego powyżej prędkości synchronicznej np. za pomocą turbiny. Nie należy wówczas zmieniać kierunku obrotów a jedynie "dopędzić" silnik do prędkości ponadsynchronicznej.

# Hamowanie dynamiczne (prądem stałym)

Hamowanie dynamiczne realizuje się w ten sposób, że uzwojenie stojana odłącza się od napięcia, a następnie zasila się je z sieci prądu stałego, tak, aby wytworzyć stały strumień magnetyczny. W wirniku wirującym w tym stałym polu indukują się napięcia i płyną prądy, które wytwarzają moment skierowany przeciwnie do kierunku wirowania wirnika. Wartość tego momentu można regulować zmieniając wartość prądu stałego zasilającego stojan lub włączając odpowiednią rezystancję dodatkową  $R_d$ . Przy stosowaniu hamowania dynamicznego nie można doprowadzić do całkowitego zahamowania urządzenia, gdyż przy spadku prędkości napięcie indukowane w wirniku maleje i moment też się zmniejsza. Energia mechaniczna zamienia się całkowicie na ciepło w wirniku i ewentualnie połączonej z nim szeregowo rezystancji.



Układy zasilania uzwojenia stojana przedstawione są rysunku. Źródłem prądu stałego jest najczęściej odpowiedni układ prostowniczy, zasilany z sieci przez transformator obniżający napięcie. Napięcie zasilające wynosi tylko kilka procent napięcia znamionowego silnika. Moc pobierana przez silnik przy hamowaniu dynamicznym jest znacznie mniejsza niż przy hamowaniu przeciwprądem.