

MASZYNY ELEKTRYCZNE

część 2

SILNIKI INDUKCYJNE

Zakres wykładu

1. Rodzaje silników indukcyjnych
2. Podstawowe parametry silników indukcyjnych
3. Oznaczenia zacisków i końcówek uzwojeń silników i prądnic
4. Stany pracy silników indukcyjnych
5. Rozruch silników indukcyjnych
6. Regulacja prędkości obrotowej silników indukcyjnych
7. Praca hamulcowa silników indukcyjnych
8. Zabezpieczenia silników indukcyjnych
9. Silniki indukcyjne specjalne

Rodzaje silników indukcyjnych

Ze względu na sposób wykonania obwodów elektrycznych wirnika i stojana, liczbę faz sieci zasilającej oraz zakres parametrów znamionowych, silniki indukcyjne dzielą się na:

1) silniki :

- a) o wirniku klatkowym,
- b) o wirniku pierścieniowym,

2) silniki :

a) o wirniku klatkowym:

- zwykłym,
- głęboko żłobkowym,
- dwuklatkowym,

b) o wirniku pierścieniowym;

3) silniki :

- a) jednofazowe,
- b) dwufazowe
- c) trójfazowe,

4) silniki specjalne (np. liniowe).

Silniki indukcyjne (asynchroniczne) są powszechnie stosowane do napędu urządzeń o nieregulowanej prędkości obrotowej. Występują najczęściej jako silniki o wirnikach klatkowych (zwartych), o mocy od kilku watów do kilkuset kilowatów, na napięcie znamionowe od 0,4 do 6 kV. Silniki z wirnikami uzwojonymi, zwane **silnikami pierścieniowymi** są budowane w zakresie mocy od około 2 kW do kilku MW przy takich samych napięciach zasilania.

Silnik pierścieniowy różni się tym od silnika klatkowego, że w żłobkach wirnika posiada trójfazowe uzwojenie, których końce są zwarte, a początki wyprowadzone i przyłączone do pierścieni ślizgowych, usytuowanych na wale wirnika. Na pierścieniach umieszczone są szczotki, które umożliwiają połączenie obracającego się uzwojenia wirnika z rozrusznikiem lub regulatorem prędkości obrotowej. W silnikach pierścieniowych, które przeznaczone są do pracy bez regulacji prędkości obrotowej, wbudowane są urządzenia do zwierania pierścieni i unoszenia szczotek.

Silniki o wirniku pierścieniowym mają, w odróżnieniu od silników o wirniku klatkowym, mniejszy prąd rozruchowy i możliwość regulacji prędkości obrotowej. Są one jednak bardziej kłopotliwe w eksploatacji oraz droższe.

Podstawowe parametry silników i prądnic trójfazowych

Po włączeniu silnika do sieci trójfazowej uzwojenie stojana wytwarza pole, którego prędkość wirowania zależy od liczby par biegunów. Jeżeli umieszczony wewnątrz stojana wirnik ma swobodę ruchu obrotowego, a jego uzwojenia są zwarte (bezpośrednio lub przez rezystancję), to na skutek działania pola wirującego na prądy indukowane w tych uzwojeniach powstaje moment obrotowy, powodujący ruch wirnika zgodnie z kierunkiem wirującego pola. Prędkość obrotowa wirnika powinna być o kilka procent niższa od prędkości synchronicznej pola. Współczynnik mocy $\cos\varphi_N$ i sprawność η_N zależą od stopnia jego obciążenia na wale.

moc znamionowa, w kW:

– silnika:

$$P_N = \sqrt{3} U_N I_N \eta_N \cos\varphi_N \cdot 10^{-3}$$

– prądnicy:

$$P_N = \sqrt{3} U_N I_N \cos\varphi_N \cdot 10^{-3}$$

napięcie uzwojenia fazowego stojana, w V:

– przy połączeniu w trójkąt:

$$U_s = U_N$$

– przy połączeniu w gwiazdę:

$$U_s = \frac{1}{\sqrt{3}} U_N$$

prąd uzwojenia fazowego stojana, w A:

– przy połączeniu w trójkąt:

$$I_{st} = \frac{\sqrt{3}}{3} I_N$$

– przy połączeniu w gwiazdę:

$$I_{st} = I_N$$

Oznaczenia zacisków i końcówek uzwojeń

Zgodnie z PN-EN 60034-8:2007 Maszyny elektryczne wirujące — Część 8: Oznaczanie wyprowadzeń i kierunek wirowania, zaciski i końcówki uzwojeń oznaczają się następująco:

- 1) Uzwojenie fazowe stojana (pierwotne) oznacza się literami **U, V, W** oraz zacisk neutralny – **N**;
- 2) Uzwojenie fazowe wirnika (wtórne) oznacza się literami **K, L, M**, zacisk neutralny – **Q**;
- 3) Początki uzwojeń fazowych oraz połączone z nimi zaciski wyróżniają się cyfrą **1**, np. U1, K1;
- 4) Końce uzwojeń fazowych oraz połączone z nimi zaciski wyróżniają się cyfrą **2**, np. V2, L2;
- 5) Jeżeli w stojanie lub wirniku znajduje się k oddzielnych uzwojeń trójfazowych albo jedno uzwojenie trójfazowe, ale złożone z k oddzielnych pasm, których początki i końce są wyprowadzone na zewnątrz, to zaciski oraz końcówki należące do kolejnych uzwojeń fazowych lub kolejnych pasm wyróżniają się cyframi 1,2,,...,k zapisanymi przed symbolami litrowymi, np.:
 - a) **1U1, 1U2** – oznaczają początek/koniec pierwszego uzwojenia fazowego U w stojanie,
 - b) **2L1, 2L2** – oznaczają początek/koniec drugiego uzwojenia fazowego L w wirniku;

- 6) Zaczepy znajdujące się w uzwojeniach fazowych stojana lub wirnika, z wyprowadzonymi na zewnątrz końcówkami, wyróżnia się kolejnymi cyframi 3, 4, 5, ...np. **U3** – pierwszy zaczepek w uzwojeniu fazowym U stojana;
- 7) Jeżeli uzwojenie pierwotne jest w wirniku, a uzwojenie wtórne w stojanie, to oznaczenia **U, V, W, N** stosuje się do wirnika, a oznaczenia **K, L, M, Q** – do stojana.

Według PN-EN 60034-8:2005 oznaczenie końcówek lub zacisków uzwojenia stojana **U1, V1, W1** i połączenie ich odpowiednio z przewodami liniowymi **L1, L2, L3** sieci zasilającej powinno zapewnić obracanie się wirnika **w prawo** (zgodnym z ruchem wskazówek zegara), obserwowanym **od strony czopa końcowego wału**.

Stany pracy silników indukcyjnych

Bieg jałowy silnika indukcyjnego

Biegiem jałowym silnika indukcyjnego nazywa się taki stan pracy, w którym:

- uzwojenie stojana jest zasilane napięciem z sieci,
- wirnik, nie jest obciążony żadnym momentem, wiruje z dużą prędkością zbliżoną do prędkości synchronicznej,
- występują bardzo niewielkie wartości: poślizgu (ok. $s_0 = 0,001$), częstotliwości w wirniku f_s , oraz strat w stali wirnika,
- w wirniku indukuje się siła elektromotoryczna E_2 o małej wartości i płynie bardzo mały prąd I_2 , stąd straty w uzwojeniu wirnika są pomijalnie małe,
- moc oddawana przez silnik jest równa zero (wał silnika nie jest obciążony),
- moc pobrana przez silnik P_o w całości idzie na pokrycie strat w uzwojeniu stojana ΔP_{cu0} , w stali stojana ΔP_{Fe0} i strat mechanicznych ΔP_m , stąd:

$$P_o = \Delta P_{cu0} + \Delta P_{Fe0} + \Delta P_m$$

Straty jałowe ΔP_o (nie zależą od obciążenia) i wynoszą:

$$\Delta P = P_o - \Delta P_{cu0}$$

Prąd jałowy w maszynach indukcyjnych przy zasilaniu napięciem znamionowym wynosi:

$$I_o = (0,25 - 0,5)I_N$$

współczynnik mocy przy biegu jałowym wynosi:

$$\cos\varphi_o = 0,1 - 0,2$$

Mały współczynnik mocy wskazuje, że silnik przy biegu jałowym pobiera z sieci niemal wyłącznie moc bierną indukcyjną, która powoduje zwiększenie strat zasilania i ogranicza pobór mocy z sieci zasilającej. W tej sytuacji należy stosować odpowiednie urządzenia kompensujące (np. baterie kondensatorów, kompensatory synchroniczne) oraz dopilnować, aby silniki indukcyjne nieobciążone były wyłączone z sieci.

Stan zwarcia silnika indukcyjnego

Stanem zwarcia silnika indukcyjnego nazywa się taki stan, w którym:

- a) uzwojenie stojana jest zasilane napięciem z sieci,
- b) obwód wirnika jest zwarty i wirnik jest nieuruchomiony, czyli: $n = 0$; $s = 1$, prąd wirnika jest duży, może osiągnąć wartość $(4 - 10)I_N$,
- c) moc elektryczna pobierana przez silnik w stanie zwarcia jest w całości zamieniana na ciepło (moc mechaniczna nie jest wydawana, ponieważ wirnik się nie obraca).

Ze względu na małe straty w rdzeniu można w przybliżeniu przyjąć, że całkowita moc pobrana P_o jest przeznaczona na pokrycie strat obciążeniowych:

ΔP_{cu1} – w uzwojeniu stojana;

ΔP_{cu2} – w uzwojeniu wirnika,

czyli:

$$P_o = \Delta P_{cu1} + \Delta P_{cu2}$$

Napięcie zwarcia silnika indukcyjnego (u_z) jest napięciem, jakie należy doprowadzić do uzwojenia jednej ze stron, np. stojana, aby przy zwarceniu drugiej strony i unieruchomieniu wirnika popłynął prąd znamionowy po stronie zasilania. Napięcie zwarcia silnika indukcyjnego podaje się w stosunku do napięcia znamionowego:

$$u_{z\%} = \frac{U_z}{U_N} 100\%$$

Napięcie zwarcia silników indukcyjnych wynosi **od 10 do 25% U_N** .

Prąd zwarcia silnika indukcyjnego

Silnik indukcyjny w stanie zwarcia, zasilany napięciem znamionowym, pobiera prąd zwarcia

$$I_z = (4 \div 10) I_N$$

(i odwrotnie, przy zasilaniu napięciem zwarcia – pobiera prąd znamionowy). Zależność między prądem zwarcia (I_z), prądem znamionowym (I_N) i napięciem zwarcia ($u_{z\%}$) jest następująca:

$$I_z = I_N \frac{100}{u_{z\%}}$$

Stan zwarcia w silnikach klatkowych występuje przy każdym załączeniu silnika do sieci, jeżeli nie stosuje się specjalnych urządzeń do obniżania napięcia. Prąd zwarcia w silnikach pierścieniowych można zmniejszyć, zwiększając rezystancję obwodu uzwojeń wirnika.

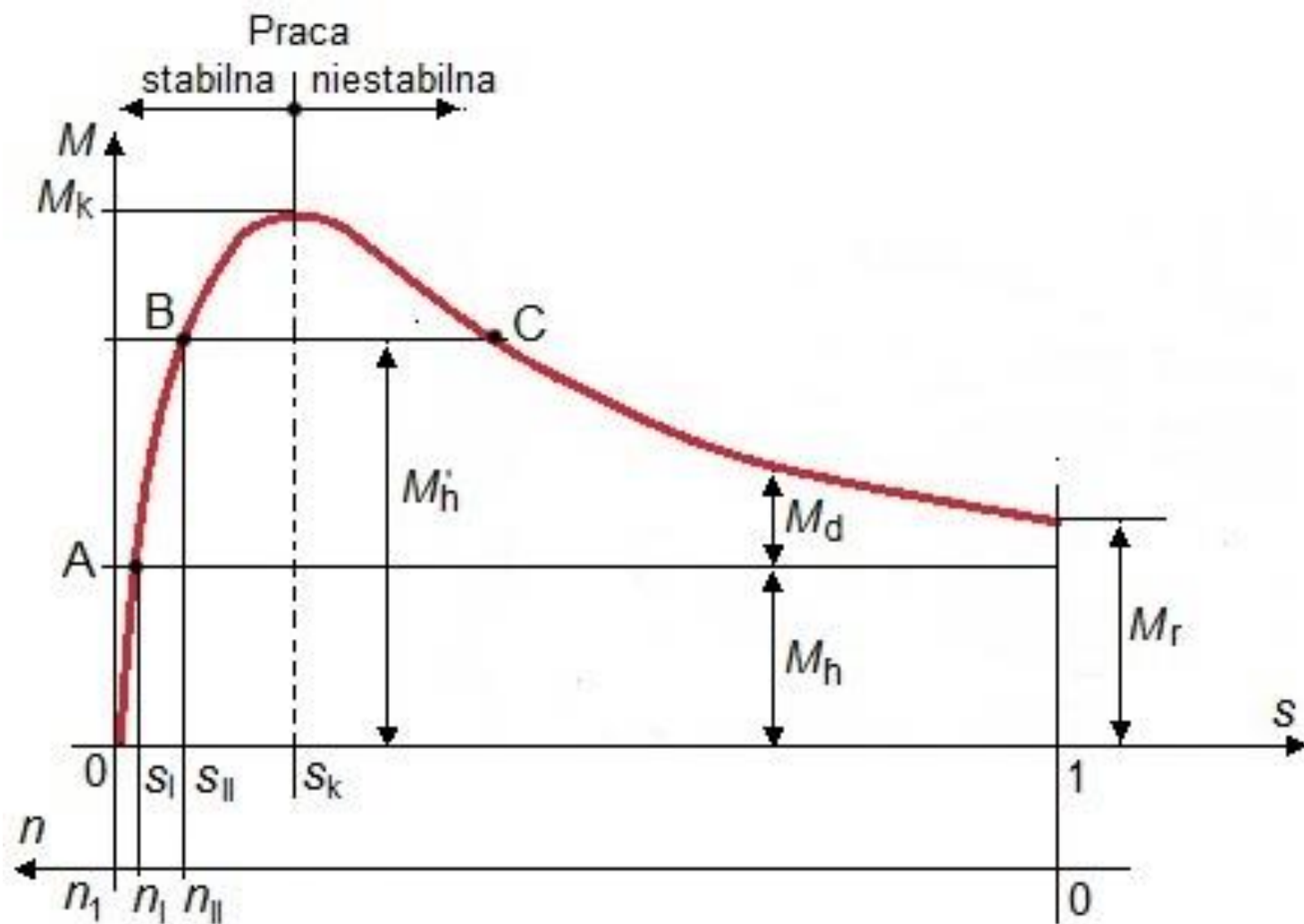
Stan obciążenia silnika indukcyjnego. Praca stabilna i niestabilna

Stan obciążenia silnika indukcyjnego występuje wtedy, gdy silnik jest sprzężony z maszyną napędzaną, przy jednoczesnym zasilaniu uzwojenia stojana napięciem sieci.

W stanie obciążenia parametry silnika indukcyjnego kształtują się następująco:

- a) warunki zasilania obciążonego silnika są najczęściej niezmiennie,
- b) ustala się prędkość obrotową wirnika, przy jakiej występuje równowaga momentu wydawanego przez silnik M i momentu hamującego M_h ,
- c) przy każdej zmianie obciążenia moment wydawany przez silnik dostosowuje się do momentu hamującego,
- d) zmienia się poślizg, prądy płynące w uzwojeniach, współczynnik mocy silnika, moc czynna pobierana oraz bilans mocy,
- e) zmienia się moment wydawany przez silnik, aż do ponownego ustalenia się równowagi momentów: $M = M_h$.

Właściwości maszyny indukcyjnej określają charakterystyki ruchowe, czyli zależności tych wielkości od momentu M (lub mocy P). Najczęściej podawaną **charakterystyką ruchową silników indukcyjnych** jest wykres $M = f(n)$, przy $U_{1N} = \text{const.}$ i $f_{1N} = \text{const.}$, zwany też **charakterystyką mechaniczną**



Właściwości ruchowe silników pracujących w stanie obciążenia wiążą się ze stabilnością lub niestabilnością pracy zespołu silnik - maszyna napędzana oraz ze stanami ustalonymi lub nieustalonymi, podczas których:

w stanie ustalonym – prędkość obrotowa (n) zespołu jest stała, a moment rozwijany przez silnik jest równy co do wartości, lecz przeciwnie skierowany do statycznego momentu obciążenia maszyny napędzanej,

w stanie nieustalonym – prędkość obrotowa się zmienia; nie zachodzi równowaga momentu rozwijanego przez silnik (M) i momentu hamującego (M_h).

Różnicę między tymi momentami:

$$M - M_h = M_d$$

nazywa się **momentem dynamicznym** (M_d).

Jeżeli $M_d > 0$ (czyli $M > M_h$), to układ przyspiesza;

Jeżeli $M_d < 0$ (czyli $M < M_h$), to układ zwalnia.

Stany nieustalone w pracy maszyn wirujących występują najczęściej w czasie:

- rozruchu,
- regulacji prędkości obrotowej,
- zmiany obciążenia,
- zmian warunków zasilania,
- zatrzymania się układu.

W zależności od właściwości układu silnik indukcyjny – maszyna napędzana, mogą wystąpić dwa zakresy pracy:

- a) **praca stabilna**, jeżeli po krótkim zakłóceniu pracy układ wraca do stanu równowagi,
- b) **praca niestabilna**, jeżeli po krótkim zakłóceniu układ zatrzymuje się lub wykazuje tendencje do rozbiegania się.

Zakres pracy stabilnej silnika indukcyjnego przy $0 < s < s_k$

Przy założeniu, że silnik indukcyjny jest obciążony momentem hamującym $M_h = \text{const}$ mniejszym od momentu rozruchowego M_r (w chwili rozruchu $n = 0$, $s = 1$), będzie zasilany napięciem sieci, to silnik zaczyna się obracać pod wpływem momentu dynamicznego M_d . Moment M_d nadaje przyspieszenie wirnikowi, stąd prędkość obrotowa wirnika wzrasta, a poślizg s się zmniejsza. Przebieg pracy silnika indukcyjnego $M = f(s)$ można opisać następująco:

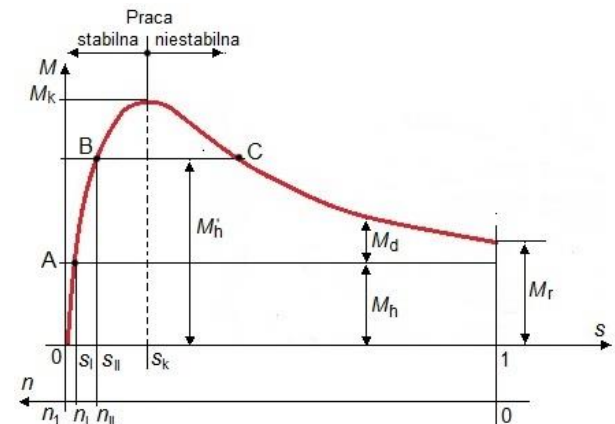
- a) punkt pracy silnika przesuwają się po linii $M = f(s)$, od punktu $s = 1$ w stronę poślizgów mniejszych, przechodząc przez punkt (M_k, s_k) ;
- b) stan ustalony w punkcie A, linia $M = f(s)$, przecina się z prostą M_h . Wtedy moment rozwijany przez silnik $M = M_h$, a moment dynamiczny $M_d = M - M_h = 0$, prędkość obrotowa wirnika ustala się w punkcie A przy prędkości n_1 ;
- c) stan ustalony w punkcie B, moment M_h wzrasta do wartości M'_h , to wtedy $M'_h > M$, czyli będzie większy od momentu wytworzonego w silniku; prędkość obrotowa silnika maleje, a poślizg rośnie. Punkt pracy przesuwają w stronę większych poślizgów, a więc moment wytworzony w silniku zrówna się z wytworzonym momentem hamującym i nastąpi nowy stan ustalony w punkcie B, przy s_{II} i n_{II} .

Zakres pracy niestabilnej silnika przy $s_k < s < 1$

Przy założeniu, że w punkcie C wystąpi chwilowy stan równowagi $M = M'_k$ (wzrasta moment hamujący M_h), to prędkość obrotowa silnika się zmniejsza, a punkt pracy silnika przesuwa się w stronę poślizgu $s = 1$.

Następnie moment obrotowy wytworzony w silniku oraz prędkość obrotowa wirnika zmniejszają się, aż przy $s = 1$ silnik zostanie zahamowany.

W innym przypadku, gdy przy wyjściu ze stanu równowagi w punkcie C moment hamujący zmniejszył się, to moment wytworzony w silniku będzie większy od momentu hamującego $M > M_h$, powodując przyspieszenie wirnika. Wówczas punkt pracy silnika przesunie się, przez punkt (M_k, s_k) , w stronę mniejszych poślizgów, przy równoczesnym wzroście momentu obrotowego i prędkości obrotowej silnika. Nowy stan ustalony wystąpi w punkcie B.



Przeciążalność silnika indukcyjnego

Moment silnika jest proporcjonalny do kwadratu doprowadzonego napięcia; każde obniżenie napięcia w sieci spowoduje znaczne zmniejszenie momentu wytworzonego w silniku. Z tego względu **punkt pracy znamionowej silnika musi znajdować się w zakresie pracy stabilnej dość daleko od momentu krytycznego**, aby obniżone napięcie nie spowodowało zahamowania silnika. Najczęściej moment znamionowy (M_N) silnika indukcyjnego jest co najmniej dwa razy mniejszy od jego momentu krytycznego (M_k).

Przeciążalność silnika można obliczyć ze wzoru:

$$u = \frac{M_k}{M_N} \geq 2$$

Przeciążalność u silnika przyjmuje się wartość ok. 2,5. W silnikach realizujących odpowiedzialne zadania, np. w silnikach dźwigowych, może przekraczać nawet 4,5.

Rozruch silników indukcyjnych

Rozruchem silnika indukcyjnego nazywa się stan pracy od chwili włączenia napięcia do osiągnięcia ustalonej prędkości obrotowej, określonej parametrami zasilania (napięciem i częstotliwością) i obciążenia (momentem hamującym). Rozruch silnika indukcyjnego jest możliwy tylko wtedy, gdy moment wytworzony przez silnik (M) jest większy od momentu obciążenia (M_h).

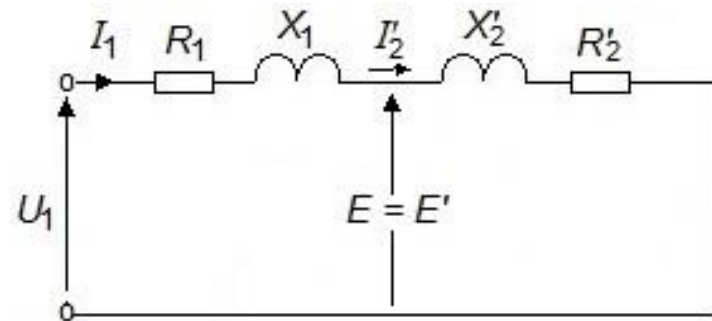
Istotne dla rozruchu silnika indukcyjnego są:

- prąd rozruchowy I_r ,
- moment rozruchowy M_r ,
- czas rozruchu.

Wymagania co do ograniczenia prądu rozruchowego, spadku napięcia w sieci, jak i przyrostów temperatury uzwojeń podczas rozruchu, a także zmniejszenia udaru mechanicznego w urządzeniu napędzanym łatwiej można spełnić, stosując silnik o wirniku pierścieniowym, niż silnik o wirniku klatkowym.

Rozruch bezpośredni – silnik z wirnikiem klatkowym

Praca silnika indukcyjnego podczas rozruchu ze zwartym uzwojeniem wirnika odpowiada stanowi zwarcia



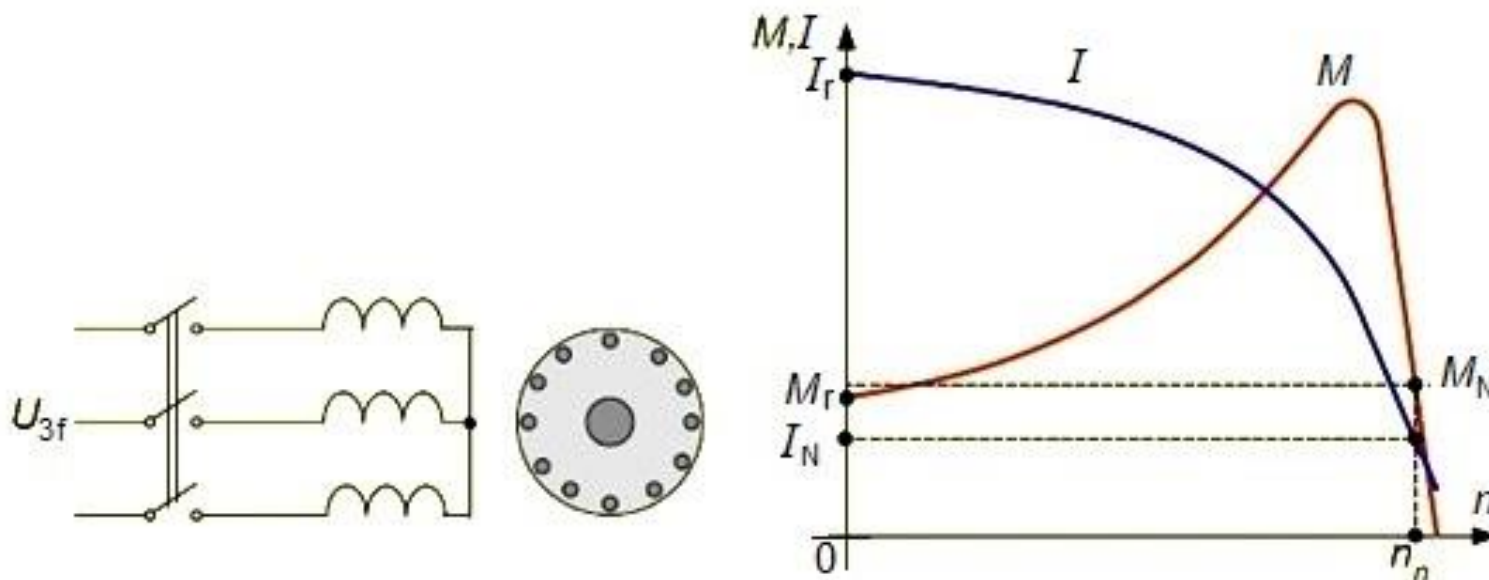
Na podstawie schematu zastępczego silnika indukcyjnego w stanie zwarcia ($s = 1$) można określić:

a) prąd rozruchowy I_r silnika indukcyjnego pobierany z sieci:

$$I_r = \frac{U_{1f}}{\sqrt{(R_1 + R_2')^2 + (X_1 + X_2')^2}}$$

a) b) prąd znamionowy I_N silnika indukcyjnego pracującego w warunkach znamionowych.

$$I_N = \frac{U_{1f}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s_N}\right)^2 + (X_1 + X_2')^2}}$$



Rozruch bezpośredni silnika o wirniku klatkowym

Bezpośrednie włączenie do sieci na napięcie znamionowe jest najprostszym ale też najbardziej krytycznym stanem pracy silnika o wirniku klatkowym. Moment rozruchowy silnika jest niewielki, a występujące wielokrotne przekroczenie znamionowego prądu silnika w czasie rozruchu, jest przyczyną spadku napięcia w sieci

Prąd pobierany podczas rozruchu silnika ze zwartym uzwojeniem wirnika jest kilkakrotnie większy od prądu znamionowego: $I_r = (5 \div 8) I_N$, a moment rozruchowy - $M_r = (0,5 \div 1,5) M_N$.

Dopuszczalna moc trójfazowych silników indukcyjnych o wirniku klatkowym, bezpośrednio włączanych do sieci elektroenergetycznej, wynosi:

a) przy włączeniu bezpośrednim:

- do sieci o napięciu 127 V – 2,2 kW,
- do sieci o napięciu 230 V – 4 kW,
- do sieci o napięciu 400 V – 5,5 kW,

b) przy włączeniu za pomocą przełącznika gwiazda – trójkąt:

- do sieci o napięciu 127 V – 6 kW,
- do sieci o napięciu 230 V – 12 kW,
- do sieci o napięciu 400 V – 15 kW.

Dopuszczalna moc jednofazowego silnika indukcyjnego włączanego bezpośrednio w sieci:

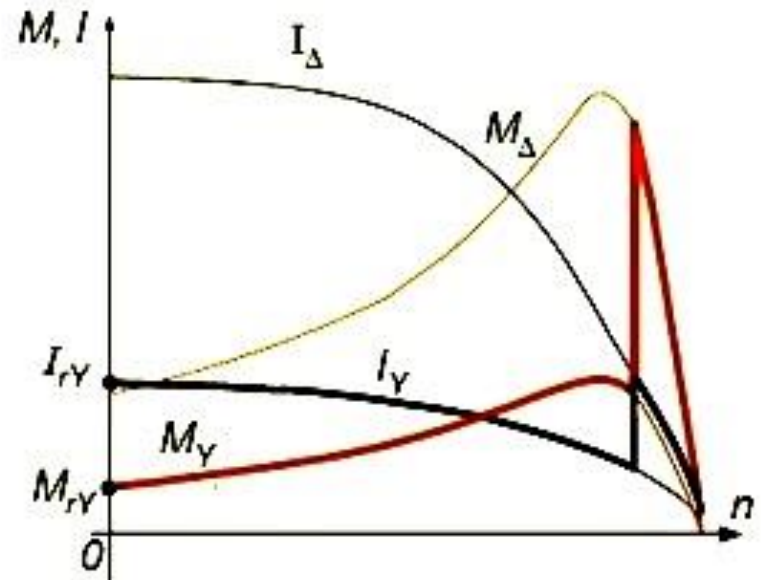
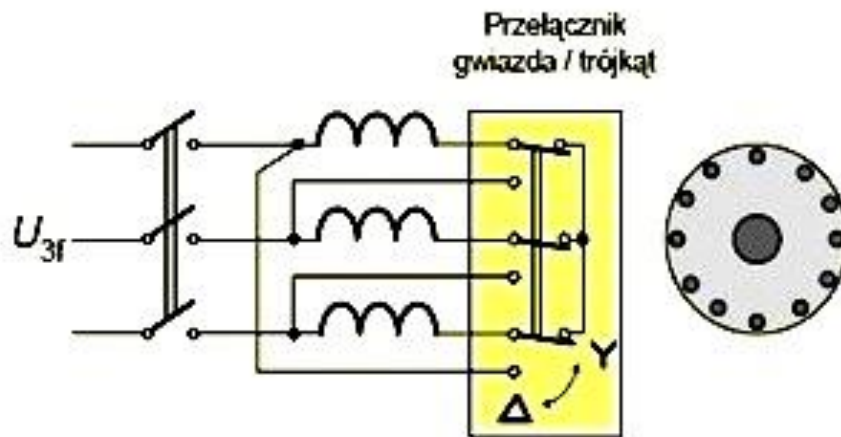
- o napięciu 127 V – wynosi 0,5 kW,
- o napięciu 230 V – wynosi 1,5 kW.

W chwili rozruchu silnika o wirniku klatkowym spadek napięcia w sieci nie powinien być większy niż:

- 5% – jeśli z transformatora są zasilane również źródła światła,
- 10% – jeżeli rozruchy są częste i ciężkie, a transformator nie zasila źródeł światła,
- 15% – jeżeli rozruchy są sporadyczne i lekkie, a transformator nie zasila źródeł światła.

Rozruch silnika indukcyjnego za pomocą przełącznika gwiazda-trójkąt

Włączenie do sieci za pomocą **przełącznika gwiazda-trójkąt** może być stosowane tylko dla silników niskiego napięcia, w wykonaniu zgodnym z PN-EN 60034-12:2004, których uzwojenia fazowe stojana są połączone w trójkąt, przy napięciu znamionowym.



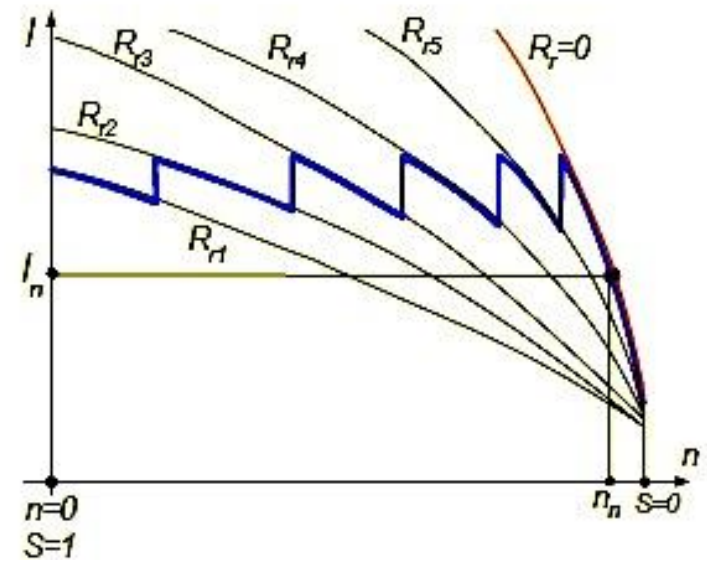
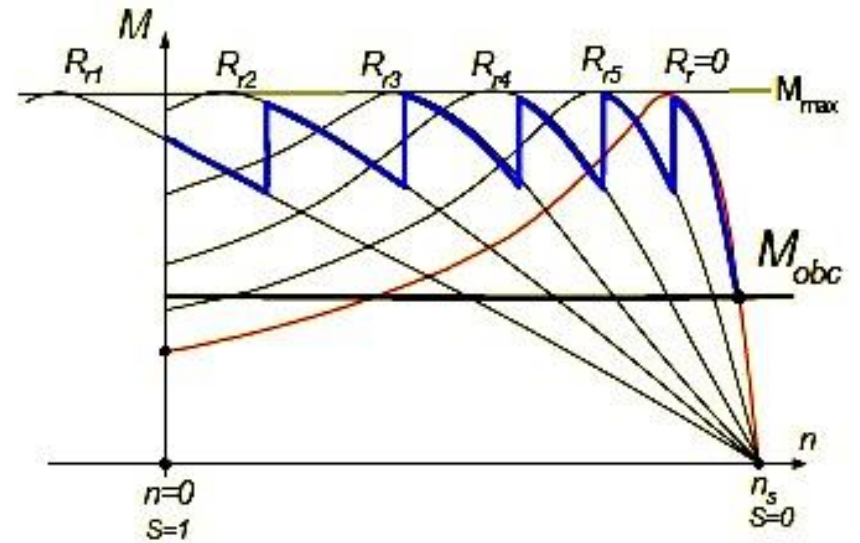
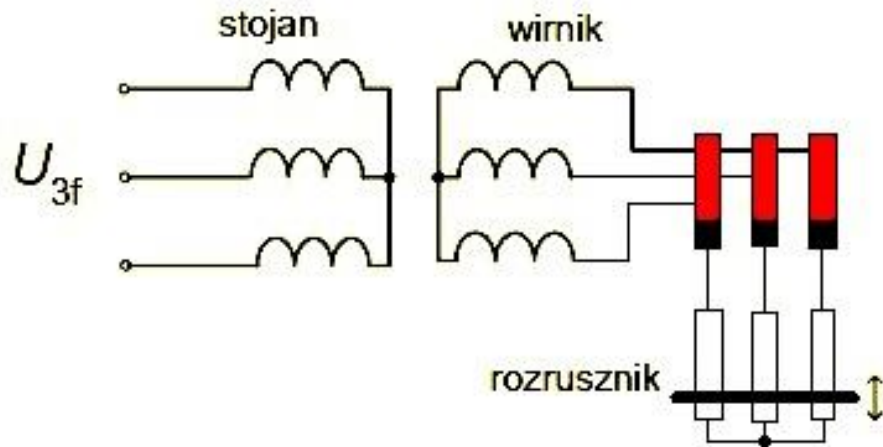
Rozruch silnika indukcyjnego za pomocą przełącznika gwiazda-trójkąt przebiega następująco:

- 1) Przełącznik gwiazda-trójkąt ustawia się w pozycji „gwiazda”, łącząc uzwojenia fazowe stojana w gwiazdę
- 2) Po włączeniu silnika prąd pobierany z sieci i elektromagnetyczny moment obrotowy będą co najmniej **3 razy mniejsze** niż przy połączeniu w trójkąt. Natomiast prąd w uzwojeniach fazowych zmniejsza się do **ok. 57%** wartości występującej przy połączeniu w trójkąt;
- 3) Gdy prędkość obrotowa w połączeniu w gwiazdę osiągnie wartość bliską znamionowej, może nastąpić przełączenie uzwojeń stojana w trójkąt.

Rozruch silnika indukcyjnego o wirniku pierścieniowym

Rozruch silnika indukcyjnego o wirniku pierścieniowym przeprowadza się za pomocą rozrusznika oporowego, włączonego w obwód uzwojenia wirnika. Zarówno silnik, jak i rozrusznik wyposażone są w styki pomocnicze blokady elektrycznej uniemożliwiającej włączenie silnika do sieci, jeśli przyrząd szczotkowy i pokrętło rozrusznika nie znajdują się w pozycji rozruchu początkowego. Przed uruchomieniem silnika pokrętło rozrusznika należy ustawić na maksymalną rezystancję, a następnie w czasie rozruchu stopniowo zmniejszać rezystancję, aż do bezpośredniego zwarcia pierścieni.

Poprzez zmianę rezystancji w obwodzie wirnika uzyskuje się możliwość płynnej zmiany obrotów, przy stosunkowo dużych stratach energii elektrycznej na rezystorze regulacyjnym.



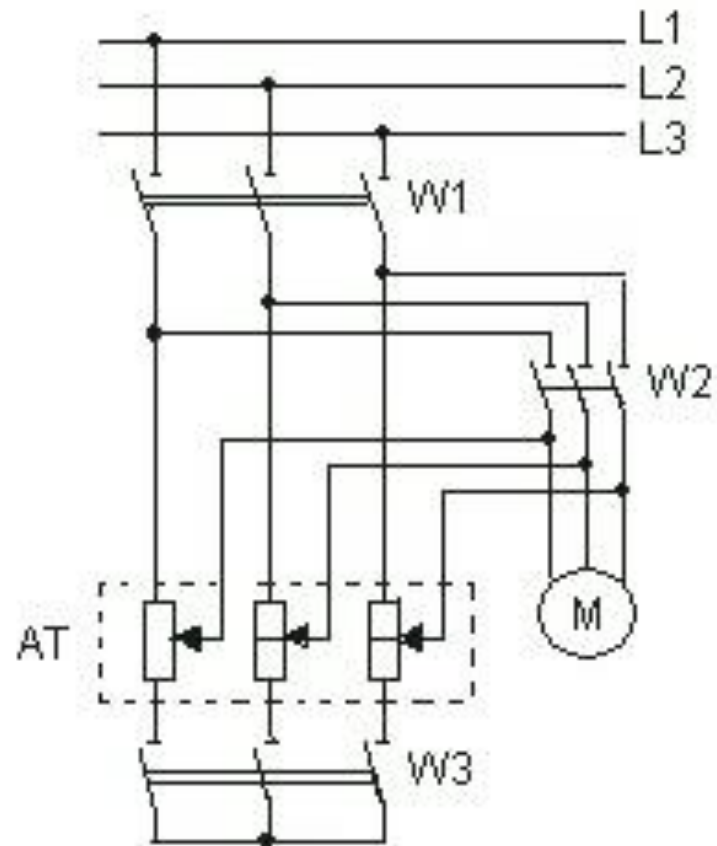
Rozruch silnika indukcyjnego za pomocą autotransformatora

Autotransformatory stosowane do rozruchu silników indukcyjnych posiadają nastawialną przekładnię napięciową n_u . Rozruch silnika rozpoczyna się od nastawienia wartości napięcia odpowiadającej przyjętemu nieprzekraczalnemu prądowi rozruchowemu, po czym:

- a) zamyka się wyłączniki W1 i W3, wyłącznik W2 zostaje otwarty,
- b) następnie stopniowo podwyższa się napięcie zasilające silnik do wartości znamionowej,
- c) po ustaleniu się prędkości silnika otwiera się wyłącznik W3, zamykając wyłącznik W2.

Zależności wielkości podstawowych charakteryzujących pracę silnika po rozruchu za pomocą autotransformatora o przekładni n_u , są następujące:

- a) napięcie zasilające silnik U_r jest niższe od napięcia sieci U ,
- b) moment rozruchowy M_r jest n_u^2 razy mniejszy od momentu przy pełnym napięciu,
- c) prąd rozruchowy I_r jest n_u razy mniejszy od prądu płynącego w uzwojeniach silnika,
- d) prąd pobierany z sieci, płynący w uzwojeniach pierwotnych autotransformatora, jest n_u^2 razy mniejszy od prądu płynącego podczas rozruchu bezpośredniego.



Przy otwartych wyłącznikach W2 i W3 autotransformator rozruchowy AT jest włączony jako dławik szeregowy.

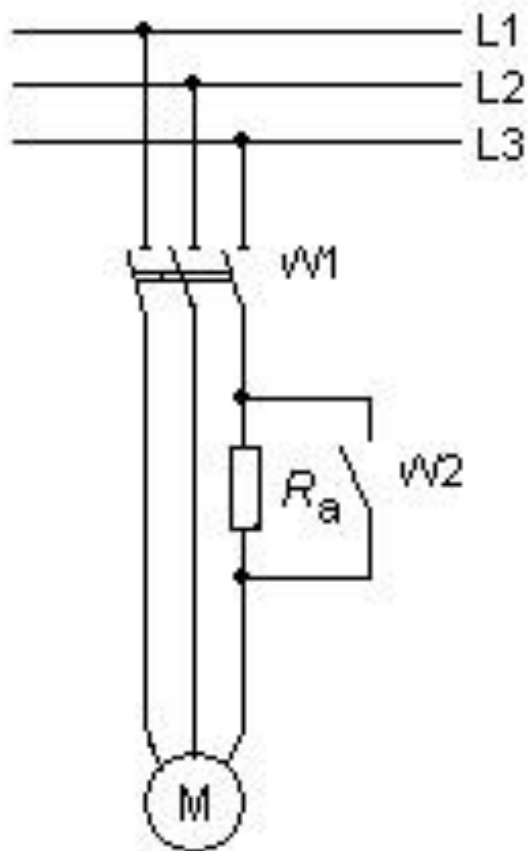
Rozruch za pomocą autotransformatora stosuje się w zasadzie do silników o mocy większej niż 500 kW.

Rozruch silnika indukcyjnego za pomocą rezystancji włączonej w obwód stojana

Rozruch silnika indukcyjnego za pomocą rezystancji włączonej w obwód stojana stosuje się w celu zmniejszenia elektromagnetycznego momentu rozruchowego oraz ograniczenia prądu rozruchowego.

Włączenie rezystancji szeregowej powoduje obniżenie się napięcia podczas rozruchu. Ten sposób rozruchu, polegający na uzyskaniu niesymetrii układu napięć na zaciskach silnika, jest obecnie stosowany rzadko i tylko w silnikach małej mocy.

W silnikach dużej mocy włącza się w tym celu dławiki o odpowiednio dobranej reaktancji. Warunki rozruchowe za pomocą rezystancji włączonej w obwód stojana są mniej korzystne niż przy rozruchu za pomocą autotransformatora lub przełącznika gwiazda-trójkąt. Dodatkową rezystancję lub reaktancję zwiera się po osiągnięciu przez silnik stanu ustalonego przy obniżonym napięciu.



Oznaczenie: W2 – wyłącznik zwierający rezystor po rozruchu silnika

Porównanie różnych sposobów rozruchu silników indukcyjnych

Lp.	Rodzaj rozruchu	Prąd rozruchu $I_r = I_{ns} \times$	Moment rozruchu $M_r = M_n \times$	Cechy charakterystyczne
1	Rozruch bezpośredni	5 - 8	0,5 - 1,5	<ul style="list-style-type: none"> - silnik o małej mocy, z trzema wyprowadzeniami, - rozruch pod obciążeniem, - duża wartość szczytowa prądu rozruchowego oraz duży spadek napięcia, - proste wyposażenie,
2	Rozruch prz pomocy przełącznika "gwiazda - trójkąt"	1,8 - 2,6	0,5	<ul style="list-style-type: none"> - silnik z sześcioma wyprowadzeniami, - rozruch przy biegu jałowym lub małym momencie obciążenia, - znaczne wartości udarowe prądu i momentu podczas przełączania uzwojeń z gwiazdy na trójkąt, - aparatura wymaga konserwacji,
3	Rozruch z użyciem autotransformatora	1,7 - 4,0	0,4 - 0,85	<ul style="list-style-type: none"> - silnik dużej mocy z trzema wyprowadzeniami, - znaczne wartości udarowe prądu podczas przełączania, - aparatura zajmująca dużo miejsca i wymagająca konserwacji,

4	Rozruch poprzez dołączenie dodatkowej rezystancji do uzwojeń stojana	4,5	0,5 - 0,75	<ul style="list-style-type: none"> - silnik dużej mocy z trzema wyprowadzeniami, - znaczne wartości udarowe prądu podczas przełączania, - aparatura zajmująca dużo miejsca i wymagająca konserwacji,
5	Rozruch za pomocą urządzenia do łagodnego rozruchu	nastawialny w granicach 2 - 5	zmienny 0,15 - 1,0	<ul style="list-style-type: none"> - silnik z trzema wyprowadzeniami od 2,2 do 800 kW, - możliwość hamowania prądem stałym, - aparatura nie wymaga konserwacji.
<p>gdzie:</p> <p>I_{ns} - prąd znamionowy silnika</p> <p>M_n - moment znamionowy silnika</p>				

Regulacja prędkości obrotowej

W praktycznych zastosowaniach, np. w napędach elektrycznych, wymaga się często zmianę kierunku wirowania, a także regulację prędkości obrotowej silnika indukcyjnego. Na podstawie zależności określającej prędkość wirowania wirnika:

$$n = n_1 (1 - s)$$

można wyznaczyć prędkość obrotową silnika indukcyjnego, ze wzoru:

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

Wynika stąd, że prędkość obrotową silnika indukcyjnego można regulować, przez zmianę:

- częstotliwości napięcia zasilającego,
- liczby par biegunów magnetycznych.
- poślizgu.

Przez zmianę częstotliwości napięcia zasilającego

Regulacja przez zmianę częstotliwości napięcia zasilającego umożliwia pracę silnika przy:

a) stałym momencie obrotowym, wtedy napięcie na zaciskach silnika należy zmieniać według zależności:

$$U \approx cf$$

przy czym c – współczynnik proporcjonalności

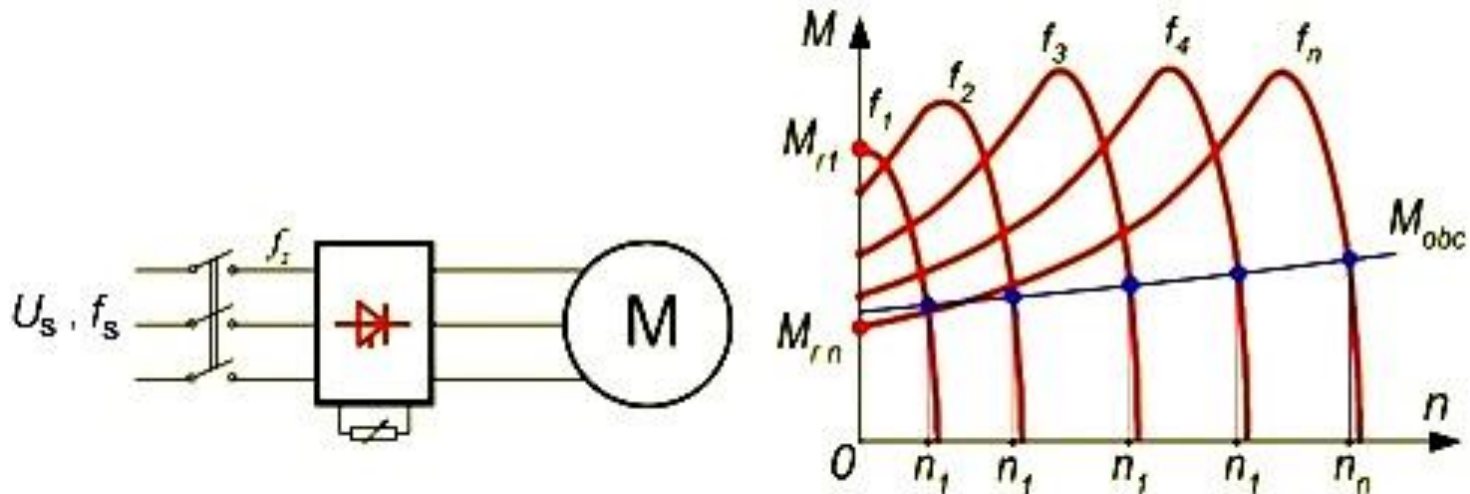
b) stałej mocy na wale; wówczas napięcie $U \approx cf$,

c) momencie obrotowym proporcjonalnym do kwadratu częstotliwości, wówczas napięcie $U \approx c \sqrt{f}$.

Ten sposób regulacji prędkości obrotowej polega na zmianie częstotliwości zasilania f_1 , która powoduje regulację prędkości wirowania pola magnetycznego oraz płynną lub skokową regulację prędkości wirowania wirnika. Przy tym sposobie regulacji wymaga się, aby zmiana częstotliwości napięcia zasilającego następowała przy stałej wartości strumienia magnetycznego.

Dlatego regulując częstotliwość f_1 , należy tak zmieniać wartość napięcia zasilającego, aby:

$$\frac{U}{f} = \text{const.}$$

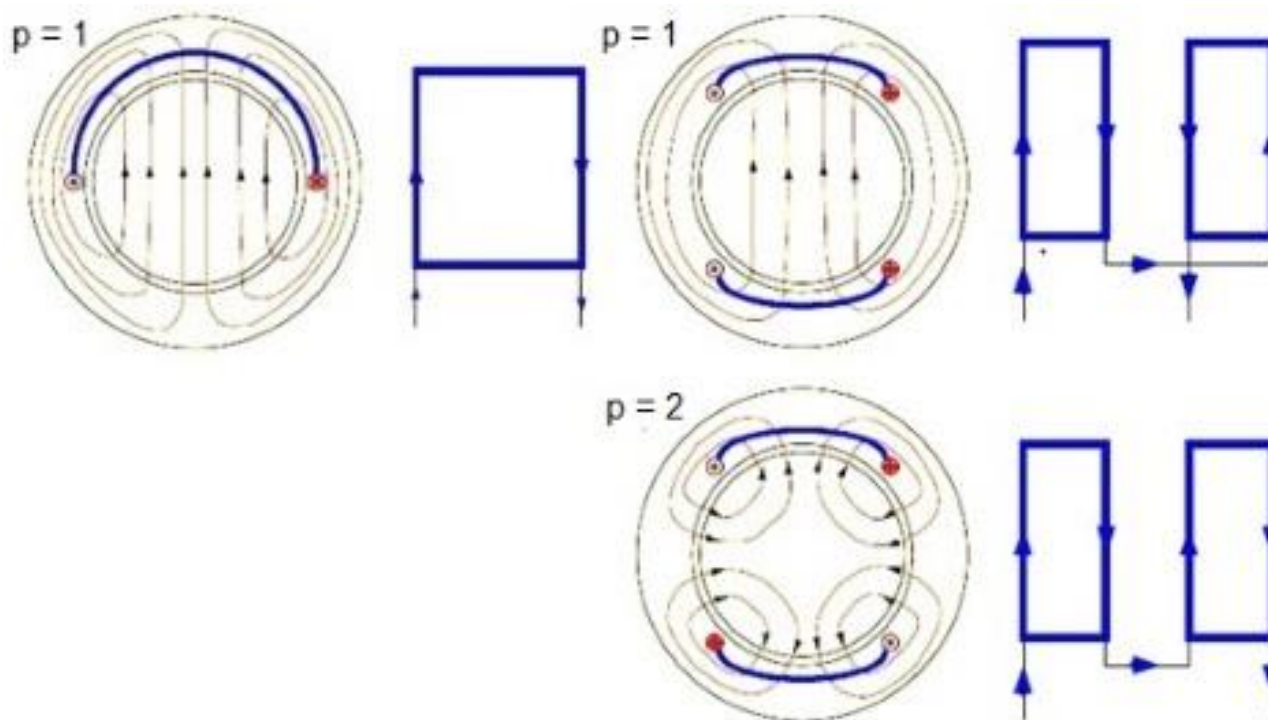


Regulacja prędkości obrotowej silnika indukcyjnego przez zmianę częstotliwości napięcia zasilającego

Przez zmianę liczby par biegunów

Regulacje prędkości obrotowej silnika indukcyjnego przez zmianę liczby par biegunów można osiągnąć stosując:

- jedno uzwojenie, które można przełączać tak, aby wytwarzało pola o różnych liczbach biegunów, lub
- dwa niezależne uzwojenia w stojanie o różnych liczbach par biegunów.



Moment obrotowy w silniku indukcyjnym powstaje tylko w przypadku, gdy liczba biegunów w stojanie i wirniku jest taka sama. Oznacza to, że regulacja prędkości obrotowej przez zmianę liczby par biegunów może być stosowana tylko w silnikach klatkowych, ponieważ uzwojenie klatkowe wirnika samo dostosowuje się, pod względem liczby par biegunów, do liczby par biegunów uzwojenia stojana.

W silnikach z wirnikiem pierścieniowym zmiana liczby par biegunów powinna nastąpić zarówno w stojanie, jak i wirniku. Dlatego w silniku z wirnikiem pierścieniowym, przy zmianie liczby par biegunów uzwojenia stojana, należałoby dokonać takiej samej zmiany liczby par biegunów uzwojenia wirnika. Zamiast dwóch dodatkowych uzwojeń w silniku z wirnikiem pierścieniowym korzystniejsze jest stosowanie jednego uzwojenia, które można przełączać w ten sposób, aby wytwarzało pola o różnych biegunach.

W silnikach tych praktycznie nie jest możliwa płynna regulacja prędkości obrotowej, a jedynie uzyskanie dwóch, a najwyżej czterech różnych prędkości. Silniki, w których regulacje prędkości obrotowej dokonuje się przez zmianę liczby par biegunów, nazywa się **silnikami wielobiegowymi**.

Przez zmianę napięcia zasilającego

Regulacja przez zmianę napięcia zasilającego jest stosowana bardzo rzadko i tylko w silnikach małej mocy.

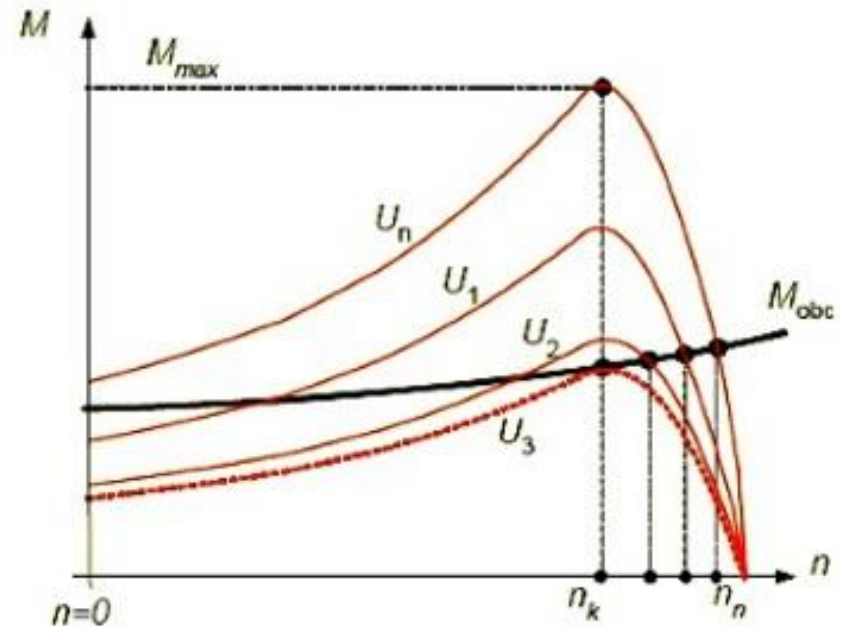
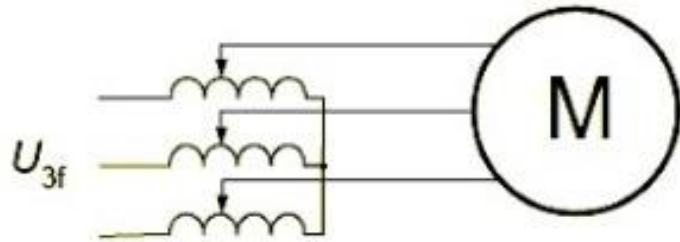
Punkty oznaczone na krzywej momentu obciążenia M_{obc} , są odpowiednio punktami pracy przy obniżonych napięciach $U_n - U_3$. Moment silnika M zmienia się proporcjonalnie do kwadratu napięcia, czyli

$$M \propto U^2$$

Jest to więc krzywa graniczna, wyznaczająca dla $M_{obc} = M_N$ zakres regulacji prędkości obrotowej w granicach $n_k - n_n$,

Oznacza to, że zakres regulacji prędkości obrotowej przez zmianę napięcia zasilającego wynosi niewiele ponad 10% poniżej prędkości znamionowej. Wadą tego sposobu regulacji prędkości obrotowej jest mały zakres regulacji; tym mniejszy im mniejsze jest obciążenie silnika, i duży spadek przeciążalności momentem.

Oprócz tego, obniżeniu napięcia U_1 przy stałej wartości momentu odpowiada wzrost prądów zarówno w obwodzie wirnika, jak i stojana, co powoduje niekorzystny wzrost strat w uzwojeniach.



Prędkość obrotową silnika indukcyjnego można regulować także, stosując układy kaskadowe lub sprzężenie mechaniczne dwóch silników oraz zasilając je z sieci w ten sposób, że momenty obrotowe tych silników mają momenty przeciwne, czyli ich strumienie magnetyczne wirują w kierunkach przeciwnych.

Obecnie stosowane są techniki półprzewodnikowe, przeznaczone do regulacji częstotliwości napięcia zasilającego.

Zmiana kierunku wirowania wirnika silnika indukcyjnego

Polega na zmianie kierunku wirowania pola magnetycznego. Kierunek wirowania pola magnetycznego zależy natomiast od kolejności następowania faz sieci trójfazowej zasilającej uzwojenie stojana silnika indukcyjnego. Zmianę kierunku wirowania wirnika silnika indukcyjnego uzyskuje się, zmieniając kolejność faz sieci zasilającej silnik. W praktyce, zmienia się kolejność przyłączenia dwóch dowolnych faz sieci zasilającej na tabliczce zaciskowej albo na wyłączniku silnika.

Praca hamulcowa silnika indukcyjnego

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

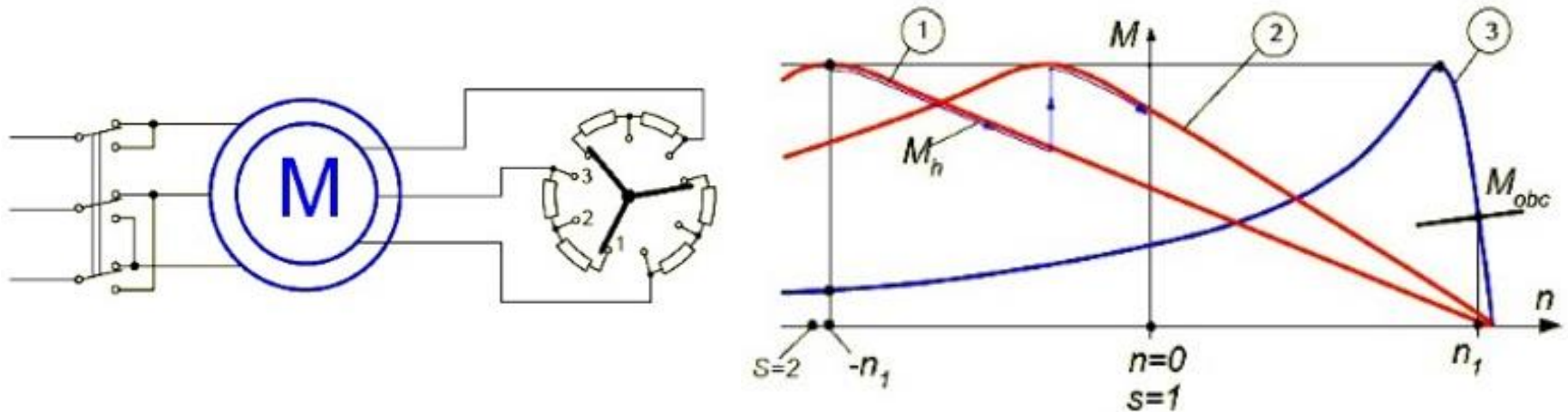
Dla silnika trójfazowego możemy zastosować jeden z trzech rodzajów hamowania:

- a) **hamowanie naturalne**, zwane także hamowaniem przeciwwłazeniowym (przeciwprądem); występuje przy prędkości wirowania przeciwnej do kierunku wirowania pola magnetycznego;
- b) **hamowanie prądnicowe** (ze zwrotem energii do sieci), zwane nadsynchronicznym, występuje przy prędkości wirnika większej od prędkości wirowania pola magnetycznego;
- c) **hamowanie dynamiczne**, czyli hamowanie prądem stałym.

Przy doborze każdego z rodzajów hamowania należy zwrócić uwagę na:

- zakresy prędkości obrotowych oraz
- charakterystykę mechaniczną silnika i urządzenia hamowanego.

Hamowanie przeciwwładceniowe (naturalne) – ma miejsce wtedy, gdy wirnik wiruje w kierunku przeciwnym do kierunku wirowania pola magnetycznego. Stan taki ma miejsce wtedy, gdy moment (M) wytworzony w silniku będzie mniejszy od od momentu hamującego (M_h) wskutek włączenia dużej rezystancji w obwód wirnika



Zmiana pozycji przełącznika powoduje zmianę kolejności faz, a zatem zmianę kierunku wytwarzanego momentu.

Aby uniknąć dużego prądu silnika, przed przełączeniem włączany jest dodatkowy rezystor w obwód wirnika, który dodatkowo pozwala na zwiększenie momentu hamującego

Hamowanie prądnicowe (hamowanie z odzyskiem energii) występuje przy prędkości wirnika większej od prędkości wirowania pola magnetycznego. Hamowanie prądnicowe może wystąpić np. przy opuszczaniu ciężaru w za pomocą silnika normalnie podnoszącego ciężar.

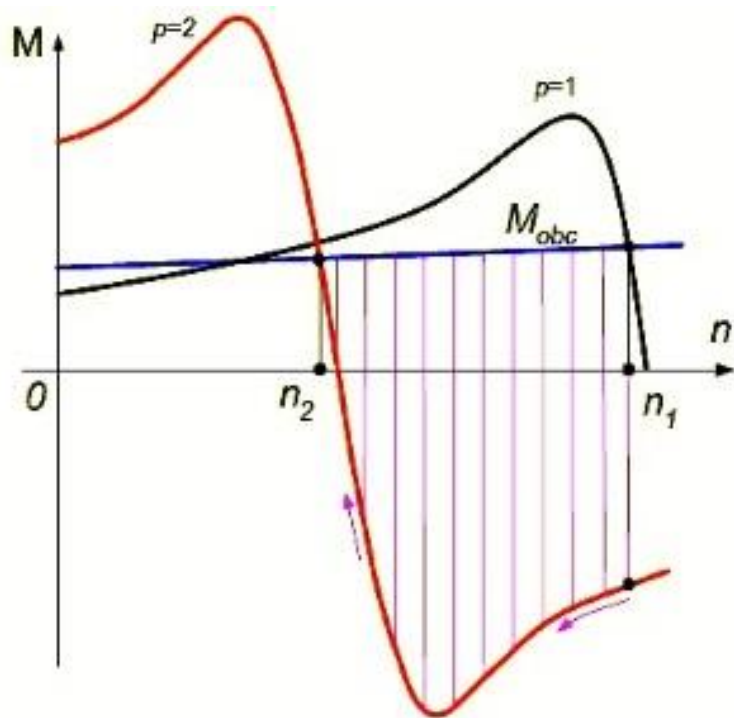
Praktyczne zastosowanie tego rodzaju hamowania polega na zamianie w silniku indukcyjnym kierunku wirowania strumienia magnetycznego, przez zamianę dwóch przewodów zasilających przyłączonych do tabliczki zaciskowej silnika. Zamieniony kierunek wirowania strumienia magnetycznego powoduje również zmianę znaku momentu M wytworzonego w silniku i wtedy zależność $M = f(n)$ ma przebieg jak na rys. 13. Moment jest równy zero, czyli maszyna wiruje synchronicznie przy prędkości n_1 .

Charakterystyki $M = f_{(n)}$ przecinają prostą M_{obc} (obrazującą obciążenie) w zakresie pracy prądnicowej przy prędkości nadsynchronicznej, ujemnej w stosunku do prędkości występujących przy podnoszeniu ciężaru. Włączając odpowiednie rezystancje w obwód wirnika, uzyskuje się odpowiednie prędkości obrotowe silnika.

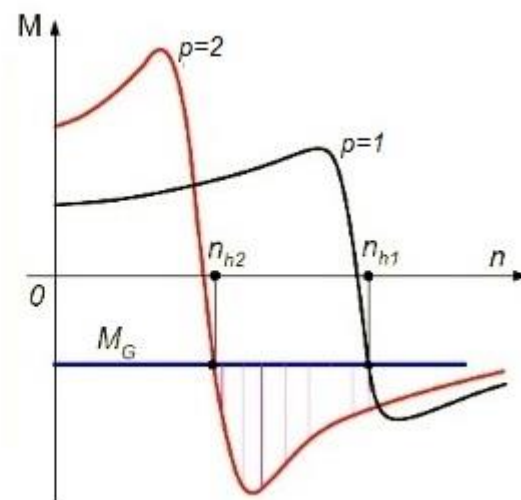
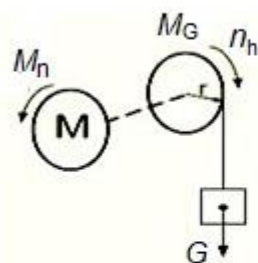
Przy hamowaniu z odzyskiem energii maszyna indukcyjna pracuje jako prądnica i przekazuje do sieci moc uzyskaną od napędzającego ją, opadającego ciężaru G . Jest to zaleta hamowania z odzyskiem energii; jego wadą jest możliwość hamowania tylko przy dużych prędkościach obrotowych.

Opuszczanie ciężaru ze stałą prędkością

- n_{h1} – silnik połączony dla $p = 1$
- n_{h2} – silnik połączony dla $p = 2$



$$M_G = G_r$$

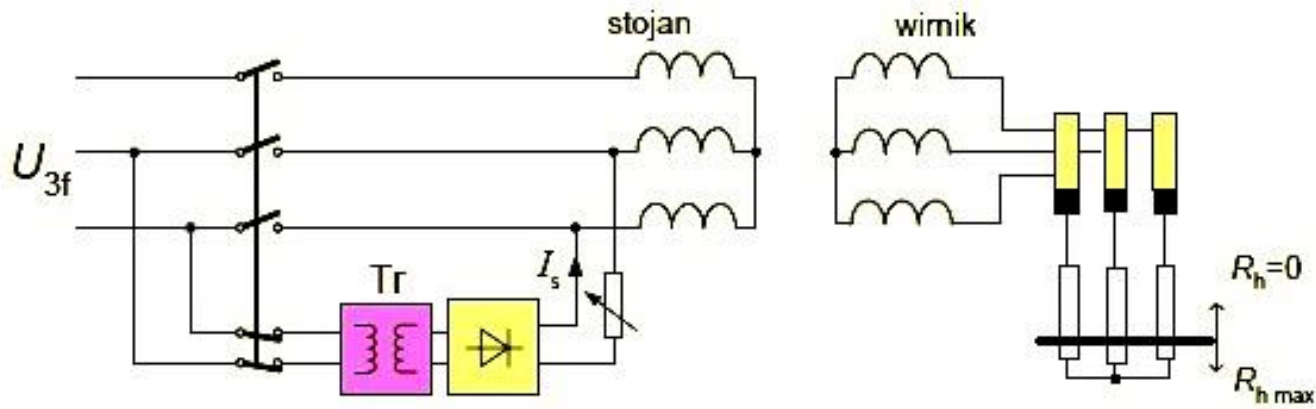


Hamowanie dynamiczne – jest to hamowanie prądem stałym, polega na odłączeniu uzwojenia stojana od napięcia sieci zasilającej, z jednoczesnym przyłączeniem zasilania uzwojeń stojana z układu prądu stałego, tak, aby wytworzyć w uzwojeniu wirnika stały strumień magnetyczny.

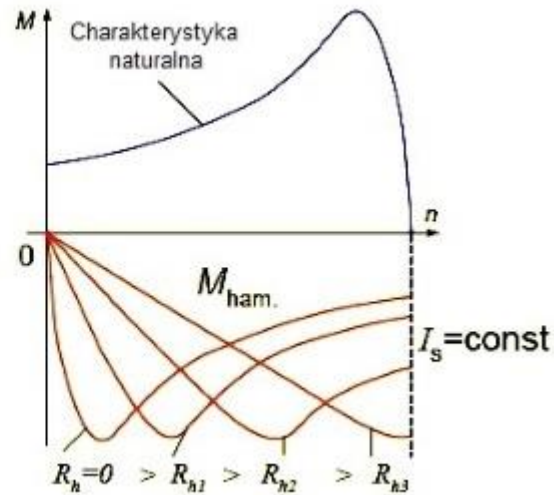
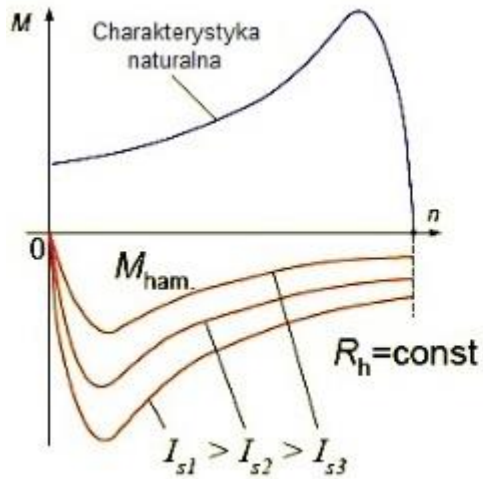
W wirniku wirującym w tym stałym polu indukują się napięcia i płyną prądy, które wytwarzają moment skierowany przeciwnie do kierunku wirowania wirnika. Wartość tego momentu można regulować zmieniając wartość prądu stałego zasilającego stojan lub włączając odpowiednią rezystancję dodatkową R_n w uzwojenie wirnika.

Przy stosowaniu hamowania dynamicznego nie można doprowadzić do całkowitego zahamowania urządzenia, gdyż przy spadku prędkości obrotowej wartość napięcia indukowanego w wirniku się zmniejsza.

Energia mechaniczna zamienia się całkowicie na ciepło w wirniku i ewentualnie połączonej z nim szeregowo rezystancji.



Hamowanie dynamiczne prądem stałym



Charakterystyki naturalne hamowania dynamicznego

Zabezpieczenia silników indukcyjnych

Silniki elektryczne wywierają istotny wpływ na sieć zasilającą, np. przetężenia prądowe przy rozruchu silników, spadki lub wahania napięć oraz znaczny pobór mocy biernej przez silniki przy biegu jałowym.

Do podstawowych zabezpieczeń silników należą:

- a) zabezpieczenie zwarciove,
- b) zabezpieczenie przeciążeniowe,
- c) zabezpieczenie od skutków obniżenia napięcia.

Jako **zabezpieczenie zwarciove** silników o napięciu nie przekraczającym 1 kV stosuje się bezpieczniki topikowe w trzech fazach lub wyzwalacze elektromagnetyczne trójfazowe. Dla silników o napięciu przekraczającym 1 kV rolę zabezpieczenia zwarciowego mogą spełniać bezpieczniki topikowe w 3 fazach w połączeniu z rozłącznikiem lub nadprądowe przekaźniki bezzwłoczne. Dla silników o mocy powyżej 2 MW i wyprowadzonych sześciu końcówkach stosuje się zabezpieczenie różnicowe wzdłużne w dwóch fazach. Silniki o mocy powyżej 1 MW wyposaża się w zabezpieczenie od zwańc doziemnych, zasilane z przekładnika Ferrantiego.

Prąd znamionowy wkładek bezpiecznikowych do zabezpieczenia silników prądu przemiennego dobiera się wg zależności:

$$I_{bn} \geq \frac{I_{rs}}{\alpha} = \frac{k_r I_{ns}}{\alpha}$$

$$I_{bn} > I_{ns}$$

w których:

I_{rs} — prąd rozruchowy silnika, w A;

I_{ns} — prąd znamionowy silnika, w A;

k_r — krotność prądu rozruchowego;

α — współczynnik rozruchowy (w przeciętnych warunkach równy 2 dla wkładek o działaniu szybkim i 2,5 dla wkładek o działaniu zwłocznym).

Wyzwalacze lub przekaźniki elektromagnetyczne stanowiące zabezpieczenie zwarciovie silnika nastawia się na prąd:

$$I_{we} \leq 1,2 \cdot I_{rsmax}$$

gdzie:

I_{rsmax} — największy prąd rozruchowy silnika.

Jako **zabezpieczenie przeciążeniowe** silników o napięciu do 1 kV stosuje się **wyzwalacze** lub **przełączniki cieplne** oraz czujniki temperatury. Dla silników o napięciu znamionowym ponad 1 kV stosuje się zabezpieczenie nadprądowe zwłoczne.

Zabezpieczenia zwarciove silnika powinny być stosowane w trzech fazach w układach trójfazowych, natomiast w układach prądu stałego w dwu lub jednym biegunie, jeżeli drugi jest uziemiony.

Nie należy stosować zabezpieczeń zwarciowych w obwodach wzbudzenia.

Każdy silnik powinien mieć zabezpieczenie zwarciove oddzielne. Dopuszcza się zabezpieczenie zwarciove wspólne dla grupy silników, tak dobrane, aby w przypadku zwarcia w jednym z silników zadziałało zabezpieczenie grupowe.

Zabezpieczenia przeciążeniowe powinien posiadać każdy silnik za wyjątkiem:

- a) silników o prądzie znamionowym mniejszym niż 4 A,
- b) silników o mocy nie przekraczającej 10 kW dla pracy ciągłej, których przeciążenie jest mało prawdopodobne (pompy, wentylatory),
- c) silników stanowiących zespół z transformatorem posiadającym własne zabezpieczenie,
- d) silników do pracy przerywanej, których zabezpieczenie czujnikami temperatury nie jest gospodarczo uzasadnione.

W układach trójfazowych z uziemionym punktem neutralnym zabezpieczenia przeciążeniowe stosuje się w 3 fazach, bez uziemionego punktu naturalnego w 2 fazach.

Zabezpieczenia przeciążeniowe nastawia się na prąd nie większy niż $1,1 I_{ns}$.

Zabezpieczenie od nadmiernego obniżenia się napięcia realizowane jest jako ponadnapięciowe zwłoczne jedno – lub dwufazowe. Zabezpieczenie to należy stosować, gdy:

- a) obniżenie napięcia uniemożliwia pracę silnika,
- b) niepożądany jest samorozruch silnika zwartego, niedopuszczalny jest samorozruch silnika pierścieniowego,
- c) wskazane jest odłączenie pewnej liczby mniej ważnych silników w celu zabezpieczenia samorozruchu innym silnikom.

Układ dwóch przekaźników podnapięciowych, włączonych na napięcia międzyprzewodowe, jest stosowany do zabezpieczenia grupy silników lub silnika o dużej ważności z punktu widzenia procesu technologicznego. Układ z jednym przekaźnikiem podnapięciowym należy stosować do zabezpieczania pojedynczych silników o mniejszym znaczeniu

Silniki indukcyjne specjalne

Silniki o budowie specjalnej, wywodzące się z przekształcenia silnika indukcyjnego, charakteryzują się parametrami technicznymi wpływającymi na ich właściwości ruchowe i użytkowe oraz dostosowującymi je do różnorodnych wymagań i zastosowań. Praktycznie, inne wymagania stawia się silnikom jednofazowym powszechnie stosowanym do urządzeń gospodarstwa domowego, inne – silnikom przeznaczonym do napędu urządzeń o ciężkim rozruchu, a jeszcze inne – silnikom pracującym jako elementy wykonawcze w układach automatyki.

Wśród wybranych silników indukcyjnych o budowie specjalnej można wyróżnić:

silniki wielobiegowe – prędkość obrotową silnika zmienia się za pomocą zmiany liczby par biegunów wirującego pola magnetycznego;

silniki klatkowe o zwiększonym momencie rozruchowym – stosuje się do napędu urządzeń o dużym momencie bezwładności lub dużym momencie obrotowym hamującym;

silniki dźwigowe klatkowe i pierścieniowe – przystosowane do różnych rodzajów pracy, służą do napędu dźwignic;

silniki samohamujące – stosowane w napędach wymagających szybkiego zatrzymania po cyklu pracy lub po awaryjnej przerwie zasilania;

silniki o zwiększonym poślizgu – stosowane do napędu urządzeń współpracujących z kołem zamachowym;

silniki przeciwwybuchowe – stosowane w pomieszczeniach lub przestrzeniach zagrożonych wybuchem;

silniki o budowie ognioszczelnej – mogą zawierać elementy iskrzące podczas pracy;

silniki o budowie wzmocnionej – nie mogą zawierać części iskrzących, a ich uzwojenia przy największym prądzie w czasie pracy lub podczas stanu awaryjnego – nie mogą do chwili ich odłączenia osiągnąć temperatury wyższej niż dopuszczalna dla danej klasy temperaturowej;

silniki z osłoną gazową z nadciśnieniem – mają obudowy szczelne, napełnione czystym powietrzem lub gazem ochronnym obojętnym (np. azotem) pod ciśnieniem wyższym o co najmniej 50 Pa niż ciśnienie w otaczającym środowisku;

silniki o zwiększonej częstotliwości – są stosowane albo w celu uzyskania prędkości obrotowej większej niż 3000 obr/min, albo w celu zmniejszenia masy układu napędowego;

silniki liniowe płaskie – są przeznaczone do napędu urządzeń transportowych (wózków, przenośników taśmowych, suwnic), do bezpośredniego przemieszczania elementów stalowych, a także do napędu pojazdów trakcyjnych szynowych i bezszynowych;

silniki pierścieniowe synchronizowane – służą do napędu ściereków w papierniach, młynów kulowych w cementowniach i innych urządzeń o trudnych warunkach rozruchowych;

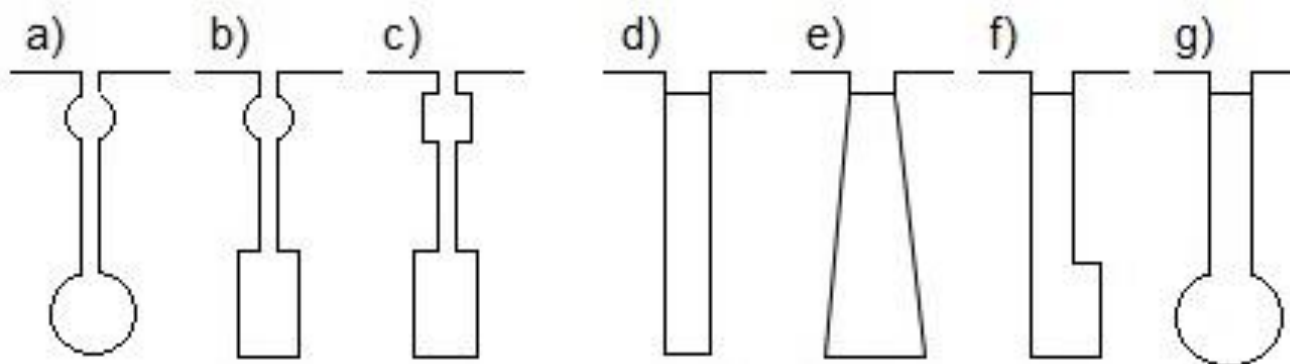
silniki do wbudowania – nie mają własnej obudowy ani własnego wału. Uzwojony rdzeń stojana i wirnika jest wmontowany w maszynę współpracującą;

silniki kołnierzowe niskiego napięcia – o wale pionowym lub poziomym o parametrach jak silniki wykonania podstawowego;

silniki cichobieżne – są przeznaczone do napędu urządzeń w środowisku, w którym jest wymagany niski poziom hałasu.

Silniki indukcyjne dwuklatkowe i głębokoźłobkowe

Rozwiązania konstrukcyjne silników indukcyjnych dwuklatkowych i głębokoźłobkowych łączą do pewnego stopnia zalety silników indukcyjnych pierścieniowych i klatkowych. W silnikach dwuklatkowych stosuje się odpowiednio wykonane uzwojenie wirnika o kształcie żłobka składającego się z dwóch klatek; klatki zewnętrznej nazywanej **klatką rozruchową** i klatki wewnętrznej – **klatką roboczą**. W silnikach głębokoźłobkowych pręty wirnika mają znacznie większą wysokość niż szerokość (stosunek 10 – 15).



Najczęściej spotykane kształty żłobków silnika indukcyjnego:

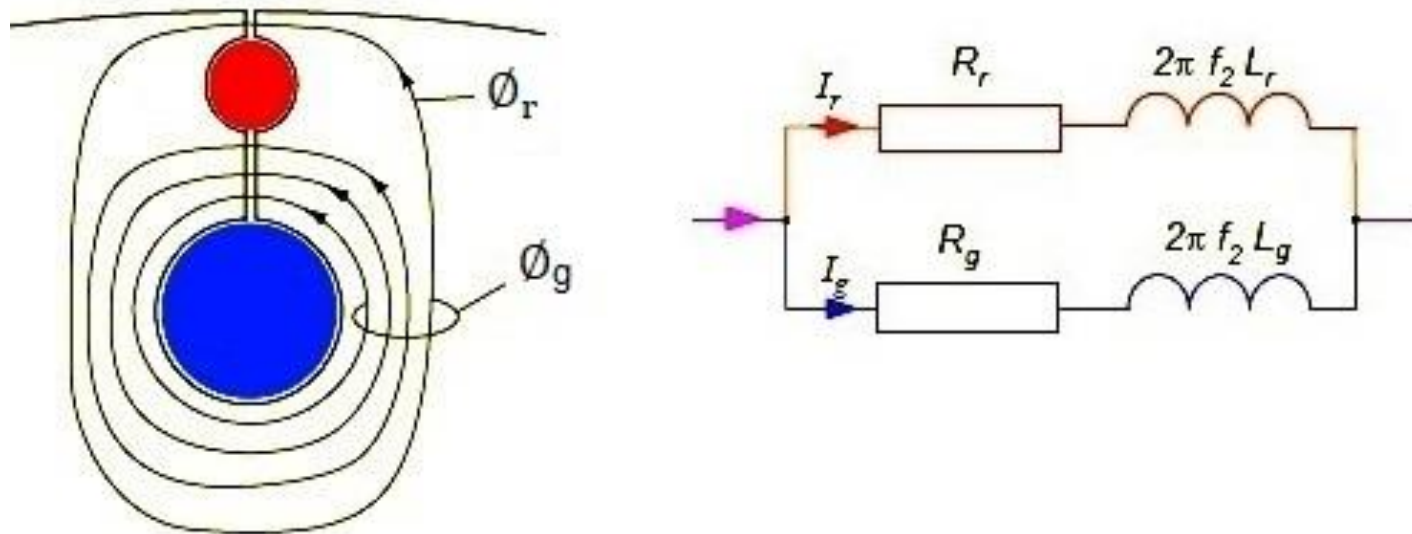
a), b), c) – z wirnikiem dwuklatkowym

d), e), f), g) – z wirnikiem głębokoźłobkowym

Silniki indukcyjne dwuklatkowego

Klatka rozruchowa silnika dwuklatkowego składa się z prętów mosiężnych o małym przekroju i dużej rezystancji R_r . natomiast klatka robocza – z prętów wykonanych z miedzi o dużym przekroju i małej rezystancji R_g . Klatki rozruchowa i robocza mogą być zwarte pierścieniami wspólnymi, jeżeli pręty są wykonane z takich samych materiałów. albo pierścieniami oddzielnymi, jeżeli pręty wykonane są z różnych materiałów (ze względu na występujące odkształcenia termiczne).

Jeżeli przez pręty klatek płynie prąd, to wokół prętów indukują się strumienie magnetyczne rozproszone Φ_r i Φ_g . Ze względu na ukształtowanie obwodu magnetycznego wokół klatki roboczej, o małej reaktancji rozproszenia, zamyka się więcej linii pola magnetycznego, niż wokół klatki rozruchowej o dużej reaktancji rozproszenia. Wynika stąd, że reaktancja rozproszenia klatki roboczej X_g jest znacznie większa od reaktancji rozproszenia klatki rozruchowej X_r .

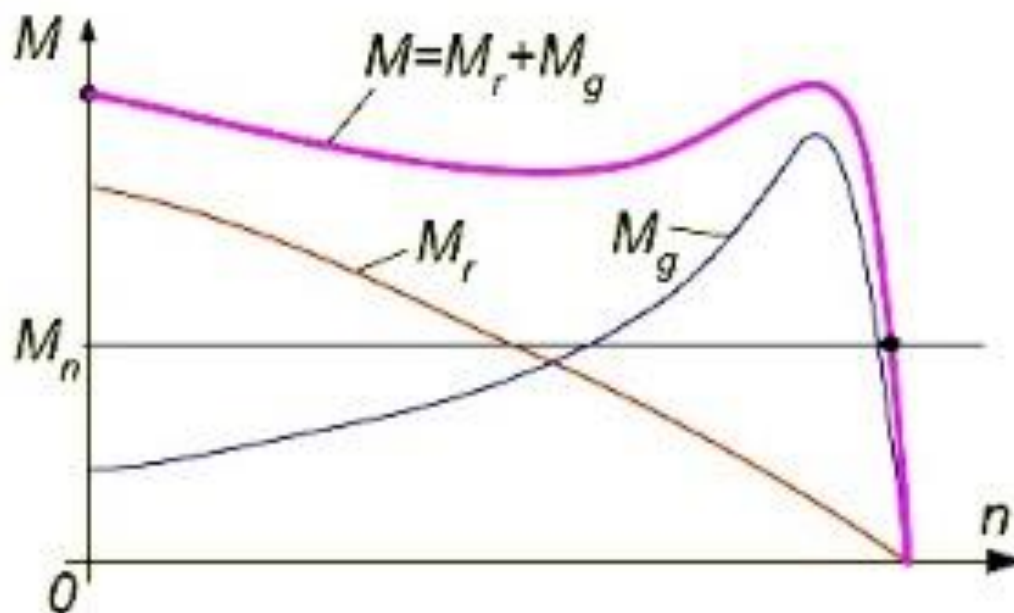


Przekrój prętów wirnika silnika dwuklatkowego, rozkład linii pola magnetycznego rozproszonego, schemat zastępczy, przy czym: $R_r > R_g$ oraz $X_r < X_g$

Parametry silnika indukcyjnego dwuklatkowego w czasie rozruchu i podczas pracy znamionowej są następujące:

- 1) W pierwszej chwili rozruchu**, gdy poślizg $s = 1$, częstotliwość $f_2 = 50$ Hz reaktancja (X_g) klatki roboczej jest duża i płynie bardzo mały prąd w porównaniu z tym, jaki płynie przez klatkę rozruchową o stosunkowo małej reaktancji (X_r), a prąd płynący przez pręty klatki rozruchowej jest dużo większy od prądu w klatce roboczej: $I_r \gg I_g$;
- 2) W początkowej fazie pracy silnika** – działanie klatki roboczej można pominąć i przyjąć, że prąd płynie tylko przez klatkę rozruchową o dużej rezystancji R_r (podobnie jak włączenie na czas rozruchu dodatkowej rezystancji w obwód wirnika silnika pierścieniowego);
- 3) Po rozruchu** – ze wzrostem prędkości obrotowej poślizg silnika maleje ($s = 0,02 - 0,05$), częstotliwość $f_2 = 1 - 3$ Hz, reaktancje klatek – roboczej i rozruchowej – są bardzo małe i mogą być pominięte. Prąd płynący przez pręty klatki rozruchowej jest dużo mniejszy od prądu w klatce roboczej: $I_r \ll I_g$. Można przyjąć, że prąd płynie praktycznie przez pręty klatki roboczej o małej rezystancji (R_g). Widać więc, że w czasie rozruchu przy dużych poślizgach występuje wypieranie prądu do klatki rozruchowej, natomiast przy małych poślizgach zjawisko to nie występuje.

Charakterystyka mechaniczna silnika dwukłatkowego przedstawia moment wypadkowy silnika (M) w funkcji prędkości obrotowej (n), składającą się z sumy momentów: rozruchowego (M_r) i momentu roboczego (M_g).



Silniki głębokoźłobkowe

Jeżeli przez pręt umieszczony w żłobku wirnika płynie prąd przemienny, to powstaje strumień magnetyczny rozproszenia Φ_r

Dolne warstwy pręta są skojarzone ze znacznie większym strumieniem rozproszenia niż warstwy górne, stąd dolne warstwy mają znacznie większą reaktancję niż warstwy górne.

Podobnie jak w silnikach dwukłatkowych, przy dużych wartościach poślizgu różnica ta jest większa.

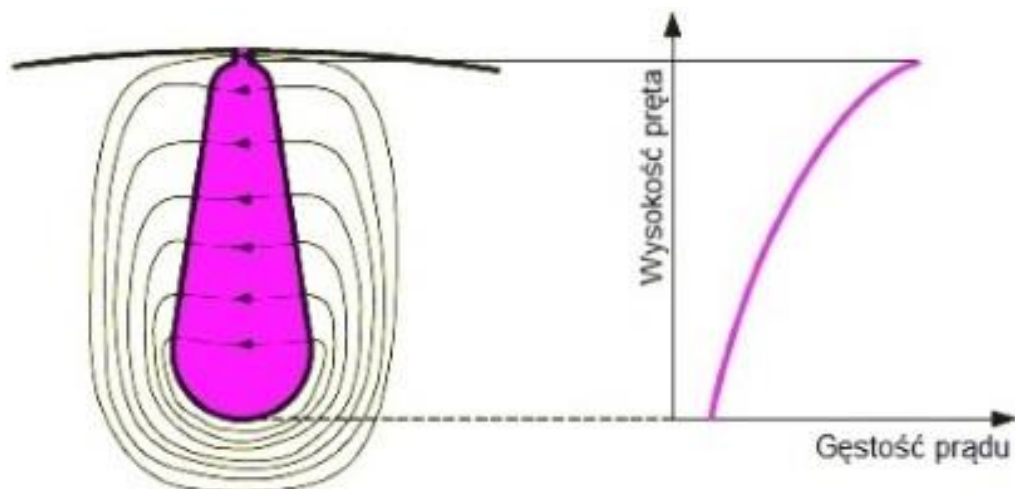
Przy rozruchu silnika głębokoźłobkowego o wartości prądu decyduje reaktancja i dlatego prąd płynie głównie w górnej warstwie.

Rozkład gęstości prądu wzdłuż wysokości żłobka przedstawia się następująco:

- a) w chwili rozruchu ($s = 1$); $f_2 = sf_1$ to $f_2 = f_1$; ($X_r \gg R_r$);
- b) podczas pracy znamionowej ($s = 0,03$); $f_2 = sf_1$ to $f_2 = 0,03f_1$; ($X_g \ll R_g$).

Podczas rozruchu silnika przez warstwy głębiej położone w żłobku płynie mały prąd, a przez warstwy górne – duży.

Przy prędkościach znamionowych gęstość prądu jest praktycznie taka sama na całej wysokości pręta.



Wypieranie prądu w żłobku wirnika powoduje pozorne zmniejszenie przekroju pręta dla przepływu prądu, a więc zwiększenie jego rezystancji. Przy prędkości bliskiej prędkości synchronicznej poślizg jest mały i wówczas częstotliwość prądu wirnika oraz reaktancja wirnika są małe.

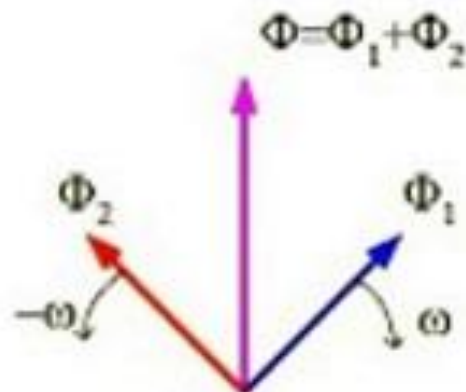
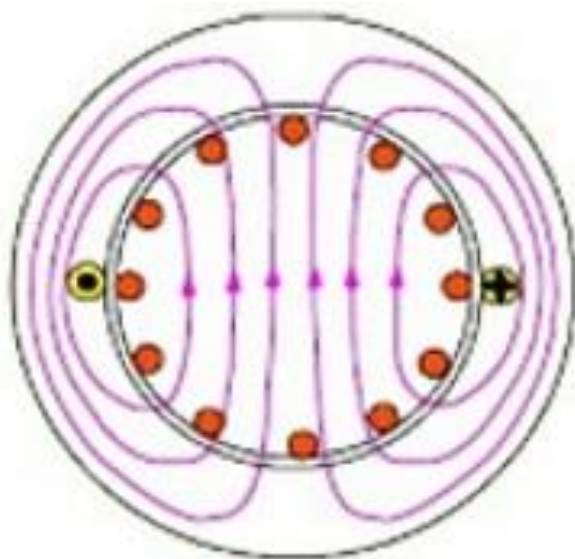
Zjawisko wypierania prądu w tym stanie pracy maszyny praktycznie nie występuje, prąd płynie równomiernie przez cały przekrój pręta, dzięki czemu rezystancja jest znacznie mniejsza niż w czasie rozruchu.

Do zalet silnika głębokożłobkowego można zaliczyć:

- prostszą obsługę względem silnika pierścieniowego, przy zachowaniu podobnych wartości,
- większy moment rozruchowy względem silnika klatkowego.

Silniki indukcyjne jednofazowe

Silniki indukcyjne jednofazowe są to silniki o wirniku klatkowym i skupionym lub rozłożonym uzwojeniu stojana przeznaczonym do zasilania z sieci jednofazowej. Znajdują one szerokie zastosowanie w napędach elektrycznych urządzeń gospodarstwa domowego, urządzeń technologicznych małej mocy w przemyśle i w rolnictwie, a także w pomocniczych napędach przemysłowych.

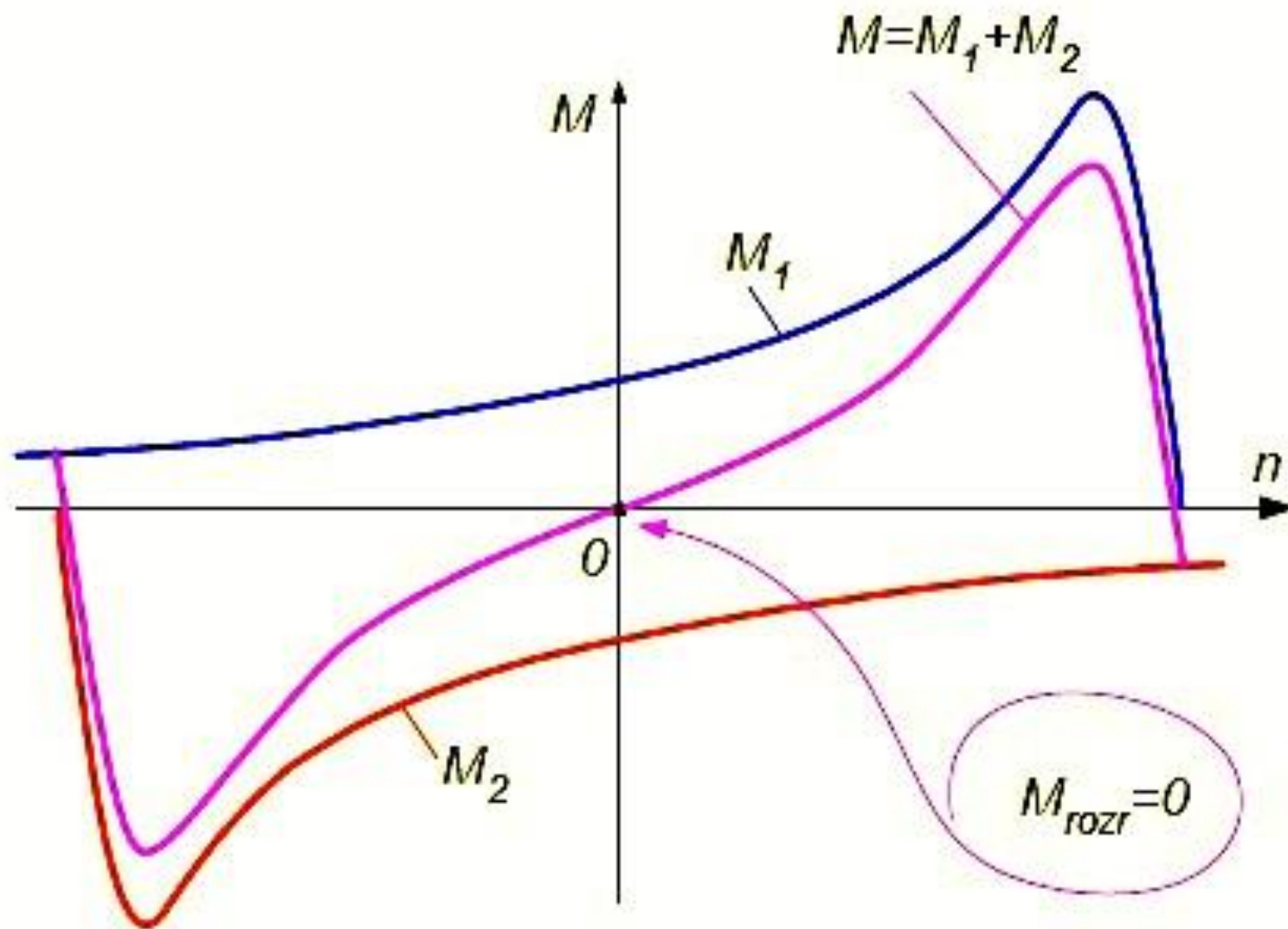


Prąd przemienny doprowadzony do jednofazowego uzwojenia stojana wytwarza pulsujące pole magnetyczne Φ , nieruchome w przestrzeni, które można rozłożyć na dwa pola kołowe Φ_1 i Φ_2 , wirujące w przeciwnych kierunkach, stąd:

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2$$

Pola magnetyczne Φ_1 i Φ_2 indukują w uzwojeniu wirnika siły elektromotoryczne, pod wpływem których w uzwojeniach wirnika płyną prądy. W konsekwencji klatka wirnika wytworza również dwa pola magnetyczne wirujące w przeciwnych kierunkach.

W wyniku oddziaływania pól magnetycznych stojana z polami magnetycznymi wirnika wytworzone zostają dwa momenty składowe M_1 i M_2 . Suma tych momentów daje charakterystykę momentu elektromagnetycznego M silnika indukcyjnego jednofazowego



Silnik indukcyjny jednofazowy może być traktowany jak dwa silniki wielofazowe pracujące na wspólnym wale, których strumienie wirują w kierunkach przeciwnych. Aby uzyskać moment rozruchowy, praktyczne konstrukcje silników jednofazowych są wyposażane w dodatkowe uzwojenia rozruchowe, połączone szeregowo z kondensatorami.

Silniki indukcyjne jednofazowe małej mocy budowane są najczęściej jako silniki:

- a) ze zwartą fazą pomocniczą, o polu magnetycznym wzbudzonym przez prąd w cewce lub w cewkach skupionych, osadzonych na biegunach wydających;
- b) o polu magnetycznym wzbudzonym przez prąd w uzwojeniach rozłożonych, umieszczonych w żłobkach;
- c) z fazą rozruchową rezystancyjną; w stojanie umieszcza się uzwojenie dwufazowe (dzielone w odpowiednim stosunku na fazę główną i fazę rozruchową).

Silniki indukcyjne liniowe

Silniki indukcyjne specjalne charakteryzują się przede wszystkim wybraną konstrukcją budowy, dobranymi parametrami technicznymi i użytkowymi oraz względami bezpieczeństwa.

W silniku indukcyjnym liniowym następuje przemiana energii elektrycznej w energię mechaniczną ruchu postępowego – bez pośrednictwa innych mechanizmów. Dzięki temu unika się budowy kosztownych przekładni zębatych oraz poprawia właściwości dynamiczne.

Silniki liniowe dzielą się na:

- prądu stałego,
- indukcyjne,
- synchroniczne, w tym reluktancyjne i krokowe (skokowe),
- elektromagnetyczne,
- o ruchu drgającym (wibratory).

Z silnikiem indukcyjnym liniowym są związane określenia podstawowe, takie jak:

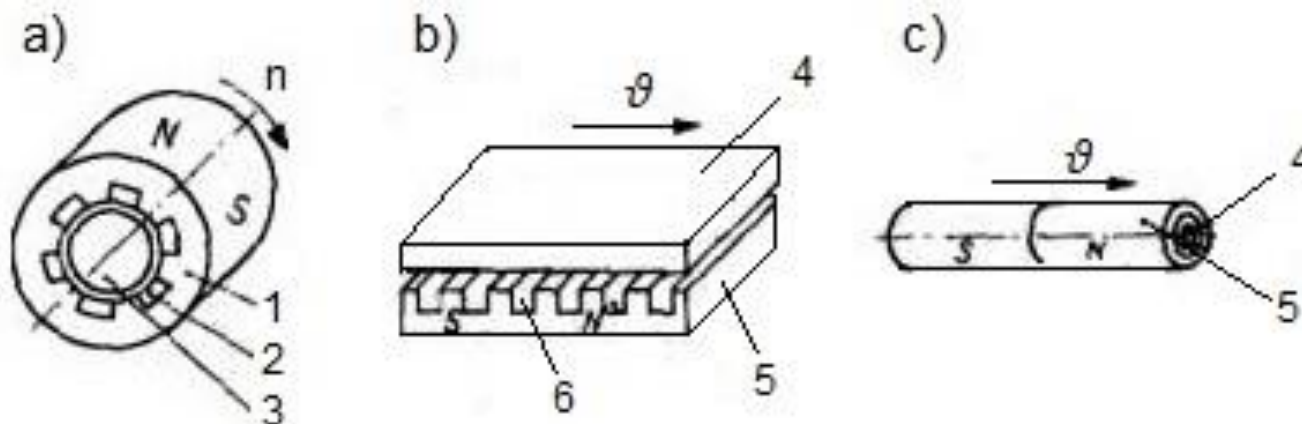
część pierwotna – część lub części silnika względem siebie nieruchome, których co najmniej jedno posiada uzwojenie zasilane z sieci;

część wtórna – część silnika, w której indukują się prądy wywołane strumieniem magnetycznym wzbudzającym w części pierwotnej;

bieżnia (bieżnik) – element silnika konieczny do utrzymania siły ciągu F .

Rozróżnia się następujące rodzaje silników indukcyjnych liniowych:

- a) **jednostronny** – część pierwotna oddziałuje na część wtórną tylko z jednej strony;
- b) **dwustronny** – dwie części pierwotne oddziałują na część wtórną z obu jej stron;
- c) **pojedynczy** – o jednej części pierwotnej;
- d) **podwójny** – dwie lub więcej części pierwotnych oddziałują na jedną część wtórną;
- e) **płaski** – powierzchnie aktywne są płaskie w kształcie prostokąta;
- f) **łukowy** – powierzchnia aktywna lub powierzchnie aktywne jednej części jest powierzchnią walcową, a drugiej części – wycinkiem powierzchni walcowej;
- g) **tubowy** – powierzchnia aktywna cylindryczna;
- h) **pompa liniowa indukcyjna** – częścią wtórna jest metal ciekły nieferromagnetyczny.



Idea budowy silnika indukcyjnego liniowego

a) silnik cylindryczny, b) silnik liniowy płaski, c) silnik tubowy

Oznaczenia:

1 – stojan, 2 – uzwojenie stojana, 3 – wirnik, 4 – bieżnik, 5 – induktor,
 6 – uzwojenie induktora

Część pierwotna silnika liniowego zbudowana jest z pakietu blach w formie grzebienia, z uzwojeniem trójfazowym (rozwinięty stojan maszyny wirującej), natomiast część wtórną stanowi ferromagnetyczna warstwa przewodząca (z miedzi lub aluminium), spełniająca rolę klatki.

Zasada działania silnika indukcyjnego liniowego

W wyniku przekształcenia silnika wirującego w liniowy nastąpiło przejście od pola magnetycznego wirującego do pola magnetycznego wędrującego – wzdłuż induktora. Droga magnetyczna, wzdłuż której wiruje pole magnetyczne, jest w silniku wirującym zamknięta, natomiast w silniku liniowym ma swój początek, gdzie pole powstaje, oraz koniec, gdzie pole zanika.

W silniku tym występuje działanie dynamiczne pola indukcji magnetycznej wzbudzonej w jednej części silnika na prądy indukowane w układzie elektrycznym części drugiej. W wyniku tego działania następuje ruch jednej części względem drugiej, z prędkością mniejszą od prędkości przemieszczania się pola indukcji. Jeżeli w wytworzonym strumieniu magnetycznym zostanie umieszczony bieźnik (płyta o dużej przewodności elektrycznej, np. z miedzi lub aluminium), to zaindukowane w nim prądy, współdziałając ze strumieniem magnetycznym, spowodują powstanie siły ciągu (F), skierowanej w kierunku ruchu strumienia (wzdłuż pakietu induktora). W następstwie działania siły (F) postaje ruch silnika względem bieźnika. Zmianę kierunku siły ciągu (F) uzyskuje się przez zmianę kolejności faz.

Silniki liniowe pracują na ogół przy prędkości wynoszącej zaledwie 10 – 15% prędkości synchronicznej. Prędkość silnika reguluje się zwykle przez zmianę wartości siły ciągu (F), uzyskanej przez zmianę wartości napięcia zasilania (U_1) lub wielkości szczeliny powietrznej między silnikiem a bieżnią.

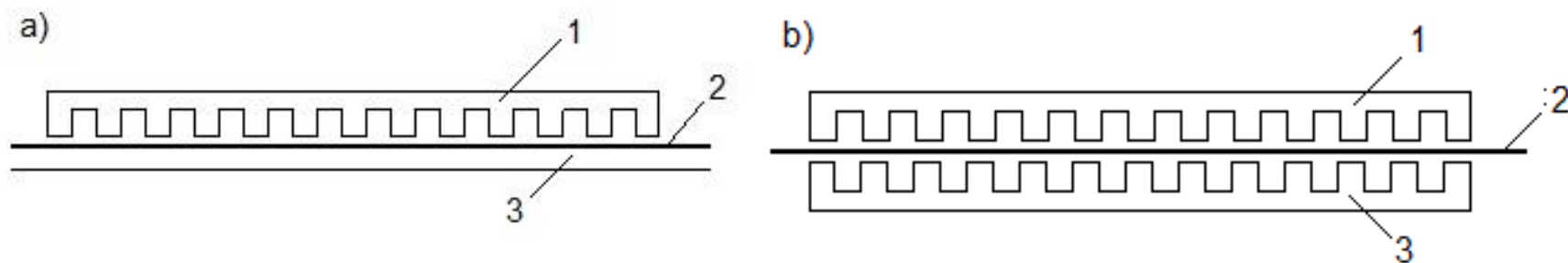
Zmianę wartości napięcia uzyskuje się przez zastosowanie dodatkowych urządzeń, np.: transformatorów regulacyjnych, układów tyrystorowych, impulsatorów, dławików, lub zasilanie układu napięciem o regulowanej częstotliwości.

Polepszenie parametrów pracy silnika indukcyjnego liniowego może zapewnić umieszczona za płytą (za bieżnikiem) zwora wykonana z materiału o dobrej przewodności magnetycznej, przyciągana ze znaczną siłą (F) przez uzwojony pakiet, lub bliźniaczy silnik linowy umieszczony z drugiej strony płyty w miejsce zwory, który zapewni ponad dwukrotnie zwiększoną siłą ciągu (F).

Silniki indukcyjne liniowe płaskie

Silniki liniowe płaskie mogą być budowane w wielu odmianach. Najczęściej są to silniki z jednostronnym lub dwustronnym induktorem. W płaskim pakiecie żłobków induktora (w rdzeniu części pierwotnej) jest rozłożone uzwojenie wielofazowe, wytwarzające pole magnetyczne wędrujące.

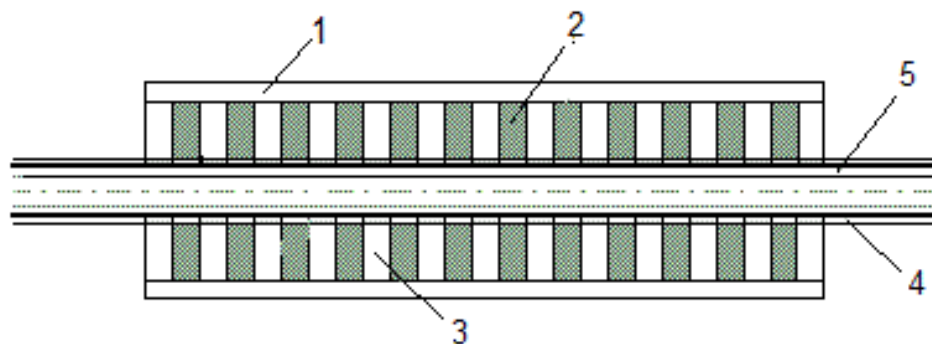
W silniku jednostronnym warstwa przewodząca części wtórnej spełnia funkcję rdzenia i uzwojenia, a w silniku dwustronnym jest to tylko uzwojenie wykonane z blachy lub taśmy z materiału przewodzącego.



Schemat budowy silnika indukcyjnego liniowego płaskiego:
a) z jednostronnym induktorem, b) z dwustronnym induktorem
Oznaczenie: 1 – induktor (rdzeń części pierwotnej), 2 – bieźnik (warstwa przewodząca części wtórnej), 3 – rdzeń ferromagnetyczny części wtórnej

Silnik liniowy tubowy

W silnikach tubowych część pierwotną i część wtórną stanowią cylindry ustawione względem siebie współosiowo. Część wtórna jest umieszczona wewnątrz części pierwotnej silnika. Wytworzone w cylindrze części pierwotnej pole magnetyczne porusza się w kierunku osiowym, pociągając za sobą nieuzwojoną, ferromagnetyczną część wtórną. Zwiększenie siły ciągu F silnika tubowego można uzyskać np. przez pokrycie rdzenia części wtórnej warstwą o dobrej przewodności elektrycznej.



Budowa i zasada działania silnika liniowego tubowego

Oznaczenia: 1 – rura ferromagnetyczna, 2 – pierścieniowe cewki uzwojenia pierwotnego, 3 – pierścienie ferromagnetyczne, 4 – warstwa przewodząca części wtórnej, 5 – rdzeń ferromagnetyczny części wtórnej.

Obecnie stosuje się wiele innych odmian silników o ruchu złożonym. Silniki liniowe tubowe mają szerokie zastosowanie w automatyce, w napędach maszyn specjalnych, w trakcji elektrycznej, do napędu: suwnic, drzwi przesuwanych, wyłączników, zaworów, maszyn i urządzeń w transporcie zakładowym itp.

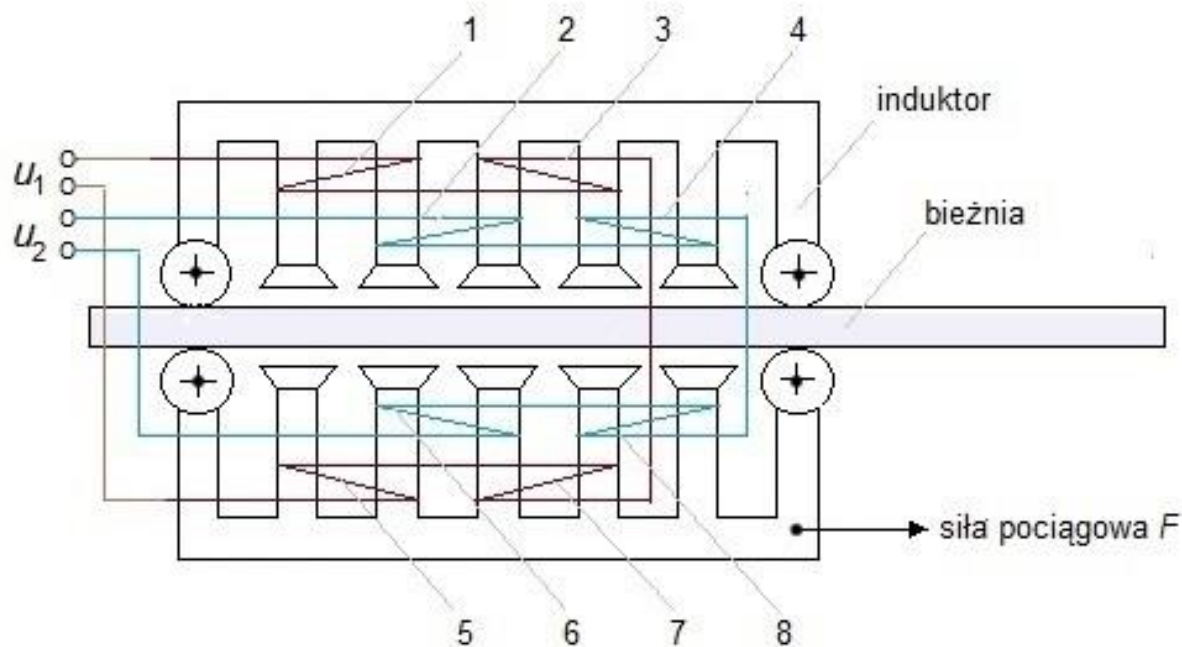
Stosowane są również do wykonywania określonych operacji, takich jak.:

- przesuwanie i podnoszenie bram, drzwi, ruchomych regałów, pokryw, pojemników;
- przerzucanie rozjazdów szynowych, dźwigni wyłączników;
- zaciskanie obrabianych elementów;
- dozowanie materiałów sypkich i płynnych.

Liniowy napęd bezpośredni realizowany przez silniki liniowe wykorzystywany jest również w obrabiarkach numerycznych i maszynach specjalnych.

Silniki indukcyjne liniowe dwufazowe

W silnikach tych część ruchomą stanowi induktor złożony z dwóch współpracujących części, pomiędzy którymi znajduje się aluminiowy bieżnik. Cewki o numerach nieparzystych są połączone szeregowo, zasilane napięciem (u_1) o stałej amplitudzie (U_1). Cewki o numerach parzystych, też są połączone szeregowo, zasilane napięciem (u_2) o amplitudzie (U_2) przesuniętym w fazie o 90° .



Przy większej liczbie kolumn i uzwojeń induktora strumienie magnetyczne poszczególnych kolumn (poza skrajnymi kolumnami) pozostają przesunięte względem siebie kolejno o 90° . Otrzymane pole magnetyczne przesuwa się względem induktora z prędkością synchroniczną:

$$v_s = 2fT_p$$

przy czym:

f – częstotliwość sieci (zwykle 50 Hz);

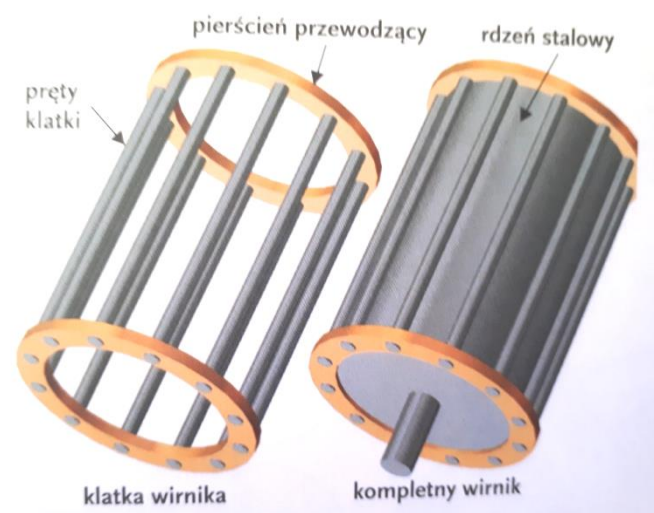
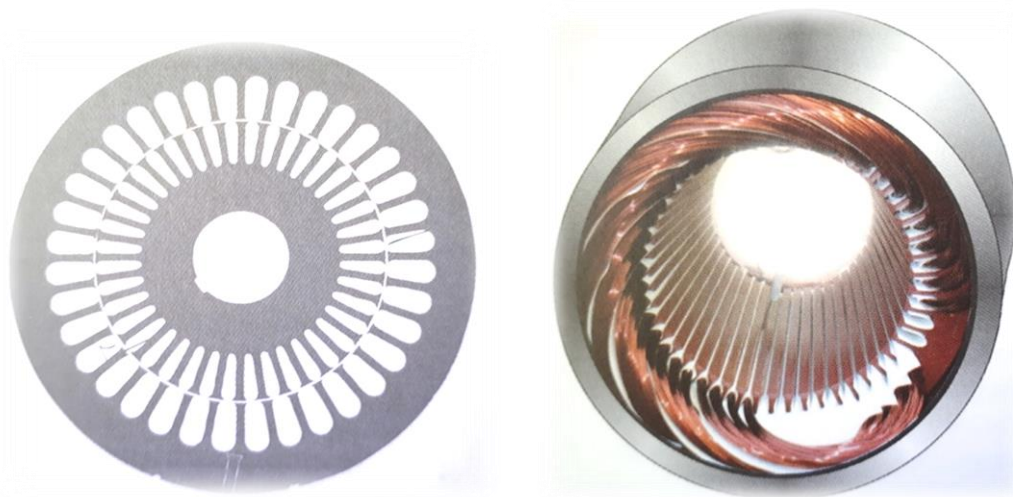
T_p – długość podziałki biegunowej, w metrach (w przypadku uzwojenia dwufazowego równa podwójnej odległości między kolumnami).

Prędkość liniowa nie zależy od ilości par biegunów. W napędach pojazdów szynowych stosuje się podobne silniki trójfazowe.

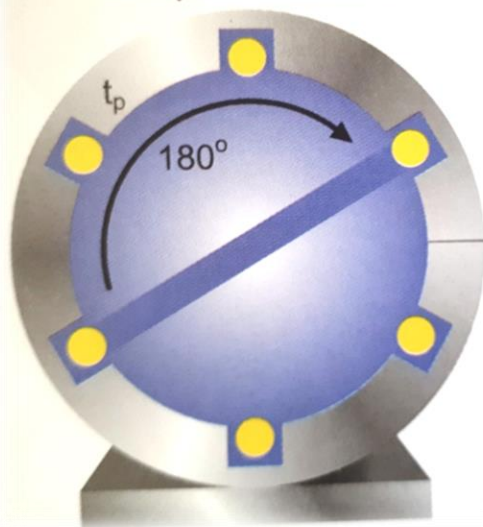
Małe silniki są wykonywane z induktorem jednoczęściowym. Bieżnia w nich musi mieć podłoże magnetyczne, po przeciwnej stronie niż induktor oraz szczególnie staranne powinno być łożyskowanie – ze względu na duże siły przyciągania do bieżni.

W silnikach bardzo małej mocy część rozruchową stanowią induktory o wielu kolumnach i induktorach wytwarzających pole, w których przesuwa się aluminiowa lub miedziana płytka.

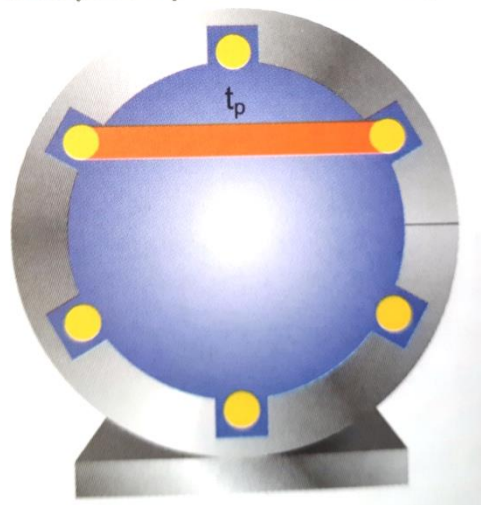
Właściwości dynamiczne silnika liniowego są analogiczne jak dla zwykłego silnika obrotowego



uzwojenie średnicowe

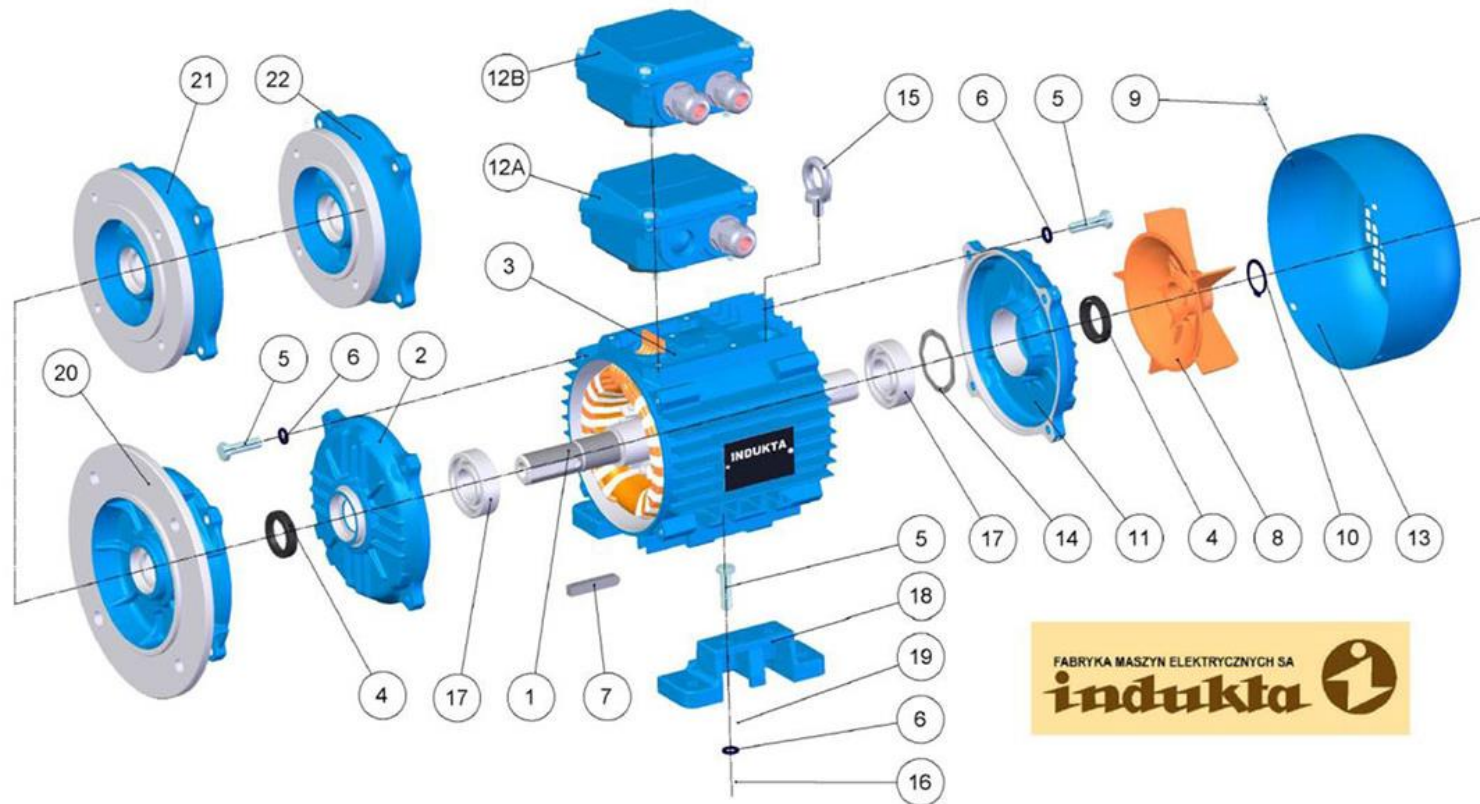


uzwojenie z poskokiem skróconym



Części składowe silnika elektrycznego

SILNIK INDUKCYJNY 3-FAZOWY KLATKOWY Z PRZEWIETRZNIKIEM WŁASNYM TEFC/IC 411



Nr.	Nazwa części	Nr.	Nazwa części	Nr.	Nazwa części	Nr.	Nazwa części	Nr.	Nazwa części
1	Wimik	6	Podkładka sprężysta	11	Tarcza łożyskowa P	15	Śruba z uchem	20	Tarcza kołnierзова B5
2	Tarcza łożyskowa N	7	Wpust	12A	Skrzynka zaciskowa 1 dławica	16	Nakrętka	21	Tarcza kołnierзова B14 C1
3	Stojan	8	Przewietrznik	12B	Skrzynka zaciskowa 2 dławice	17	Łożysko	22	Tarcza kołnierзова B14 C2
4	Pierścień uszczelniający	9	Wkręt	13	Oslona przewietrznika	18	Łapa	23	
5	Śruba	10	Pierścień osadczy	14	Podkładka falista	19	Podkładka zwykła	24	

Do oglądnięcia:

[Silnik indukcyjny w akcji](#)

[Trójfazowe asynchroniczne silniki elektryczne w korpusach żeliwnych](#)

Dziękuję za uwagę



mgr inż. Robert Czak

tel: 0048 603687444

mail: robert.czak@op.pl