

2. Trójfazowe silniki prądu przemiennego

Pierwszy silnik elektryczny był jednostką prądu stałego, zbudowaną w 1833. Regulacja prędkości tego silnika była prosta i spełniała wymagania wielu różnych aplikacji i układów napędowych. W 1889 zbudowano pierwszy silnik prądu przemiennego. Bardziej prosty i dynamiczny niż silnik prądu stałego, trójfazowe silniki miały natomiast ograniczoną regulację prędkości i charakterystyki momentu. Dlatego też przez wiele lat, silniki te nie mogły być zastosowane w skomplikowanych oraz specjalistycznych napędach.

Trójfazowe silniki prądu przemiennego są elektromagnetycznymi przemiennikami energii zamieniającymi energię elektryczną na energię mechaniczną (praca silnikowa) i odwrotnie (praca prądnicowa) zgodnie z prawami indukcji elektromagnetycznej.

Zasadę indukcji elektromagnetycznej można przedstawić na przykładzie przewodu poruszającego się w polu magnetycznym B , ruch ten powoduje indukowanie się siły elektromotorycznej SEM. Jeżeli przewód znajduje się w zamkniętym obwodzie, to popłynie prąd I . Kiedy przewód znajduje się w ruchu, działa na niego siła F , która jest prostopadle skierowana do kierunku pola magnetycznego.

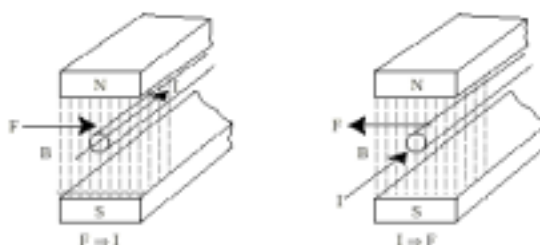
Podstawy indukcji elektromagnetycznej:

- a) Zasada pracy generatorowej (indukcja rozumiana jako wynik ruchu)

Podstawowa zasada mówi, że przewód poruszający się w polu magnetycznym indukuje napięcie, rys. 2.01a.

- b) Zasada pracy silnikowej

W silnikach elektrycznych prądu przemiennego przewód, w którym płynie prąd jest umieszczany w polu magnetycznym, wtedy na przewód zaczyna działać siła F wypychająca przewód poza pole magnetyczne, która powoduje ruch przewodu w polu magnetycznym.



- a) Zasada działania generatora.

- b) Zasada działania silnika.

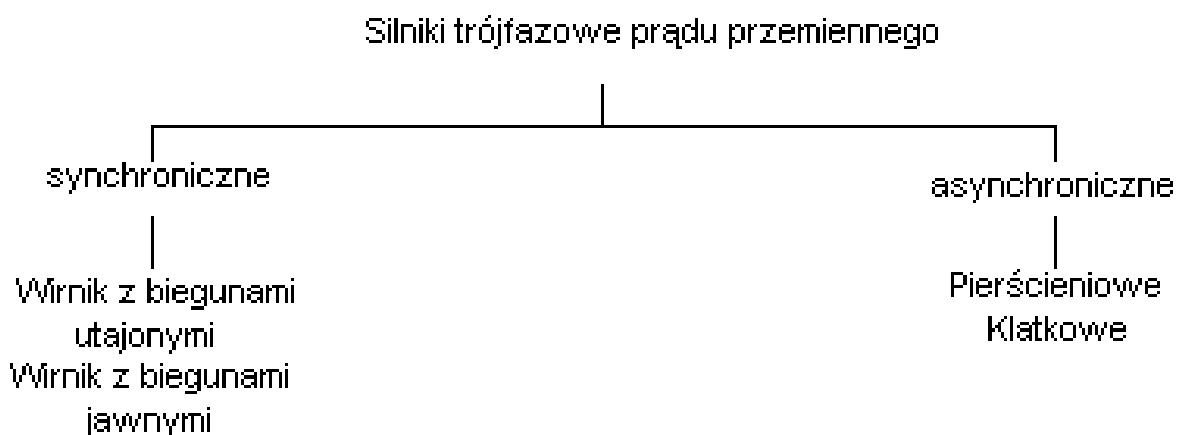
Rys. 2.01 Zasada indukcji elektromagnetycznej.

W czasie pracy silnikowej pole magnetyczne i prąd płynący w przewodach uzwojeń powodują ruch jego wirnika, rys. 2.01b.

Pole magnetyczne silnika, generowane w uzwojeniu stojana oddziałuje poprzez siły elektromagnetyczne na wirnik powodując jego ruch.

Silniki trójfazowe prądu przemiennego można podzielić na dwie główne grupy: silniki asynchroniczne i silniki synchroniczne.

W obu typach silników zasada pracy stojana jest taka sama, ale wykonanie wirnika i jego ruch w stosunku do pola magnetycznego jest różny. W silniku synchronicznym prędkość wirowania wirnika i pola magnetycznego są takie same, a w silniku asynchronicznym prędkości te są różne.

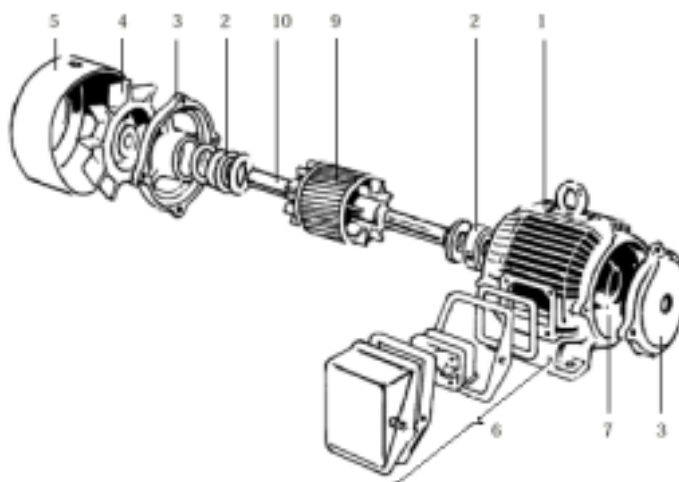


Rys. 2.02 Rodzaje trójfazowych silników prądu przemiennego.

2.1 Silnik asynchroniczny

Silniki asynchroniczne są najbardziej rozpowszechnione i nie wymagają praktycznie żadnej konserwacji. Z punktu widzenia napędu układów mechanicznych, są one najszerzej stosowane, ponieważ najłatwiej dobrać odpowiedni silnik do różnych zastosowań. Jest wiele rodzajów silników asynchronicznych, działających na tej samej zasadzie. Głównymi elementami silnika asynchronicznego są stojan i wirnik.

2.1.1 Stojan



Rys. 2.03 Budowa silnika asynchronicznego.

Stojan jest nieruchomą częścią silnika. Silnik składa się z obudowy (1), łożysk kulkowych (2) podpory wirnika (9), ułożyskowania (3) dla umiejscowienia łożysk w końcowej części obudowy stojana silnika, wentylatora (4) dla chłodzenia silnika i osłony wentylatora (5) jako ochrony przed obracającym się wentylatorem. Skrzynka podłączeniowa z zaciskami elektrycznymi (6) jest umiejscowiona na obudowie stojana silnika.

Rdzeń stojana (7) może być zbudowany z blach ferromagnetycznych o grubości (0,3 do 0,5 mm) podzielonych na sekcje. Te sekcje odizolowane od siebie stanowią trzy uzwojenia fazowe stojana.

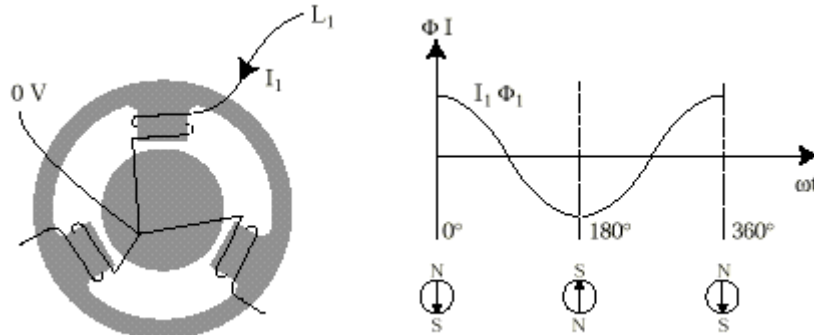
Uzwojenia fazowe i rdzeń stojana indukują wirujące pole magnetyczne. Liczba par biegunów (lub biegunów) określa prędkość wirowania pola magnetycznego. Jeżeli silnik jest zasilany napięciem o określonej częstotliwości, to prędkość wirowania pola magnetycznego nazywana jest prędkością synchroniczną silnika n_0 .

Tabela. 2.01 Liczba par biegunów - p, liczba biegunów i prędkość synchroniczna silnika.

Liczba par biegunów	1	2	3	4	6
Liczba biegunów	2	4	6	8	12
n_0 [1/min]	3000	1500	1000	750	500

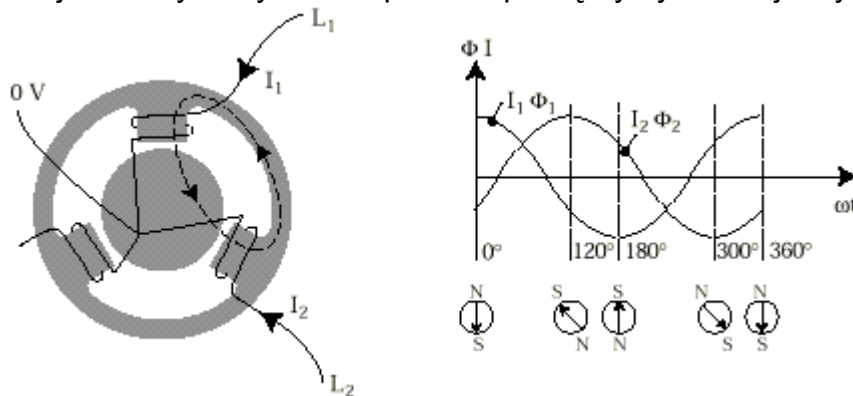
2.1.2 Pole magnetyczne silnika

Pole magnetyczne indukuje się w szczelinie powietrznej między stojanem i wirnikiem. Po dołączeniu uzwojenia fazowego do zasilania indukuje się w silniku pole magnetyczne.



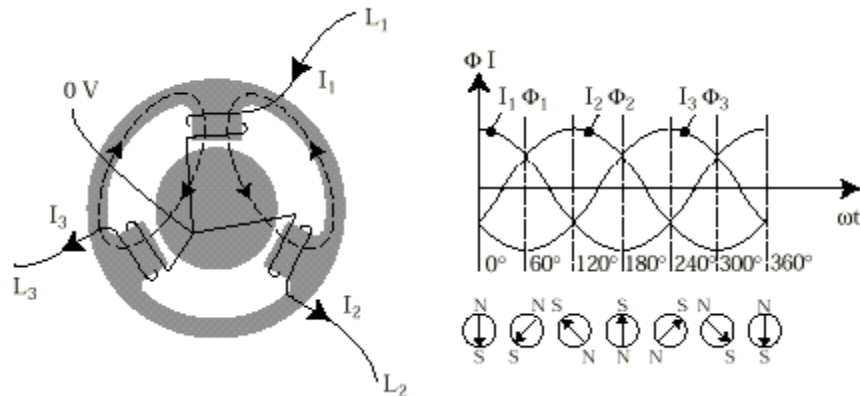
Rys. 2.04 Zmienne pole magnetyczne silnika po dołączeniu jednej fazy.

Położenie pola magnetycznego w rdzeniu stojana jest stałe, ale jego kierunek wirowania zmienia się. Prędkość, przy której występuje zmiana kierunku wirowania jest określona przez częstotliwość napięcia zasilania. Przy częstotliwości 50Hz kierunek wirowania zmienia się 50 razy na sekundę. Jeżeli dwa uzwojenia są połączone do odpowiedniej fazy w tym samym czasie, to indukują dwa pola magnetyczne w stojanie. W silniku dwubiegunowym, istnieje wówczas przesunięcie o 120 stopni między tymi dwoma polami. Wartości amplitudy tych pól są też przesunięte w czasie. Powoduje to indukowanie wirującego pola magnetycznego w stojanie. Pole to jest niesymetryczne dopóki nie podłączymy trzeciej fazy.



Rys. 2.05 Niesymetryczne wirujące pole magnetyczne silnika po dwóch faz.

Trzy fazy generują trzy pola magnetyczne w stojanie, które są przesunięte o 120 stopni względem siebie.



Rys. 2.06 Symetryczne pole magnetyczne silnika po dołączeniu trzech faz.

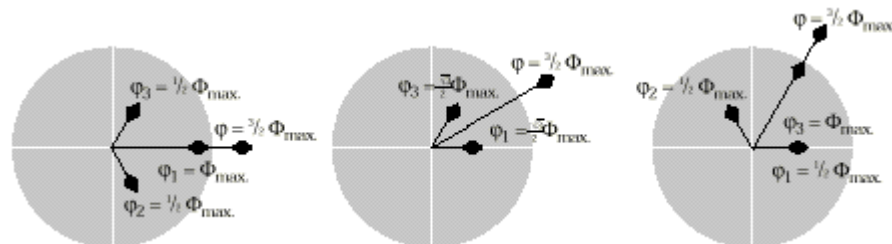
Gdy podłączymy uzwojenia stojana do trójfazowego napięcia zasilania to pola magnetyczne od poszczególnych uzwojeń wytworzą wirujące symetryczne pole magnetyczne, nazywane wirującym polem magnetycznym silnika. Amplituda wirującego pola jest stała i 1,5 razy większa od amplitudy pola pojedynczego uzwojenia. Prędkość wirowania tego pola wyraża się następującym wzorem:

$$n_0 = \frac{(60 * f)}{p} \quad [1/\text{min.}]$$

gdzie:

- f – częstotliwość
- n_0 – prędkość synchroniczna
- p – liczba par biegunów

Jak wynika z powyższego wzoru prędkość synchroniczna silnika zależy od liczby par biegunów p i częstotliwości f napięcia zasilania. Rys. 2.07 przedstawia wykres wektorowy strumienia pola magnetycznego ϕ w trzech różnych okresach.



Rys. 2.07 Wykresy wektorowe strumienia pola magnetycznego silnika w różnych okresach - amplituda tego pola jest stała.

Odwzorowaniem wirującego pola jest wektor o odpowiedniej prędkości wirowania, który zakreśla okrąg. Jako funkcja czasu w układzie współrzędnych, wirujące pole ma kształt sinusoidy. Wirujące pole staje się przebiegiem o kształcie elipsy, jeżeli amplituda strumienia zmienia się w czasie wirowania wału silnika.

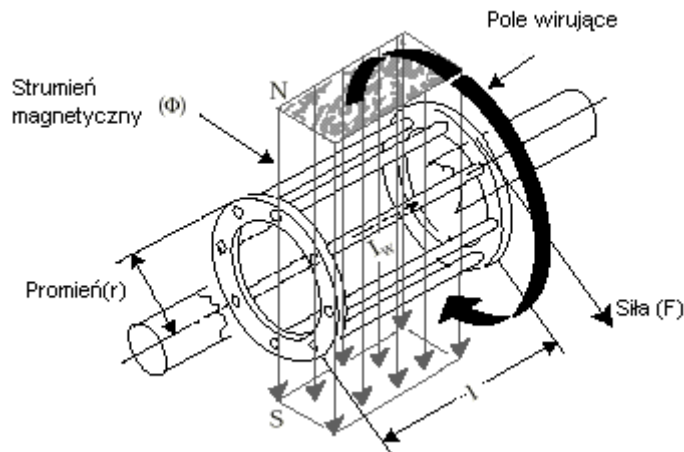
2.1.3 Wirnik silnika asynchronicznego

Wirnik (9) jest zamocowany na wale silnika (10), rys. 2.03.

Wirnik, podobnie jak stojan, wykonany jest zwykle z cienkich blach ferromagnetycznych. Ze względu na dwa rodzaje wirników rozróżniamy dwa typy silników - silnik pierścieniowy i silnik klatkowy. Wirniki silników pierścieniowych mają tak jak stojan uzwojenia umieszczone w żłobkach, w których uzwojenie każdej fazy jest połączone z pierścieniem ślizgowym. Po zwarciu pierścieni, silnik będzie pracował jako silnik klatkowy.

Silniki klatkowe mają uzwojenia w postaci aluminiowych prętów i do tych prętów mocuje się pierścienie aluminiowe (powstaje coś w rodzaju klatki). Silnik klatkowy jest częściej używany niż silnik pierścieniowy. Obydwa silniki pracują na tej samej zasadzie. W niniejszej książce będzie opisywany tylko silnik klatkowy.

Kiedy klatka jest umieszczona w wirującym polu magnetycznym, strumień przecina pręt klatki wirnika. Strumień magnetyczny wywołuje przepływ prądu wzbudzenia I_w w klatce wirnika, co spowoduje powstanie siły F , rys. 2.08 i 2.09.



Rys. 2.08 Pole wirujące w wirniku silnika klatkowego.

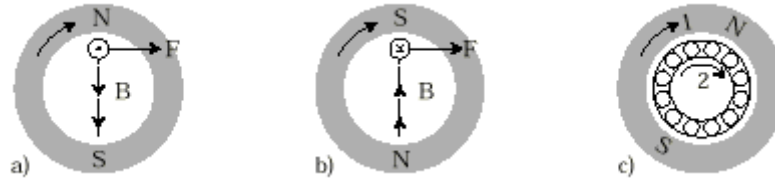
Siła ta jest określona przez wartość indukcji B , prąd wzbudzenia I_w , długość l wirnika i kąt θ między siłą i indukcją.

$$F = B * I_w * l * \sin\theta$$

Jeżeli kąt θ jest równy 90° , to

$$F = B * I_w * l$$

Następny biegun ma przeciwną polaryzację, powoduje to zmianę kierunku przepływu prądu. Ponieważ kierunek pola magnetycznego także się zmienia, kierunek działania siły F nie ulega zmianie, rys. 2.09.



Rys. 2.09 Wykres wektorowy indukcji magnetycznej w przecie klatki wirnika.

Kiedy cały wirnik znajduje się w wirującym polu, rys. 2.09c, pręty klatki wirnika są poddawane działaniu sił, które obracają wirnik. Prędkość wirowania wirnika (2) nie jest równa prędkości wirowania pola (1). Jeżeli te prędkości byłyby równe to w prętach klatki nie będą indukować się żadne prądy.

2.1.4 Poślizg, moment i prędkość

W czasie normalnej pracy silnika prędkość wirnika n jest niższa niż prędkość wirującego pola magnetycznego n_0 , a poślizg s jest różnicą pomiędzy prędkością wirującego pola magnetycznego i prędkością wirnika:

$$n_o = \frac{(60 * f)}{p} \quad [1/\text{min.}]$$

gdzie: p – liczba par biegunów

Bezwzględny poślizg silnika często wyrażany jest w procentach prędkości synchronicznej i zwykle zawiera się w przedziale 4 - 11 procent.

$$s = n_0 - n$$

$$s = \frac{n_o - n}{n_o} * 100 [\%]$$

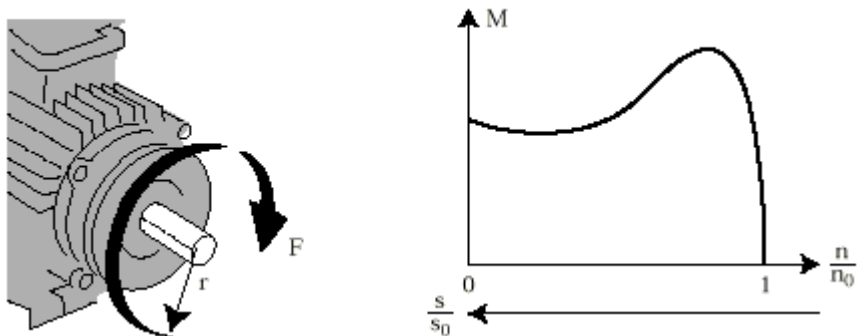
Indukcja magnetyczna B zależna jest od strumienia magnetycznego ϕ płynącego przez przekrój poprzeczny A uzwojeń klatki wirnika. Przekształcając wzór określający indukcję B można wyznaczyć siłę F .

$$F = \frac{\phi * I_w * l}{A}$$

$$F \sim \phi * I_w$$

Siła F jest proporcjonalna do strumienia magnetycznego ϕ i prądu wzbudzenia I_w płynącego w przewodzie.

W klatce wirnika, pod wpływem pola magnetycznego indukuje się SEM. Siła elektromotoryczna SEM powoduje przepływ prądu wzbudzenia I_w w klatce wirnika. Pod wpływem tego prądu w klatce wirnika powstają siły, które powodują pojawienie się momentu M na wale silnika.



Rys. 2.10 Charakterystyka momentu silnika asynchronicznego - siła x długość ramienia.

Na zależność między momentem i prędkością silnika duży wpływ ma budowa klatki wirnika. Moment na wale silnika jest wynikiem działania sił, które powodują ruch wału silnika.

Przykładowo: siła ta powstaje na kole zamachowym przymocowanym do wału. Moment ten jest zależny od siły F i promienia r koła zamachowego.

$$M = F * r$$

Praca wykonywana przez silnik jest wyrażana wzorem:

$$W = F * d$$

gdzie

d - odległość na jaką silnik przeniósł daną masę,
 n - liczba obrotów

$$d = n * 2 * \pi * r$$

Praca może być wyrażona również jako iloczyn mocy i czasu:

$$W = P * t$$

$$M = F * r = \frac{W}{d} * r = \frac{P * t * r}{n * 2\pi * r}$$

$$M = 9550 \frac{P}{n} \quad (t = 60 \text{ sek.})$$

Na podstawie powyższych wzorów można obliczyć moment.

Wyżej przedstawiony wzór przedstawia zależność między prędkością n [obr/min], momentem M [Nm] oraz mocą silnika P [kW]. Dzięki powyższym wzorom na n , M i P można przedstawić prędkość, moment i moc w jednostkach względnych n_r , M_r i P_r . Dzięki temu można opisać punkt pracy silnika w stosunku do jego danych znamionowych zgodnie z poniższymi wzorami:

$$M_r = \frac{P_r}{n_r}, \quad \text{gdzie} \quad P_r = M_r * n_r$$

$$M_r = \frac{M}{M_n}$$

$$P_r = \frac{P}{P_n}$$

$$n_r = \frac{n}{n_n}$$

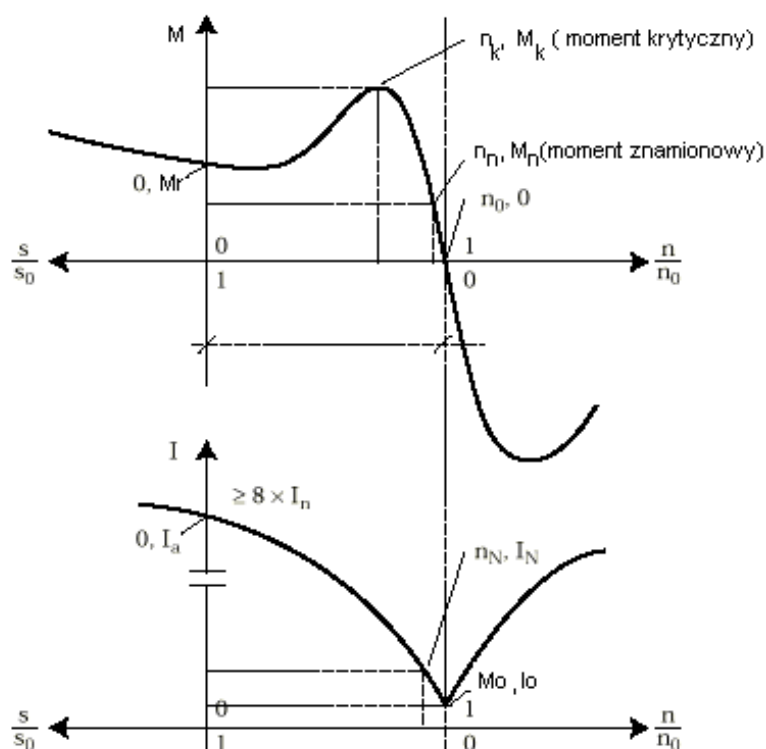
Przy obliczeniach w jednostkach względnych nie występuje stała wartość liczbowa 9550.

Przykład:

Obciążenie = 15% wartości znamionowej, prędkość = 50% wartości znamionowej. Moc = 7,5% mocy znamionowej, wtedy moc w jednostkach względnych można wyznaczyć jako:

$$P_r = 0,15 * 0,50 = 0,075.$$

W zakresie normalnej pracy silnika występują dwa zakresy hamowania.



Rys. 2.11 Charakterystyki przebiegu prądu i momentu silnika asynchronicznego.

W przedziale $n/n_0 > 1$, gdzie wał silnika obraca się z prędkością powyżej prędkości synchronicznej silnik działa jak generator – tworząc przeciwny moment hamujący i oddając w tym czasie energię do sieci zasilania.

W przedziale prędkości silnika $n/n_0 < 0$, nazywanym przedziałem hamowania regeneratywnego, można również oddawać energię do sieci zasilania. Jeżeli zamienimy dwie fazy silnika pole wirujące zmienia swój kierunek. W chwilę po tym, współczynnik prędkości n/n_0 będzie równy 1.

Silnik poprzednio obciążony z momentem M , teraz hamuje z momentem hamującym. Jeżeli silnik nie zostaje odłączony od zasilania przy $n = 0$, to będzie on dalej obracał się, ale w przeciwnym kierunku w związku ze zmianą kierunku wirowania pola magnetycznego.

Silnik pracuje w swoim normalnym stanie pracy jeśli: $0 < n/n_0 < 1$

Stan pracy silnika może być podzielony na dwie zakresy:

zakres rozruchu: $0 < n/n_0 < n_k/n_0$, i zakres pracy normalnej: $n_k/n_0 < n/n_0 < 1$

Są to najbardziej istotne zakresy prędkości podczas pracy silnika:

M_r - jest to moment rozruchowy silnika, moment ten powoduje duży wzrost poboru mocy silnika ponad wartości nominalne przy zadanych stałych wartościach napięcia i częstotliwości jego zasilania.

M_k - jest to moment krytyczny silnika, to największa wartość momentu jaką może generować silnik przy zadanych stałych wartościach napięcia i częstotliwości zasilania.

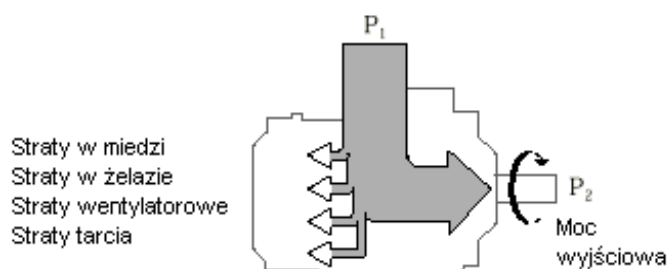
M_n - jest to moment znamionowy silnika, na który silnik został zaprojektowany ze względu na jego własności mechaniczne i elektryczne np. wg normy IEC 34. Może on być odczytany z tabliczki znamionowej. Dane znajdujące się na tabliczce znamionowej określają odpowiednie warunki obciążenia silnika przy bezpośrednim dołączeniu do sieci zasilania.

2.1.5 Sprawność i straty

Silnik pobiera energię elektryczną sieci zasilającej. Przy stałym obciążeniu, pobór mocy z sieci zasilającej jest większy niż oddawanie mocy mechanicznej na wale silnika, powoduje to powstawanie strat i obniżenie sprawności silnika. Zależność między mocą na wejściu i mocą na wyjściu jest nazywana sprawnością silnika η .

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad \text{gdzie: } P_2 - \text{moc wyjściowa, } P_1 - \text{moc wejściowa}$$

Typowa sprawność silnika zawiera między w przedziale 0,7 a 0,9 zależnie od mocy silnika i liczby biegunów.



Rys. 2.12 Rodzaje strat w silniku.

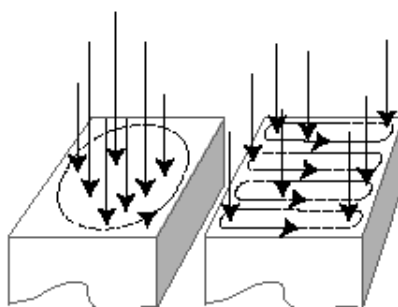
Wyróżniamy cztery główne rodzaje strat w silniku – straty w miedzi, straty w żelazie, straty wentylatorowe i straty tarcia:

- straty w miedzi są to straty w uzwojeniach stojana i wirnika,

- straty w żelazie spowodowane są pętlą histerezy i prądami wirowymi. Straty histerezowe występują podczas magnesowania rdzenia prądem przemiennym. Przy częstotliwości 50 Hz rdzeń jest magnesowany i rozmagnesowywany 100 razy na sekundę. Magnesowanie i rozmagnesowywanie wymaga zużycia pewnej ilości energii, która wzrasta wraz z częstotliwością napięcia zasilania i indukcją magnetyczną.

Straty od prądów wirowych powstają, ponieważ pole magnetyczne indukuje siły elektromotoryczne w rdzeniu i przewodach. Siły te powodują przepływ prądów wirowych wzdłuż linii sił pola magnetycznego powodując nagrzewanie się silnika.

Poprzez wykonanie rdzenia z cienkich blach straty od prądów wirowych można znacznie zmniejszyć.



Rys. 2.13 Ograniczenie wpływu prądów wirowych poprzez budowę rdzenia z cienkich połączonych ze sobą blach.

- Straty pochodzące od wentylatora spowodowane są oporem aerodynamicznym samego wentylatora.
- Straty tarcia pochodzą od łożysk wirnika.

Straty silnika są wyznaczone dla znamionowej wartości prądu silnika, pomiary strat w stanie zwarcia określają straty w miedzi, a przy pracy jałowej określają straty w żelazie.

2.1.6 Pole magnetyczne silnika

Silnik jest projektowany na odpowiednie napięcie i częstotliwość zasilania, więc magnesowanie silnika zależy od stosunku między napięciem i częstotliwością.

Jeżeli stosunek napięcie / częstotliwość wzrasta, to silnik jest przemagnesowany, jeżeli stosunek ten zmniejsza się, silnik jest niedomagnesowany. Pole magnetyczne w niedomagnesowanym silniku jest osłabione i moment, który silnik jest w stanie wytworzyć jest zmniejszany, może wtedy wystąpić sytuacja, że wirnik silnika nie będzie się obracał, lub czas rozruchu może być wydłużony, co doprowadzi do przeciążenia silnika.

Silnik przemagnesowany pracuje tak jakby był przeciążony. Moc zużyta na przemagnesowanie powoduje przegrzewanie się silnika i może uszkodzić izolację. Jednakże, trójfazowe silniki prądu przemiennego, a w szczególności silniki

asynchroniczne są bardzo odporne na przemagnesowywanie. Tylko proces długiego przemagnesowywania przy pracy ciągłej jest w stanie go zniszczyć.

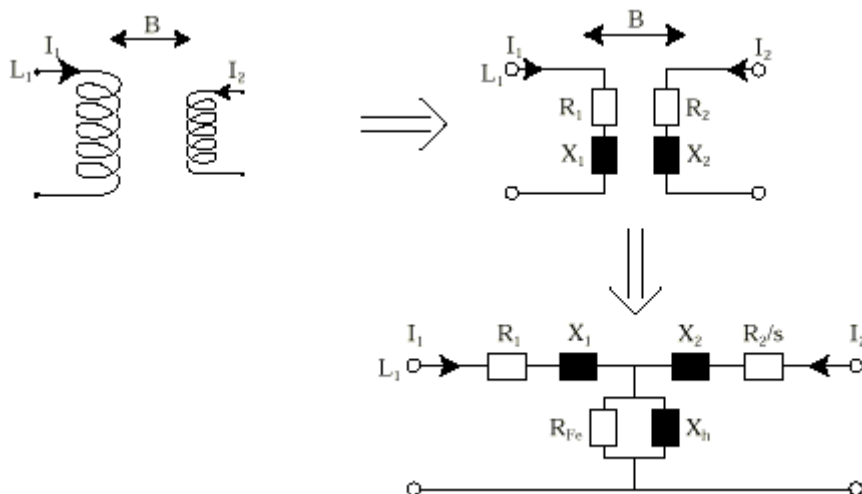
Sposobem na określenie nieprawidłowego namagnesowania silnika jest ocena jego pracy. Prędkość silnika wskazuje czy proces magnesowania silnika jest dobry. Jeżeli prędkość nie jest stała przy zmianach obciążenia, następują wahania prędkości lub szarpania, świadczyć to może o nieprawidłowym magnesowaniu silnika.

2.1.7 Elektryczny schemat zastępczy

Zasadniczo silniki asynchroniczne składają się z sześciu uzwojeń: trzy uzwojenia w stojanie i trzy uzwojenia w wirniku - zwarta klatka wirnika pod względem magnetycznym jest równoważna trzem uzwojeniom. Analizując układ uzwojeń możliwe jest sporządzenie elektrycznego schematu zastępczego, który ilustruje zasadę działania silnika.



Rys. 2.14 a) Rozkład uzwojeń wirnika i stojana.



Rys 2.14 b) Schemat zastępczy silnika jednofazowego sprowadzony do fazy L₁.

Uzwojenie stojana posiada nie tylko rezystancję, ale i reaktancję wyrażoną w omach [Ω]. Prąd płynący w uzwojeniu zależy od częstotliwości f napięcia zasilania:

$$X_L = 2 * \pi * f * L$$

gdzie:

f - częstotliwość zależna od prędkości kątowej ω [Hz].

L - indukcyjność uzwojenia wyrażona w [H].

Uzwojenia stojana i wirnika są sprzężone magnetycznie. Uzwojenie wirnika generuje prąd w stojanie i odwrotnie, rys. 2.14b. Ten wzajemny wpływ oznacza, że dwa elektryczne obwody mogą być połączone za pomocą jednego wspólnego. Obwód wspólny składa się z rezystancji wzajemnej R_{Fe} i reaktancji wzajemnej X_h , przez który przepływa prąd magnesowania stojana i wirnika. Napięcie występujące na rezystancji R_{Fe} i reaktancji X_h nazywane jest napięciem magnesowania.

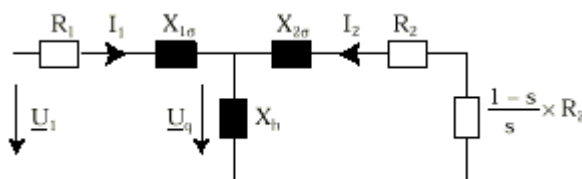
2.1.7.1 Warunki pracy silnika

Do tej pory rozważaliśmy przypadek, gdzie silnik pracował bez obciążenia. Kiedy silnik pracuje w zakresie jego normalnej pracy, częstotliwość wirowania wirnika jest niższa niż częstotliwość pola wirującego i X_2 jest zmniejszony przez poślizg s .

W elektrycznym schemacie zastępczym, efekt ten jest opisany przez zmianę rezystancji wirnika R_2 przez współczynnik $1/s$.

R_2/s możemy zapisać jako: $R_2 + (R_2 \cdot (1-s)/s)$ gdzie: $R_2 \cdot (1-s)/s$ - jest mechanicznym obciążeniem silnika.

Wartości R_2 i X_2 odnoszą się do wirnika. R_2 jest przyczyną strat cieplnych silnika przy obciążeniu.



Rys. 2.15 Schemat zastępczy silnika pod obciążeniem.

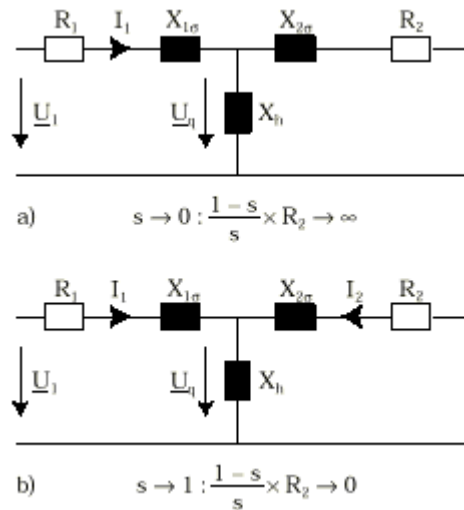
Poślizg jest bliski zero, gdy silnik pracuje bez obciążenia.

To oznacza, że zmniejsza się $R_2 \cdot (1-s)/s$.

W wyniku tego w obwodzie wirnika praktycznie nie popłynie żaden prąd. W idealnym przypadku jest to sytuacja, gdy rezystancja R_2 (przedstawiająca obciążenie mechaniczne) jest równa zero.

Kiedy silnik jest obciążony poślizg zwiększa się zmniejszając $R_2 \cdot (1-s)/s$.

Wraz ze wzrostem obciążenia prąd I_2 w wirniku też wzrasta.



Rys. 2.16 a) Schemat zastępczy biegu jałowego b) Schemat zastępczy stanu zwarcia.

Przy pomocy przedstawionego elektrycznego schematu zastępczego można analizować pracę silnika w różnych warunkach w większości przypadków.

Istnieje tutaj niebezpieczeństwo, że napięcie samoindukcji (\underline{U}_q) może osiągnąć wartość napięcia zasilania. Wynika to stąd, że zastosowano schemat uproszczony dla łatwiejszej analizy pracy silnika w różnych warunkach. Jednakże sytuacja taka ma miejsce tylko w przypadku, gdy silnik jest nieobciążony.

Jeżeli wzrasta obciążenie to wzrasta prąd I_2 , a stąd i prąd I_1 – w wyniku tego zwiększony spadek napięcia musi być uwzględniany. Jest to szczególnie ważne wtedy, gdy silnik jest zasilany przez przemiennik częstotliwości.

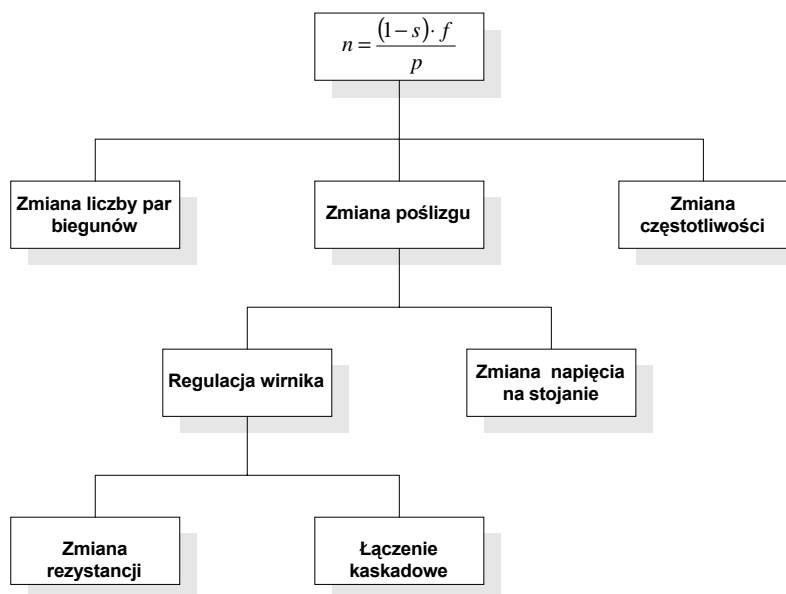
2.1.8 Sposoby regulacji prędkości

Prędkość n silnika jest zależna od prędkości wirowania pola magnetycznego maszyny i może być wyrażona jako:

$$n \left[\frac{1}{s} \right] = \frac{(1-s) \cdot f}{p} \quad \text{lub} \quad n \left[\frac{1}{\min} \right] = 60 \frac{f}{p} \cdot (1-s) \quad \text{gdzie} \quad s = \frac{n_0 - n}{n_0}$$

Prędkość silnika może być zatem zmieniona przez:

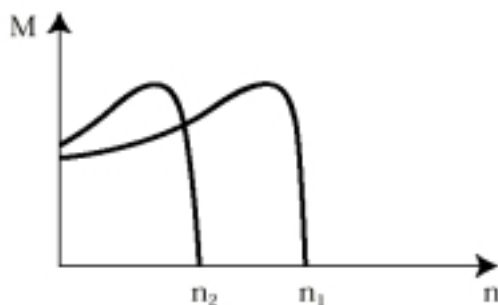
- zmianę liczby par biegunów,
- zmianę poślizgu,
- zmianę częstotliwości napięcia zasilania.



Rys. 2.17 Przedstawienie możliwości zmian regulowania prędkości silnika asynchronicznego.

2.1.8.1 Regulacja prędkości przez zmianę liczby par biegunów

Szybkość rotacji pola jest określona przez liczbę par biegunów w stojanie. W przypadku dwubiegunowego silnika, szybkość obracającego się pola wynosi 3,000 rpm dla częstotliwości 50Hz w sieci zasilania.



Rys. 2.18 Charakterystyki mechaniczne silnika w odniesieniu do zmiany liczby par biegunów.

Przy częstotliwości 50Hz, szybkość obracającego się pola w czterobiegunowym silniku wynosi 1,500 rpm.

Silniki mogą być budowane dla dwu różnych liczb par biegunów - silniki dwubiegunowe. Spowodowane jest to specjalnym rozmieszczeniem uzwojenia stojana w żłobkach w formie uzwojenia Dahlander'a bądź jako dwóch oddzielnych uzwojeń. W silniku wielobiegunowym występują połączenia różnych typów uzwojeń.

Szybkość jest zmieniana przez przełączanie uzwojeń statora, zmienia się wtedy liczba par biegunów w stojanie. Na skutek przełączania z małej liczby par biegunów - praca przy dużej prędkości obrotowej wału silnika, do większej liczby par biegunów, faktyczna szybkość silnika jest drastycznie zmniejszana, np. od 1,500 do 750 rpm. Na skutek szybkiego przełączania par biegunów, silnik przechodząc

przez zakres pracy generatorowej może być znacznie przeciążony, gdyż energia hamowania jest zależna od rodzaju obciążenia dołączonego wału silnika. Na udary narażone są także mechanizmy sprzęgające silnik z obciążeniem.

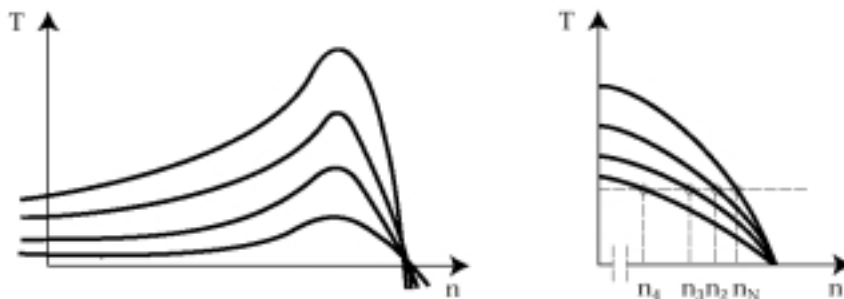
2.1.8.2 Sterowanie poślizgiem silnika

Prędkość silnika może być sterowana przez poślizg na dwa różne sposoby:

- przez zmianę napięcia dostarczanego do stojana,
- przez ingerowanie w pracę wirnika.

⇒ **Zmiana napięcia stojana**

Prędkość silnika asynchronicznego może być kontrolowana przez dostosowanie napięcia wejściowego silnika bez zmiany częstotliwości (na przykład używając softstarter'a). Jest to możliwe, ponieważ moment obrotowy silnika zmienia proporcjonalnie do kwadratu napięcia.



Rys. 2.19 Charakterystyki mechaniczne silnika przy zmianie napięcia na stojanie.

Wskazywane na charakterystyce mechanicznej, stałe punkty pracy mogą być otrzymywane w zakresie pracy normalnej ($n_k < n < n_0$). Stałe punkty pracy silnika z pierścieniami ślizgowymi mogą być otrzymywane w zakresie pracy rozruchowej ($0 < n < n_k$) przez wstawienie oporników w uzwojenia wirnika.

⇒ **Regulacja wirnika**

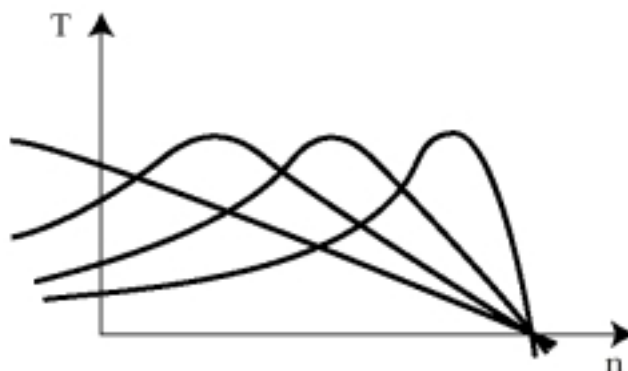
Istnieją dwa możliwe sposoby oddziaływania na wirnik. Poprzez dodawanie rezystancji do obwodu wirnika lub dołączanie obwodu wirnika do innych maszyn elektrycznych, albo do obwodu prostownika połączonego kaskadowo.

Silniki pierścieniowe mogą być tak regulowane, ponieważ mają konstrukcję umożliwiającą dostęp do uzwojeń wirnika na pierścieniach ślizgowych.

⇒ **Zmiana rezystancji wirnika**

Prędkość silnika może być regulowana przez dołączenie oporników do pierścieni ślizgowych i kosztem powiększenia strat mocy w wirniku. Prowadzi do przyrostu wartości poślizgu i zmniejszenia prędkości silnika. Jeżeli rezystory dołączone są do obwodu wirnika, zmienia się charakterystyka mechaniczna. Jak pokazano na rys. 2.20, zwiększenie rezystancji spowoduje zmniejszenie prędkości obrotowej wirnika przy zachowaniu stałego momentu obrotowego. Poprzez zmianę

rezystancji uzyskujemy zmianę prędkości przy tym samym obciążeniu. Tak wstępnie określona prędkość jest zależna od obciążenia. Jeżeli zmniejszamy obciążenie silnika, prędkość wzrasta prawie do prędkości synchronicznej.

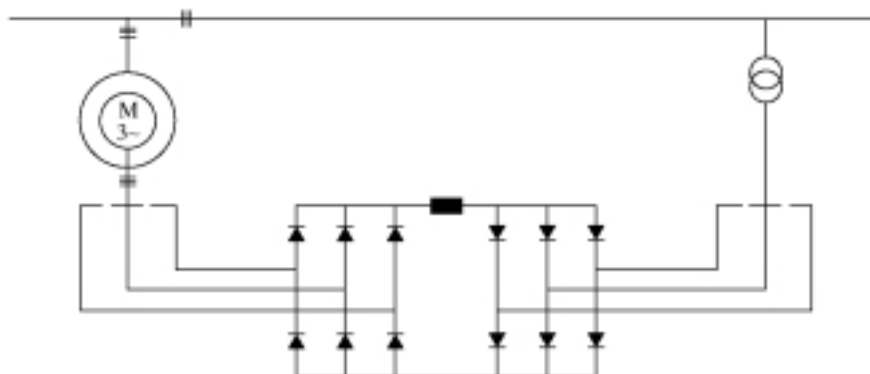


Rys. 2.20 Charakterystyki mechaniczne silnika przy zmianie rezystancji wirnika.

Rezystancja zależna jest od temperatury i dlatego ważne jest, aby temperatura podczas pracy była stała.

⇒ Łączenie kaskadowe

Zamiast oporników, obwód wirnika może być połączony przez pierścienie ślizgowe do obwodów napięciowych maszyny lub wejściowych obwodów prostownika. Obwód napięciowy maszyny dostarcza obwodowi wirnikowemu silnika dodatkowe odpowiednie napięcie, umożliwiając wpływ na prędkość i magnetyzm wirnika. Technika ta jest używana głównie w elektrycznych systemach kolejowych. Wejścia mocy prostownika mogą być używane zamiast obwodów napięciowych maszyny, w tym przypadku obszar aplikacji jest zredukowany do systemów z pompami, wentylatorami, itp.



Rys. 2.21 Przykładowa typowa realizacja połączenia kaskadowego.

2.1.8.3 Regulacja prędkości przez zmianę częstotliwości napięcia zasilania

Przy zmianie częstotliwości możliwe jest kontrolowanie prędkości silnika bez dodatkowych strat. Prędkość obrotowa pola magnetycznego zmienia się wraz ze zmianą częstotliwości.

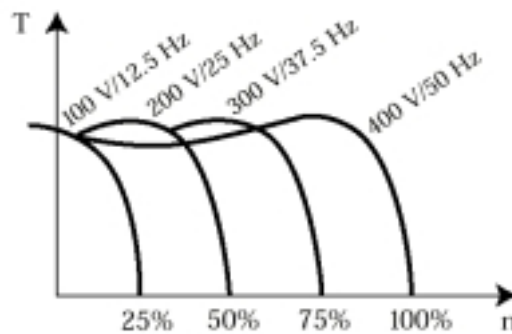
Prędkość silnika zmienia się proporcjonalnie do prędkości rotacji pola magnetycznego. Aby utrzymać moment obrotowy silnika, napięcie silnika musi być zmieniane wraz z częstotliwością.

Przy znanym obciążeniu można wyznaczyć moment i pomijając poślizg silnika otrzymujemy:

$$M = \frac{P \cdot 9550}{n} \approx \frac{\eta \cdot \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi \cdot 9550}{f \cdot \frac{60}{p}} = k \cdot \frac{U}{f} \cdot I$$

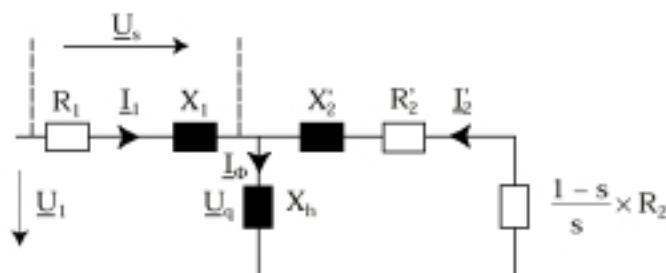
$$M \approx \frac{U}{f} \cdot I$$

Dla danego obciążenia, słuszna jest następująca zależność: dla stałego stosunku między napięciem podawanym na silnik a częstotliwością, namagnesowanie w założonym zakresie prędkości silnika jest także stałe.



Rys. 2.22 Charakterystyki mechaniczne przy regulacji prędkości przez proporcjonalną zmianę napięcia i częstotliwości zasilania.

Namagnesowanie nie jest idealne w dwóch przypadkach: w początkowej fazie rozruchu silnika oraz przy bardzo niskich częstotliwościach pracy silnika, gdzie wymagane jest dodatkowe magnesowanie. Także, gdy silnik w tym zakresie pracuje ze zmiennym obciążeniem, powinno być możliwe namagnesowanie odpowiadające obciążeniu, rys. 2.23.



Rys. 2.23 Schemat zastępczy silnika dla pracy przy małych prędkościach wirnika.

⇒ **Dodatkowe namagnesowanie w początkowej fazie rozruchu**

Ważne jest kontrolowanie spadku napięcia \underline{U}_s w związku z indukowanym napięciem \underline{U}_q .

$$\begin{aligned} \text{Napięcie wejściowe:} \quad & \underline{U}_1 = \underline{U}_s + \underline{U}_q = \underline{U}_{R1} + \underline{U}_{X1} + \underline{U}_q \\ \text{Reaktancja stojana :} \quad & X_1 = 2 * \pi * f * L \end{aligned}$$

Silnik został zaprojektowany dla swoich wartości nominalnych. Na przykład: napięcie magnesujące \underline{U}_q , może wynosić 370 V dla silnika, przy $U_1=400V$ i $f=50Hz$. Wówczas silnik ma optymalne namagnesowanie.

Współczynnik określający stosunek napięcia do częstotliwości wynosi:

$$\frac{400}{50} = 8 \frac{[V]}{[Hz]}$$

Jeżeli częstotliwość jest zmniejszona do 2.5Hz, napięcie będzie wynosić 20V. Z powodu obniżania częstotliwości reaktancja stojana X_1 również maleje. Ten spadek napięcia zależy jedynie od rezystancji R_1 i nie ma żadnego wpływu na ogólny spadek napięcia w stojanie. Napięcie na rezystancji R_1 odpowiada w przybliżeniu wartości około 20 V dla nominalnych warunków zasilania silnika, wobec czego prąd silnika zależy od obciążenia. Cała wartość napięcia wejściowego \underline{U}_1 odkłada się teraz tylko na rezystancji stojana R_1 , powodując brak tego napięcia na namagnesowanie silnika.

Przy niskich częstotliwościach, kiedy stosunek napięcia do częstotliwości pozostaje stały w pełnym zakresie, brak jest napięcia dla namagnesowania silnika i silnik nie jest w stanie wytworzyć momentu obrotowego. W konsekwencji ważne jest, aby zwiększyć odpowiednio napięcie \underline{U}_1 podczas startu silnika i przy niskich częstotliwościach pracy.

⇒ **Zależność namagnesowania od obciążenia**

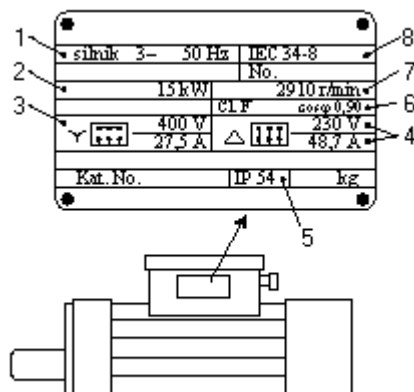
Po dostosowaniu silnika do dodatkowego namagnesowania przy niskich częstotliwościach i podczas początkowej fazy rozruchu, wystąpi przemagnesowanie w czasie pracy z małym obciążeniem. W tej sytuacji, prąd stojana I_1 będzie opadać a wzrośnie indukowane napięcie U_q .

Silnik zwiększy pobór prądu reaktywnego, co spowoduje jego nadmierne nagrzewanie. Magnetyzacja silnika zależy więc od napięcia, które powinno zmieniać się automatycznie w zależności od obciążenia.

Dla optymalnego namagnesowania silnika częstotliwość i zmienne obciążenie musi być uwzględniane przy sterowaniu częstotliwościowym silnika.

2.2 Dane tabliczki znamionowej silnika

Wszystkie silniki posiadają trwale zamocowaną tabliczkę znamionową z wykazem wszystkich istotnych danych. Pozostałe dane zwykle są dostępne w katalogu silnika.



Rys. 2.24 Tabliczka znamionowa silnika.

Przykład

Tabliczka znamionowa dla dwubiegunowego silnika 15 kW może mieć następujące dane:

1. Silnik trójfazowy dla sieci zasilania o częstotliwości 50 Hz.
2. Moc silnika wynosi 15 kW, tj. silnik jest zdolny przekazywać na wał, co najmniej 15 kW, jeżeli podłączony jest do wskazanej sieci zasilania. Zostały stworzone standardowe typoszeregi silników asynchronicznych ze względu na wartość mocy wyjściowej. Pozwala to użytkownikowi na odpowiedni dobór silnika kierując się jego przeznaczeniem. W typoszeregu występują moce silników jak w tabeli 2.02.

Tabela. 2.02 Typoszereg silników.

kW	0,06	0,09	0,12	0,18	0,25	0,37	0,55	0,75	1,10	1,50	2,20	3,00
kW	4,00	5,50	7,50	11,0	15,0	18,5	22,0	30,0	37,0	45,0	55,0	75,0

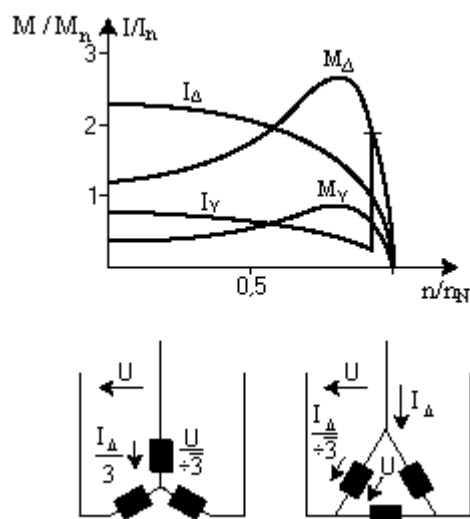
Obecnie zwykle używaną jednostką dla określenia mocy silnika jest wat [W], który jest zamienny z koniem mechanicznym [HP] i przelicza się go następująco: 1 KM=0,736 kW.

- 3-4. Uzwojenie musi być połączone w "trójkąt" lub "gwiazdę".

Jeśli napięcie zasilania wynosi 400V to uzwojenia silnika muszą być połączone w "gwiazdę". Prąd fazowy silnika wynosi wtedy 27.5A. Jeżeli

napięcie sieci zasilania wynosi 230V, uzwojenie musi być połączone w "trójkąt". Prąd fazowy wynosi wtedy 48.7A.

W początkowej fazie rozruchu silnika, kiedy prąd jest od 4 do 10 razy większy od prądu normalnego, sieć zasilania może być przeciążona. Spowodowało to wydanie przez zakłady energetyczne rozporządzeń zalecających obniżenie wartości prądu podczas rozruchu dużych silników. Może być to dokonywane na przykład, przez połączenie uzwojeń silnika podczas rozruchu w gwiazdę, a później przełączenie w trójkąt.



Rys. 2.25 Prąd i moment obrotowy silnika w połączeniu w gwiazdę - Υ i trójkąt - Δ .

Moment obrotowy silnika, którego uzwojenie połączone jest w gwiazdę, zmniejsza moc i moment obrotowy do 1/3, dlatego silnik nie może startować z pełnym obciążeniem.

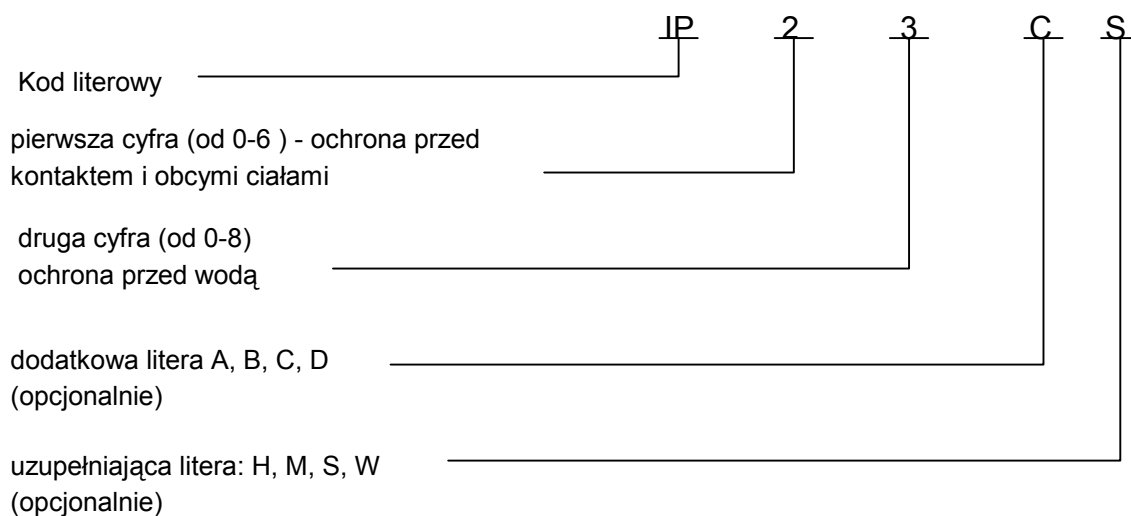
Silnik zaprojektowany do pracy w połączeniu uzwojeń w gwiazdę zostanie przeciążony, jeśli nie posiada wyłącznika do połączenia w uzwojeń gwiazdę dla pracy z pełnym obciążeniem.

5. Rodzaj ochrony, jaką spełnia silnik wskazuje stopień ochrony przez obudowę zabezpieczającej przed przenikaniem do wnętrza silnika płynów i obcych ciał.

Rys. 2.26 zawiera opisy stosowanych stopni ochrony obudów silników według międzynarodowego standardu IEC - Publikacja 34-5.

Zastosowanie ochrony i jej rodzaj są wskazywane przez dwie litery IP (International Protection) i dwie cyfry.

Cyfry są używane, aby wyszczególnić poziom ochrony silnika przed kontaktem dotykowym i obcymi ciałami (pierwsza cyfra), oraz przed płynami (druga cyfra). Jeżeli wymagane są dodatkowe litery, mogą być one dodane. Podstawowy układ kodu IP wygląda następująco:



Rys. 2.26 Opisy używane w międzynarodowym standardzie IEC dla oznaczenia stopnia ochrony obudowy silników.

Ważne, aby zapamiętać, że:

- -Jeżeli cyfra nie może być określona, to może być zastąpiona przez literę "X".
- -Dodatkowo *i/lub* łączące litery mogą być opuszczone bez zastępowania innym znakiem.
- -Jeżeli wymagana jest więcej niż jedna uzupełniająca litera, zachowana musi być kolejność alfabetyczna.

Tabela. 2.03 Wykaz ochrony silników według normy IEC 34-5.

Cyfra	Pierwsza cyfra		Druga cyfra
	Ochrona kontaktu	Ochrona przed obcymi ciałami	Ochrona przed zawilgoceniem
0	Bez ochrony	Bez ochrony	Bez ochrony
1	Ochrona przed bezpośrednim kontaktem dłońmi, także ich odwrotną stroną	Ochrona przed ciałami stałymi o średnicy większej niż 50mm	Ochrona przed pionowo opadającą wodą
2	Ochrona przed kontaktem z palcami dłoni.	Ochrona przed ciałami stałymi o średnicy większej niż 12,5mm	Ochrona przed opadającą wodą pod kątem 15°
3	Ochrona przed kontaktem z narzędziami	Ochrona przed ciałami stałymi o średnicy większej niż 2,5mm	Ochrona przed opadającą wodą pod kątem 60°
4	Ochrona przed kontaktem z przewodem	Ochrona przed ciałami stałymi o średnicy większej niż 1,0mm	Ochrona przed opadającą wodą we wszystkich kierunków
5	Ochrona przed kontaktem z przewodem	Ochrona przed pyłem, kurzem	Ochrona przed wodą opadającą strumieniem
6	Ochrona przed kontaktem z przewodem	Ochrona przed pyłem, kurzem	Ochrona przed wodą padającą strumieniem pod ciśnieniem
7	-----	-----	Ochrona przed krótkotrwałym zanurzeniem w wodzie
8	-----	-----	Ochrona przed długotrwałym zanurzeniem w wodzie

Dodatkowe oznaczenia literowe wskazują, w jaki sposób ludzie są zabezpieczeni w miejscach niebezpiecznych:

- Uwaga na odwrotną część dłoni litera A
- Uwaga na palce litera B
- Uwaga na narzędzia litera C
- Uwaga na przewód litera D

Oznaczenia się wzajemnie uzupełniają i dostarczają informacji o zagrożeniach w szczególności:

- Wysokie napięcie litera H
- Próba wodna podczas pracy litera M
- Próba wodna podczas postoju litera S
- Warunki pogodowe litera W

W przypadku, gdy w maszynie jest zapewniona ochrona przeciw zanieczyszczeniom zewnętrznym takim jak np.: pył lub kurz, umieszcza się w oznaczeniu pierwszą cyfrę 5. Ochrona taka nie zapewnia całkowitego odizolowania - jest szczelna dla określonych rozmiarów zanieczyszczeń stałych, lecz w znacznym stopniu ogranicza wpływ zanieczyszczeń zewnętrznych na bezpieczną i długotrwałą pracę tejże maszyny elektrycznej.

Cyfrą 6 oznacza się wykonanie ochronne przeciw wodzie i spełnia wymagania wszystkich innych niższych oznaczeń. W systemie oznaczeń symbol IP X7 określa jako dopuszczane chwilowe zanurzenie, IP X8 oznacza jako dopuszczane ciągłe zanurzenie. Powyższe wymagania ochrony przed wodą uwzględniają wymagania dotyczące ochrony przeciw wodzie opadającej także strumieniami IPX5 czy silnymi strumieniami wody IPX6. Jeśli dwa rodzaje zagrożeń mogą wystąpić jednocześnie urządzenie musi mieć podwójne oznaczenie, np. IPX5/IPX7

Przykład: IP 65 mówi, iż silnik jest bezpieczny ze względu na dotyk i ma ochronę przed zanieczyszczeniami zewnętrznymi oraz silnym strumieniem padającej wody.

6. Prąd I_s , który jest pobierany przez silnik, nazywany prądem pozornym dzieli się na dwie składowe: czynną I_w i bierną I_b . $\cos\phi$ ilustruje procentowy udział prądu czynnego w prądzie zasilającym silnik w warunkach nominalnych. Składowa czynna prądu zasilania silnika odpowiada za moc czynną na wale silnika a składowa bierna prądu zasilającego jest potrzebna do wymuszenia pola magnetycznego w silniku. Gdy pole magnetyczne jest okresowo usuwane moc magnesowania jest oddawana do sieci zasilania.

Określenie "bierny" oznacza, że ten prąd jest przesyłany do i z przewodów bez wpływu na wartość mocy czynnej na wale silnika.

Prąd pozorny pobierany z sieci zasilania, jego składowa czynna i bierna nie sumują się wprost arytmetycznie silniku, gdyż są przesunięte w czasie względem siebie Wielkość przesunięcia między składowymi prądu zależy

od częstotliwości napięcia zasilania. Dla częstotliwości 50Hz przesunięcie wynosi 5ms, a ich suma geometryczna wynosi:

$$I_S = \sqrt{I_W^2 + I_B^2}$$

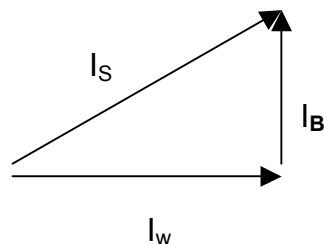
Prąd silnika I_S i jego składowe I_W i I_B mogą być przedstawione jako ramiona trójkąta prostokątnego, w którym długość przeciwprostokątnej jest pierwiastkiem kwadratowym sumy kwadratów długości przyprostokątnych - składowych I_W i I_B (wg geometrii Pitagorasa).

φ to kąt pomiędzy prądem I_S i jego czynną składową I_W . $\cos \varphi$ jest współczynnikiem określającym zależność pomiędzy wielkościami tych prądów:

$$\cos \varphi = \frac{I_W}{I_S}$$

$\cos \varphi$ może również przedstawiać stosunek pomiędzy mocą czynną i pozorną:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}$$

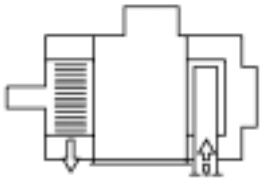
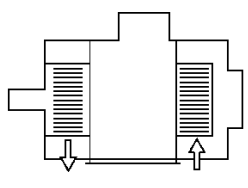
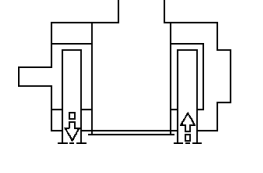
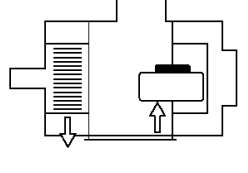


Rys. 2.27 Związek pomiędzy prądem czynnym, biernym i pozornym.

Wyrażenie "moc pozorna" oznacza, że tylko część tej mocy jest wykorzystywana do wytworzenia mocy czynnej na wale silnika. W tym przypadku wartość mocy czynnej determinuje składowa I_W prądu pozornego.

Silniki elektryczne projektowane są na różne typy chłodzenia. Przykładowe metody chłodzenia zgodne z międzynarodowymi normami IEC - Publikacja 34-6, podane są w tabeli nr.2.03


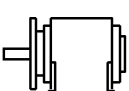



Tabela. 2.04 Sposoby chłodzenia silników zgodne z normą IEC 34-6.

<p>IC01 Wentylacja własna, wewnątrz silnika jest chłodzone bezpośrednio przepływającym przez jego wnętrze powietrzem otoczenia zewnętrznego</p>		<p>IC17 Chłodzenie zewnętrzne Silnik z wbudowanym wentylatorem dochłodzenia powietrzem</p>	
<p>IC06 Chłodzenie zewnętrzne silnik chłodzony zewnętrznym obcym strumieniem powietrza</p>		<p>IC37 Chłodzenie zewnętrzne silnik do oddzielnego chłodzenia i oddzielnym wlotem i wylotem powietrza</p>	

Wybór silnika musi uwzględniać rodzaj aplikacji, a także warunki wykonania instalacji.

Międzynarodowe normy IEC 34-7 podają również typy mocowań silników, które oznacza się dwoma literami IM (ang. International Mounting) i czterema cyframi. Przykładowe formy mocowań podane są w tabeli nr 2.05.

Tabela. 2.05 Typy mocowań silników wg. IEC 34-7.

Sposób mocowania				objaśnienia			
rys.	skrót zgodny z normą			pokrywy (dekle)	mocowanie stojana	Ogólnie mocowanie	mocowanie silnika
	DIN42	DIN IEC 34 -7					
		Kod 1	Kod 2				
	B 3	IM B3	IM 1001	2 pokrywy	na łapach	-----	Do korpusu
	B 3/B5	IM B 35	IM2001	2 pokrywy	na łapach	nasadowe	Do korpusu na dodatkowych uchwytach
	B3/B14	IM B 34	IM 2101	2 pokrywy	na łapach	nasadowe	Do korpusu na dodatkowych uchwytach
	B5	IM B 5	IM 3001	2 pokrywy	kołnierzowe	nasadowe	Na stanowisku luźno, oraz do dekla
	B6	IM B 6	IM 1051	2 pokrywy	na łapach	jak w B3, obrócone o kąt 90°	Mocowanie do ściany, widok od strony czołowej

Tabliczka znamionowa zawiera tylko podstawowe parametry elektryczne silnika. Inne wielkości charakteryzujące silnik można wyliczyć korzystając ze wzorów np.: moment znamionowy.

$$M = \frac{P \cdot 9550}{n} = \frac{15 \cdot 9550}{2910} = 49 Nm$$

Sprawność silnika η można określić jako iloraz pomiędzy mocą na wale a mocą elektryczną pobieraną przez silnik z sieci zasilania i oblicza się ze wzoru:

$$\eta = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi} = \frac{15000}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 29 \cdot 0,9} = 0,87$$

Poślizg silnika s można określić na podstawie danych z tabliczki znamionowej, która podaje nominalną prędkość i częstotliwość napięcia zasilania. Te dwie wielkości wskazują na dwa bieguny silnika, jeśli silnik osiąga prędkość synchroniczną 3000 obr/min. A więc poślizg silnika n_s wynosi:

$$n_s = n_o - n_n = 3000 - 2910 = 90 \text{ obr/min}$$

Poślizg normalnie podawany jest w procentach i wynosi

$$s = \frac{n_s}{n_o} = \frac{90}{3000} = 0,03 = 3\%$$

W katalogach można znaleźć wiele danych charakteryzujących silnik, tabela 2.05.

Moc silnika, prędkość wirnika, $\cos \varphi$, prąd silnika, częstotliwość są zamieszczone na tabliczce znamionowej i tworzą podstawową informację o silniku. Sprawność i moment można wyznaczyć bazując na danych z tabliczki znamionowej.

Ponadto katalogi podają, że prąd rozruchowy I_a silnika o mocy 15kW, jest 6,2 razy większy od prądu znamionowego silnika I_N .

$$I_a = 29 \cdot 6,2 = 180 A$$

Moment rozruchowy M_a jest określony jako 1,8 większy od momentu znamionowego i wynosi

$$M_a = 1,8 \cdot 49 = 88 Nm$$

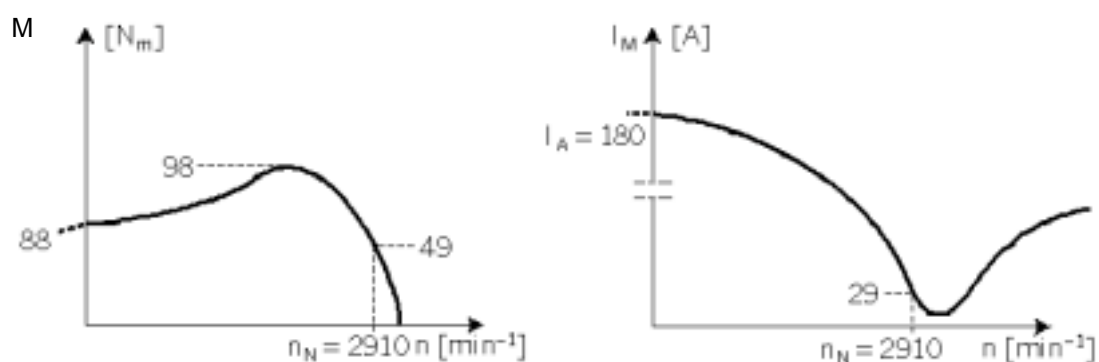
Ten moment rozruchowy wymaga prądu o wartości 180A, co należy uwzględnić przy projektowaniu sieci zasilania. Moment krytyczny silnika M_k jest dwukrotnie większy od momentu znamionowego.

$$M_k = 2 \cdot 49 = 98 Nm$$

Tabela. 2.06 Fragment katalogu zawierającego dane o silniku.

typ	Moc	Prędkość		$\cos \varphi$	Prąd 380V	$\frac{I_a}{I}$	M	$\frac{M_a}{M}$	$\frac{M_{max}}{M}$		
	[kW]	[min ⁻¹]		-----	[A]		[Nm]			[kgm ²]	[kg]
160 MA	11	2900	86	0,87	25	6,2	36	2,3	2,6	0,055	76
160	15	2910	88	0,90	29	6,2	49	1,8	2,0	0,055	85

M											
160	18,5	2930	88	0,90	33	6,2	60	2,8	3,0	0,056	96
L											



Rys. 2.28 Charakterystyki mechaniczne silnika asynchronicznego.

W końcu moment bezwładności i waga silnika są określone na tabliczce znamionowej. Moment bezwładności jest wykorzystywany do określenia momentu przyspieszenia. Waga silnika jest istotną daną dla celów transportowych, instalacyjnych i montażowych.

Część producentów silników nie publikuje wartości momentu bezwładności i podaje w miejsce tego parametru moment zamachowy WR^2 . Jednak tę wielkość można przekształcić wg wzoru:

$$J = \frac{WR^2}{4 \cdot g}$$

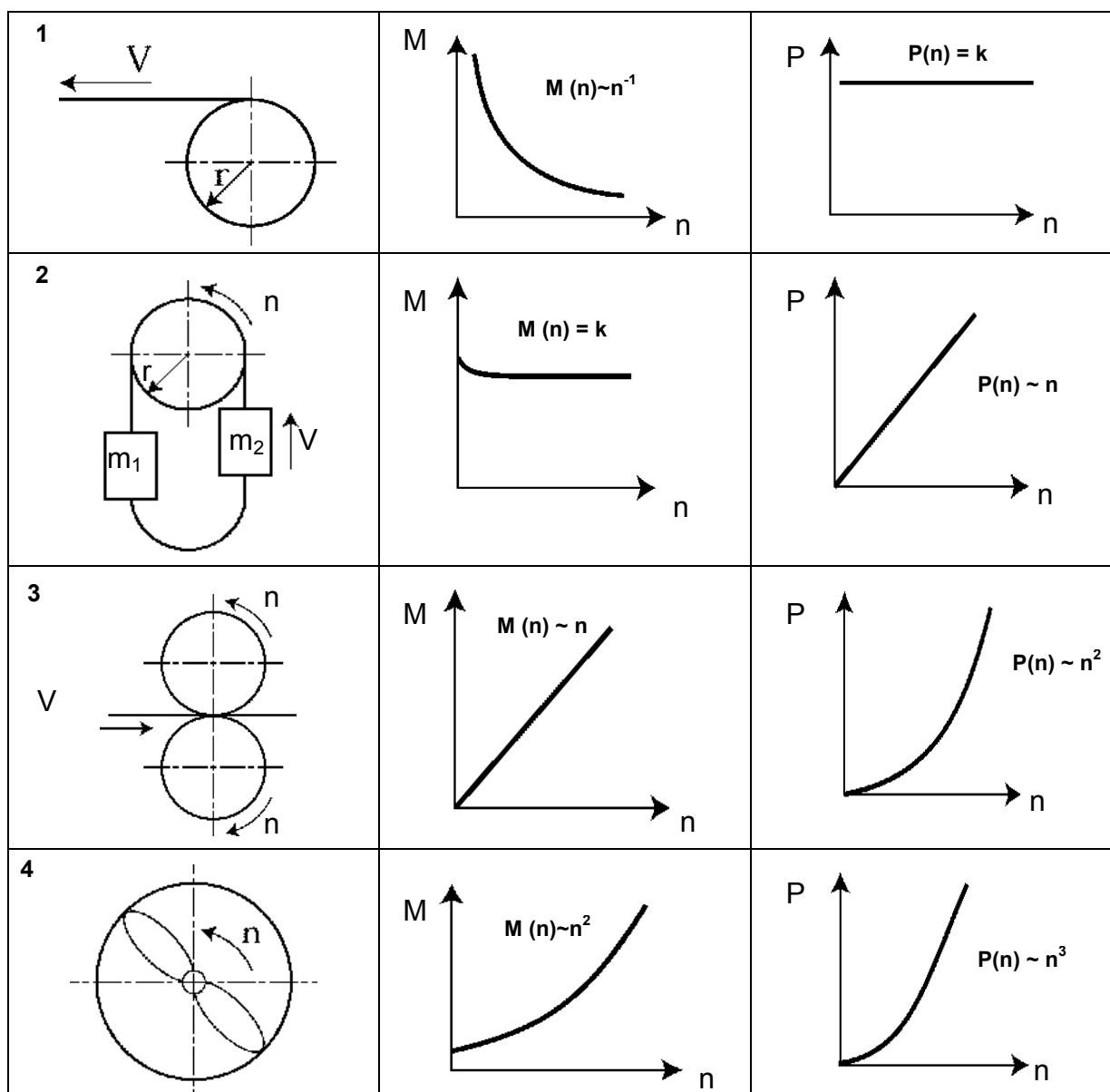
gdzie:

- J - moment bezwładności [kgm²]
- g - przyspieszenie ziemskie [m/s²]
- WR² - moment zamachowy [Nm²]

2.3 Typowe obciążenia silników

Jeśli moment na wale silnika jest równy momentowi obciążenia silnik pracuje z stabilnie ze stałą prędkością obrotową.

Charakterystyki robocze dla silników i maszyn są przedstawiane jako zależność między prędkością i momentem wyjściowym. Charakterystyki momentu silnika były już omawiane. Natomiast charakterystyki momentów maszyn przedstawione na rys. 2.29 można podzielić się na cztery zasadnicze grupy.



Rys. 2.29 Typowe charakterystyki obciążeń maszyn roboczych.

Do grup tych należą odpowiednio maszyny:

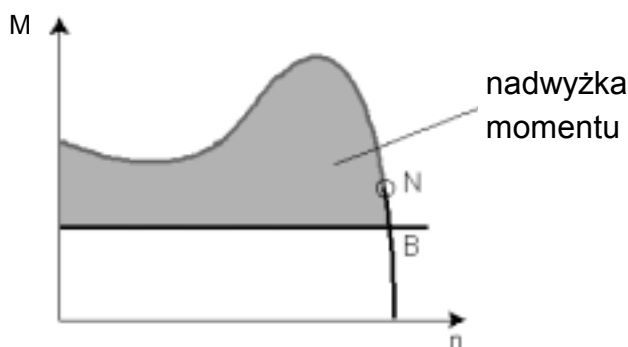
- do grupy 1 zalicza się różnego rodzaju maszyny nawijające i naciągające,

- do grupy 2 należą np.: przenośniki taśmowe, suwnice, wyciągarki, pompy o niewielkiej wydajności, jak i obrabiarki narzędzi,
- grupa 3 składa się z maszyn takich jak walcarki, obrabiarki automatyczne,
- grupa 4 składa się z maszyn wykorzystujących siłę odśrodkową np: wirówki, pompy wirowe - odśrodkowe, wentylatory.

Silnik elektryczny pracuje w ustalonym punkcie pracy gdy moment silnika i maszyny roboczej są identyczne. Charakterystyki momentów się przecinają w punkcie B, rys. 2.30.

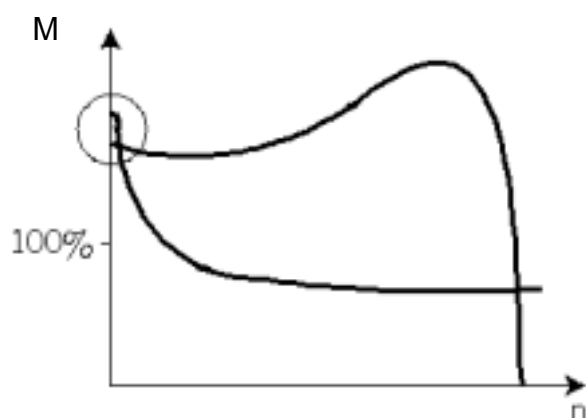
Gdy silnik jest dobierany do obciążenia danej maszyny roboczej należy dobierać ten silnik tak, aby jego moment nominalny, punkt N był możliwie najbliższy punktowi B.

Nadwyżka momentu jest wykorzystywana jedynie do rozruchu silnika dla zapewnienia odpowiedniego przyśpieszenia - praca powyżej punktu N. Nadmierne przyśpieszanie silnika może być często niekorzystne dla maszyny roboczej. W zakresie powyżej momentu znamionowego silnika, jego praca jest niestabilna i może on ulec zatrzymaniu przy chwilowym przeciążeniu.



Rys. 2.30 Charakterystyki mechaniczne silnika i maszyny roboczej - silnik wymaga nadwyżki momentu dla zapewnienia przyśpieszenia.

W praktycznie dla maszyn z grup 1 i 2 należy brać pod uwagę możliwość wystąpienia zwiększonego zapotrzebowania na moment rozruchowy w początkowej fazie rozruchu maszyny. Ten rodzaj maszyn może mieć początkowy moment obciążający taki sam jak początkowy moment rozruchowy silnika. Istnieje tu ryzyko nie dokonania rozruchu silnika z tego powodu, że łatwo jest uzyskać stan, w którym początkowy moment obciążenia przekroczy wartość początkowego momentu rozruchowego rys 2.31, wówczas silnik nie ruszy i będzie pracował w stanie zwarcia.



Rys. 2.31 Charakterystyki mechaniczne silnika i maszyny roboczej, w szczególnych przypadkach może wystąpić konieczność zapewnienia zwiększonego momentu rozruchowego silnika.

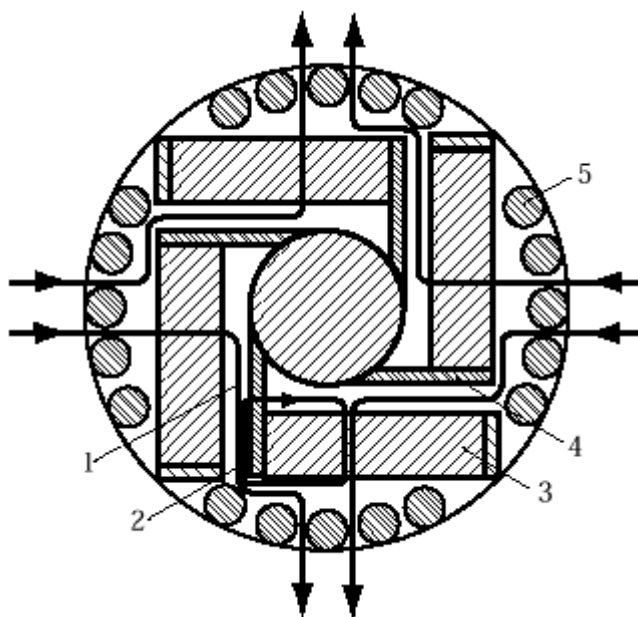
2.4 Silniki synchroniczne

W silnikach synchronicznych stojan zbudowany jest tak samo jak w silnikach asynchronicznych.

Wirnik w silniku synchronicznym (nazywany także kołem magnetycznym) posiada wydane bieguny magnetyczne i może być wykonywany z magnesów trwałych (dla małych silników) lub z elektromagnesów (dla większych silników).

Wirnik może mieć dwie lub więcej par biegunów i dlatego może być używany w silnikach niskoobrotowych. Nie jest możliwy rozruch silnika synchronicznego bezpośrednio z sieci zasilającej. Spowodowane to jest bezwładnością wirnika oraz dużą prędkością wirowania pola magnetycznego. Dlatego wirnik trzeba najpierw rozpędzić, aby jego prędkość wirowania była taka sama jak prędkość wirowania pola magnetycznego. Aby osiągnąć odpowiednią prędkość obrotową wirnika dla silników o dużych mocach, zwykle stosuje się rozruszniki w postaci silników pomocniczych lub przemienniki częstotliwości.

Do rozruchu małych silników zasilanych bezpośrednio z sieci stosuje się dodatkowe uzwojenia rozruchowe (uzwojenia tłumiące) w wirniku i wówczas silnik zachowuje się tak silnik klatkowy.



1. Strumień magnetyczny.
2. Straty magnetyczne.
3. Magnes trwały.
4. Przekładka niemagnetyczna (diamagnetyk).
5. Klatka rozruchowa.

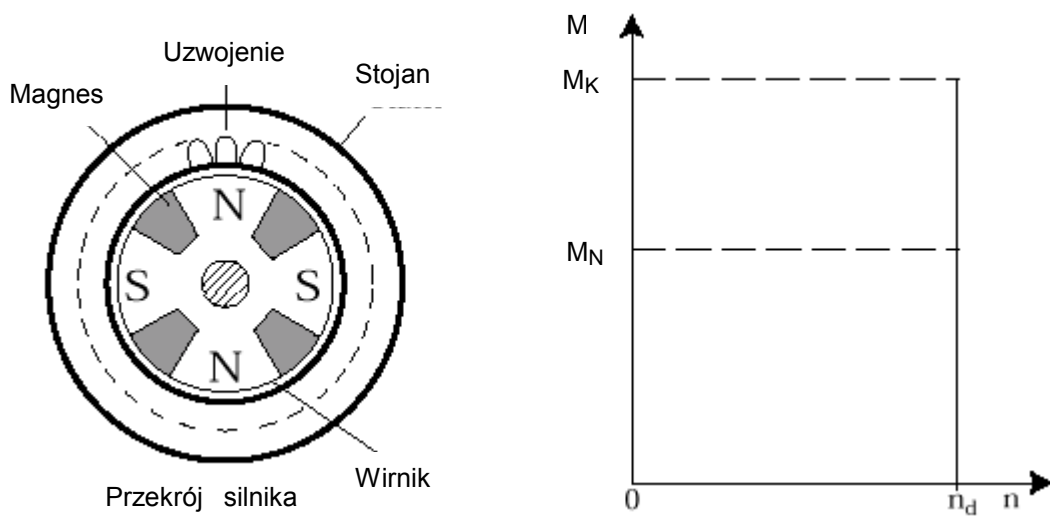
Rys. 2.32 Wirnik silnika synchronicznego z magnesami trwałymi.

Po rozruchu silnika, prędkość obrotowa wirnika jest taka sama jak prędkość wirowania pola magnetycznego (prędkość synchroniczna). Jeśli silnik jest dołączony do obciążenia odległość pomiędzy biegunami wirnika i wirującymi biegunami pola magnetycznego wzrasta. Przy zwiększających się obrotach silnika zwiększa się przesunięcie pomiędzy biegunami wirnika, a biegunami wirującego pola magnetycznego. Opóźnienie prędkości wirnika względem wirującego pola magnetycznego spowodowane jest istnieniem przesunięcia fazowego obciążenia V oraz przesunięciem nieobciążonego wirnika względem pola magnetycznego, rys. 2.34.

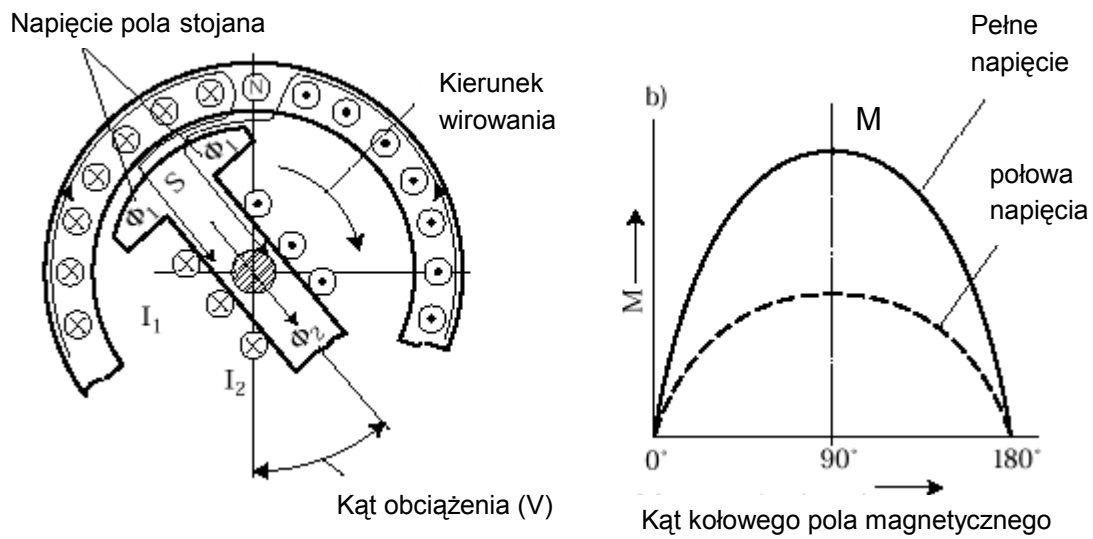
Silniki synchroniczne mają stałą prędkość obrotową, która jest niezależna od obciążenia. Silniki te nie tolerują większego obciążenia niż moc rozruchowa pomiędzy wirnikiem i polem magnetycznym.

Jeżeli obciążenie wymusi większą moc napędową niż moc rozruchowa, następuje rozsynchronizowanie silnika, co powoduje zatrzymanie się maszyny.

Silniki synchroniczne są używane przykładowo w pracy równoległej silników, gdzie kilka mechanicznie niezależnych jednostek napędowych ma działać synchronicznie.



Rys. 2.33 Wirnik z wydatnymi biegunami magnetycznymi i charakterystyka mechaniczna.



Rys. 2.34 Kąt obciążenia i moment silnika w zależności od kąta wirnika.

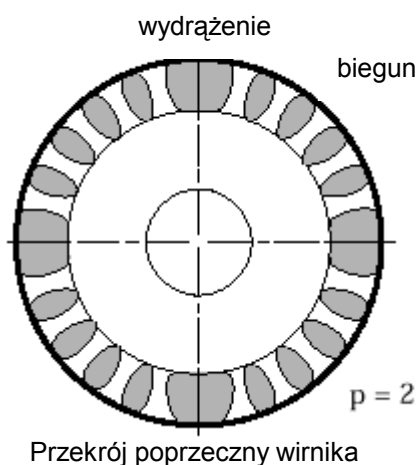
2.5 Silniki reluktancyjne

Trójfazowe silniki reluktancyjne prądu przemiennego, rozwijają taką samą prędkość jak trójfazowe silniki klatkowe, ale potem mają właściwości silników synchronicznych. Odkąd silniki reluktancyjne posiadają wbudowaną prostą klatkową uzwojenie w wirniku maszyny, mają one większy moment rozruchowy, są niezawodne, nie trzeba wykonywać prac konserwacyjnych, nie generują one szkodliwych zakłóceń o częstotliwościach fal radiowych oraz są one względnie tanie. Silniki te posiadają również wady, a mianowicie wytwarzają one dużo indukcyjnej mocy biernej oraz są mało wydajne, dlatego w przemyśle stosuje się głównie silniki reluktancyjne o mocy do 15 kW.

⇒ **Budowa**

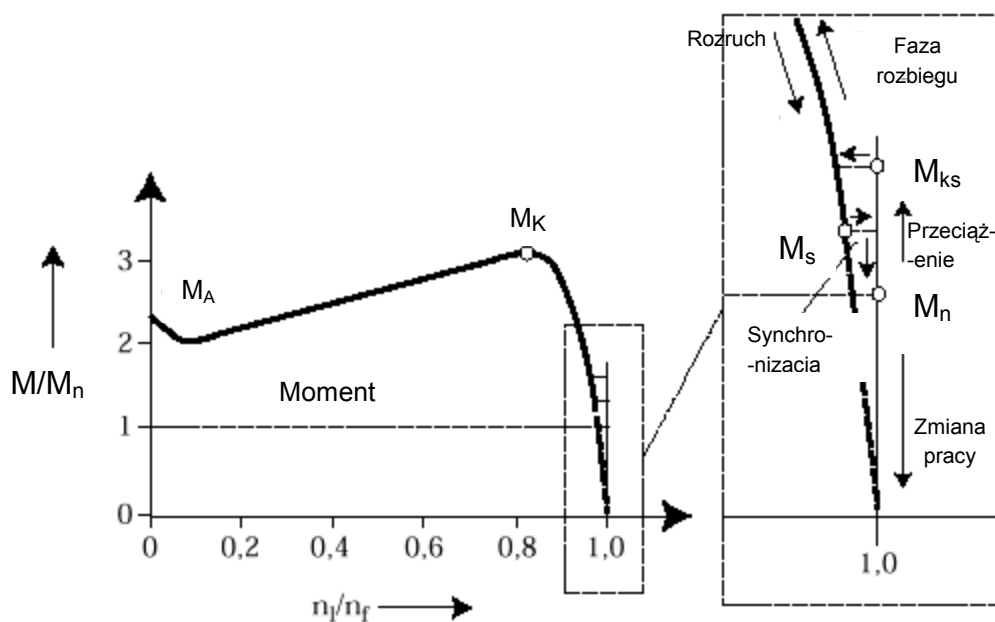
Stojan trójfazowego silnika reluktancyjnego prądu przemiennego jest wykonany tak samo jak w zwykłym trójfazowym silniku asynchronicznym z wbudowaną klatką rozruchową w wirniku maszyny.

W wirniku silnika reluktancyjnego znajduje się proste uzwojenie klatkowe. Jednakże wirnik silnika reluktancyjnego posiada tę samą ilość biegunów wydatnych co stojan. Bieguny te przecinają się przez wydrążenia znajdujące się przy obwodzie wirnika umieszczone w metalowej płytce lub innej podobnej strukturze rys. 2.35.



Rys. 2.35 Wirnik silnika reluktancyjnego.

Rezystancja magnetyczna (reluktancja) występująca przy obwodzie wirnika wytwarzana jest przez wydrążenia, które mogą być wypełnione tym samym materiałem, co klatka wirnika. Rezystancja ta jest najmniejsza w okolicy bieguna i największa w okolicy wydrążenia.



Rys. 2.36 Graficzna prezentacja przebiegu momentu w silniku reluktancyjnym.

Kiedy podłączymy silnik reluktancyjny do trójfazowej sieci zasilającej prądu przemiennego rozwinie on prędkość bliską prędkości synchronicznej, podobnie jak silnik klatkowy pod warunkiem, że moment silnika jest wyższy od momentu obciążenia podczas rozruchu procesu produkcyjnego. Prąd pobierany podczas rozruchu jest nieco większy a moment początkowy jest nieco mniejszy w porównaniu z podobnej mocy silnikami klatkowymi. Jest to wynikiem większej szczeliny powietrznej w silnikach klatkowych w porównaniu do silników reluktancyjnych. Gdy wirnik praktycznie osiągnie prędkość obracającego się pola magnetycznego, pole magnetyczne stojana i wirnika daje w rezultacie moment synchroniczny. Po zsynchronizowaniu, silnik będzie pracował przy prędkości synchronicznej, pomimo zmniejszonego oddziaływania wirnika.

Zsynchronizowany silnik reluktancyjny pracuje mniej więcej tak samo jak silnik synchroniczny, jego wirnik obraca się z taką samą prędkością jak wirujące pole magnetyczne stojana. W ten sam sposób jak bieguny w wirującym polu magnetycznym stojana, poruszają się bieguny w wirniku. W silnikach reluktancyjnych strumień magnetyczny w wirującym polu stojana próbuje uaktywnić wirnik w pobliżu biegunów wydatnych. Mała szczelina powietrzna w tych miejscach generuje mniejszą rezystancję magnetyczną (reluktancję) niż w miejscach wydrążenia. Natężenie pola magnetycznego nie musi pokonywać wyższej rezystancji magnetycznej w okolicy wydrążenia, przez co tworzy się moment synchroniczny, który utrzymuje obciążenie.

Z powodu spadającego generowanego w wirniku prądu stałego, moment synchroniczny w silnikach reluktancyjnych jest znacznie mniejszy niż w porównywalnym silniku synchronicznym.

Jeżeli synchronizacja jest zapewniona, silniki reluktancyjne mają charakterystykę roboczą zbliżoną do standardowych silników synchronicznych.

Wirnik obraca się z prędkością wirującego pola magnetycznego stojana, która zależy od częstotliwości sieci zasilającej oraz od ilości par biegunów.

Kąt obciążenia określa jak daleko bieguny wydatne wirnika pozostają za wirującym polem magnetycznym stojana. Jeżeli silnik jest w fazie przeciążenia (ang. overload) może dojść do rozsynchronizowania (ang. phase swinging) i wtedy silnik będzie pracował jak silnik asynchroniczny z prędkością zależną od obciążenia, rys. 2.36. Silnik powróci do pracy synchronicznej wtedy, gdy moment obciążenia będzie mniejszy od momentu synchronicznego. Jeżeli jednak silnik będzie bardziej obciążony niż w przypadku obciążenia jak pracy asynchronicznej, nastąpi jego zatrzymanie.

Ponieważ szczelina powietrzna w obszarze wydrążenia jest większa niż w pozostałej części obwodu wirnika, silniki reluktancyjne mają względnie duże rozproszenie, które powoduje zapotrzebowanie na dużą indukcyjną moc bierną. Występowanie dużej wartości mocy biernej powoduje znaczne obniżenie współczynnika mocy, o wartościach w przedziale 0,4 - 0,5 dla warunków znamionowych, gdzie tkwi największa wada tych silników. Kiedy zamierzamy zastosować napęd z silnikiem reluktancyjnym, musimy wziąć pod uwagę fakt zwiększonego zapotrzebowania tych silników na moc bierną.

Trójfazowe silniki reluktancyjne prądu przemiennego są głównie używane w napędach wielozadaniowych, kiedy prędkość każdej osi musi być dokładnie taka sama i gdzie użyty pojedynczy silnik z napędem mechanicznym do poszczególnych osi byłby trudny do realizacji lub zbyt kosztowny.

Przykładem takiego zastosowania mógłby być napęd maszyn przędzalniczych, pomp lub systemów taśmociągowych.