

NAPĘD I STEROWANIE MASZYN

Robert Babiarz

Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa
Politechnika Rzeszowska

Rzeszów 2019

SILNIKI INDUKCYJNE

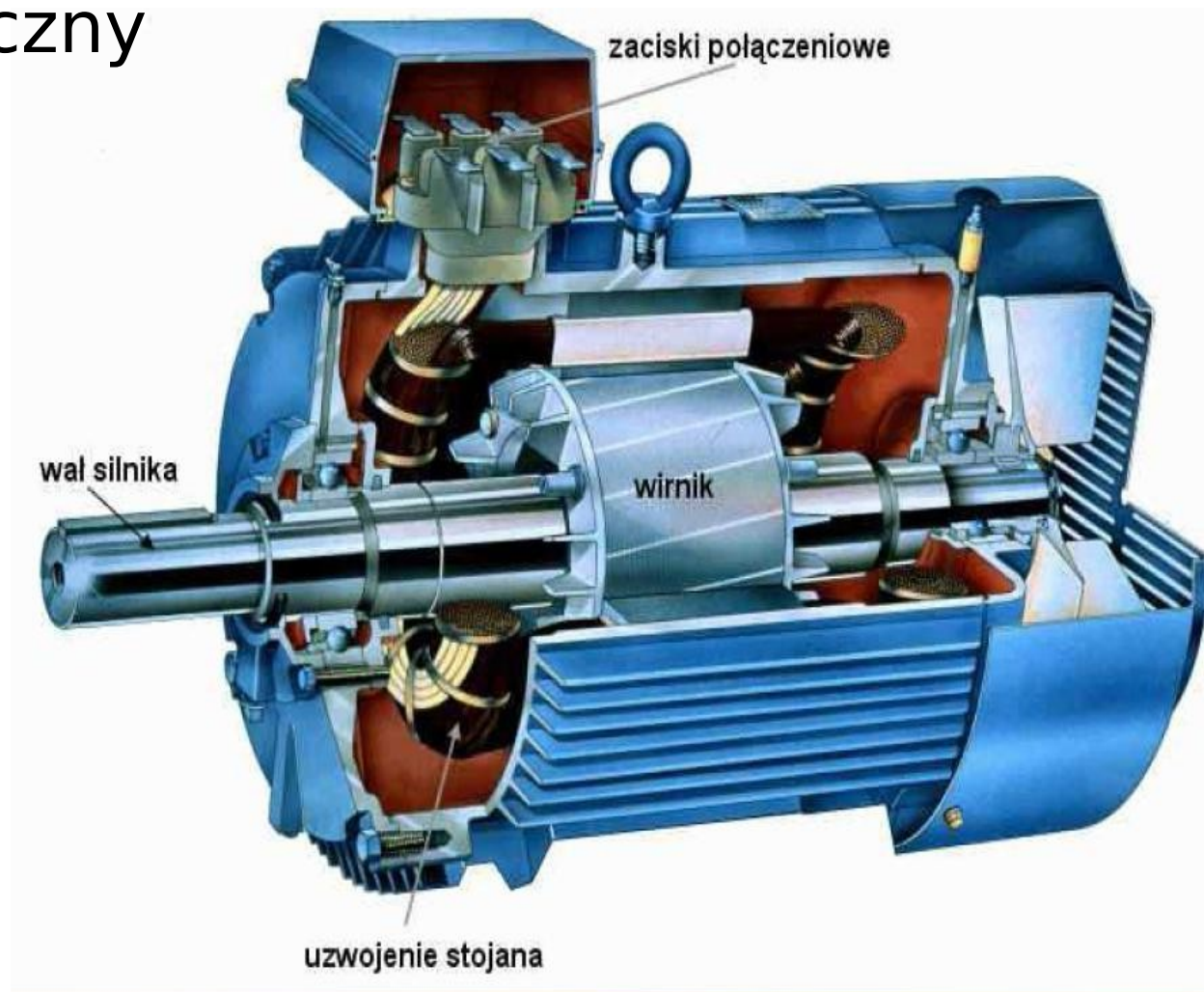
Rodzaje silników indukcyjnych

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

- 1) silniki synchroniczne,
- 2) silnikami indukcyjne (asynchroniczne):
 - a) o wirniku klatkowym, stosowane często w obrabiarkach,
 - b) o wirniku pierścieniowym,
- 3) silniki komutatorowe:
 - a) jednofazowe,
 - b) trójfazowe,
- 4) silniki specjalne (np. liniowe).

Silnik asynchroniczny

Silnik asynchroniczny (indukcyjny) to najbardziej popularny silnik, o najszerszych zastosowaniach ze wszystkich rodzajów silników elektrycznych, wykorzystywany szczególnie w przemyśle, ale również i w sprzęcie domowym. Charakteryzuje się bardzo prostą, i łatwą w utrzymaniu konstrukcją.



Moce budowanych obecnie silników asynchronicznych obejmują zakres od ułamków kilowatów do kilku megawatów. Silnik indukcyjny składa się z dwóch zasadniczych części: nieruchomego stojana i ruchomego (wirującego) wirnika.

Silnik asynchroniczny

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



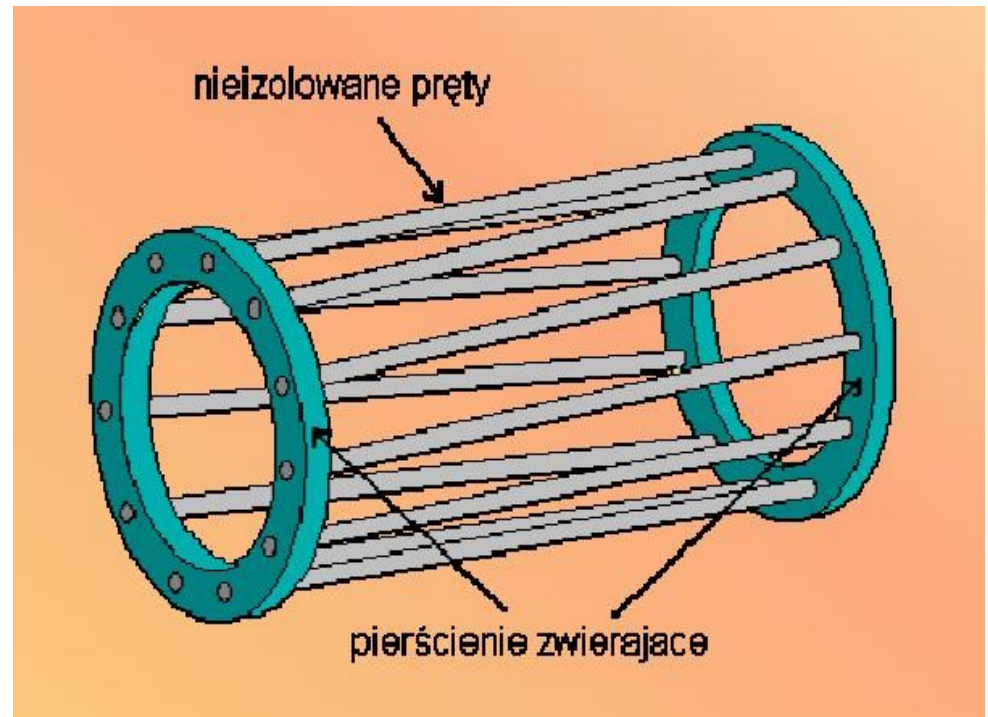
Uzwojenie stojana wykonane jest z izolowanego drutu, zaimpregnowane i mocno usztywnione, tak, aby zmniejszyć prawdopodobieństwo uszkodzenia na skutek drgań mechanicznych.

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

Silnik asynchroniczny

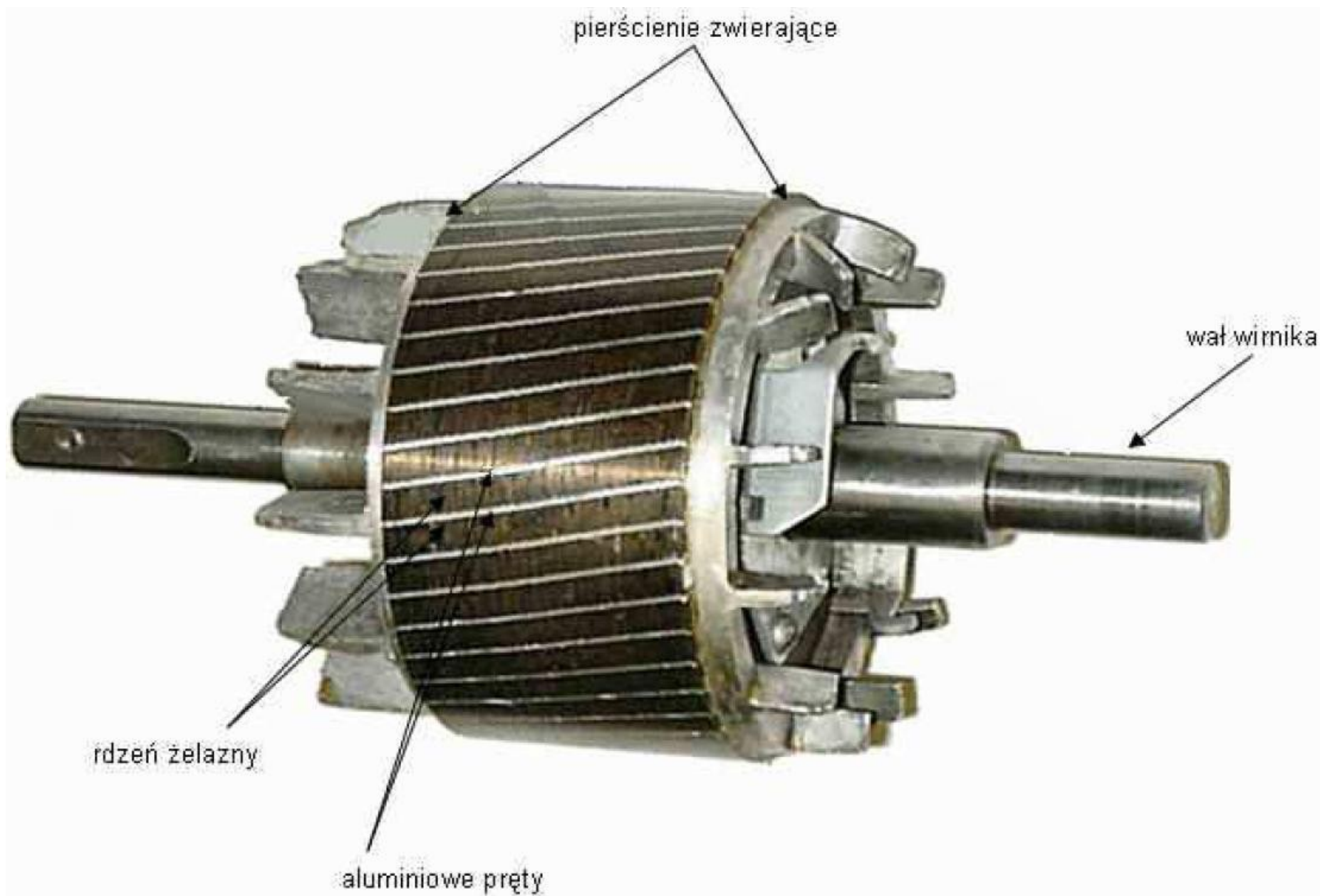
W silniku indukcyjnym klatkowym obwód elektryczny wirnika jest wykonany z nieizolowanych prętów, połączonych po obu stronach wirnika pierścieniami zwierającymi. Konstrukcja to wyglądem przypomina klatkę o kształcie walca (stąd wzięła się nazwa tego silnika).

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



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

Silnik asynchroniczny



Zasada działania silnika indukcyjnego

Wytworzone przez uzwojenia stojana wirujące pole magnetyczne obraca się wokół nieruchomego wirnika. W wyniku przecinania przez to pole prętów klatki wirnika, indukuje się w nich napięcie (stąd nazwa "silnik indukcyjny").

Zaczyna płynąć w nich prąd, (patrz zjawisko indukcji elektromagnetycznej).

Przepływ prądu w polu magnetycznym powoduje powstanie siły elektrodynamicznej (patrz zjawisko powstawania siły elektrodynamicznej) działającej stycznie do obwodu wirnika, a zatem powstaje także moment elektromagnetyczny.

Jeżeli wartość tego momentu jest większa od wartości momentu obciążenia, to wirnik rusza i zaczyna zwiększać swoją prędkość obrotową.

Zwiększanie prędkości wirnika, powoduje że pręty jego klatki przecinane są przez pole magnetyczne z coraz mniejszą prędkością, co skutkuje zmniejszeniem wartości indukowanej siły elektromotorycznej i spadkiem wartości prądu płynącego w prętach klatki, a zatem spada również wartość momentu elektromagnetycznego.

Silnik asynchroniczny

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

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

n_s - prędkość wirowania pola wytworzonego przez stojan

n - prędkość wirowania wirnika

Silnik asynchroniczny

Często w praktycznych zastosowaniach silnika istnieje potrzeba szybkiego wyznaczenia wartości momentu elektromagnetycznego, jaki jest on w stanie osiągnąć. Tabliczka znamionowa silnika zwykle nie podaje jego wartości, ale podaje inne wartości na podstawie których bardzo łatwo go wyliczyć.

W najprostszej postaci wzoru na moment obrotowy jest to iloczyn siły i ramienia, na jakim działa ta siła.

$$M = F \cdot r [Nm]$$

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

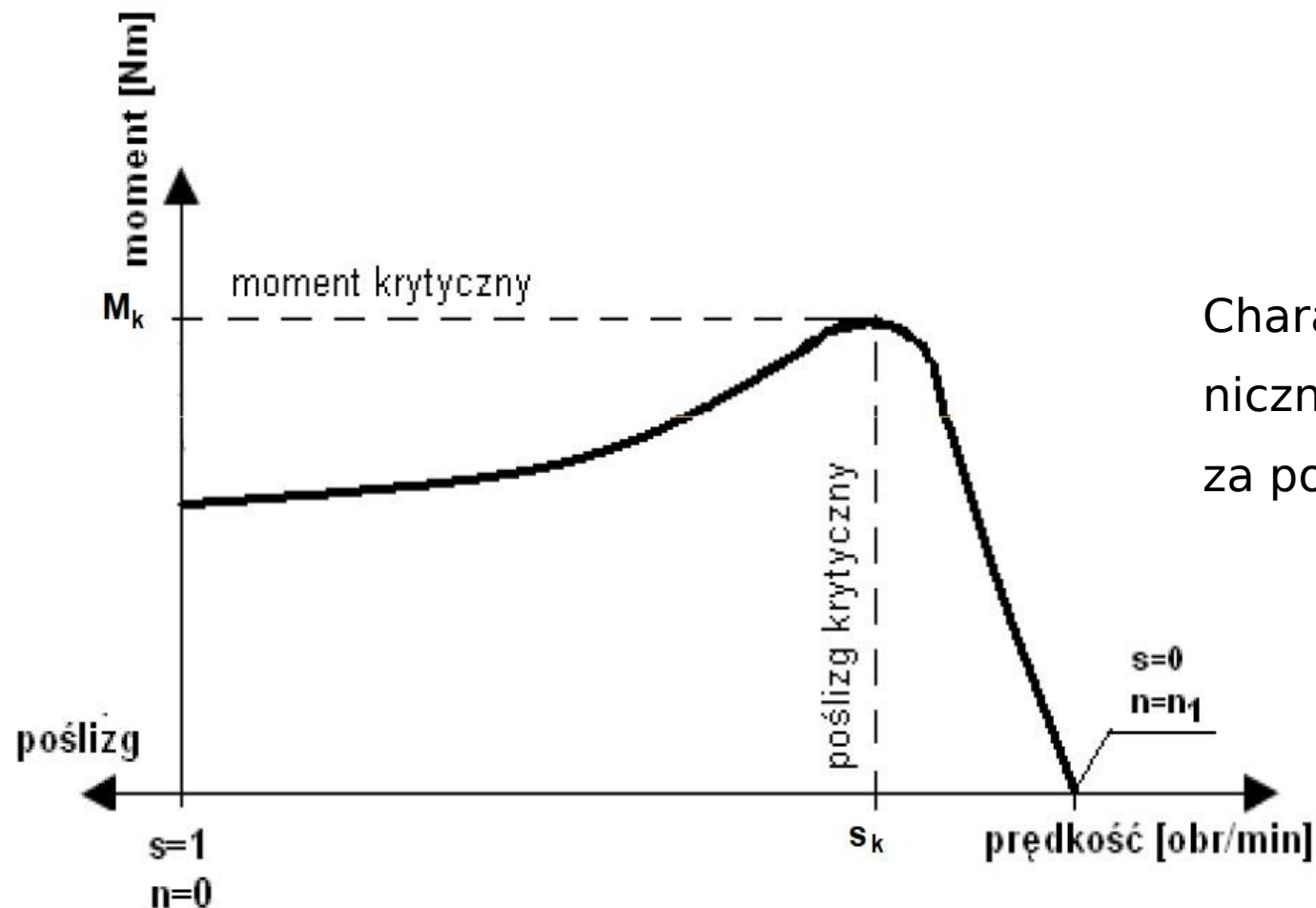
$$P = \frac{W}{t} = \frac{F \cdot l}{t} = F \cdot v = F \cdot \omega \cdot r = F \cdot \frac{\pi \cdot n}{30} \cdot r = \frac{M}{r} \cdot \frac{\pi \cdot n}{30} \cdot r = M \cdot \frac{\pi \cdot n}{30}$$

Zatem generowany w tych warunkach moment elektromagnetyczny M :

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

Silnik asynchroniczny

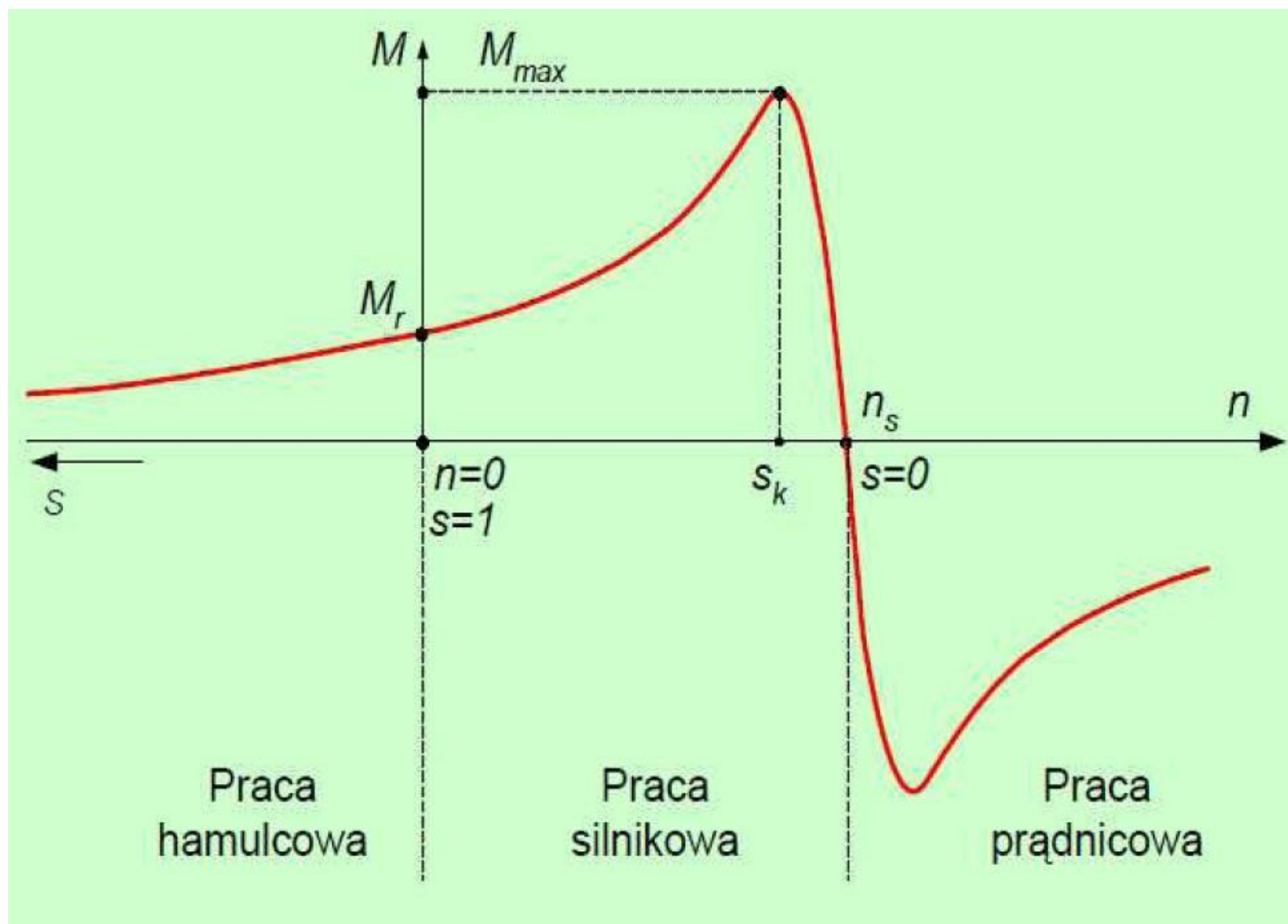
Charakterystyka mechaniczna silnika indukcyjnego ukazuje zależność momentu na jego wale od prędkości obrotowej silnika. Jak już wspomniano wcześniej prędkość obrotową silnika asynchronicznego można wyrazić za pomocą poślizgu.



Charakterystykę mechaniczną silnika można wyrazić za pomocą Wzoru Klossa:

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

Charakterystyka mechaniczna silnika indukcyjnego dla różnych rodzajów jego pracy

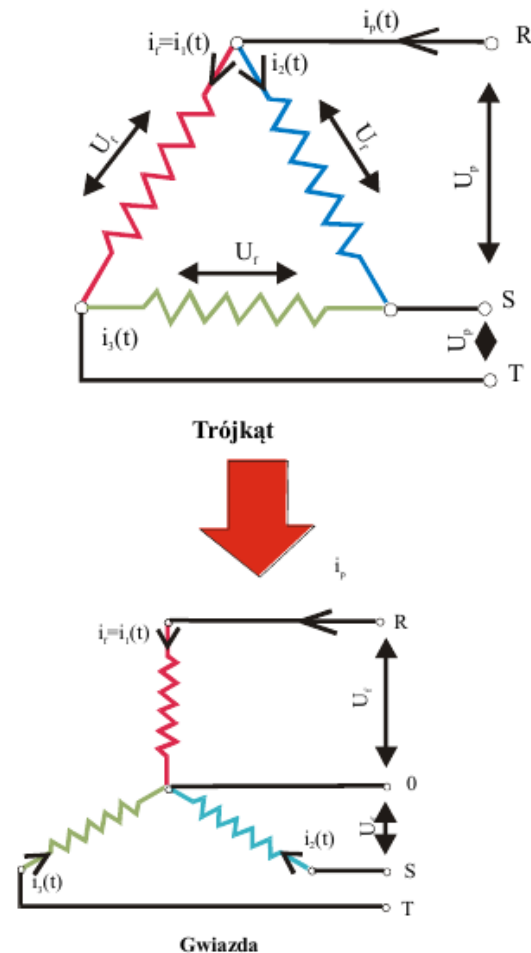
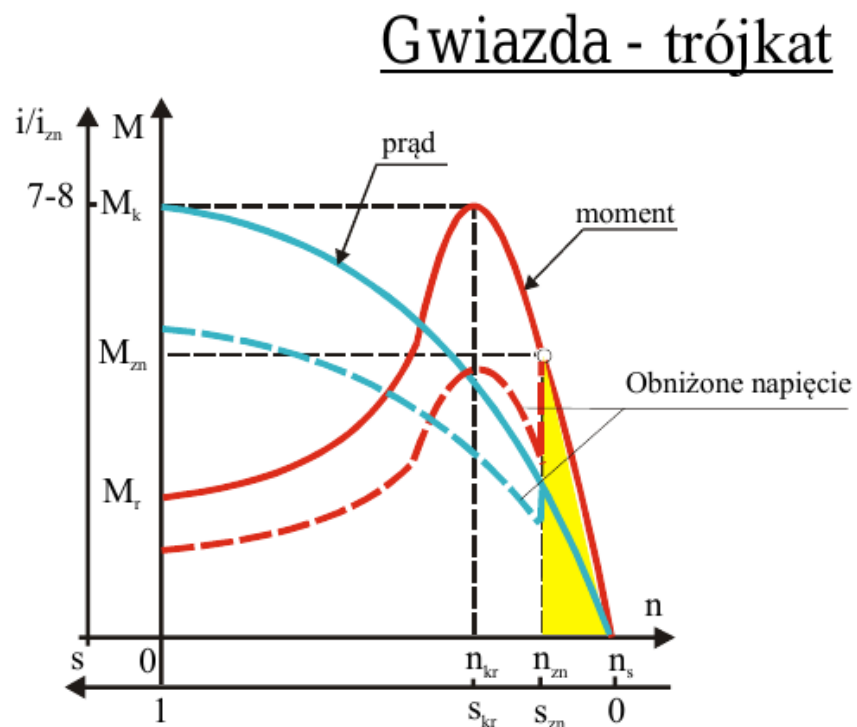


Rozruch bezpośredni

Rozruch silnika jest możliwy, jeżeli powstający w chwili rozruchu moment elektromagnetyczny jest większy niż moment obciążenia. Najprostszym sposobem dokonania rozruchu silnika indukcyjnego jest podłączenie uzwojeń stojana do 3-fazowego źródła zasilania (w przypadku silnika 3-fazowego), jest to tzw. rozruch bezpośredni.

W tym przypadku **pobierany prąd rozruchu jest wielokrotnie większy niż prąd znamionowy (do 8 razy)**, co powoduje nagrzewanie się uzwojeń, a także może spowodować spadki napięcia sieci zasilającej. Wartość powstającego momentu elektromagnetycznego nie jest zbyt duża, dlatego, aby silnik mógł wystartować nie może być zbyt obciążony. Ze względu na te ograniczenia rozruch bezpośredni stosuje się dla silników o małych mocach (do kilkunastu kW).

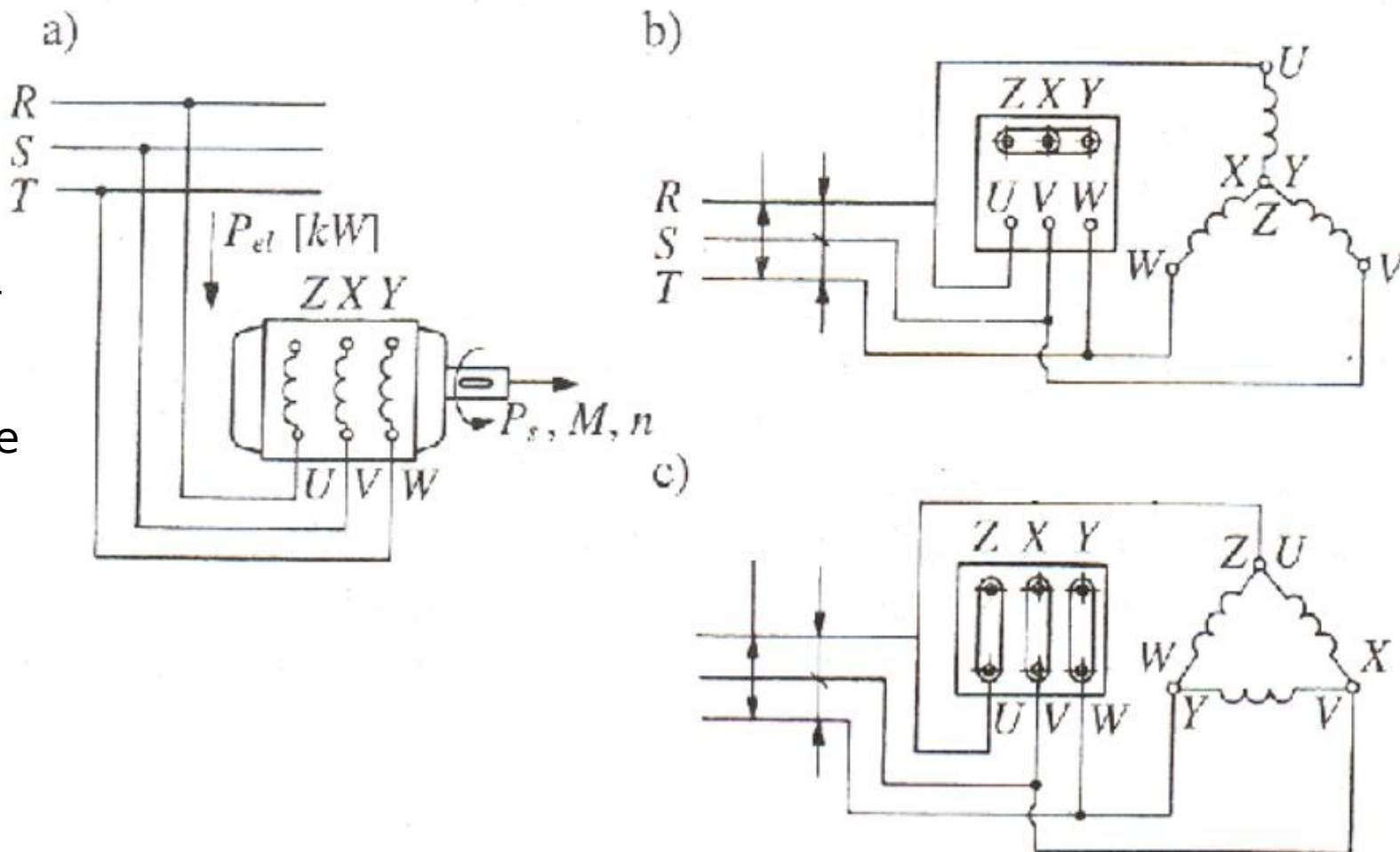
Silnik asynchroniczny – metody rozruchu



Zastosowanie przełącznika „gwiazda – trójkąt” obniża pobór prądu ok. 3 razy (niestety mniejszy jest w związku z tym moment rozruchowy)

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

Rozruch ten jest jednak możliwy tylko dla silników 3-fazowych, które mają wyprowadzone 6 zacisków na tabliczce zaciskowej.

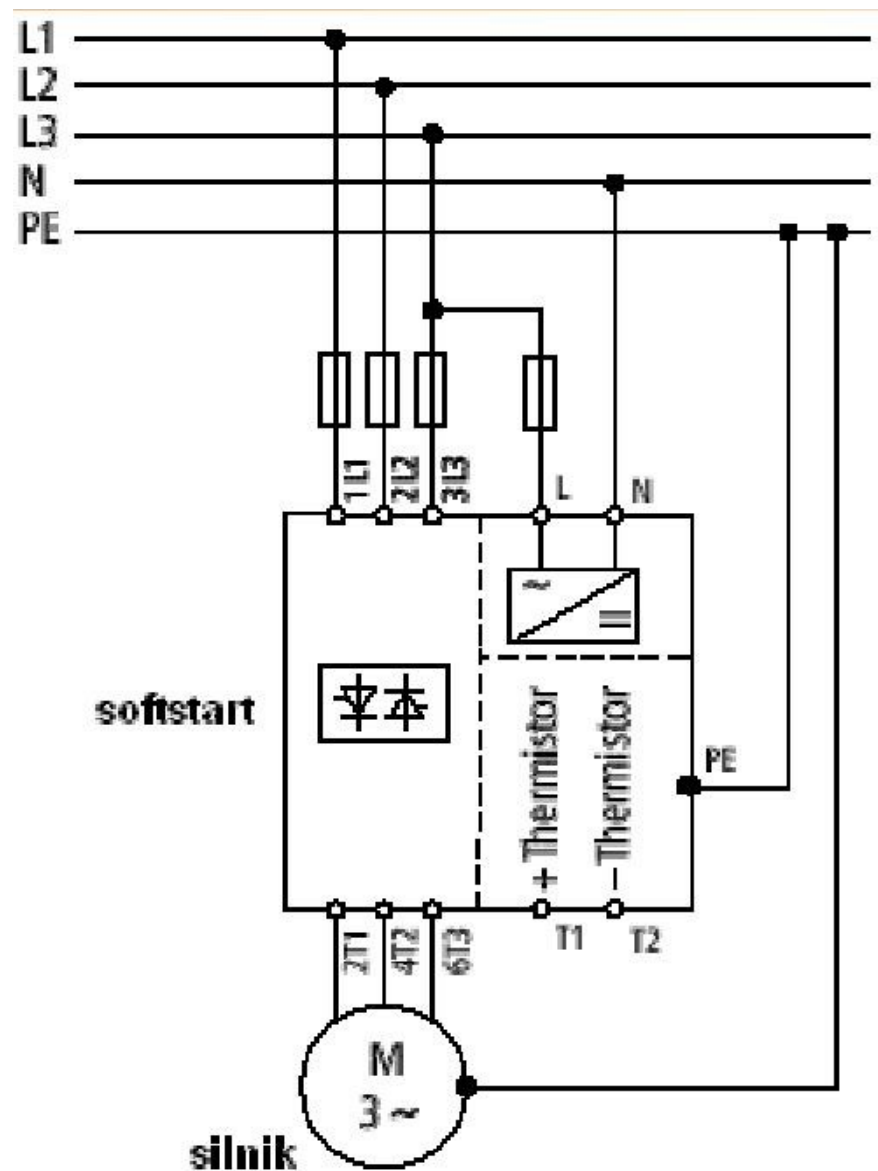


Przy połączeniu uzwojeń silnika w gwiazdę, prąd pobierany przez silnik z sieci jest 3-krotnie mniejszy niż prąd pobierany przy połączeniu w trójkąt. Także moment elektromagnetyczny a więc i moc silnika w tym przypadku są 3-krotnie mniejsze.

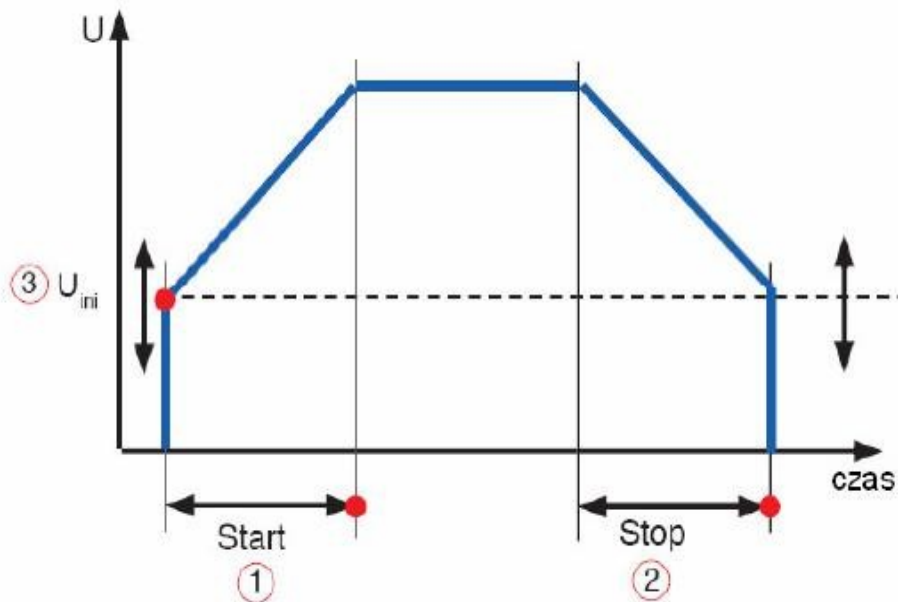
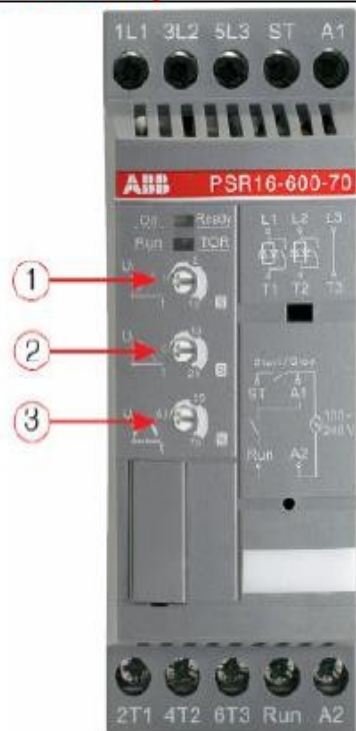
W nowoczesnych układach napędowych, do łagodnego rozruchu 3-fazowych silników indukcyjnych stosuje się specjalizowane urządzenia, nazywane układami „soft – start” (miękkiego rozruchu), które mają za zadanie redukować niekorzystnych zjawisk występujących podczas rozruchu, wpływających na żywotność silników i jakość ich pracy.

Ich zasada działania opiera się na, płynnej regulacji napięcia podawanego na uzwojenia (lub jedno z uzwojeń).

W roli elementów sterujących stosuje się najczęściej tyrystory. Zwykle urządzenia takie umożliwiają kontrolę i możliwość nastawienia wielu parametrów takich jak czas rozruchu, wartość początkowego momentu rozruchowego, kolejności faz i czy temperaturę przegrzania.

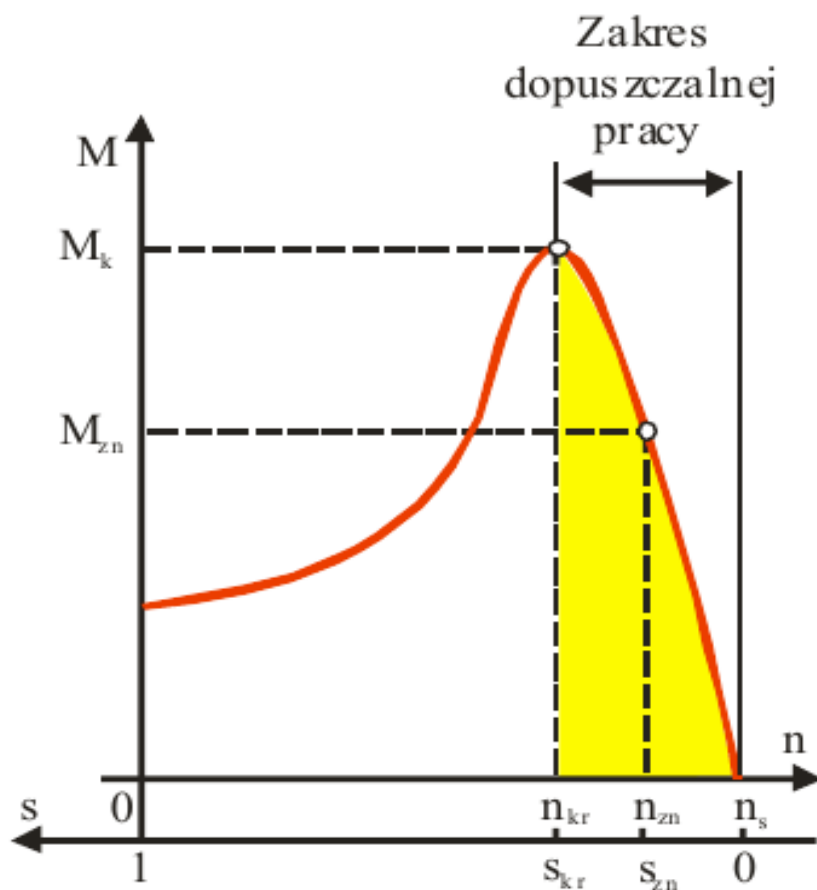


Nastawy



- ① Czas rozruchu = 1... 10s
- ② Czas zatrzymania = 0 ... 20s
- ③ Napięcie początkowe U_{ini} = 40 ... 70% (również nastawa napięcia końcowego)

Silnik asynchroniczny – przeciążalność

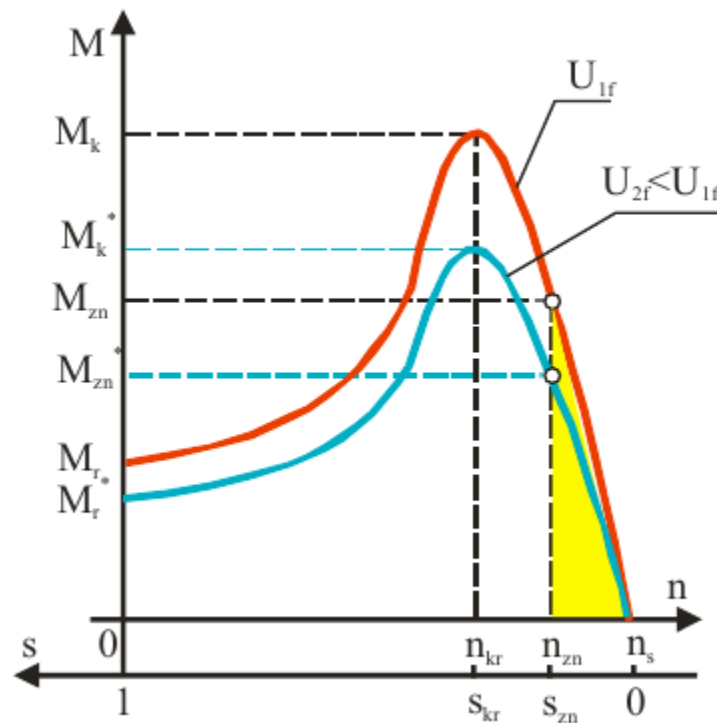


Możliwość pracy pod przeciążeniem
Ale w ograniczonym przedziale
czasu (kryterium cieplne)

$$M_k/M_{zn} = (1,6 - 2,5)$$

Zmiana prędkości obrotowej silnika

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



Obniżanie napięcia w stanie

Zły pomysł w tym przypadku zmiana prędkości będzie niewielka

Zmiana prędkości obrotowej silnika

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

f - częstotliwości zasilania,

p - liczby par biegunów – to zależy od sposobu nawinięcia uzwojeń stojana,

s – poślizg,

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

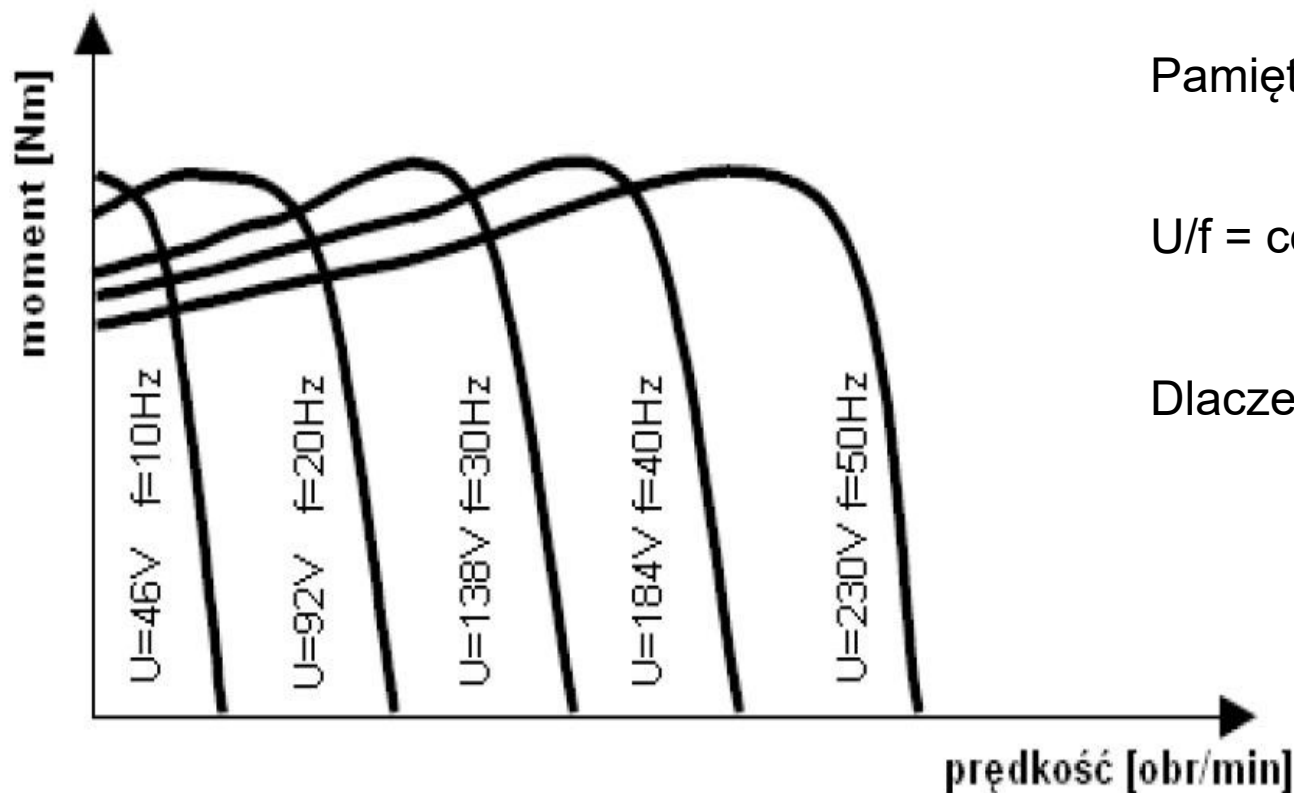
Zmiana liczby par biegunów

Realizuje się to zwykle umieszczając w stojanie **kilka niezależnych uzwojeń** o różnych liczbach par biegunów (z reguły nie więcej niż dwa) lub jedno uzwojenie o przełączalnej liczbie par biegunów. Przełączając zasilanie pomiędzy uzwojeniami, otrzyma się pola wirujące z różnymi prędkościami.

W tym przypadku możliwa jest tylko i **wyłącznie skokowa regulacja** prędkości obrotowej. Silniki takie nazywane są silnikami wielobiegowymi, i wykonuje się je wyłącznie jako silniki klatkowe. Silniki te znajdują zastosowanie w wszelkiego rodzaju obrabiarkach, zastępując, jeżeli to możliwe, przekładnie mechaniczne.

Zmiana częstotliwości zasilania

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

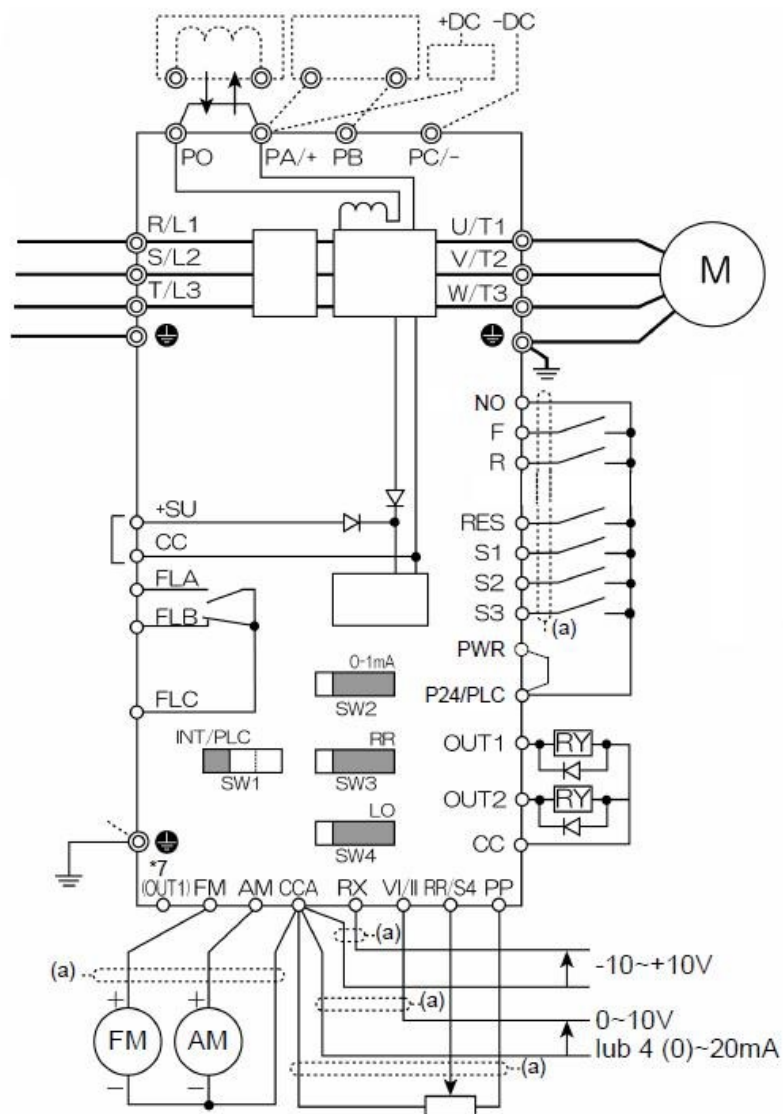


Pamiętamy aby zapewnić :

$U/f = \text{const}$

Dlaczego ?

Zmiana częstotliwości zasilania - falownik



Silnik indukcyjny – dobór, moc

Zainstalowanie silnika indukcyjnego o **zbyt dużej mocy pociągnie za sobą jego pracę o małej sprawności**, przy niskim współczynniku mocy.

Dla tak dobranego silnika przy biegu jałowym straty są większe, a wartość współczynnika mocy może spaść nawet do 0,1.

Natomiast zainstalowanie silnika **zbyt małej mocy może być przyczyną częstych przerw w pracy silnika na skutek odłączenia go przez urządzenia zabezpieczające**, dodatkowo przy braku właściwie ustawionych zabezpieczeń może nastąpić przegrzanie silnika i jego uszkodzenie.

Moc znamionowa silnika musi więc być tak dobrana, by w danych warunkach pracy silnik nie nagrzewał się nadmiernie a moment maksymalny silnika był większy od momentu maksymalnego przewidywanego obciążenia.

Moment silnika jest proporcjonalny do pobieranego prądu a straty ciepła do jego kwadratu.

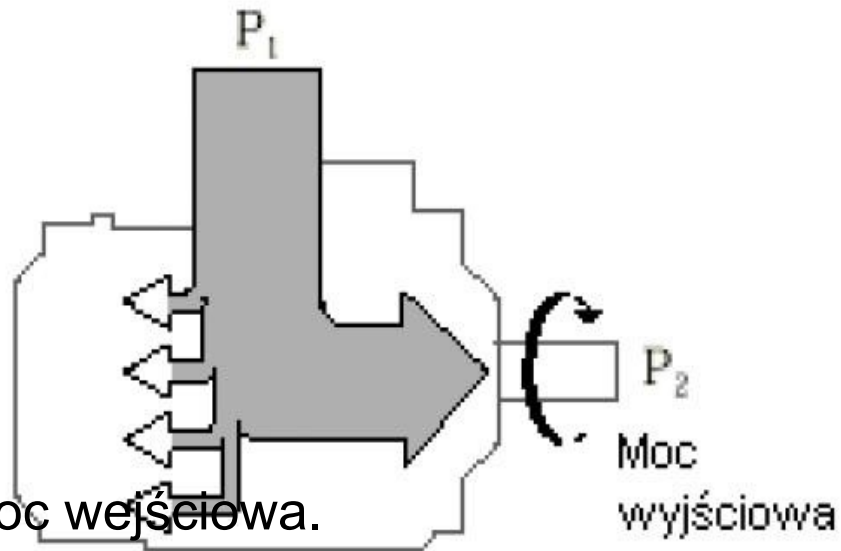
Sprawność i straty

Przy stałym obciążeniu, pobór mocy z sieci zasilającej jest większy niż wartość mocy mechanicznej oddawanej, z uwagi na straty i sprawność silnika. Zależność między mocą na wejściu i mocą na wyjściu jest nazywana sprawnością Silnika :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}$$

gdzie: P_2 – moc wyjściowa, P_1 – moc wejściowa.

Straty w miedzi
Straty w żelazie
Straty wentylatorowe
Straty tarcia



Typowa sprawność silnika zawiera między w przedziale 0,7 a 0,9 zależnie od mocy silnika, jego konstrukcji.

Silnik asynchroniczny – podsumowanie

- Bardzo dobra (sztywna) charakterystyka mechaniczna.
- Bardzo dobra przeciążalność.
- Dobre właściwości rozruchowe ale wymagające rozruchu. (hamowania) na charakterystyce sztucznej.
- Niesterowalność - prędkością obrotową
(sterowanie prędkością obrotową wymaga znacznych nakładów – napędy falownikowe) - obecnie już nie takie kosztowne ok. 3x cena silnika,
- Pogarszająca się nierównomierność ruchu w miarę obniżania prędkości obrotowej

Silniki krokowe

Silnik krokowy

Silnik krokowy - przekształca impulsy elektryczne w dyskretne ruchy mechaniczne (ciąg przesunięć kątowych wirnika).

Droga kątowa lub liniowa, którą przebywa wirnik jest proporcjonalna do liczby impulsów, a prędkość części ruchomej silnika do częstotliwości tych impulsów.

Silnik przetwarza sygnał sterujący bezpośrednio na ustalone położenie wału .

Cechy szczególne

- Moment trzymający, bez prądowy moment spoczynkowy (detent torque), silniki wyposażone w magnes trwały,
- Silnik pracuje z pełnym momentem w stanie spoczynku (o ile uzwojenia są zasilane),
- Precyzyjne pozycjonowanie i powtarzalność ruchu - dobre silniki krokowe mają dokładność ok. 3 - 5% kroku i błąd ten nie kumuluje się z kroku na krok. Krok podstawowy, rozdzielczość kątowa kroku : 15° , 7.5° , 3.6° , 1.8° , 0.9° (liczba kroków: 24, 48, 100, 200, 400)
- Szeroki zakres prędkości obrotowych uzyskiwany dzięki temu, że prędkość jest proporcjonalna do częstotliwości impulsów wejściowych,
- Możliwość bardzo szybkiego rozbiegu, hamowania i zmiany kierunku.
- Niezawodny - ze względu na brak szczotek, żywotność silnika zależy zatem tylko od żywotności łożysk.

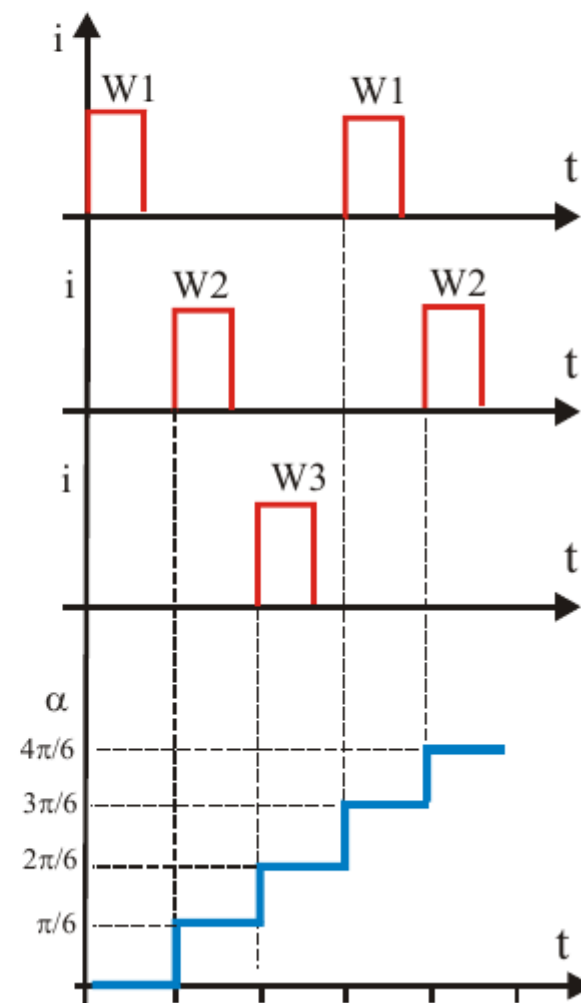
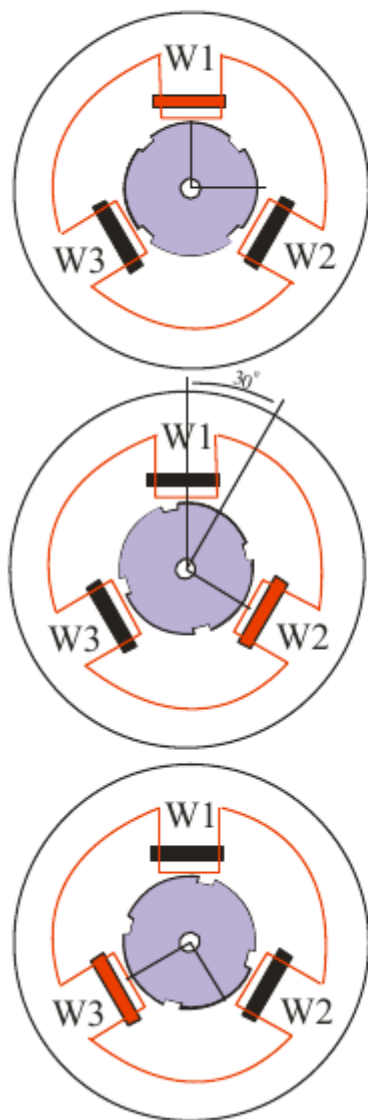
Cechy szczególne cd.

- Możliwość osiągnięcia bardzo niskich prędkości synchronicznych obrotów z obciążeniem umocowanym bezpośrednio na osi.
- Jedną z najbardziej znaczących zalet silnika krokowego jest możliwość dokładnego sterowania w pętli otwartej co oznacza, że nie potrzeba sprzężenia zwrotnego - informacji o położeniu. Eliminuje to potrzebę stosowania kosztownych urządzeń sprzężenia zwrotnego, takich jak enkodery optoelektroniczne. Pozycje określa się zliczając impulsy wejściowe.

Silniki skokowe – własności eksploatacyjne

- działka elementarna
- moment synchronizujący
- moment rozruchowy
- moment maksymalny (przeciążalność)
- maksymalna (graniczna) częstotliwość robocza
- częstotliwość startowo-stopowa

Silniki skokowe – zasada działania (silnik reluktancyjny)



Wady:

- Rezonanse mechaniczne pojawiające się przy niewłaściwym sterowaniu.
- Trudności przy pracy z bardzo dużymi prędkościami.
- Malejący moment obrotowy wraz ze wzrostem prędkości obrotowej.

Silniki krokowe – konstrukcja



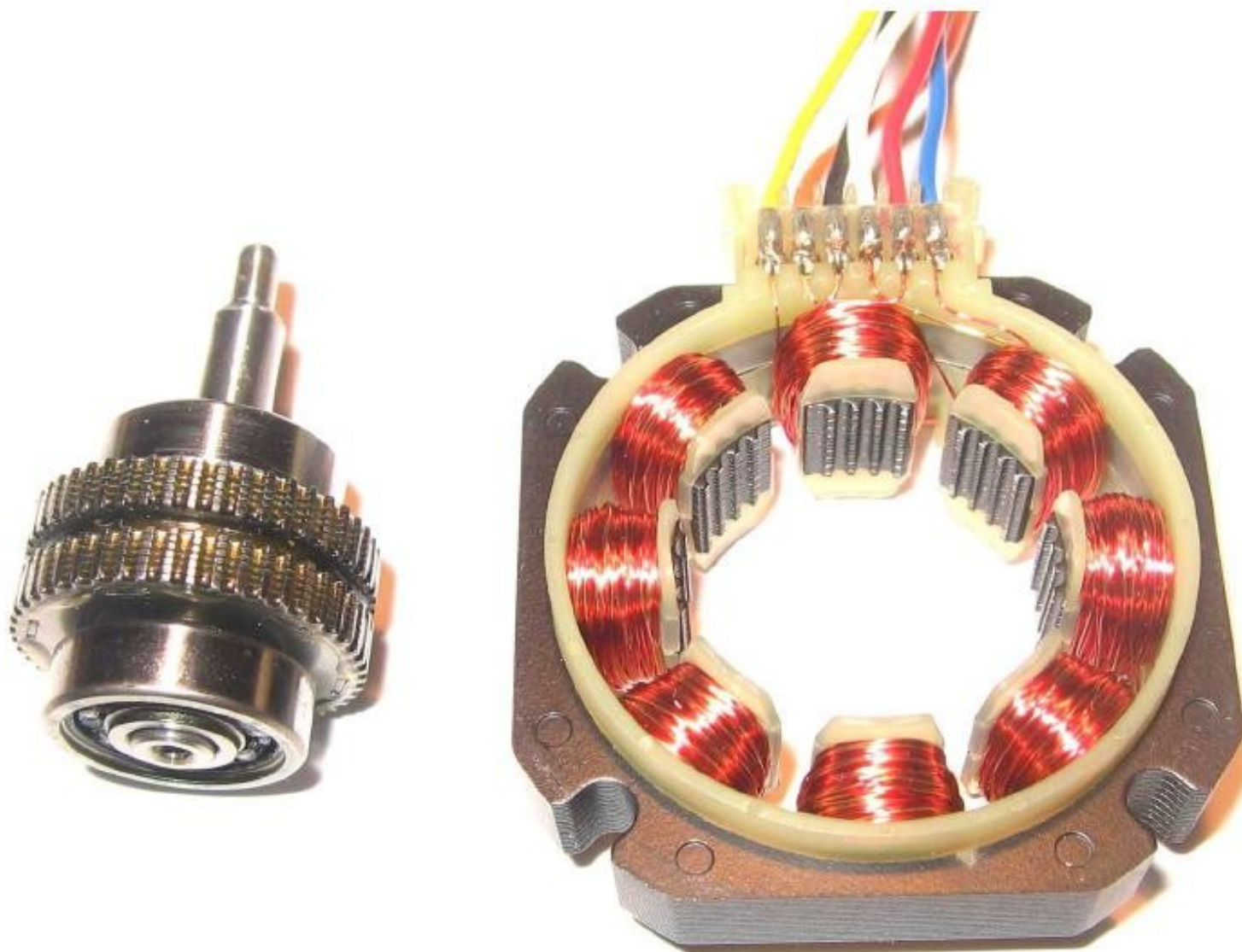
Wirnik dwufazowego hybrydowego silnika krokowego

Silniki krokowe – konstrukcja



Stojan dwufazowego hybrydowego silnika krokowego

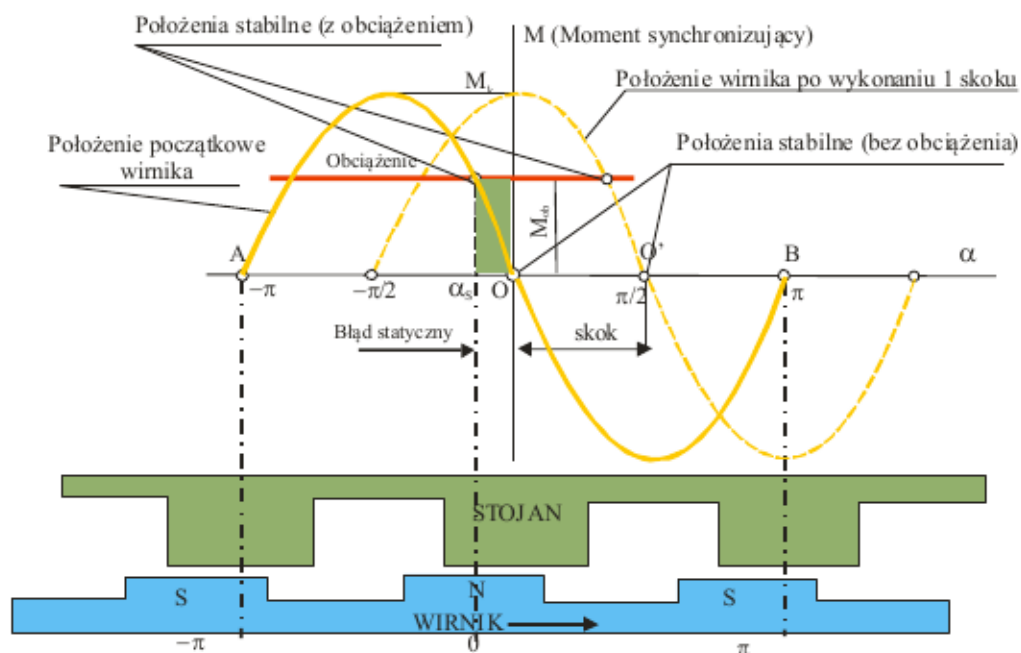
Silniki krokowe – konstrukcja



Silnik hybrydowy firmy SANYO DENKI, typ: 103-556-0270

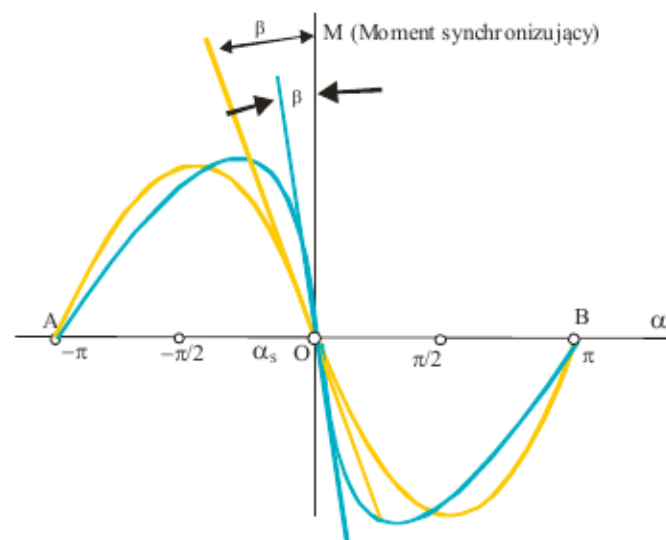
Silniki skokowe – charakterystyka mechaniczna

Błąd statyczny, sztywność charakterystyki



Błąd statyczny α_s to kąt (droga kątowa) o jaki obróci się wirnik, obciążony momentem M_{ob} .

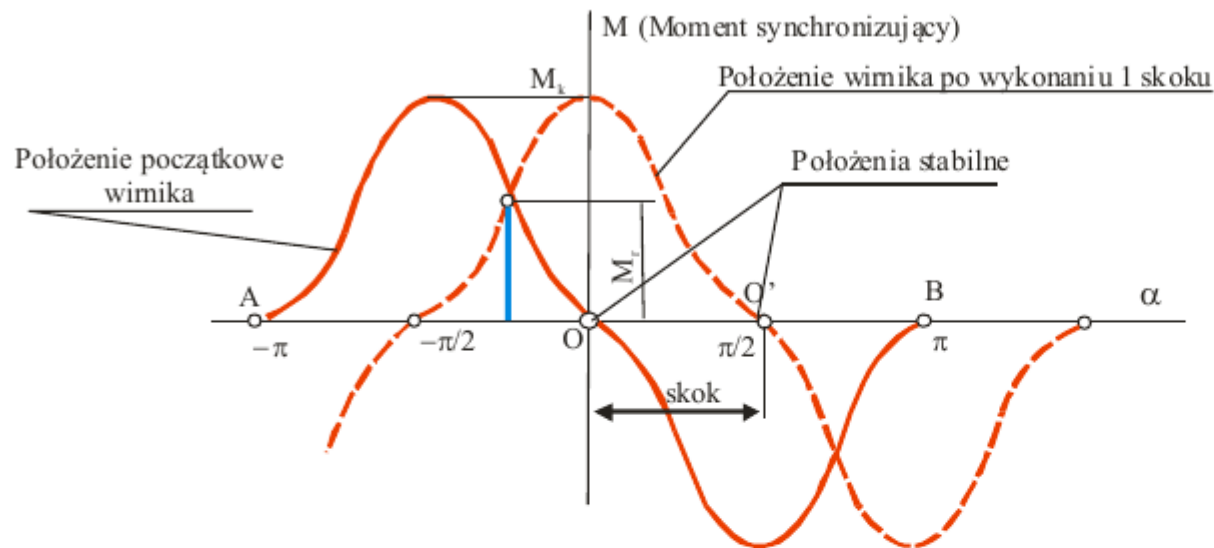
$$\alpha_s < \pi/2 \quad \text{dla } p=1, f=2$$



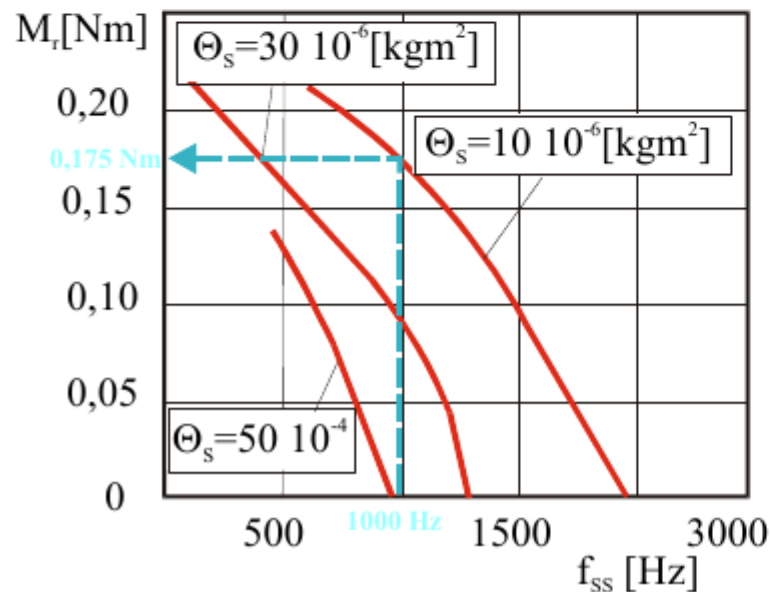
$$\operatorname{tg} \beta = \frac{dM}{d\alpha} \quad - \quad \text{Miara sztywności charakterystyki}$$

Im $\frac{dM}{d\alpha}$ mniejsze tym błąd statyczny α_s mniejszy

Silniki skokowe – własności rozruchowe



$$M_r > 0$$

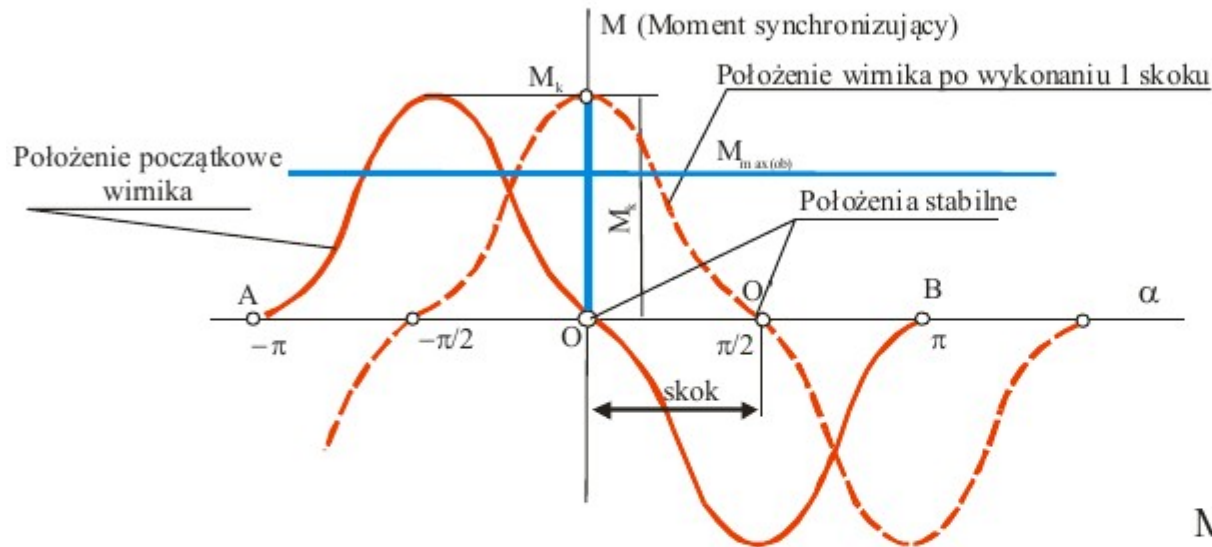


Częstotliwość START-STOP to największa częstotliwość pracy silnika podczas rozruchu (START) lub hamowania (STOP), przy której silnik nie utraci skoku.

Każdej wartości momentu rozruchowego odpowiada dopuszczalna częstotliwość START-STOP

Silniki skokowe – przeciążalność

Maksymalna częstotliwość robocza f_r maksymalne obciążenie $M_{\max(ob.)}$



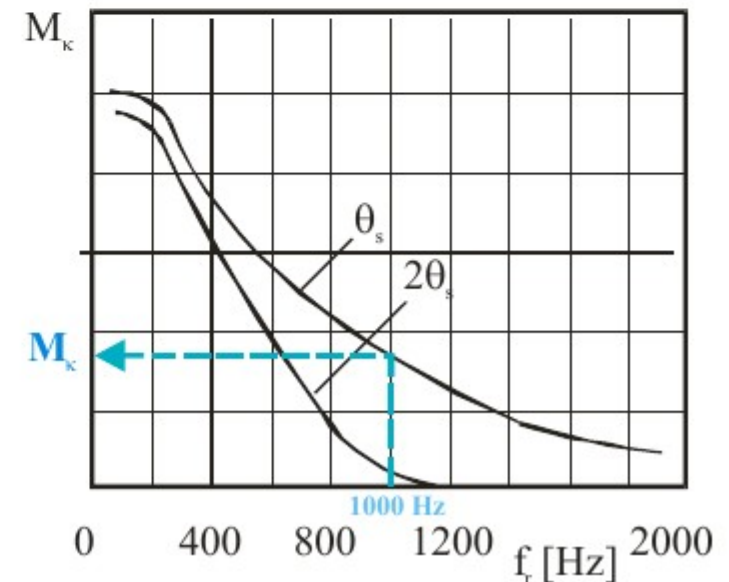
$$\frac{M_k}{M_{zn}} > 1$$

$$M_{\max(ob.)} < \frac{\pi}{2} \frac{k-2}{k} \frac{dM}{d\alpha}$$

gdzie: n – liczba taktów (skoków)

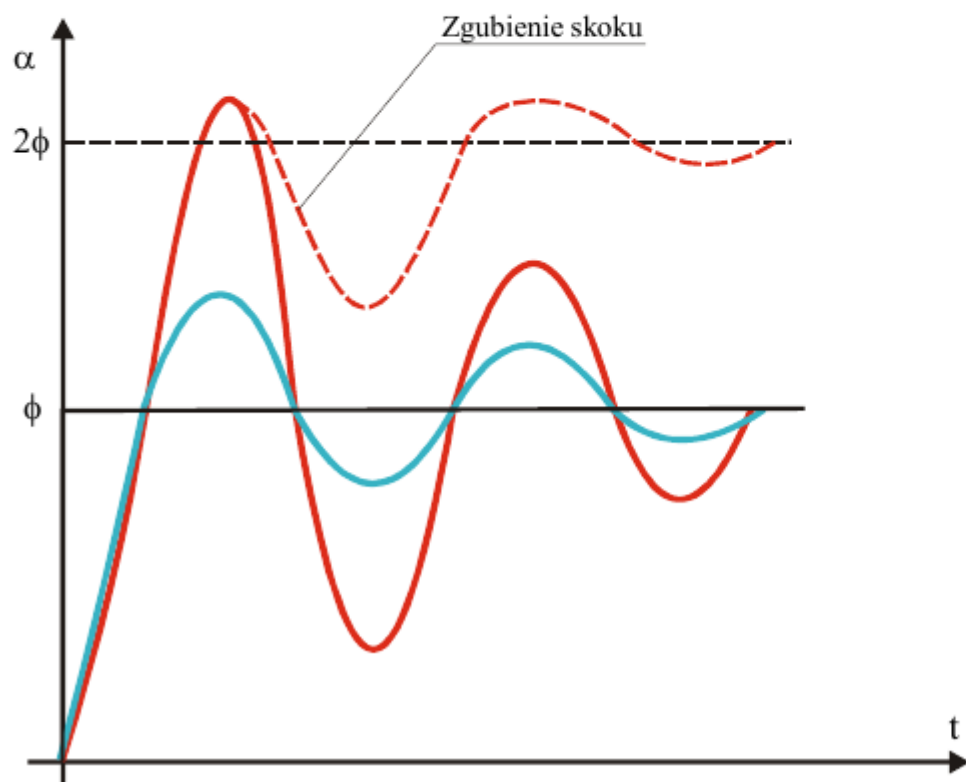
Maksymalna częstotliwość robocza f_r to największa częstotliwość sygnałów sterujących, dla której silnik nie utraci skoku. Decyduje ona o największej prędkości ruchu w stanie ustalonym

Każdej wartości M_k odpowiada maksymalna częstotliwość robocza f_r .



Silniki skokowe – właściwości dynamiczne

W silnikach skokowych właściwości dynamiczne decydują o częstotliwościach START-STOP (f_{ss}), o maksymalnej częstotliwości roboczej (f_r) a przede wszystkim o uniknięciu zgubienia skoku (wypadnięcie z synchronizmu).



Aby uniknąć zgubienia skoku silnik powinien posiadać odpowiedni zakres (zapas) stabilności dynamicznej ZSD.

Silniki krokowe – sterowanie

Rozpatrując właściwości silnika skokowego należy brać pod uwagę nie tylko cechy wynikające z budowy samego silnika ale również układ sterowania.

Układ sterowania odgrywa decydującą rolę w kształtowaniu pożądanych charakterystyk silników krokowych.

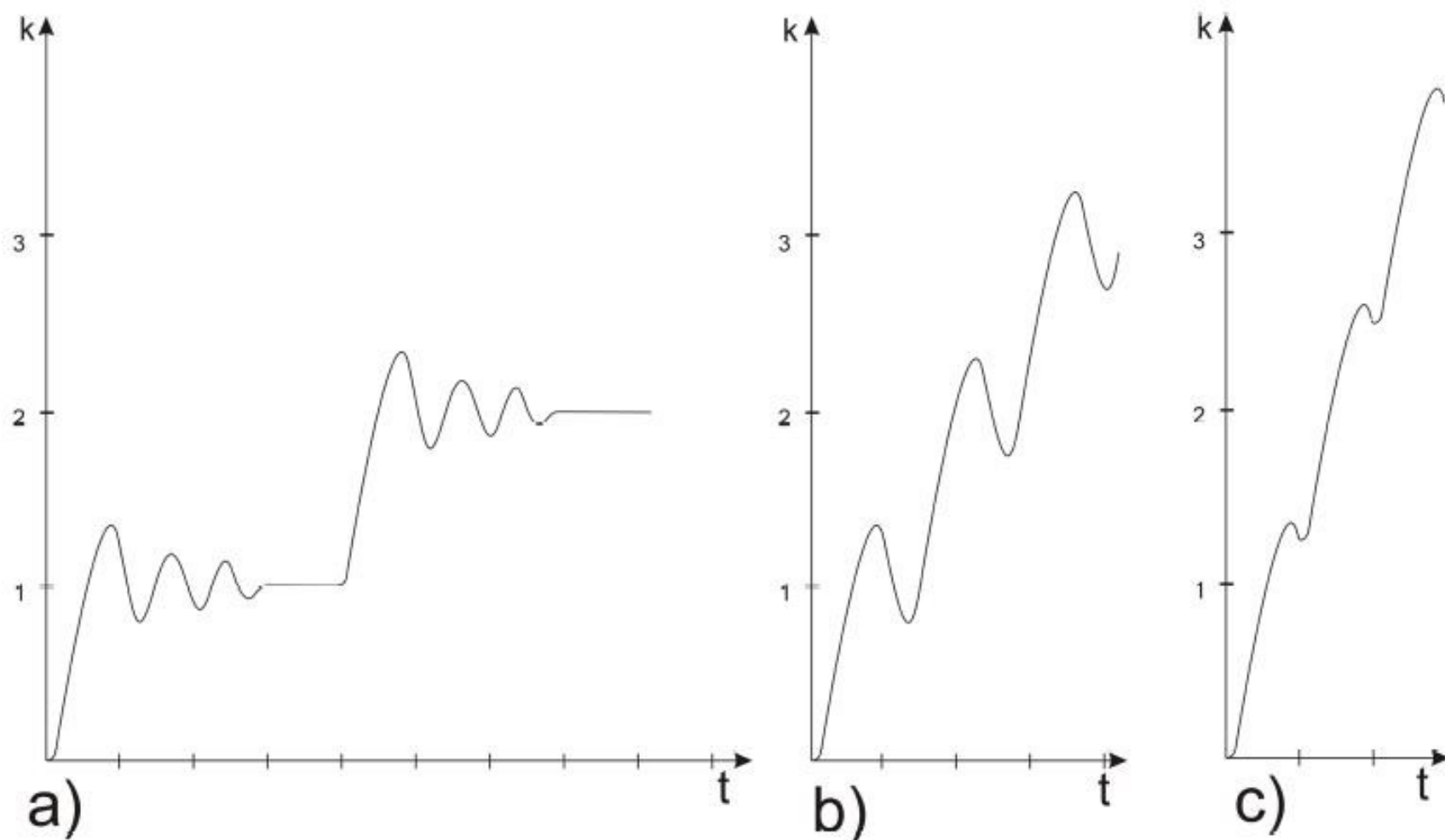
Sterowanie mikrokrokowe

W sterowaniu mikrokrokowym prądy w uzwojeniach zmieniają się płynnie rozbijając w ten sposób pełny krok na wiele mniejszych.

Dzięki pracy z mikrokrokiem możliwe jest uzyskanie płynniejszej pracy” i dokładniejszego pozycjonowania.

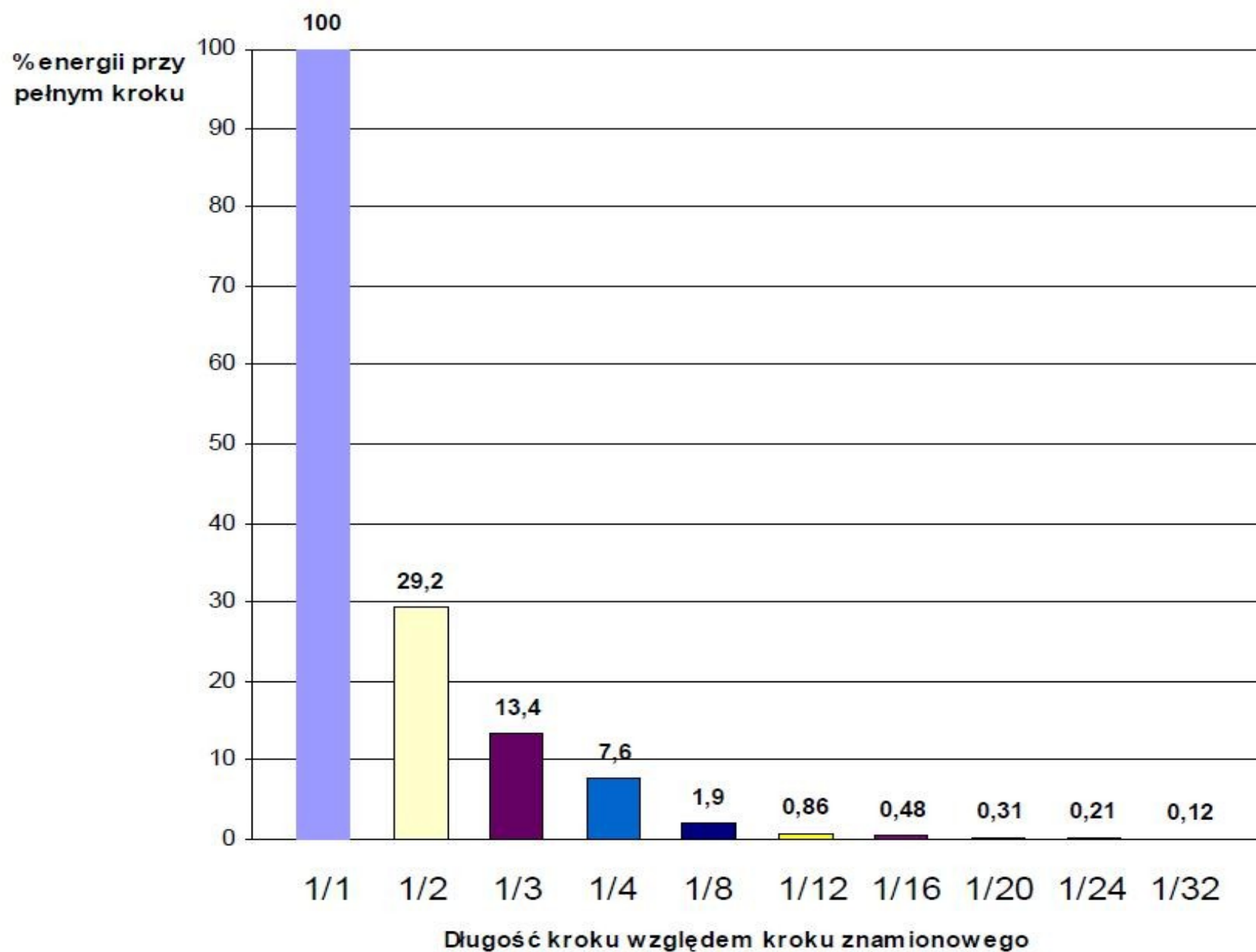
Istnieje wiele różnych typów mikrokroków o podziale od $1/3$ do $1/256$ pełnego kroku lub jeszcze większym.

Silniki krokowe – sterowanie



Odpowiedzi silników krokowych przy pracy: a) start-stopowej; b) ze średnią prędkością; c) z dużą prędkością.

Silniki krokowe – sterowanie



Silniki krokowe – sterowanie

Właściwości napędu z silnikami krokowymi w bardzo dużym stopniu zależą od układowego rozwiązania wzmacniacza mocy i układu zasilania.

Uzwojenie silnika charakteryzuje się trzema podstawowymi parametrami :

- rezystancją,
- indukcyjnością,
- prądem znamionowym.

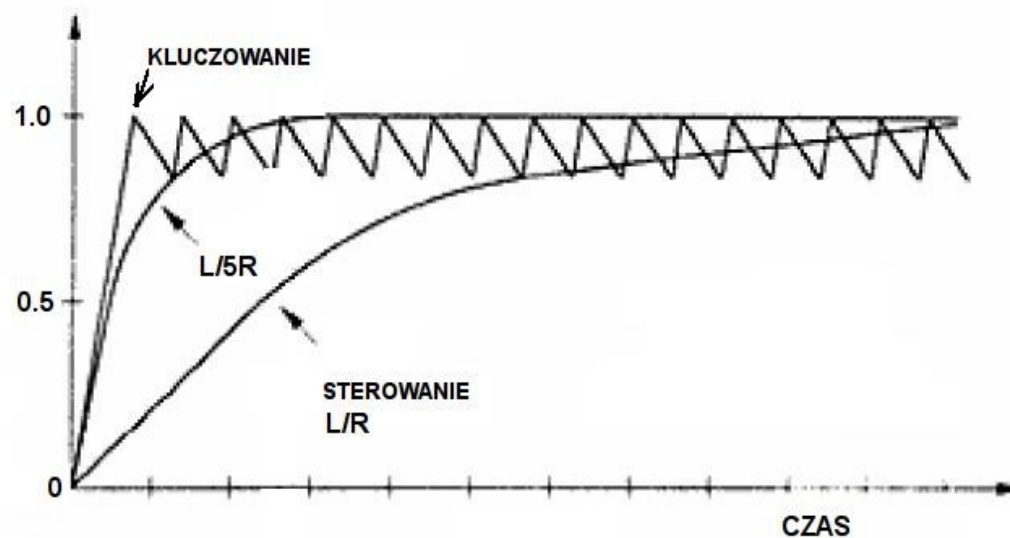
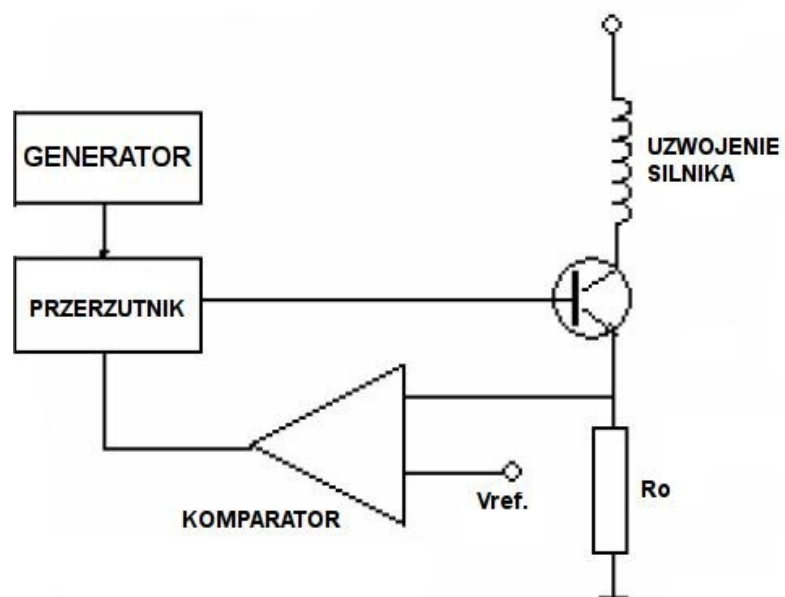
Uzwojenie silnika można przedstawić jako szeregowe połączenie indukcyjności L_s i rezystancji R_s . Przebieg prądu w obciążeniu ma charakter wykładniczy :

$$I_s = \left(\frac{U}{R_s} \right) \cdot \left(1 - e^{\left(\frac{-t}{T} \right)} \right)$$

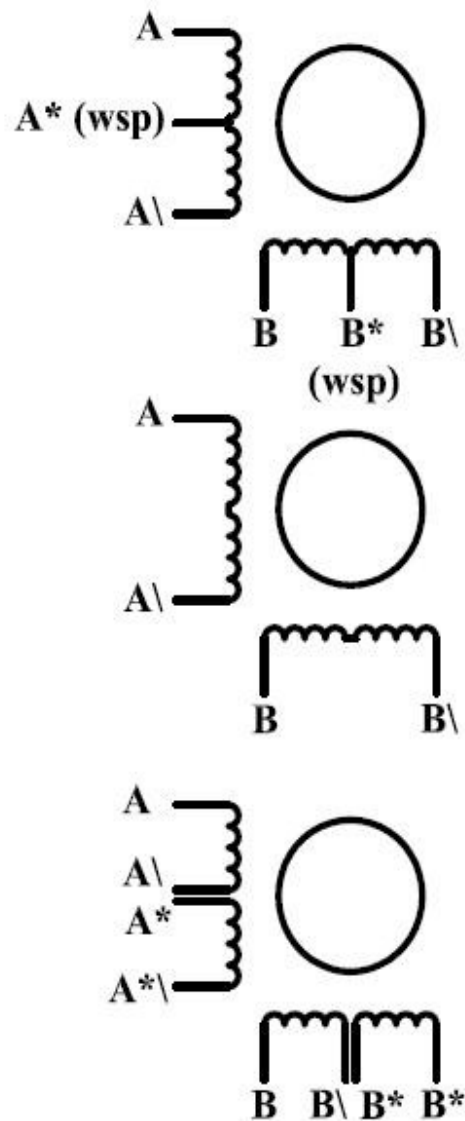
gdzie: $T = \frac{L_s}{R_s}$

Stała czasowa T wynosi zazwyczaj około 10 ms, a zatem czas $3T$ po upływie którego wartość prądu osiągnie 95% wartości ustalonej wynosi 30 ms. Jest to bardzo duża wartość. Układy mocy projektuje się tak, aby zwiększyć szybkość narastania prądu umożliwia to uzyskanie większej częstotliwości pracy silnika.

Silniki krokowe – sterowanie



Silniki krokowe – wyprowadzenia



MODEL		TRYB PRACY	PRĄD (A)	NAPIĘCIE (V)	REZYSTANCJA FAZY (Ω)	MOMENT (Nm)	INDUKCJA (mH)	BEZWŁADNOŚĆ ROTORA (gcm ²)	WAGA (kg)
85BYGH	450-08	4 bipol	3,5	3,6	1	2,20	6	200	1,7
	450-07	6 unipol	4,5	5,4	1,2	3,00	4,5	210	2,0
	450A	6 unipol	4,5	2,8	0,64	4,10	5,3	350	2,8
	450B	8 bipol	4	3,8	0,95	6,30	8,8	580	3,8
	450C	4 bipol	8,5	2,8	0,33	6	1,5	350	2,8

MODEL	L [mm]	KOLORY WYPROWADZEŃ							
		A	A\	A* (wsp)	A*\	B	B\	B* (wsp)	B*\
85BYGH450-08	80	żółty	czerw	-	-	nieb	ziel	-	-
85BYGH450-07	75	czerw	żółty	czarny	-	nieb	ziel	biały	-
85BYGH450A	113	czerw	żółty	czarny	-	nieb	ziel	biały	-
85BYGH450B	153	czerw	żółty	przezr	czar	fiolet	nieb	brąz	ziel
85BYGH450C	115	czerw	nieb	-	-	ziel	czarny	-	-

Silniki krokowe – charakterystyki

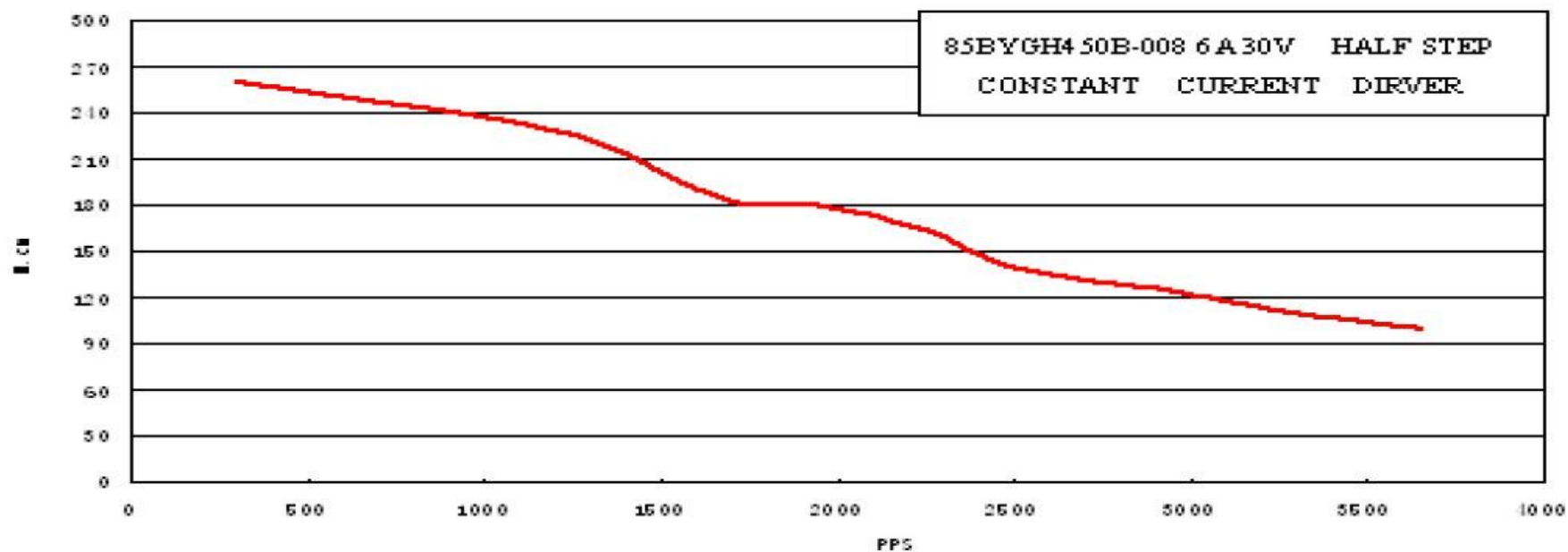
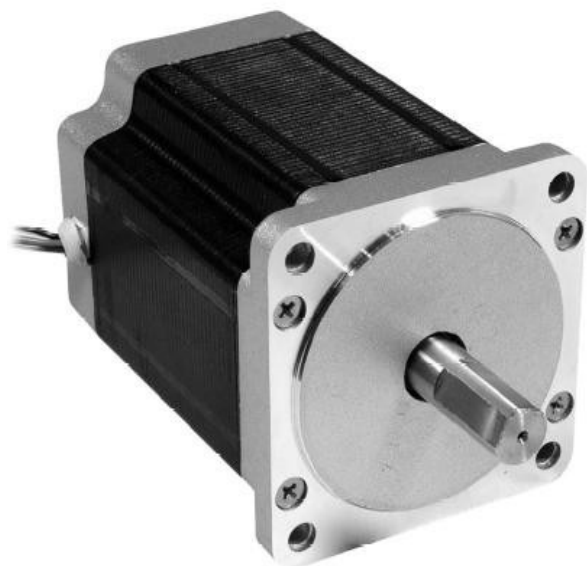
Podstawową charakterystyką silników krokowych, niezbędnych do określenia parametrów napędu jest zależność momentu napędowego od częstotliwości zmian wysterowania faz.

Charakterystyka ta pozwala na dobór właściwego silnika dla spełnienia wymagań narzuconych przez napędzany mechanizm, a także określa ograniczenia w zakresie sterowania dla danego typu silnika.

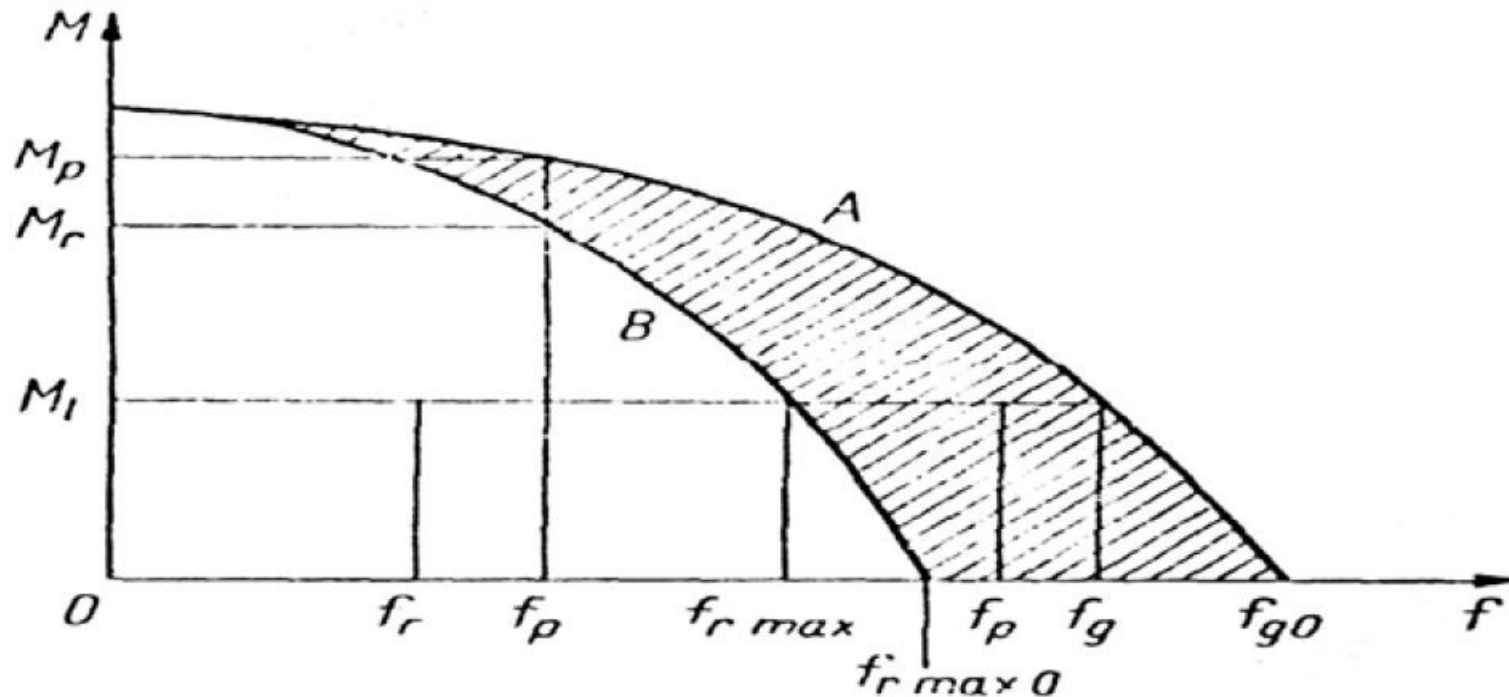
Obszar ograniczony układem współrzędnych i linią a określa zakres pracy start-stopowej .

Przebieg linii zależny jest nie tylko od parametrów silnika ale także od dodatkowego momentu bezwładności wprowadzonego przez obciążenie.

Silniki krokowe – charakterystyki



Silniki krokowe – charakterystyki



B-graniczna charakterystyka pracy „start-stop’ ($J=0$),

A-graniczna charakterystyka pracy synchronicznej,

Częstotliwość maksymalna rozruchu $f_{r\max}$

Częstotliwość graniczna f_g

Częstotliwość graniczna nawrotu f_n , $f_n = (0,2 \div 0,5) f_{r\max}$.

Moment rozruchowy silnika skokowego M_R

Maksymalny statyczny moment synchroniczny M_s .