

NAPĘD I STEROWANIE MASZYN

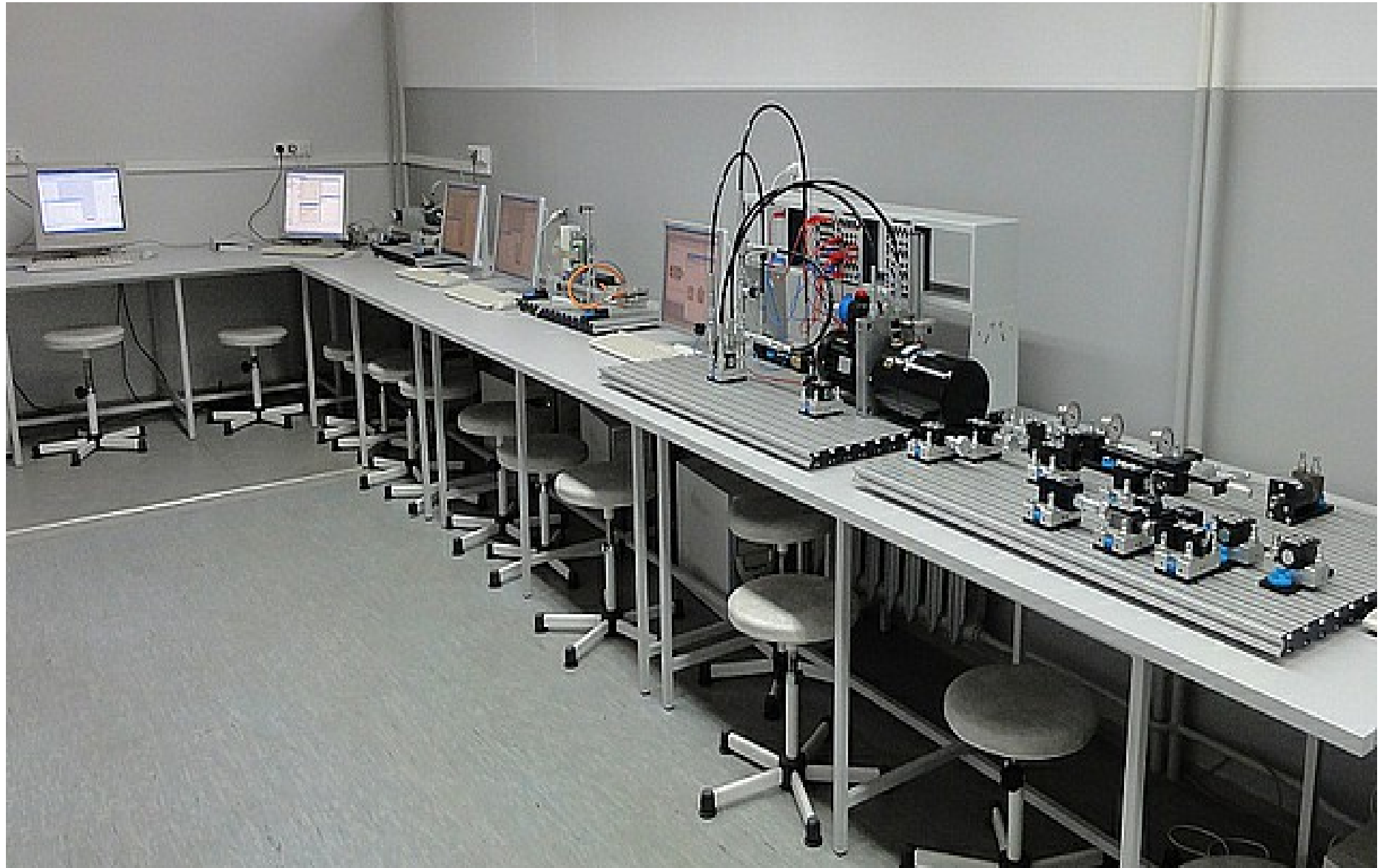
Robert Babiarz

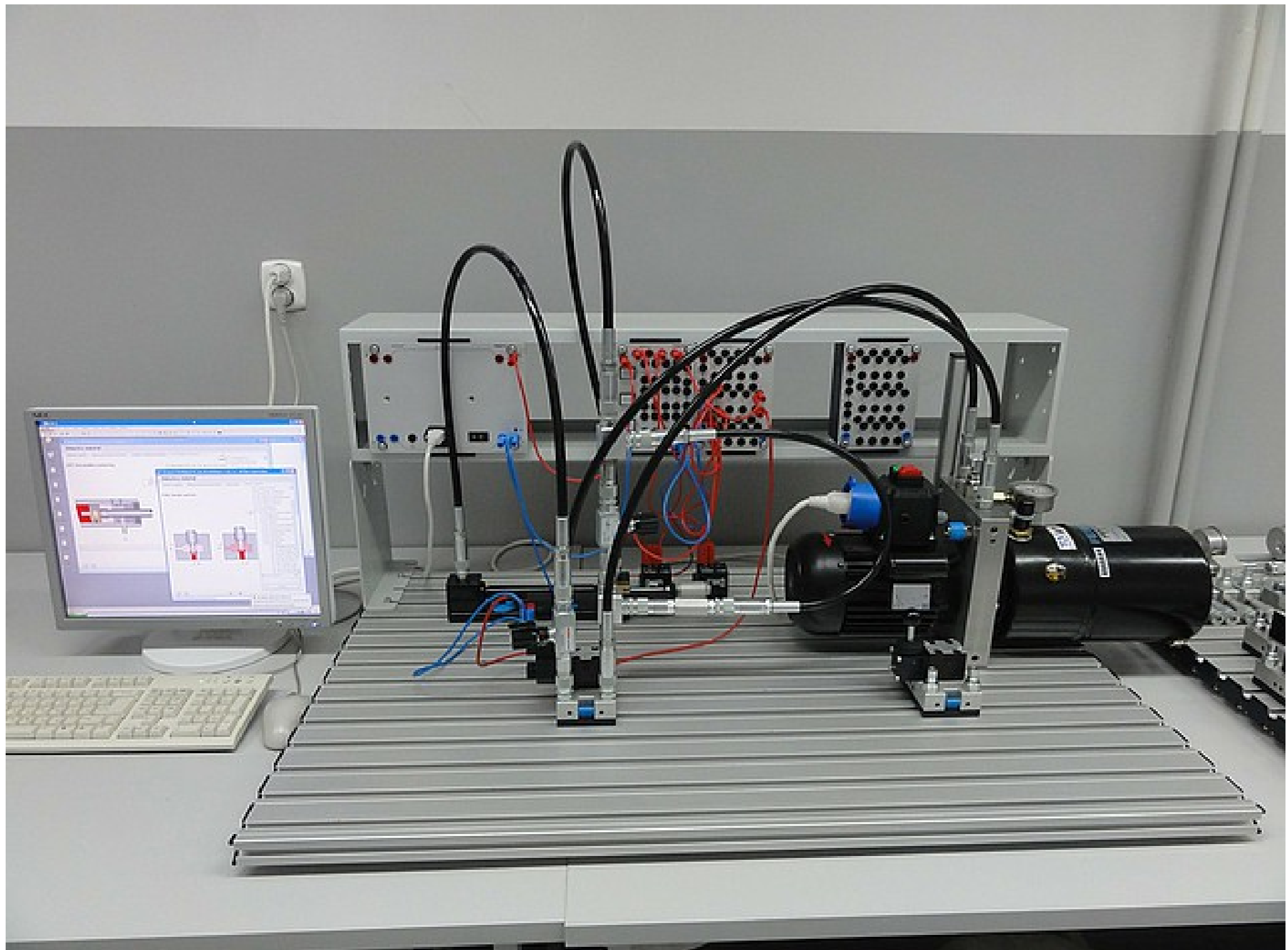
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa
Politechnika Rzeszowska

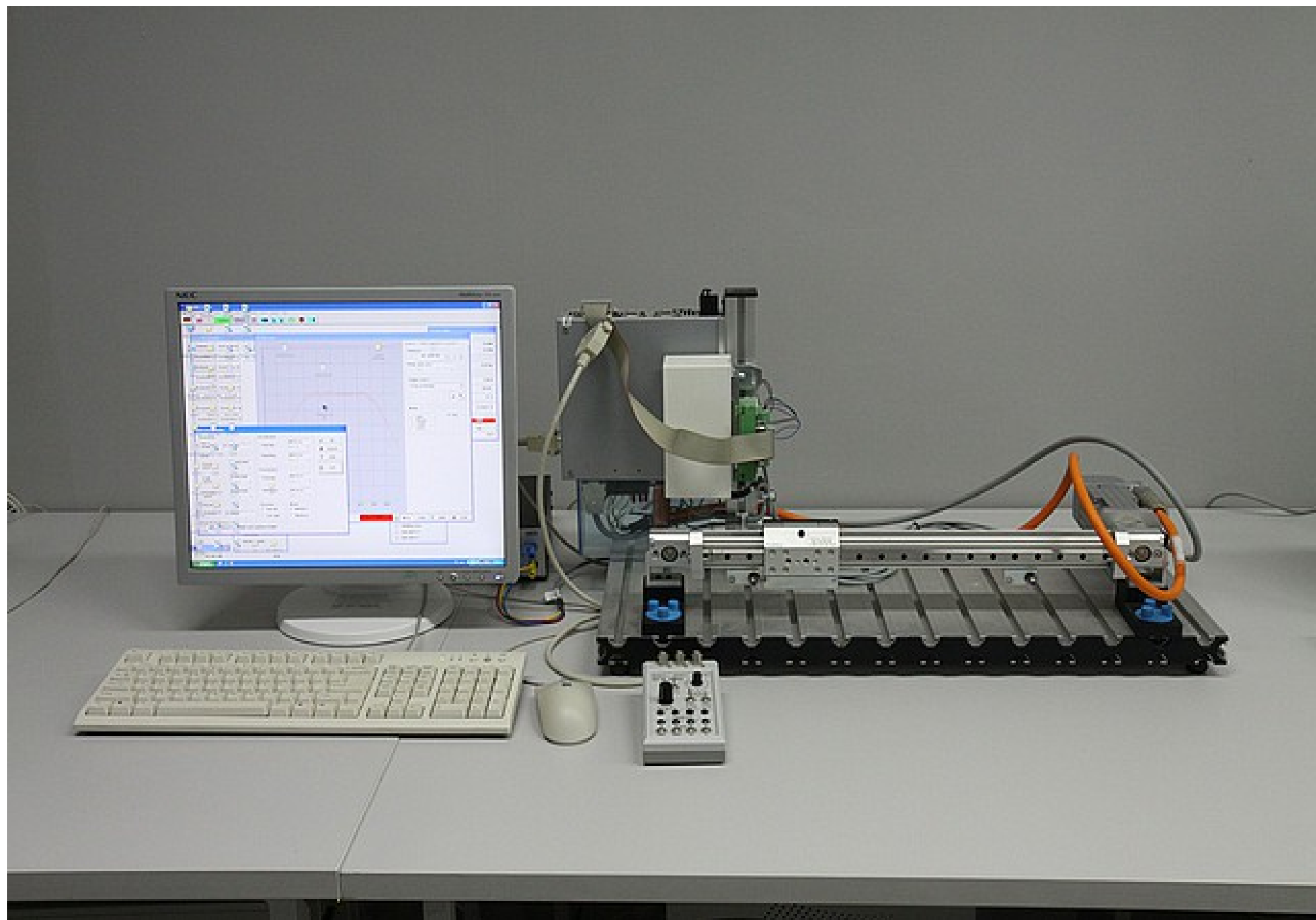
Rzeszów 2015

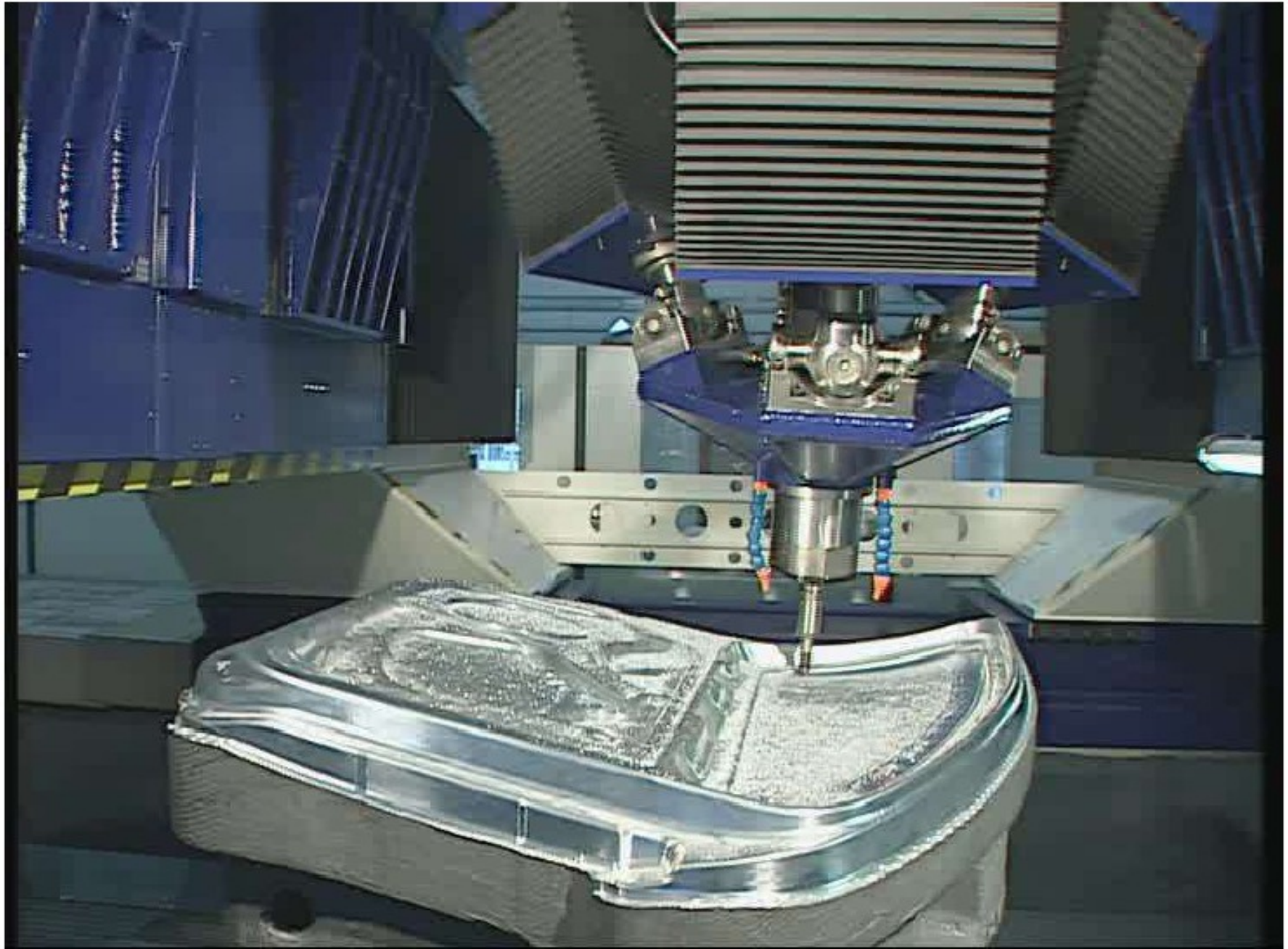
Literatura:

1. J. Kosmol. Serwonapędy maszyn sterowanych numerycznie. WNT Warszawa, 1998r
2. J. Kosmol. Elektryczne silniki i układy napędowe obrabiarek i maszyn technologicznych. Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice, 1993r.
3. Praca zbiorowa pod redakcją J. Kosmola. Laboratorium z napędu i sterowania elektrycznego obrabiarek. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2000r
4. H. Kowalowski. Maszyny i napęd elektryczny. PWN, Warszawa, 1981r
5. T. Kaczmarek, K. Zawirski. Układy napędowe z silnikiem synchronicznym. Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań, 2000r
- R. Kurdziel. Elektrotechnika. PWN, Warszawa, 1969r





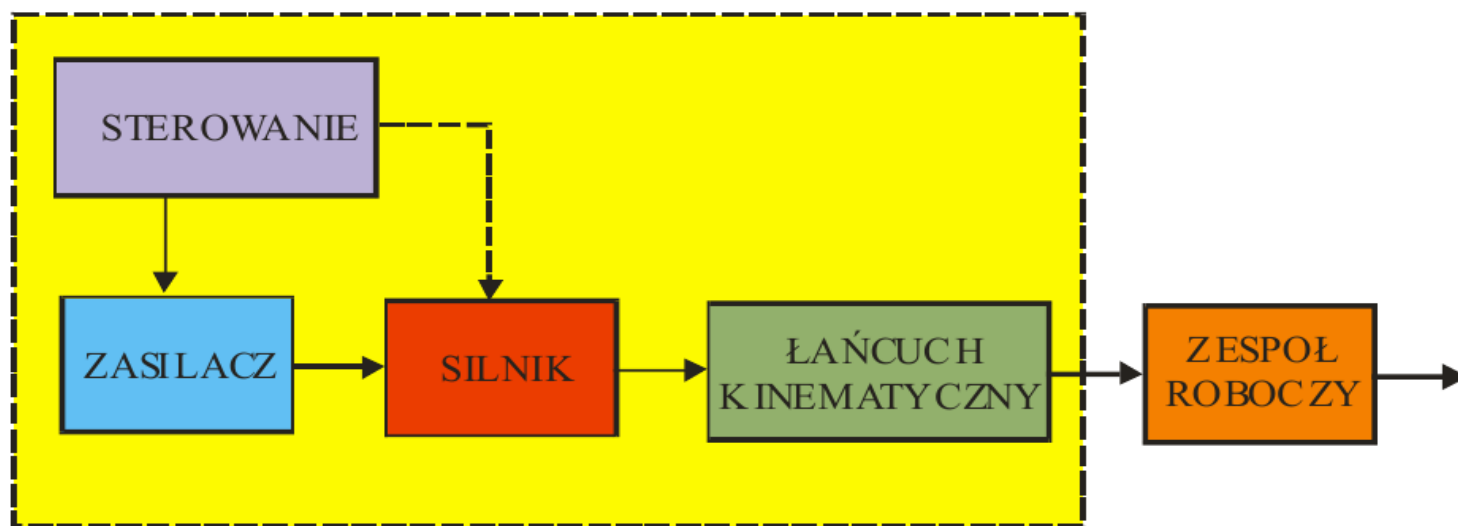




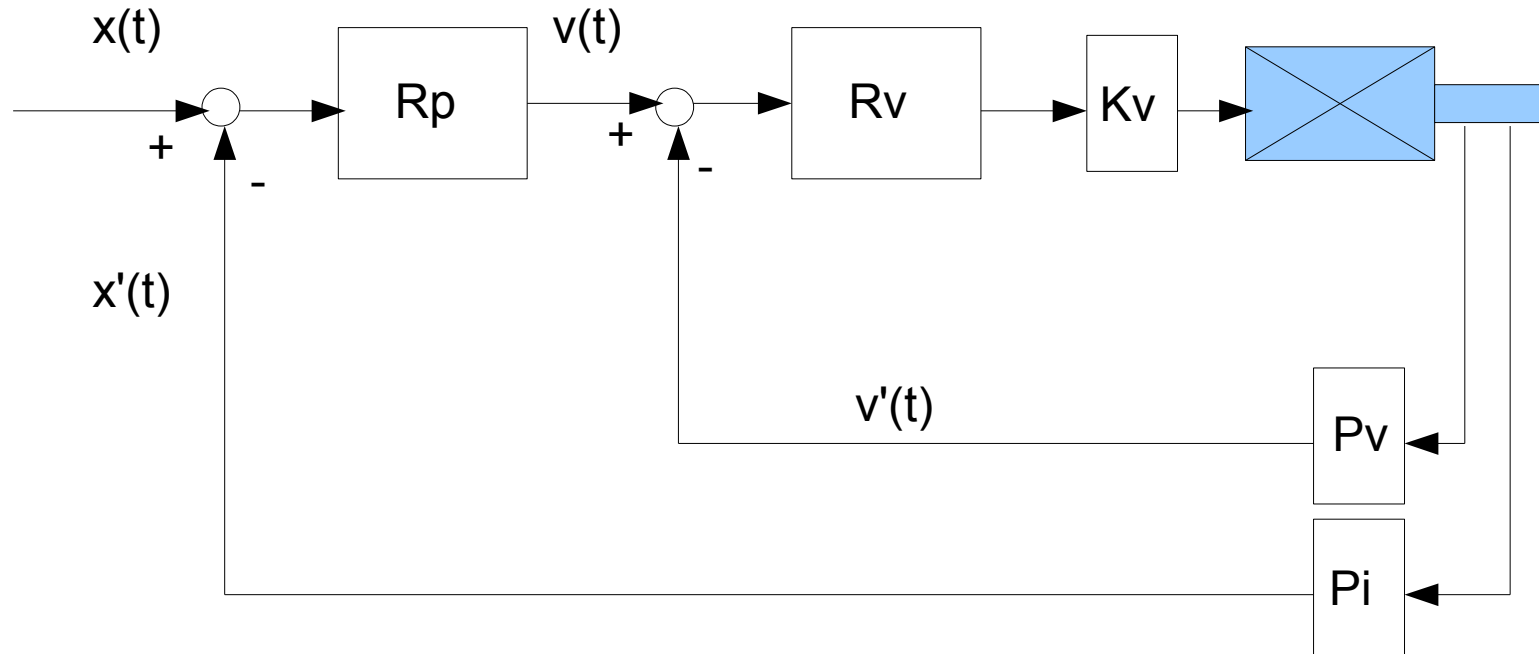
Definicja napędu:

Napędem nazywamy układ (system) którego zadaniem jest przeniesienie energii ze źródła do zespołu roboczego maszyny, urządzenia itp. i który składa się z:

- silnika wraz z jego sterowaniem,
- zasilacza (źródło energii),
- mechanizmów (tzw. łańcuch kinematyczny) łączących silnik z zespołem roboczym (te mechanizmy często spełniają rolę zamiany ilości i kierunku prędkości, momentu).



Schemat blokowy serwonapedu



R_p - regulator położenia

R_v - regulator prędkości

K_v - wzmacniacz mocy

S - silnik

P_v - prądnica tachometryczna

P_i - przetwornik położenia

Wprowadzenie – zadania i wymagania

Zadania stawiane napędom:

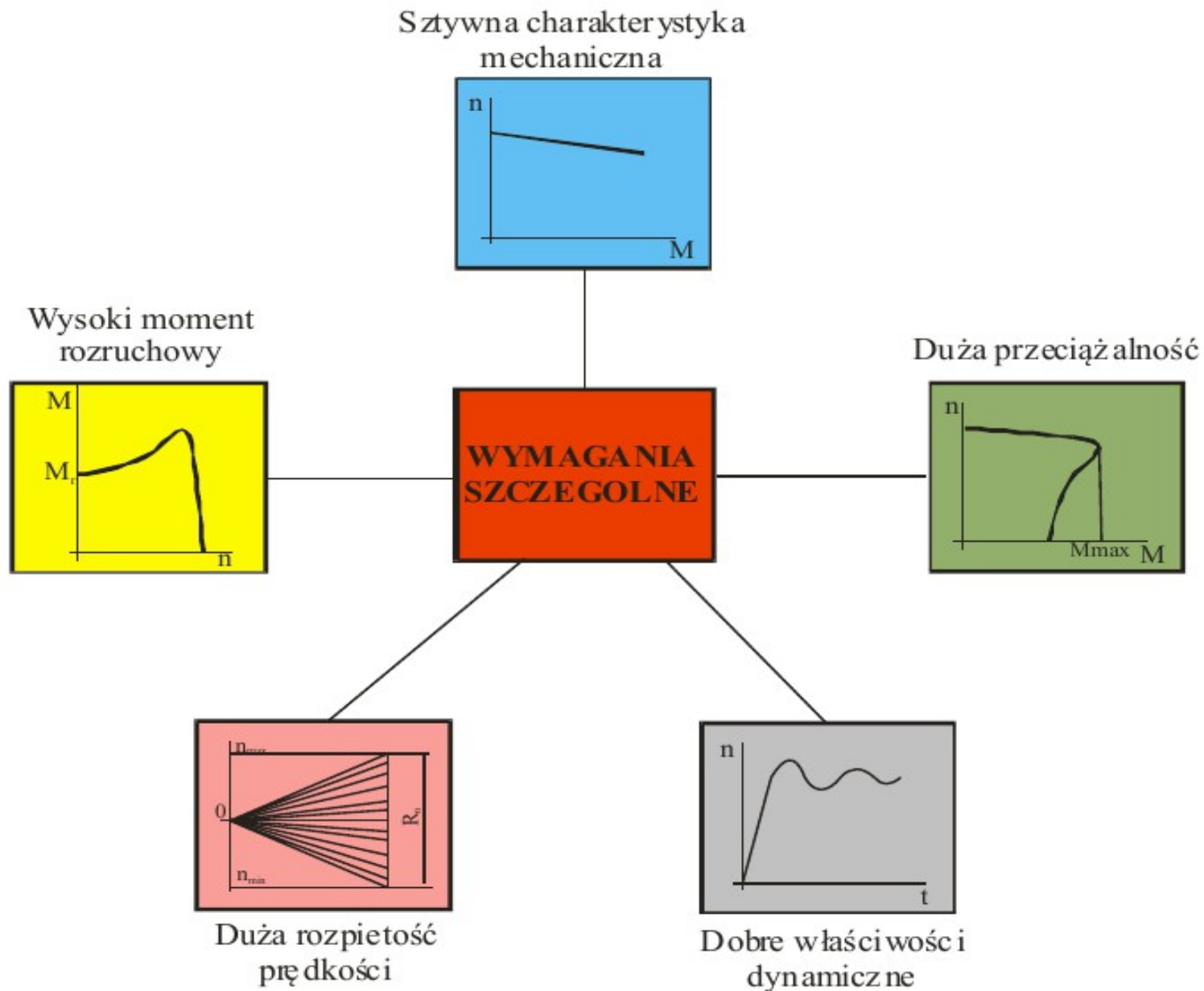
- uruchomienie i podtrzymywanie ruchu zespołu roboczego,
- zapewnienie odpowiednich parametrów kinematycznych ruchu i niezbędnej energii (mocy, momentu, siły),
- zapewnienie wymaganej dokładności ruchu, np. pozycjonowania i pożądanej równomierności ruchu.

Wprowadzenie – zadania i wymagania

Wymagania stawiane napędom:

- sztywność charakterystyki mechanicznej,
- odpowiednie charakterystyki rozruchu i hamowania,
- przeciążalność,
- zdolność do sterowania (zmiany) ruchem (sterowanie ilością i kierunkiem ruchu),
- odpowiednie właściwości dynamiczne.

Wprowadzenie – zadania i wymagania



Wprowadzenie – zadania napędu

Zadania stawiane napędom:

- ruch z programowaną prędkością, przyspieszeniem, itp.,
- ruch z programowanym przemieszczeniem, pozycjonowaniem, (serwonapędy),
- ruch z programowaną siłą, momentem siły, itp.

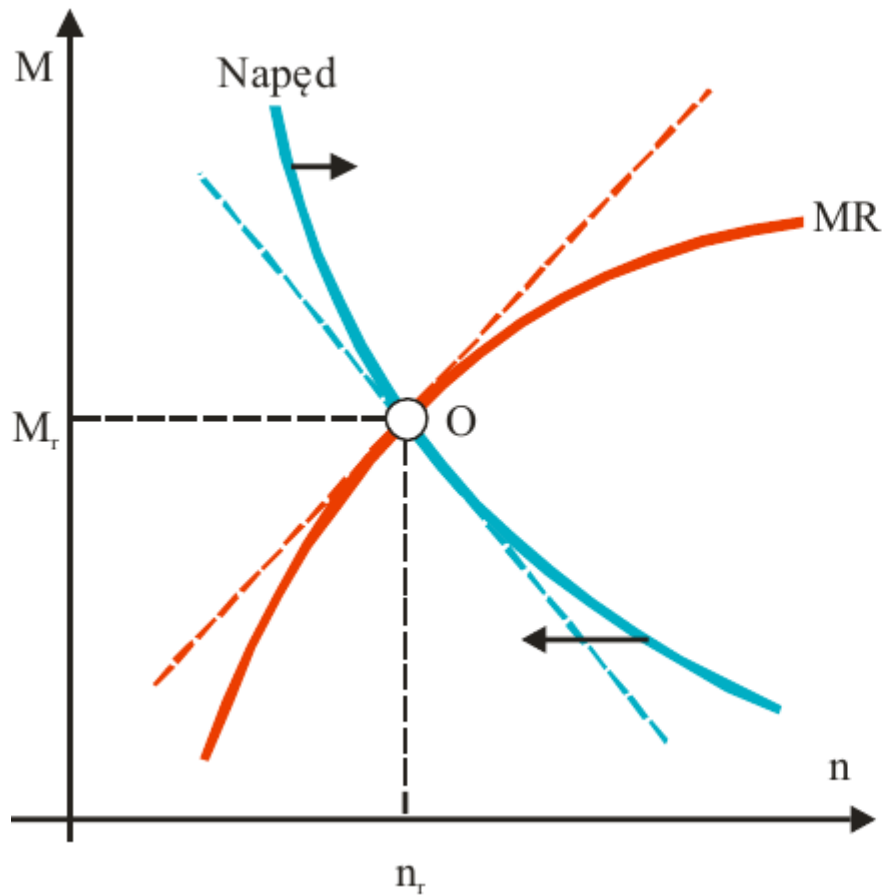
Wprowadzenie – zadania napędu

Wymagania stawiane napędom:

W zależności od zadania stawianego napędom:

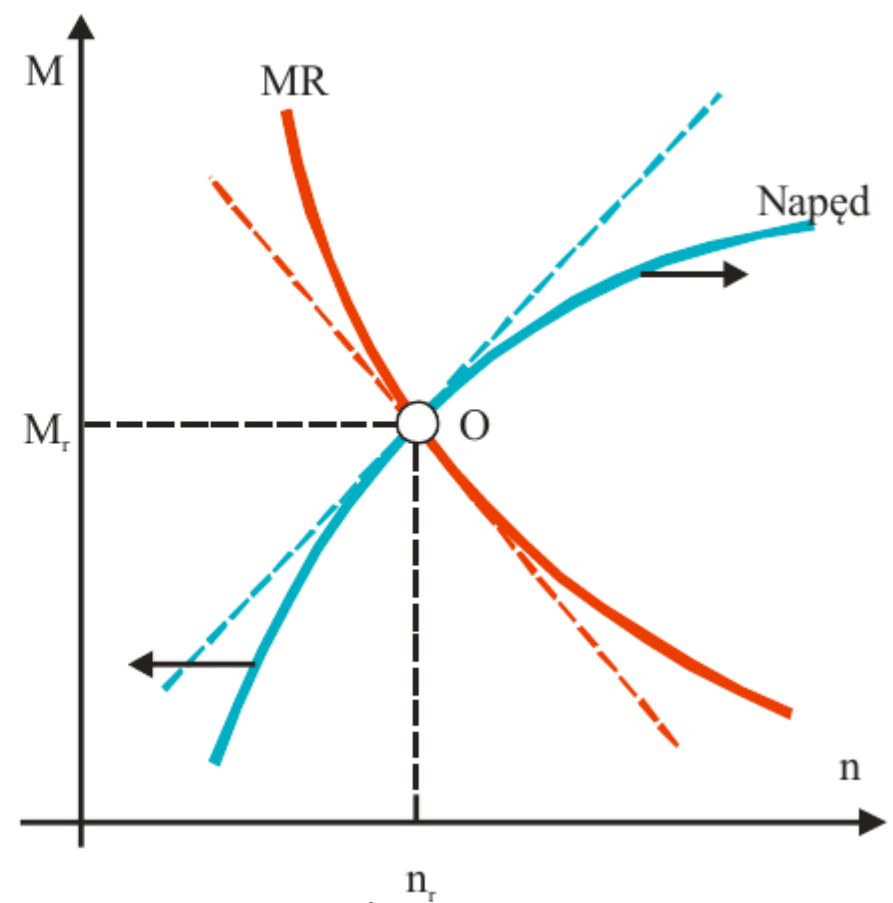
- sztywność charakterystyki mechanicznej,
- odpowiednie charakterystyki rozruchu i hamowania,
- przeciążalność,
- zdolność do sterowania (zmiany) ruchem (sterowanie ilością i kierunkiem ruchu),
- odpowiednie właściwości dynamiczne,
- odpowiednie charakterystyki siłowe (sterowanie wielkością i kierunkiem sił).

Wprowadzenie – stateczność (stabilność) napędu



$$\frac{dM_N}{dn} < \frac{dM_{MR}}{dn}$$

Napęd stateczny (stabilny)

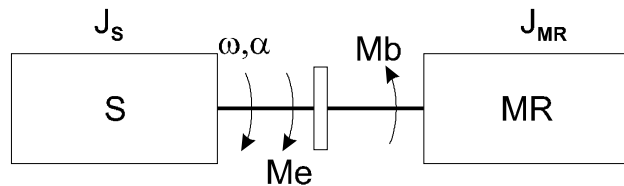


$$\frac{dM_N}{dn} > \frac{dM_{MR}}{dn}$$

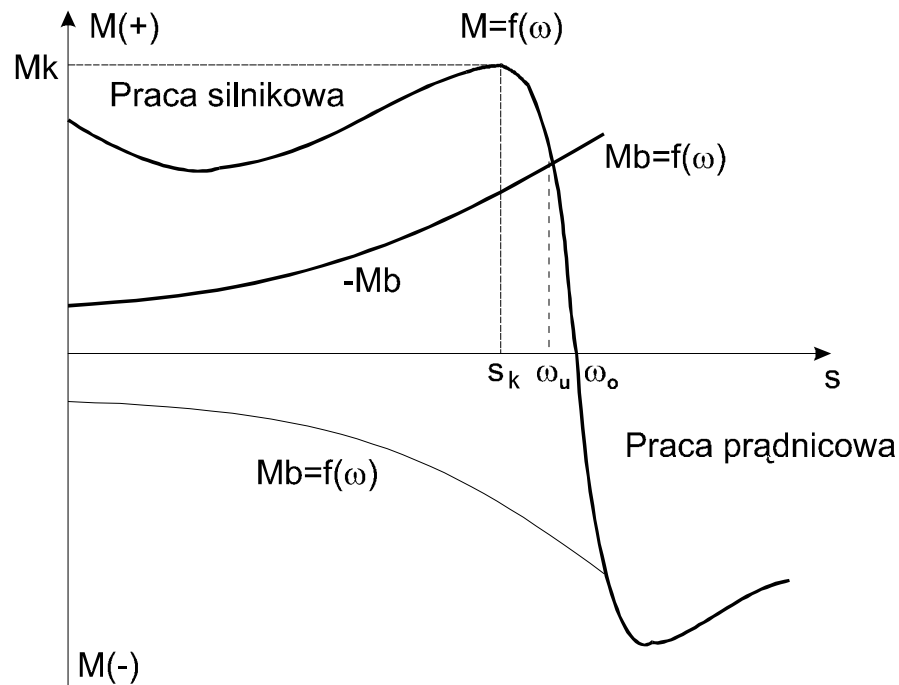
Napęd niestateczny (niestabilny)

Równanie ruchu układu napędowego

Rozważmy prosty układ napędowy:



$J = J_s + J_{MR}$ - wypadkowy moment bezwładności



Faktycznie M_e oraz M_b mają znaki przeciwne.

Z tego powodu, dla wygody, umówiono się rysować M oraz M_b w jednej ćwiartce pamiętając, iż M_b posiada znak „-”, który piszemy sporadycznie.

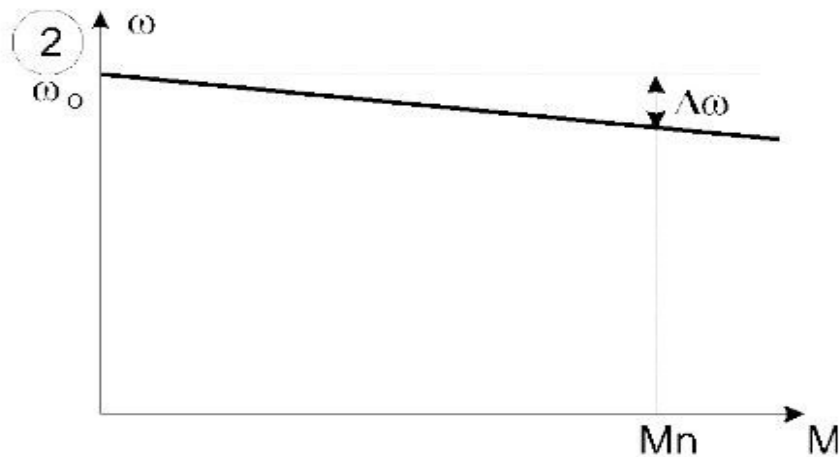
Dowolna różnica momentów

$$M_e - M_b = M_d$$

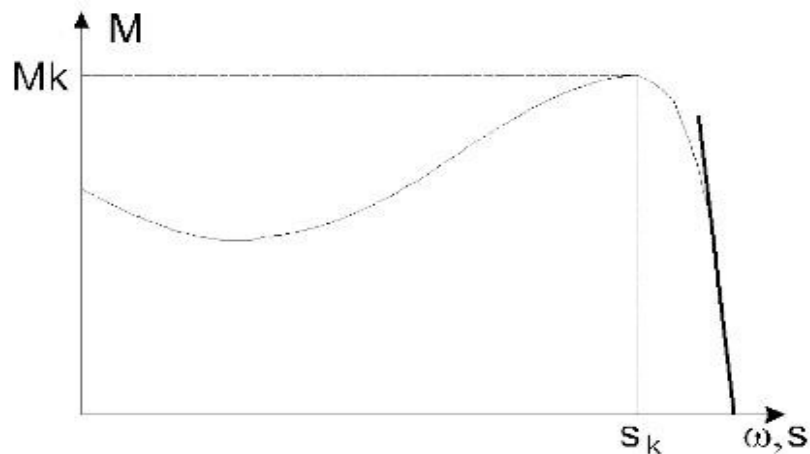
stanowi **moment dynamiczny**.

Charakterystyką mechaniczną silnika nazywa się zależność prędkości obrotowej silnika od jego obciążenia.

O charakterystyce tej mówi się, że jest sztywna, gdy zmiana obciążenia silnika powoduje jedynie nieznaczne zmiany jego prędkości.



$$\frac{\Delta\omega}{\omega_o} * 100\% \leq 10\%$$



Stan ustalony jest wtedy, gdy jest zerowy moment dynamiczny.

Ogólna postać równania ruchu układu napędów:

$$Md = Me - Mb = J \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega}{2} \frac{dJ}{dt}$$

gdzie: J [kgm²] – zastępczy moment bezwładności układu.
Czasami J zależy od położenia i wtedy

$$\omega = \frac{d\alpha}{dt} \quad \text{a równanie ruchu przyjmie postać:} \quad Md = J \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \frac{dJ}{d\alpha} = Me - Mb$$

W naszych rozważaniach będziemy się ograniczać do przypadków, gdy $J = \text{const.}$
W tym przypadku równanie ruchu przyjmie postać:

$$Md = Me - Mb = J \frac{d\omega}{dt}$$

$Me - Mb > 0$
 $Me - Mb < 0$

wzrost prędkości,
zmniejszanie się prędkości.

Elementarne przykłady całkowania równania ruchu

Podstawowe równanie ruchu:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_e - M_m = M_d$$

Czas trwania stanów przejściowych ($M_d \neq 0$) możemy wyznaczyć z powyższego równania w następujący sposób:

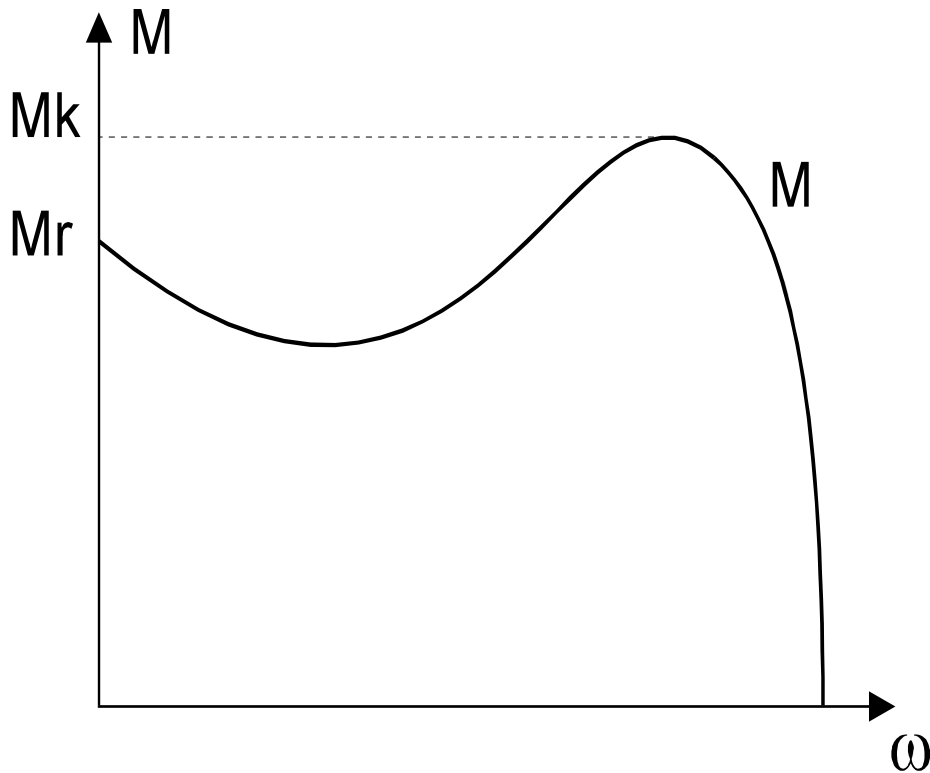
$$t = J \int \frac{d\omega}{(M_e - M_m)}$$

Niestety zwykle utrudnione jest korzystanie z tego równania z następujących powodów:

- nieznajomość charakterystyki $M_e = f(\omega)$,
- nieznajomość charakterystyki $M_m = f(\omega)$,
- trudności z analitycznym rozwiązaniem najczęściej nieliniowych równań.

Dlatego koniecznym staje się zastosowanie uproszczeń.

Dla silnika klatkowego czas rozruchu możemy określić dysponując tzw. średnim momentem elektromagnetycznym.



$$t_r \cong J \frac{\Delta\omega}{M_{d\acute{s}r}}$$

$$M_{d\acute{s}r} = M_{e\acute{s}r} - M_{b\acute{s}r}$$

$$M_{e\acute{s}r} = \frac{M_r + M_k}{2} \cdot (0.9)$$

gdzie: M_r , M_k - dane katalogowe,
 $\Delta\omega = \omega_k - \omega_p$

Otrzymany wynik jest przybliżony i nie uwzględnia elektromagnetycznych procesów przejściowych w silniku. Pozwala jednak na szacowanie czasów rozruchu czy hamowania.

W przypadku, gdy moment dynamiczny M_d (niezależnie od rodzaju silnika) jest liniową funkcją prędkości, czas trwania stanów przejściowych możemy obliczyć z następującej zależności:

$$t_p = J \frac{\omega_k - \omega_p}{M_{dk} - M_{dp}} \cdot \ln \frac{M_{dk}}{M_{dp}}$$

Uwaga!

Przy dojściu do stanu ustalonego $M_{dk} = 0$, ale $\ln(0)$ jest nieokreślony ($t_p \rightarrow \infty$). W takiej sytuacji M_{dk} należy obliczyć dla prędkości równej np. $0,95 \omega_{ust}$.

SILNIKI NAPĘDOWE

Silnik elektryczny jest to maszyna która zamienia energię elektryczną w energię mechaniczną.

Silniki elektryczne można podzielić na kilka sposobów

np. ze względu na rodzaj napięcia zasilającego:

- silniki elektryczne prądu stałego,
- silniki elektryczne prądu zmiennego,
- silniki uniwersalne.

Silniki elektryczne prądu stałego :

- bocznikowe,
- szeregowo,
- szeregowo - bocznikowe,

Cechy silników elektrycznych z punktu widzenia zastosowania ich w układach napędowych:

zalety:

- szeroki zakres mocy produkowanych silników (od pojedynczych watów w przypadku silników do napędu modeli do stu megawatów,
- powszechna dostępność energii elektrycznej,
- ochrona środowiska,
- możliwość pracy w różnych warunkach otoczenia (np. w warunkach zagrożenia wybuchem, pożarowego - niska temp. jego elementów),
- łatwa możliwość kontroli i programowania pracy,
- łatwa regulacja prędkości (w szerokim zakresie i z dużą dokładnością),
- wysoka sprawność, niska cena i prosta obsługa w czasie eksploatacji.

Cechy silników elektrycznych z punktu widzenia zastosowania ich w układach napędowych:

wady:

- konieczność przyłączenia do nieruchomego zazwyczaj źródła energii elektrycznej (akumulatory są ciężkie i mają małą pojemność - wózki o małym zasięgu, przewody ślizgowe - trakcja kolejowa, tramwajowa i trolejbusy, baterie słoneczne),
- ciężar jednostkowy i szybkość działania mniejsza niż w przypadku siłowników pneumatycznych i hydraulicznych.

Silniki elektryczne obrotowe charakteryzują się następującymi parametrami:

- wejściowymi:

- znamionowe napięcie zasilania U_n [V],
- znamionowy I_n i maksymalny I_{max} prąd zasilania [A],
- częstotliwość sieciowa prądu zasilającego f [Hz],

- wyjściowymi:

- prędkość obrotowa wirnika n [obr/min],
- moment obrotowy na wale silnika M [Nm] ; rozpatruje się momenty: znamionowy M_n , szczytowy (krytyczny) M_k i rozruchowy M_r ,
- moc silnika P [kW],
- dopuszczalna temperatura uzwojeń,

- pozostałymi:

- moment bezwładności T_s [kg m²],
- dopuszczalna siła F_w [N] poprzecznego odciążenia wału silnika;
- stała czasowa elektryczna T_e [s] i mechaniczna T_m [s].

Charakterystyki funkcyjne silników elektrycznych, spotykane w katalogach producentów, mogą, być następujące:

- **mechaniczna** silnika,
- **wykorzystania mocy** napędowej, podająca moc, jaką silnik może rozwinąć długotrwale lub w przypadku przeciążenia silnika w określonych przedziałach czasu, przy różnych prędkościach obrotowych,
- **cieplna**, określająca dopuszczalną temperaturę uzwojeń i czas nagrzewania do temperatury ustalonej,
- **sprawność silnika** w zależności od prędkości obrotowej wału silnika i stopnia wykorzystania mocy silnika.

Silniki prądu stałego (komutatorowe)

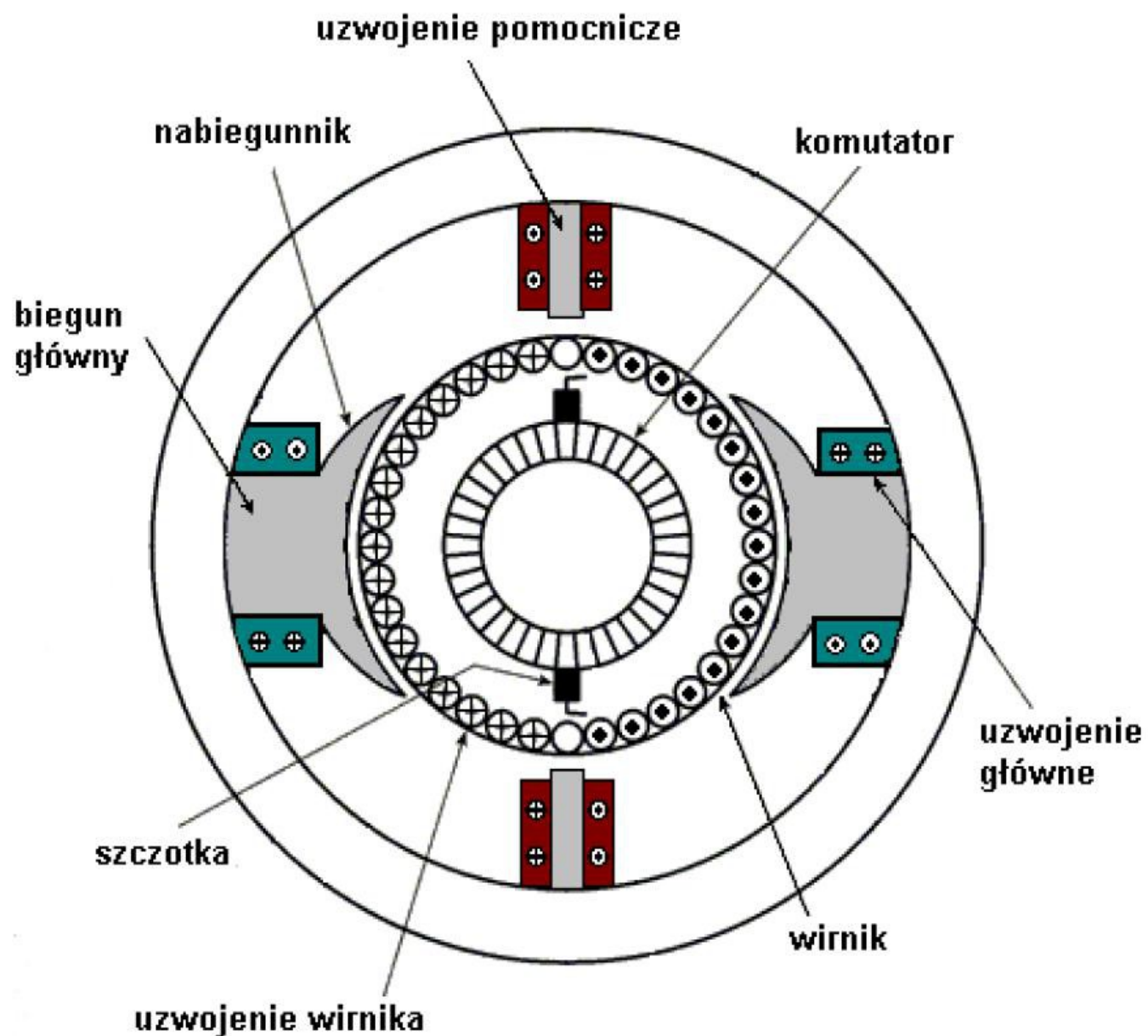
Silnik prądu stałego jest silnikiem elektrycznym zasilanym prądem stałym i służy do zamiany energii elektrycznej na energię mechaniczną.

Jako maszyna elektryczna prądu stałego może pracować zamiennie jako silnik lub prądnica. W tym drugim przypadku wirnik napędzany jest energią mechaniczną dostarczoną z zewnątrz, a na zaciskach uzwojenia twornika odbierana jest wytworzona energia elektryczna.

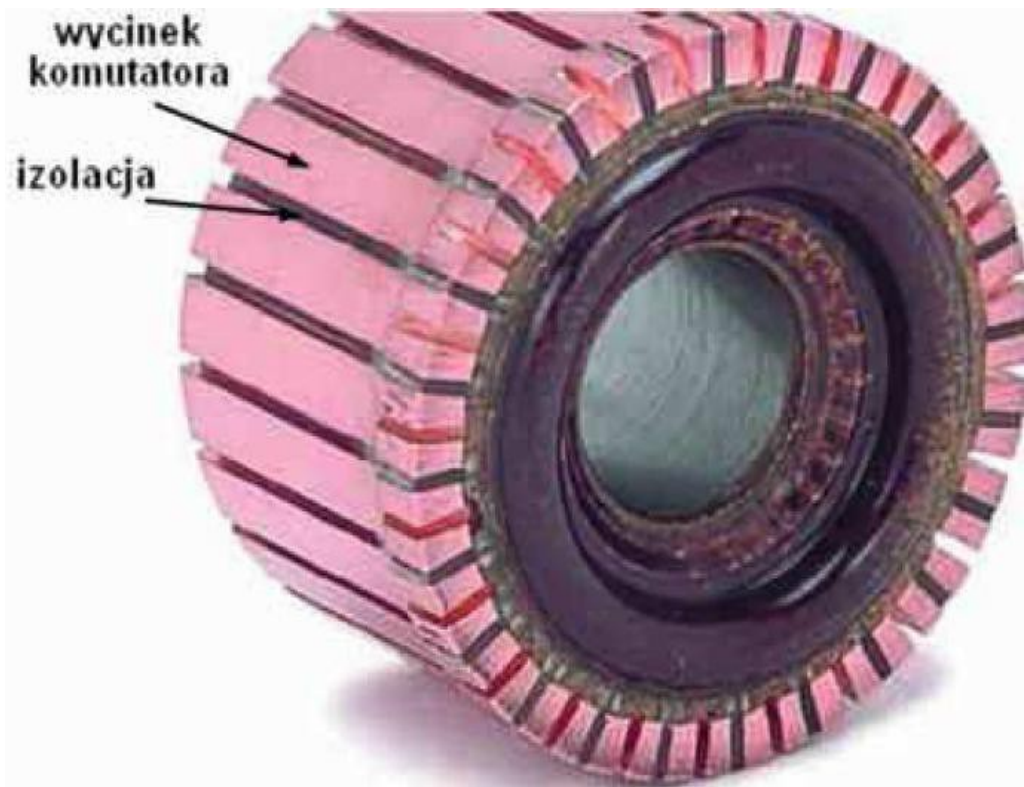
Większość silników prądu stałego to silniki komutatorowe, to znaczy takie, w których uzwojenie twornika zasilane jest prądem poprzez komutator.

Jednak istnieje wiele silników prądu stałego które nie posiadają komutatora lub też komutacja przebiega na drodze elektronicznej.

Silniki prądu stałego - budowa



Silniki prądu stałego - budowa



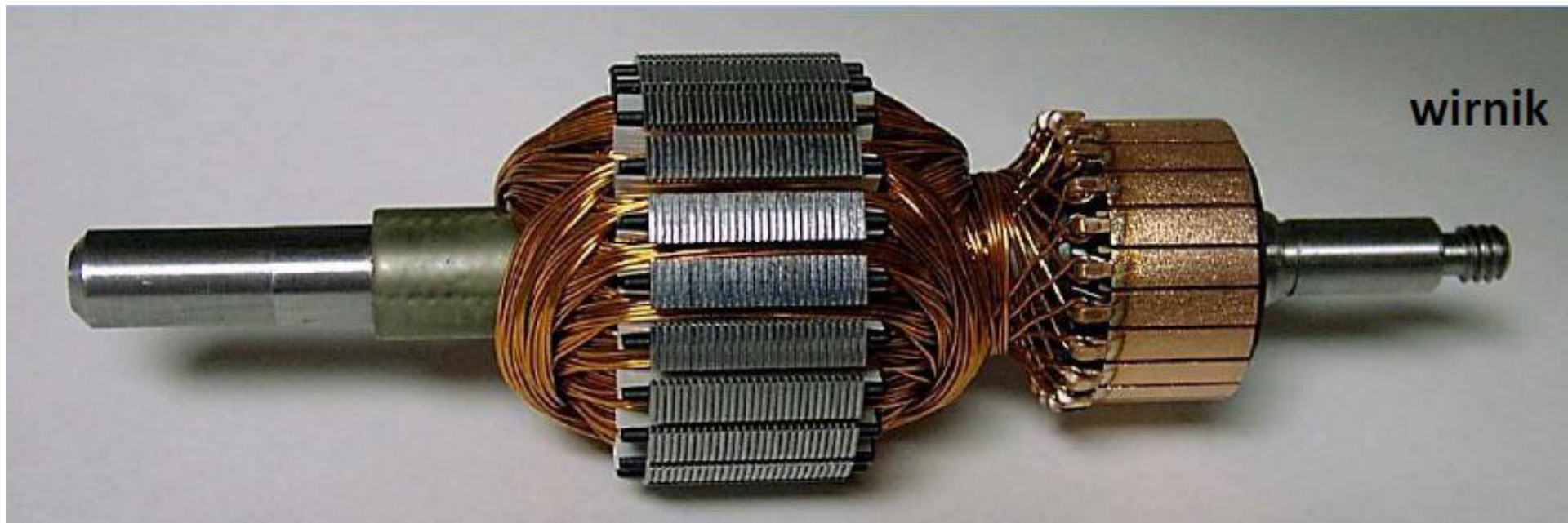
Bardzo ważną częścią silnika prądu stałego, umożliwiającą mu prawidłowe funkcjonowanie jest komutator.

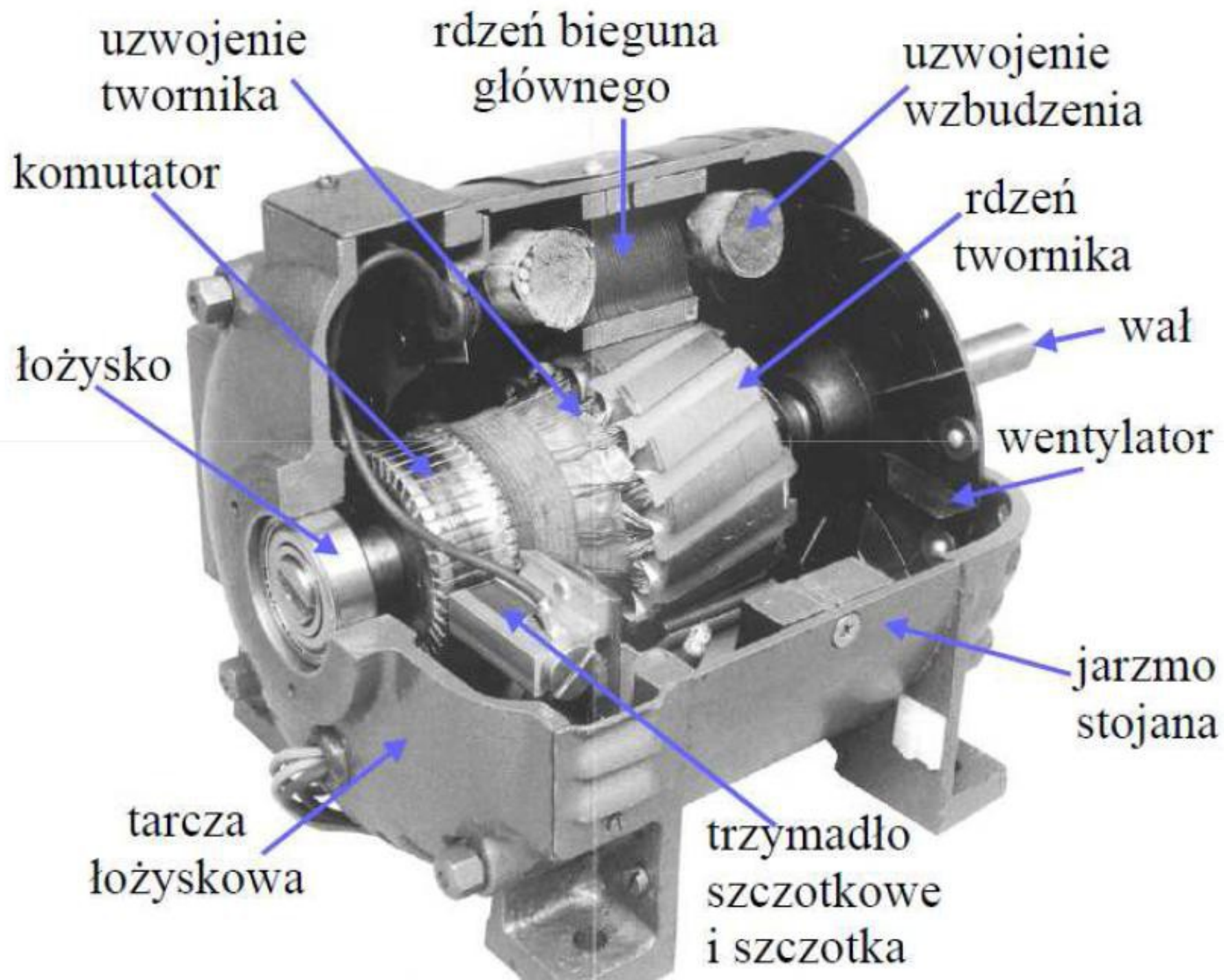
Komutator wykonany jest w postaci wielu miedzianych wycinków, wzajemnie odizolowanych.

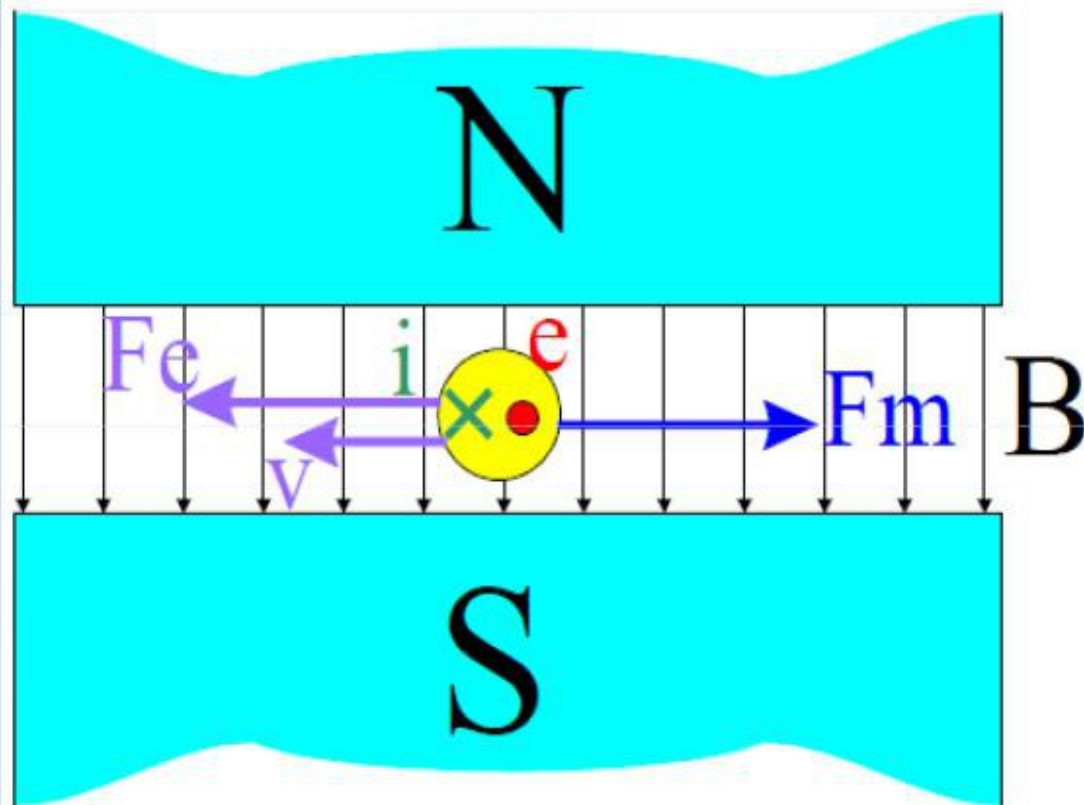
Do każdego z wycinków przyłączony jest jeden koniec uzwojenia wirnika.

komutator silnika prądu stałego

Silniki prądu stałego - budowa







Moment elektromagnetyczny

$$M_e = c_M \cdot \Phi \cdot I_t$$

c_M – stała maszyny

I_t – prąd twornika

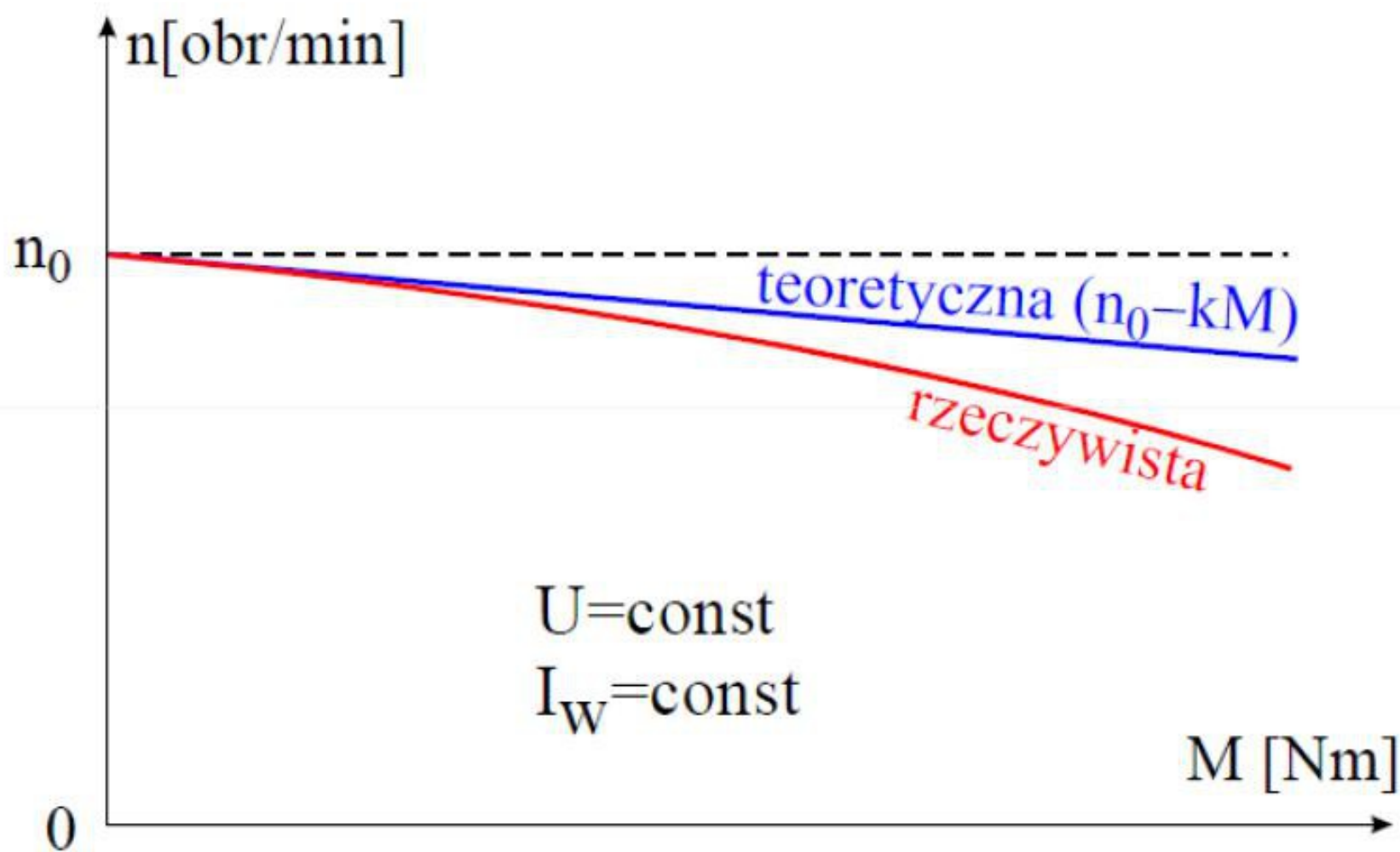
Napięcie indukowane

$$E = c_E \cdot \Phi \cdot n$$

c_E – stała maszyny

Φ – strumień magnetyczny

Charakterystyka mechaniczna silnika



$$n = \frac{U - I_t R_{tc}}{c_E \Phi} = \frac{U}{c_E \Phi} - \frac{R_{tc}}{c_M c_E \Phi^2} M = n_0 - kM$$

SILNIKI INDUKCYJNE

Silniki indukcyjne są maszynami odwracalnymi:

- praca prądnicowa
- praca silnikowa.

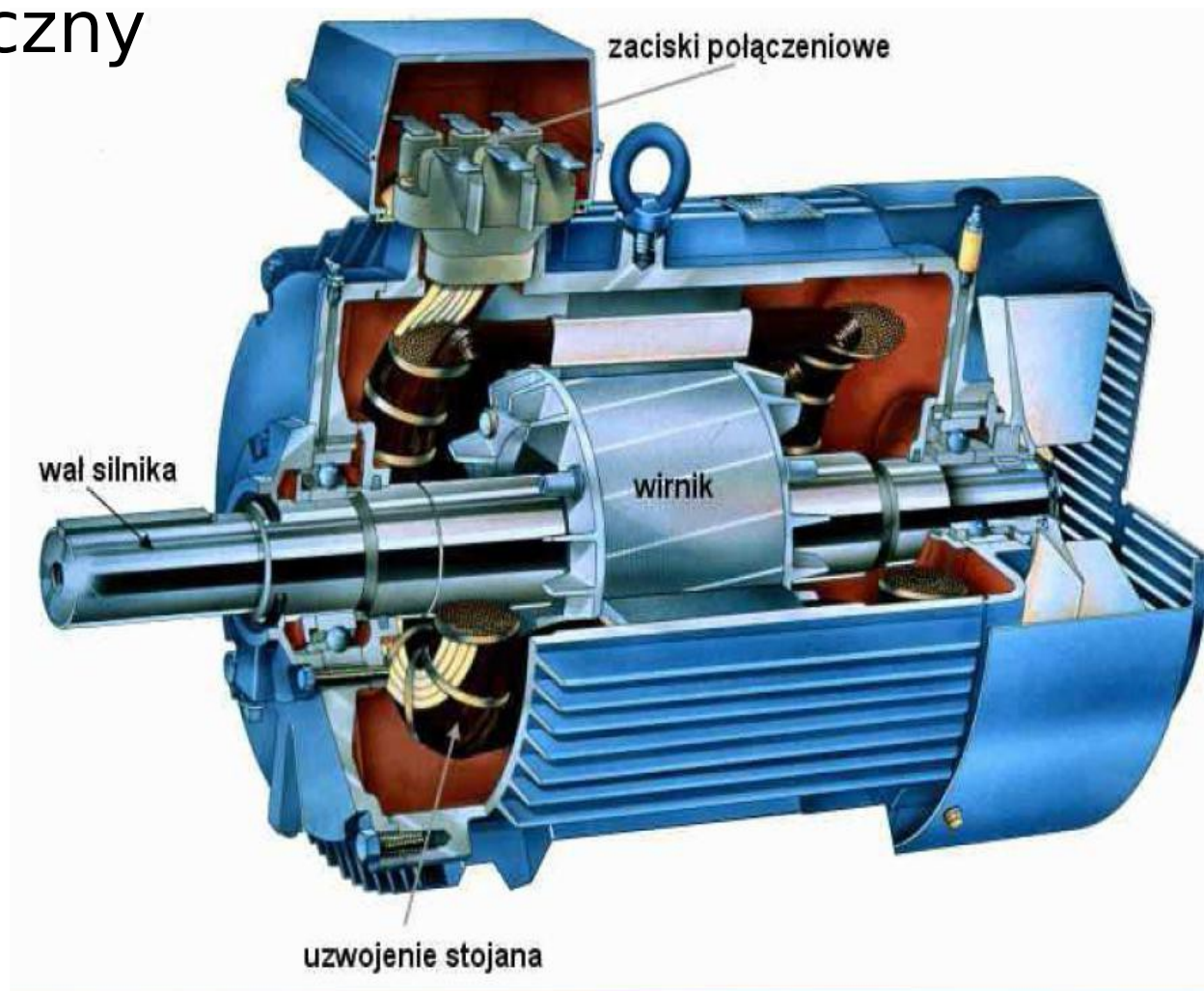
Rodzaje silników indukcyjnych

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,
 - b) o wirniku pierścieniowym,
- 3) silniki komutatorowe:
 - a) jednofazowe,
 - b) trójfazowe,
- 4) silniki specjalne (np. liniowe).

Silnik asynchroniczny

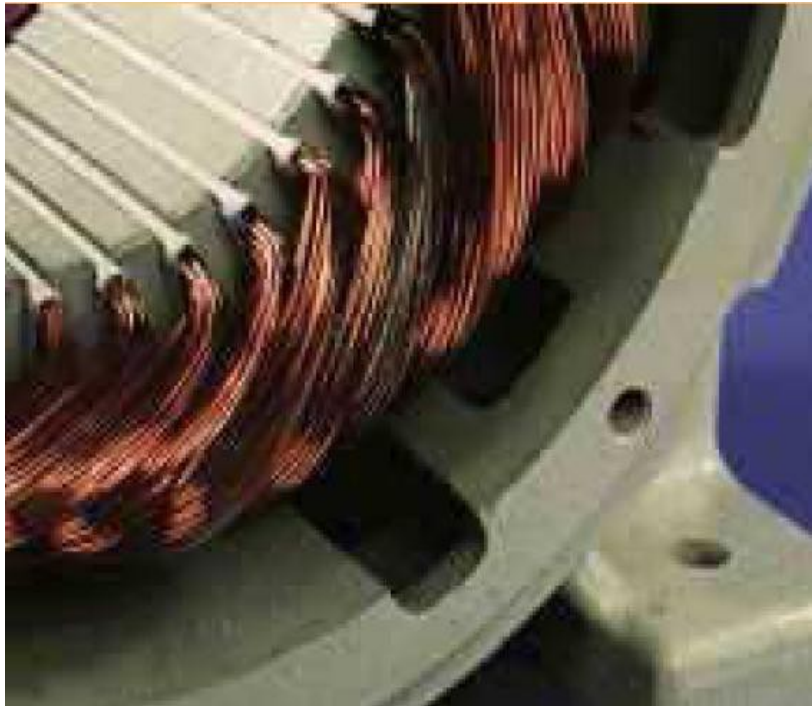
Silnik asynchroniczny (indukcyjny) to najbardziej popularny silnik, o najszerszych zastosowaniach ze wszystkich rodzajów silników elektrycznych, wykorzystywany szczególnie w przemyśle, ale również i w sprzęcie domowym. Charakteryzuje się bardzo prostą, i łatwą w utrzymaniu konstrukcją.



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.



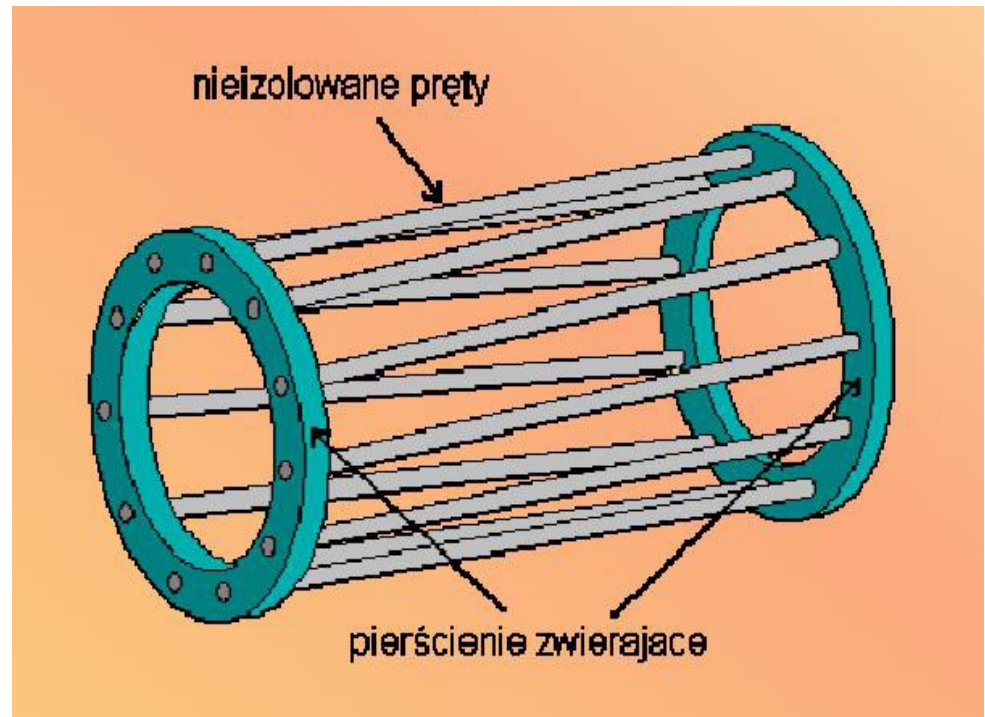
Uzwojenie stojana wykonane jest z izolowanego drutu, zaimpregnowane i mocno usztywnione, tak, aby zmniejszyć prawdopodobieństwo uszkodzenia na skutek drgań mechanicznych.

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

Silnik asynchroniczny

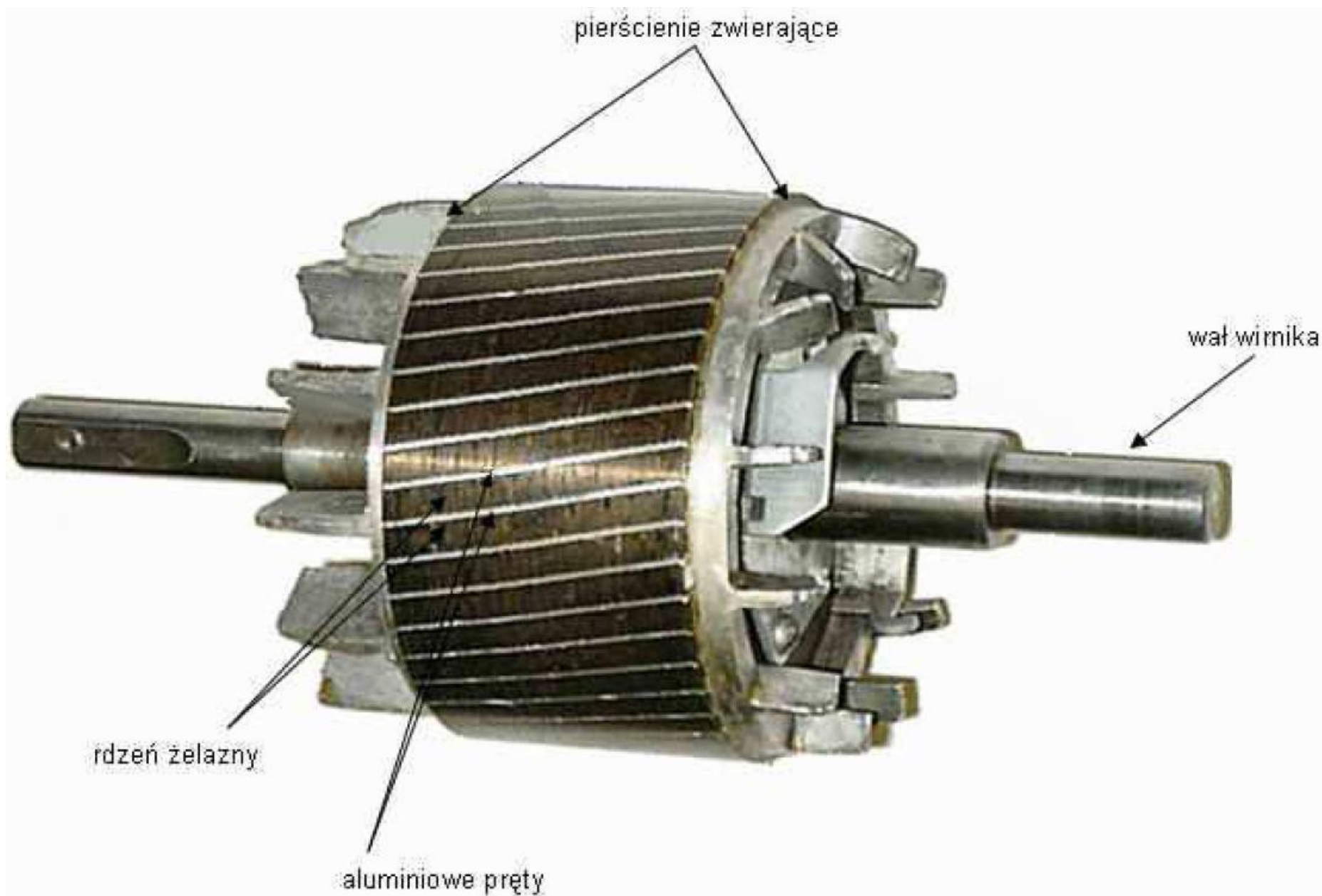
W silniku indukcyjnym klatkowym obwód elektryczny wirnika jest wykonany z nieizolowanych prętów, połączonych po obu stronach wirnika pierścieniami zwierającymi. Konstrukcja to wyglądem przypomina klatkę o kształcie walca (stąd wzięła się nazwa tego silnika).

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 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

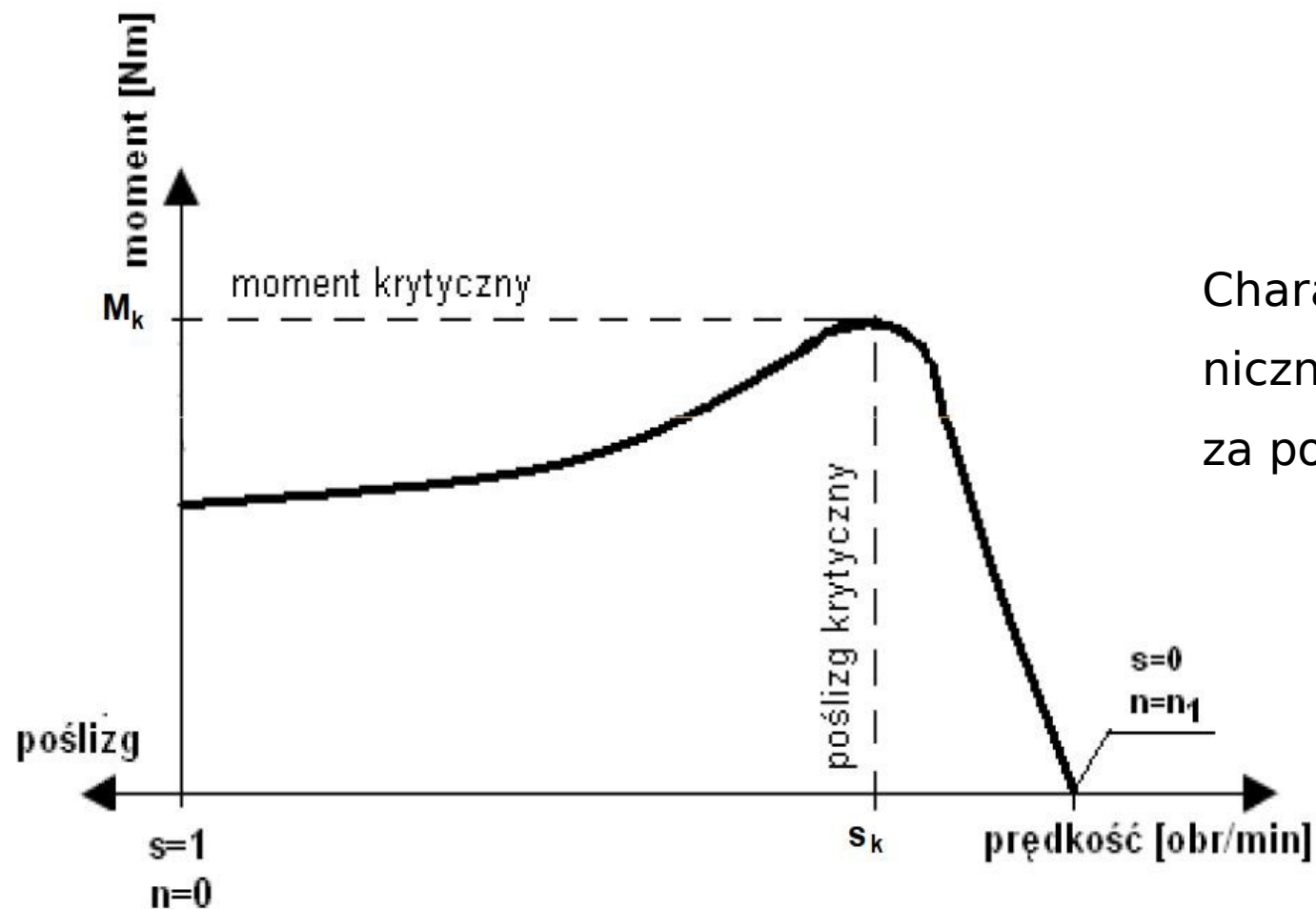
$$P = \frac{W}{t} = \frac{F \cdot l}{t} = F \cdot v = F \cdot \omega \cdot r = F \cdot \frac{\pi \cdot n}{30} \cdot r = \frac{M}{r} \cdot \frac{\pi \cdot n}{30} \cdot r = M \cdot \frac{\pi \cdot n}{30}$$

Zatem generowany w tych warunkach moment elektromagnetyczny M :

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

Silnik asynchroniczny

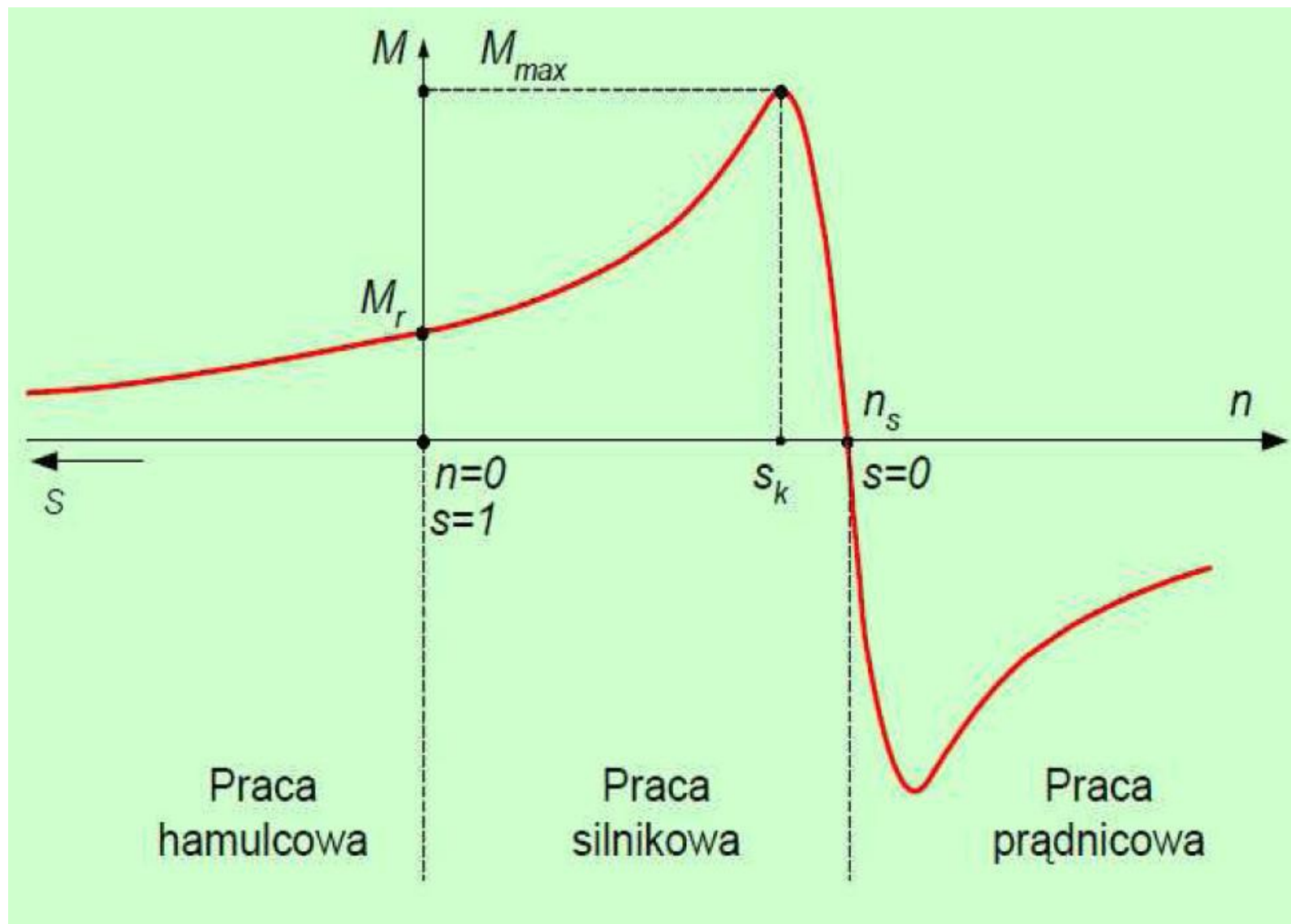
Charakterystyka mechaniczna silnika indukcyjnego ukazuje zależność momentu na jego wale od prędkości obrotowej silnika. Jak już wspomniano wcześniej prędkość obrotową silnika asynchronicznego można wyrazić za pomocą poślizgu.



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

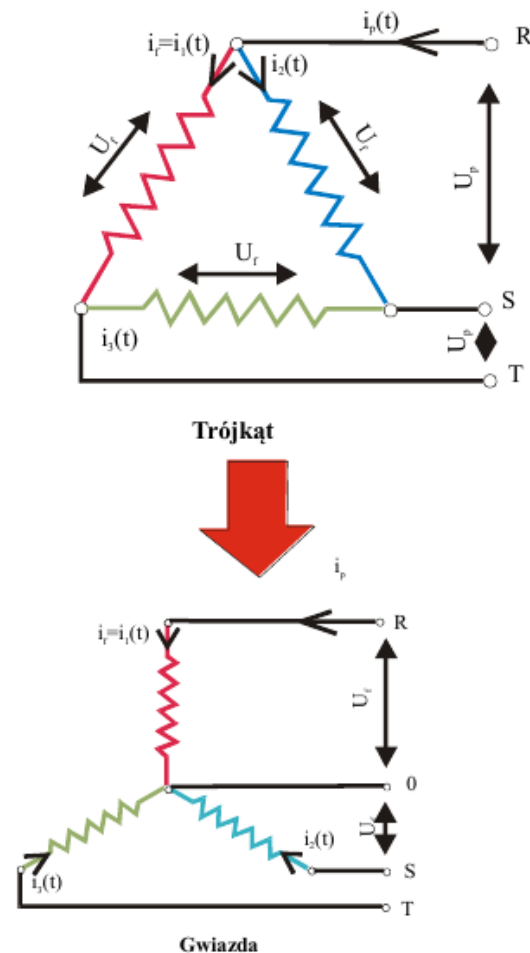
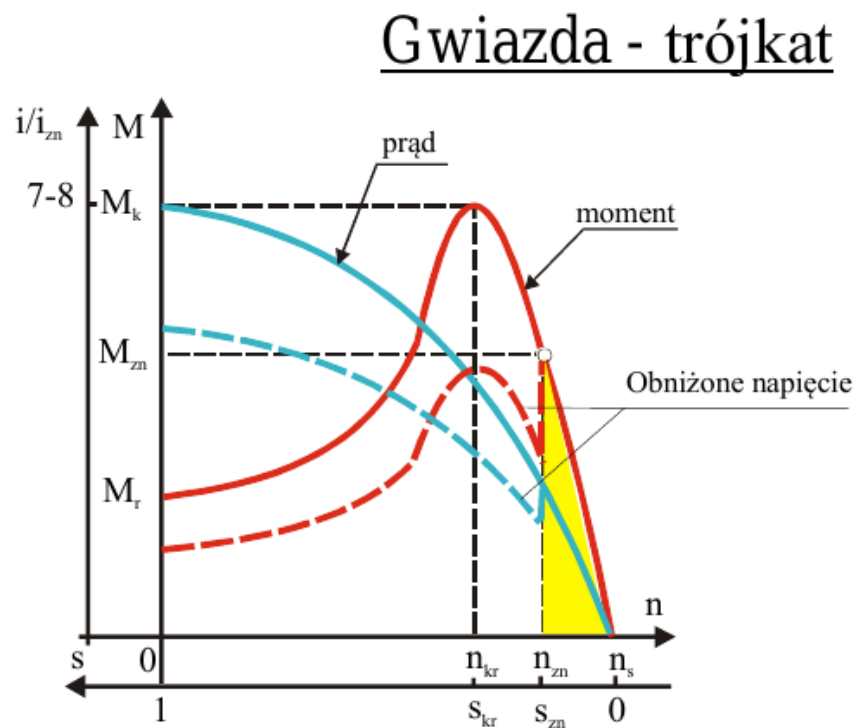


Rozruch bezpośredni

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).

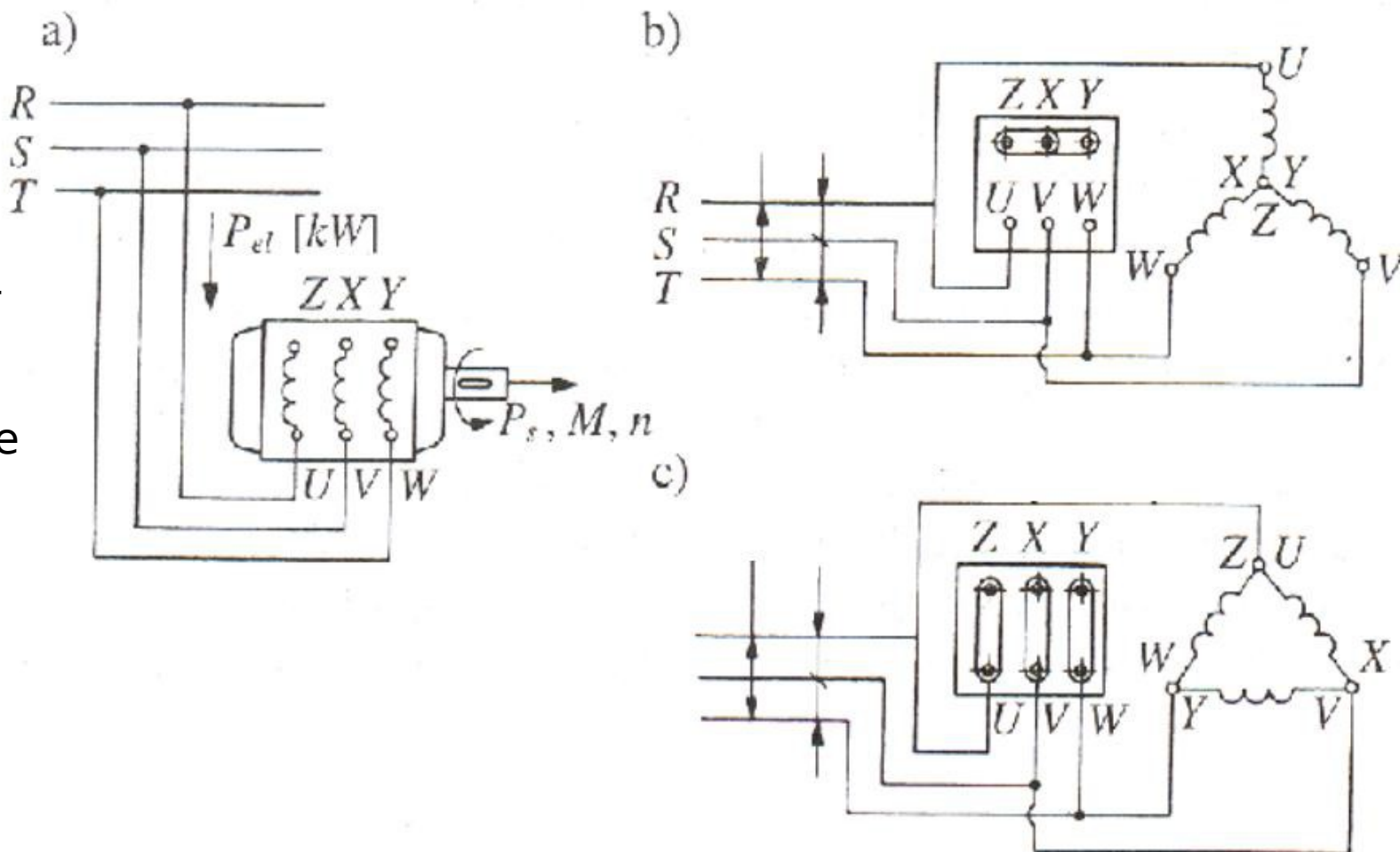
Silnik asynchroniczny – metody rozruchu



Zastosowanie przełącznika „gwiazda – trójkąt” obniża pobór prądu ok. 3 razy

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.

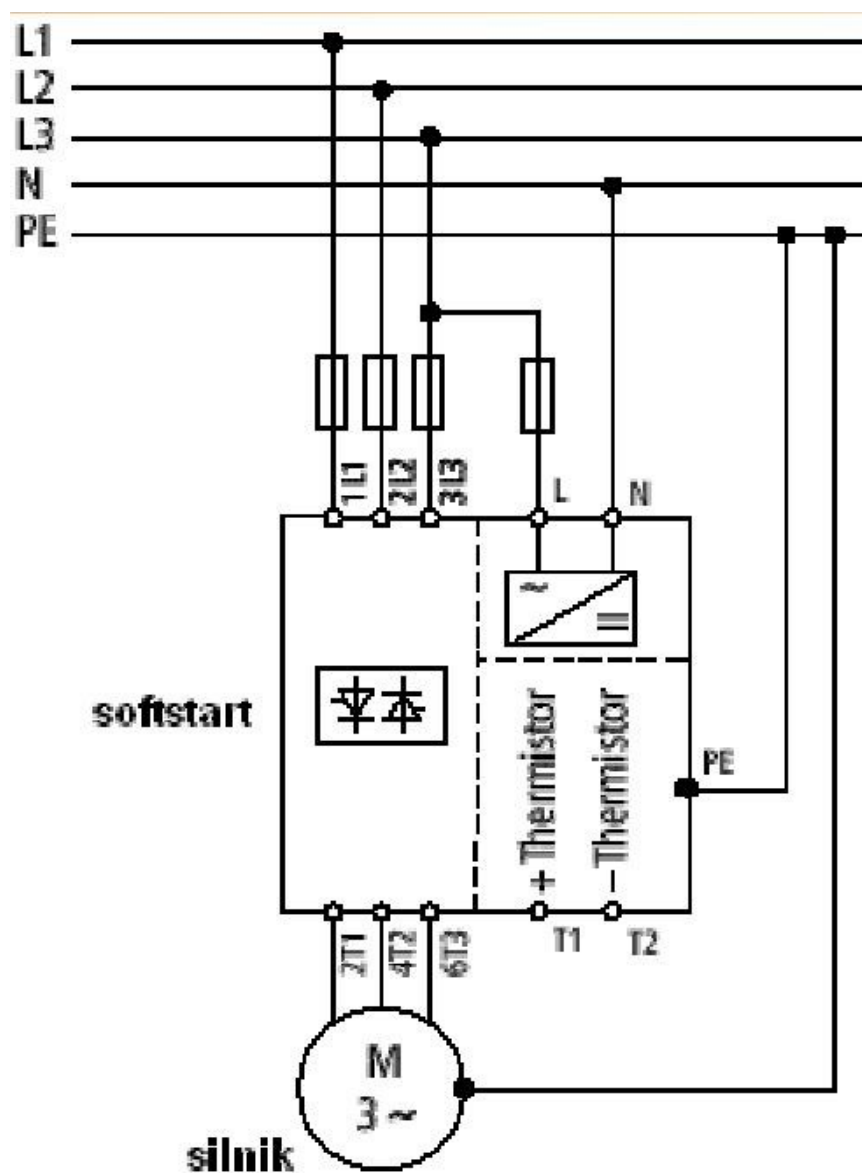


Przy połączeniu uzwojeń silnika w gwiazdę, prąd pobierany przez silnik z sieci jest 3-krotnie mniejszy niż prąd pobierany przy połączeniu w trójkąt. Także moment elektromagnetyczny a więc i moc silnika w tym przypadku są 3-krotnie mniejsze.

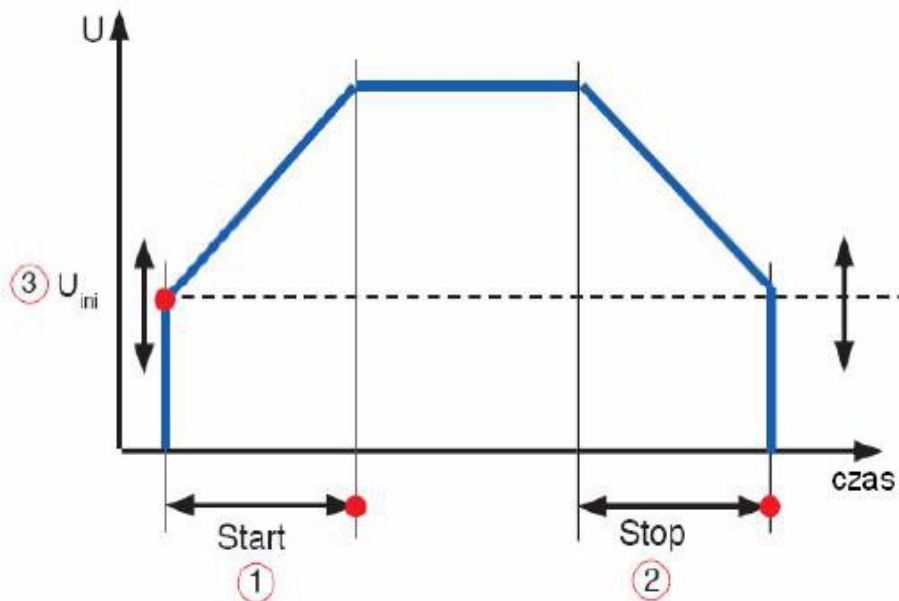
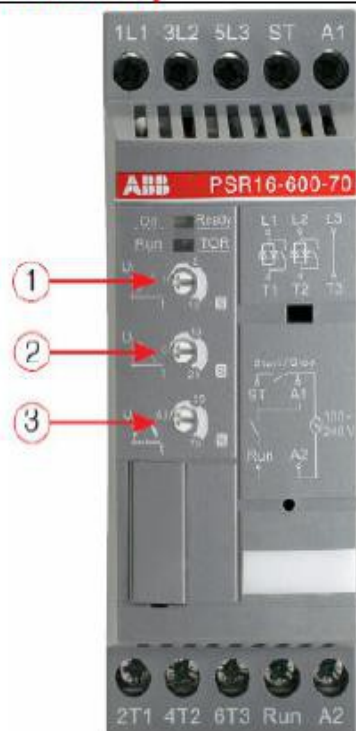
W nowoczesnych układach napędowych, do łagodnego rozruchu 3-fazowych silników indukcyjnych stosuje się specjalizowane urządzenia, nazywane układami „soft – start” (miękkiego rozruchu), które mają za zadanie redukować niekorzystnych zjawisk występujących podczas rozruchu, wpływających na żywotność silników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



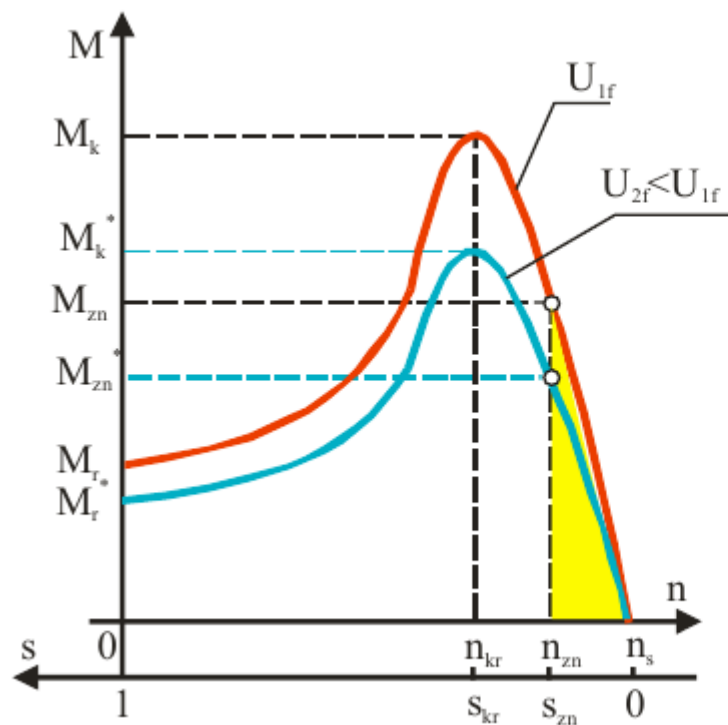
Nastawy



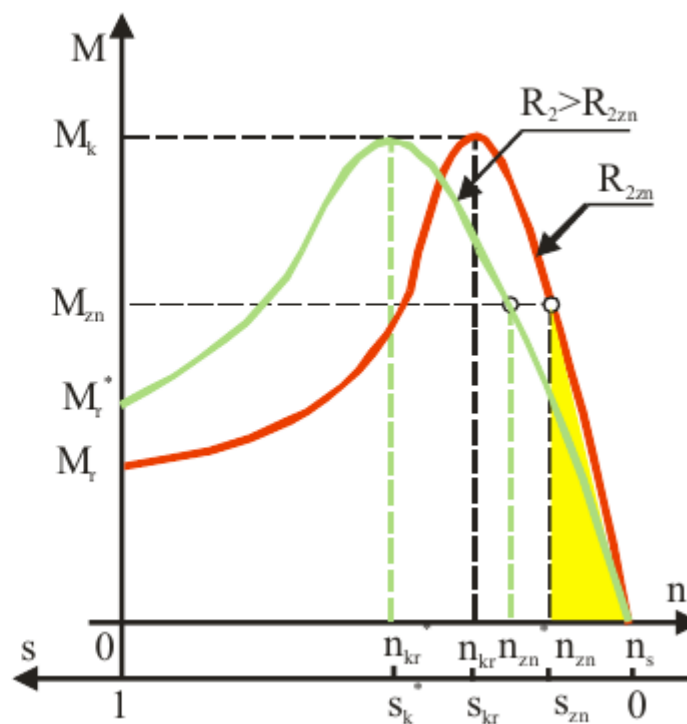
- ① Czas rozruchu = 1... 10s
- ② Czas zatrzymania = 0 ... 20s
- ③ Napięcie początkowe U_{ini} = 40 ... 70% (również nastawa napięcia końcowego)

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 stojanie



Powiększenie rezystancji wirnika
(tylko w silniku pierścieniowym)

Zmiana liczby par biegunów

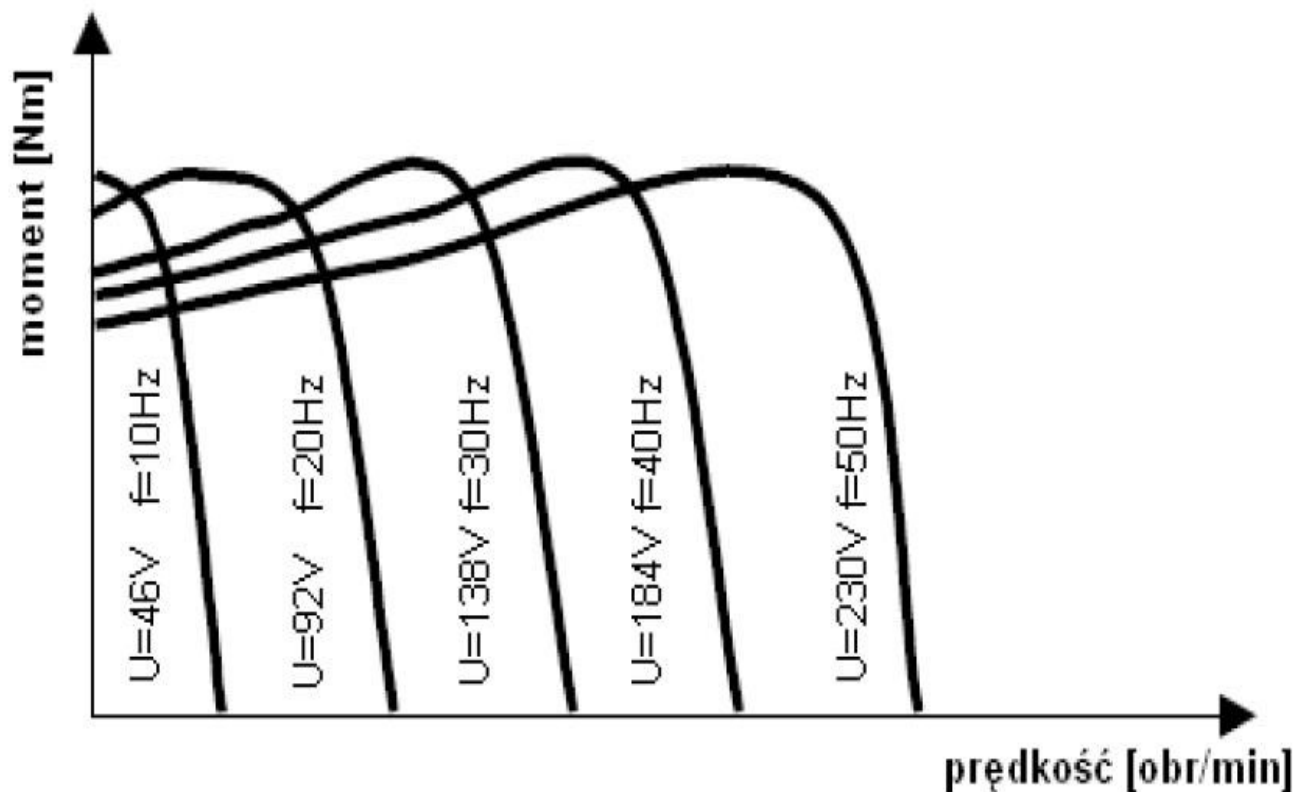
Realizuje się to zwykle umieszczając w stojanie **kilka niezależnych uzwojeń** o różnych liczbach par biegunów (z reguły nie więcej niż dwa) lub jedno uzwojenie o przełączalnej liczbie par biegunów. Przełączając zasilanie pomiędzy uzwojeniami, otrzyma się pola wirujące z różnymi prędkościami.

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.

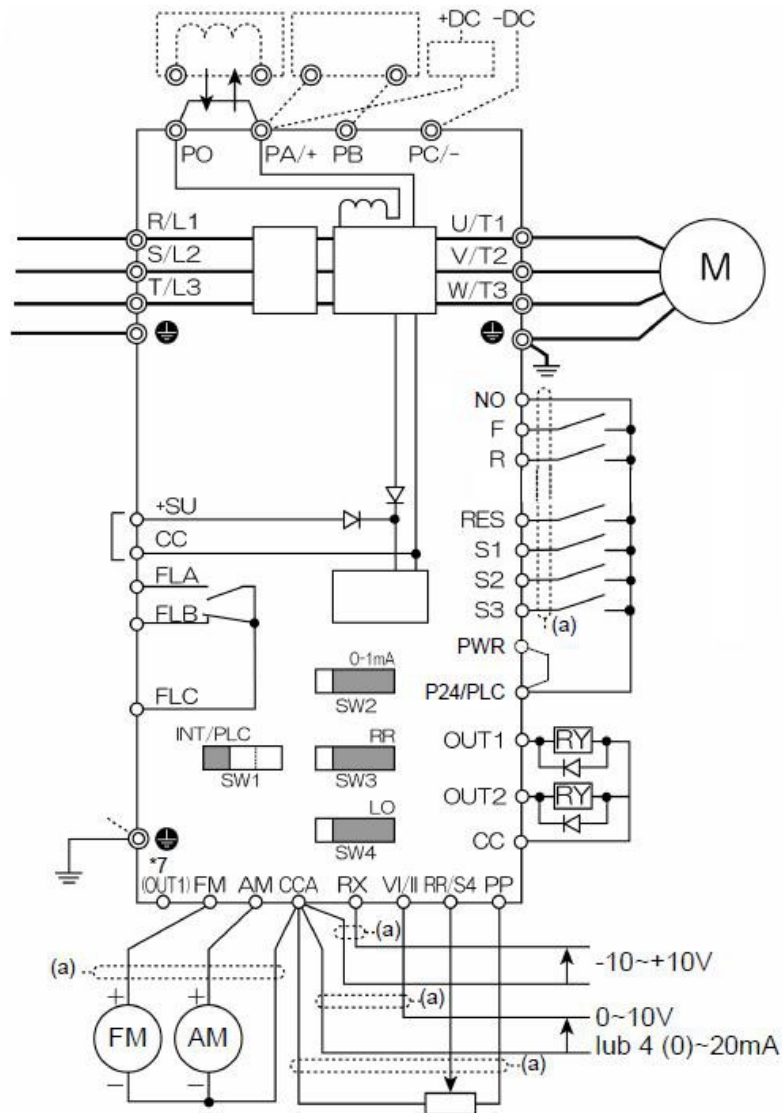
p	1	2	3	4	5	6	7
ns	3000	1500	1000	750	500	375	300
nN	2880	1440	960	720	480	360	288

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).



Zmiana częstotliwości zasilania - falownik



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)
- Pogarszająca się nierównomierność ruchu w miarę obniżania prędkości obrotowej

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, bezprądowy moment spoczynkowy (detent torque), silniki wyposażone w magnesy trwałe,
- 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.

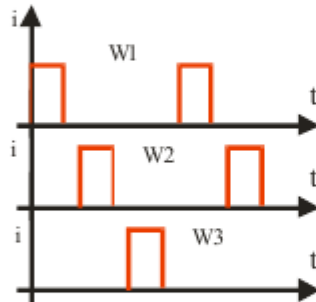
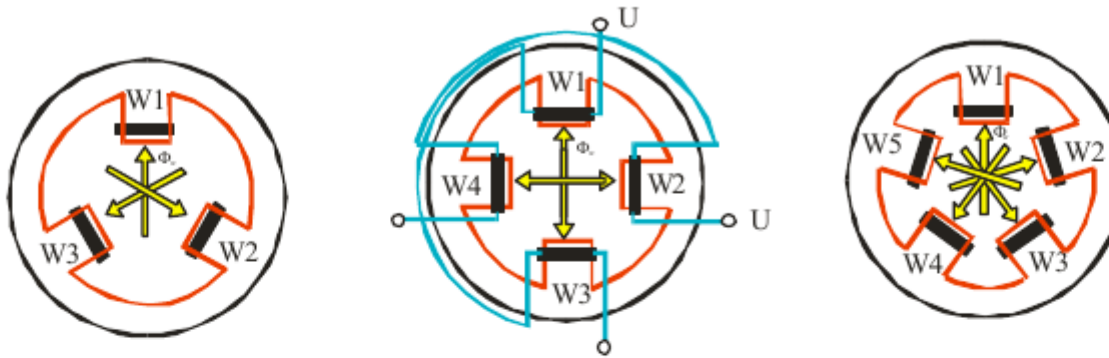
Cechy szczególne cd.

- 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.

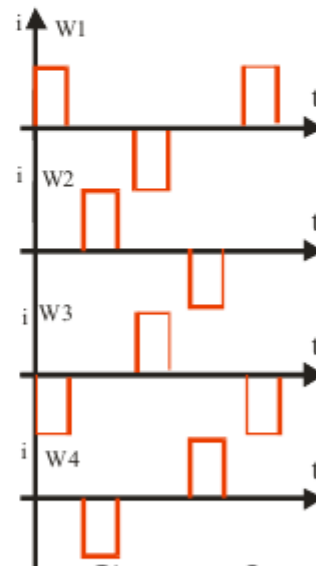
Silniki skokowe – własności eksploatacyjne

- działka elementarna
- moment synchronizujący
- moment rozruchowy
- moment maksymalny (przeciążalność)
- maksymalna (graniczna) częstotliwość robocza
- częstotliwość startowo-stopowa
- strefa stabilności statycznej i dynamicznej
- błąd statyczny i dynamiczny
- tłumienie
- sterowanie

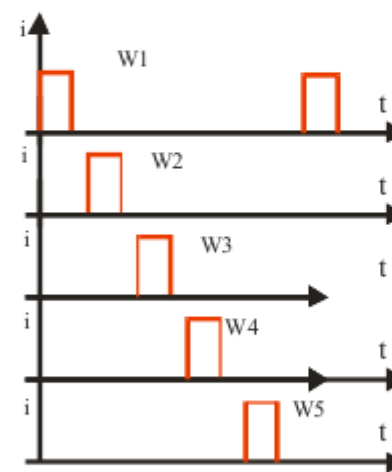
Silniki skokowe – budowa (stojan)



Trójfazowy



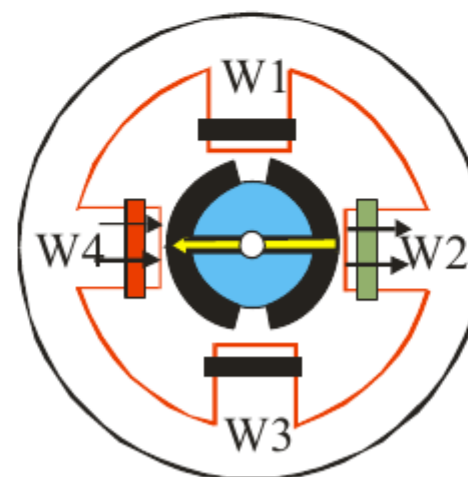
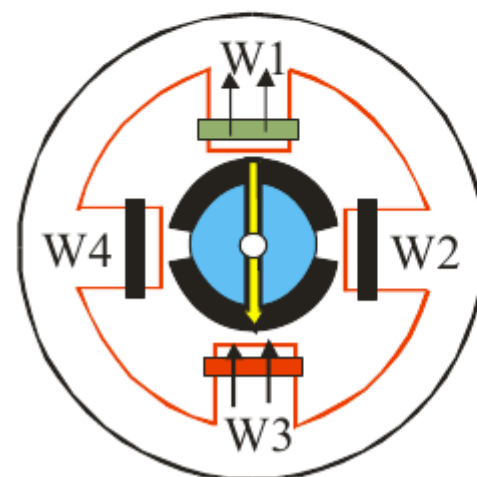
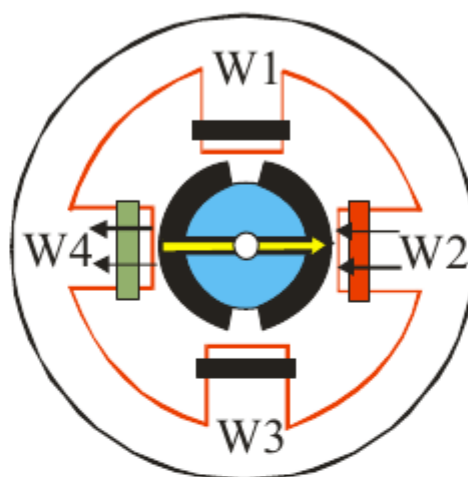
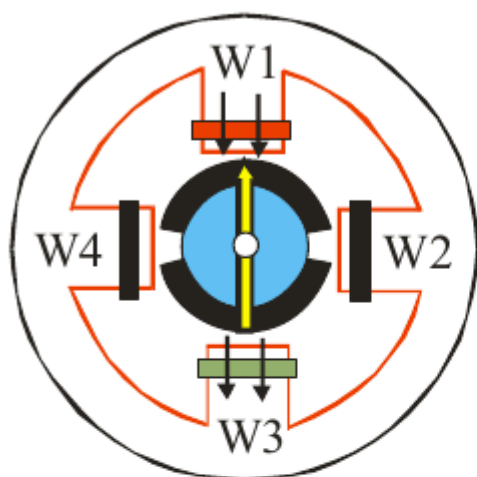
Czterofazowy



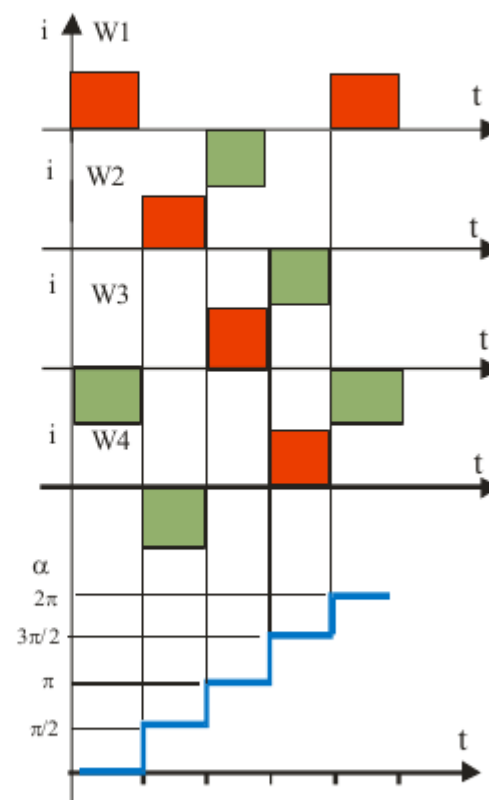
Pięciofazowy

Uzwojenia stojana (fazy) są zasilane sekwencyjnie prądem stałym (dotyczy silników ze sterowaniem sekwencyjnym), wytwarzając stałe pole magnetyczne (wektor pola wiruje dyskretnie).

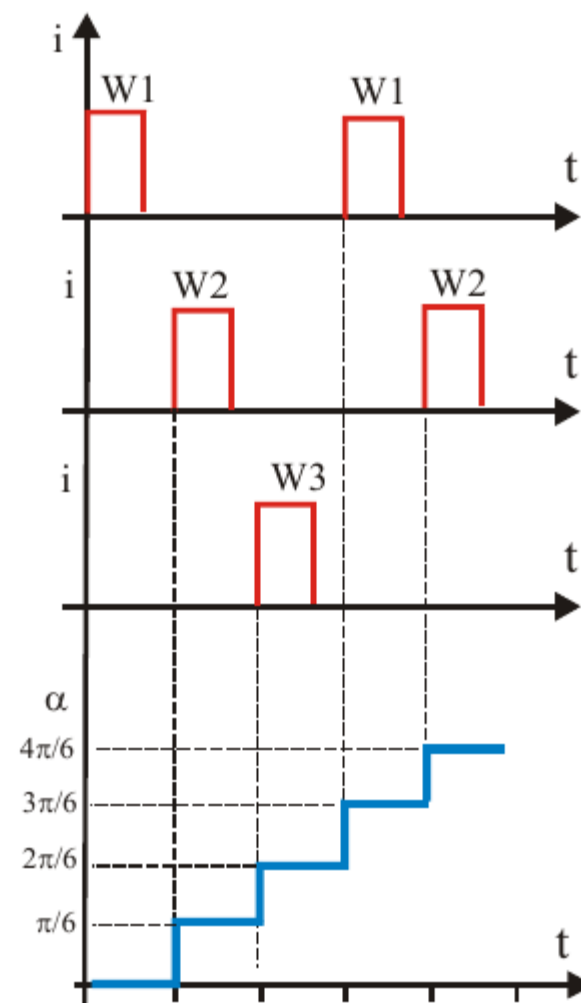
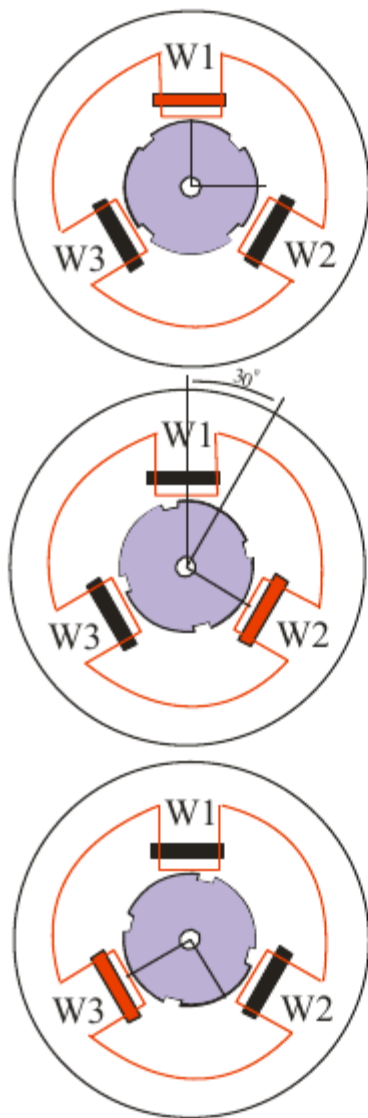
Silniki skokowe – zasada działania



(+)
 (-)



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

Wirujące silniki krokowe dzieli się na trzy podstawowe grupy: o wirniku reluktancyjnym (biernym wirniku), o magnesach trwałych (czynnym wirniku) oraz o wirniku hybrydowym.

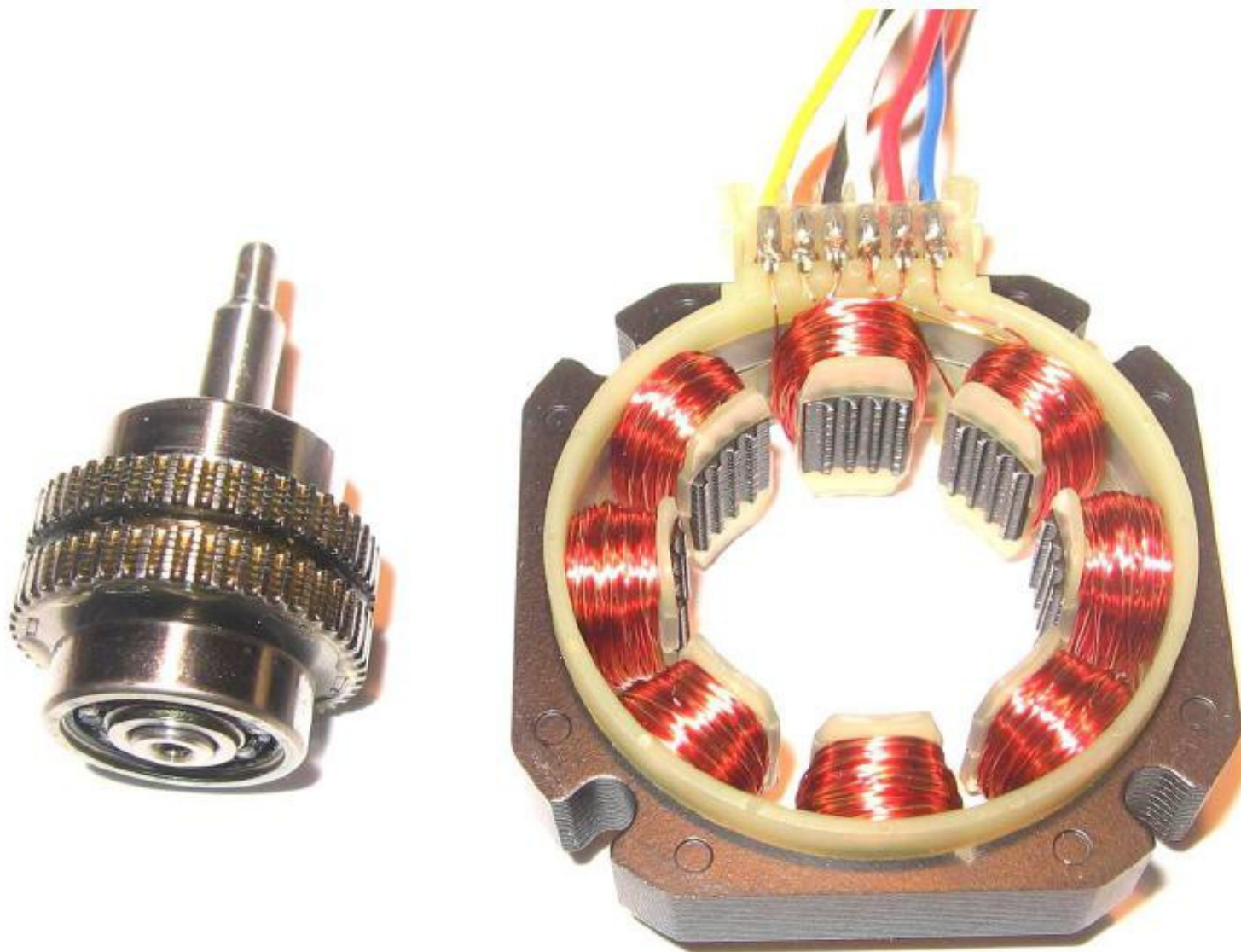
Oprócz szeroko stosowanych jednosegmentowych silników krokowych o wirniku reluktancyjnym spotykane są silniki wielosegmentowe.

Wśród jednosegmentowych silników o wirniku reluktancyjnym występują silniki krokowe z jednym biegunem stojana przypadającym na jeden ząb wirnika, jak również z jednym biegunem stojana przypadającym na kilka zębów wirnika.

Zarówno jedna, jak i druga odmiana może być wykonana w wariancie symetrycznym jak i niesymetrycznym.

W odmianie symetrycznej uzwojenia dwóch przeciwległych biegunów stojana tworzą pasmo, natomiast w niesymetrycznym całe uzwojenie jednego pasma jest umieszczone na jednym biegunie.

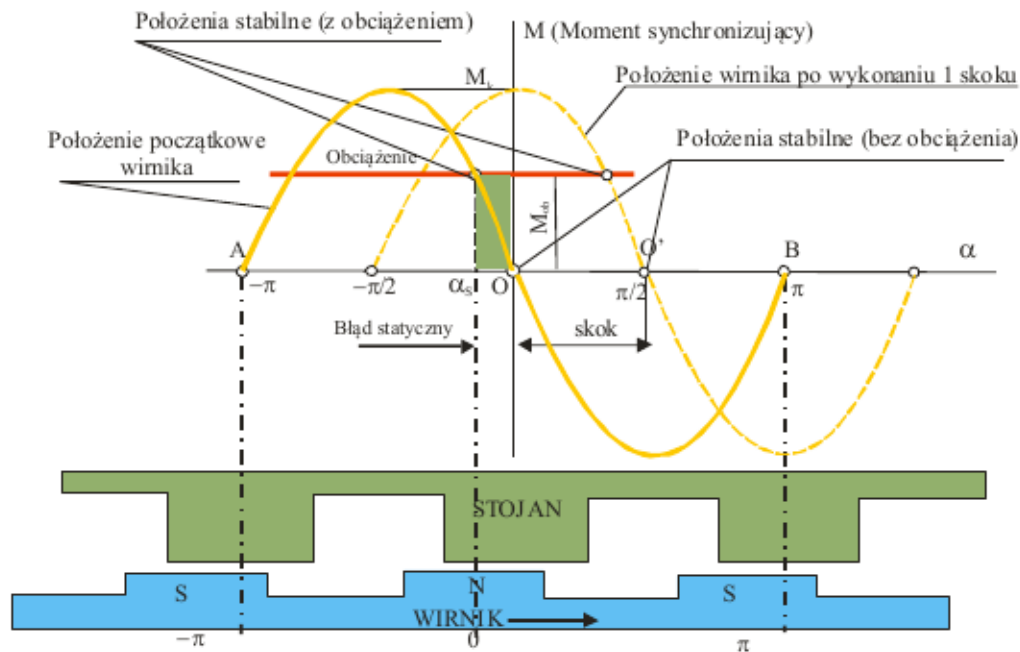
Silniki krokowe – konstrukcja



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

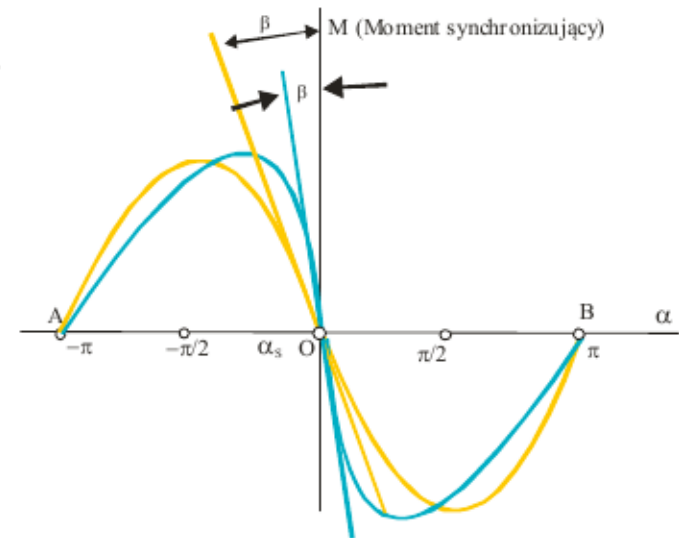
Silniki skokowe – charakterystyka mechaniczna

Błąd statyczny, sztywność charakterystyki



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

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



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

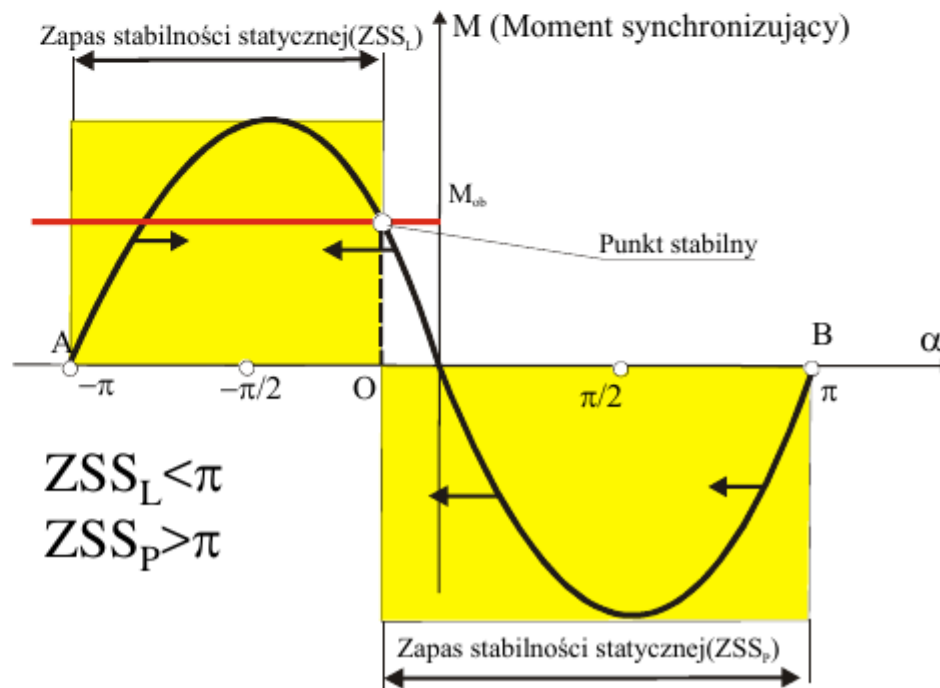
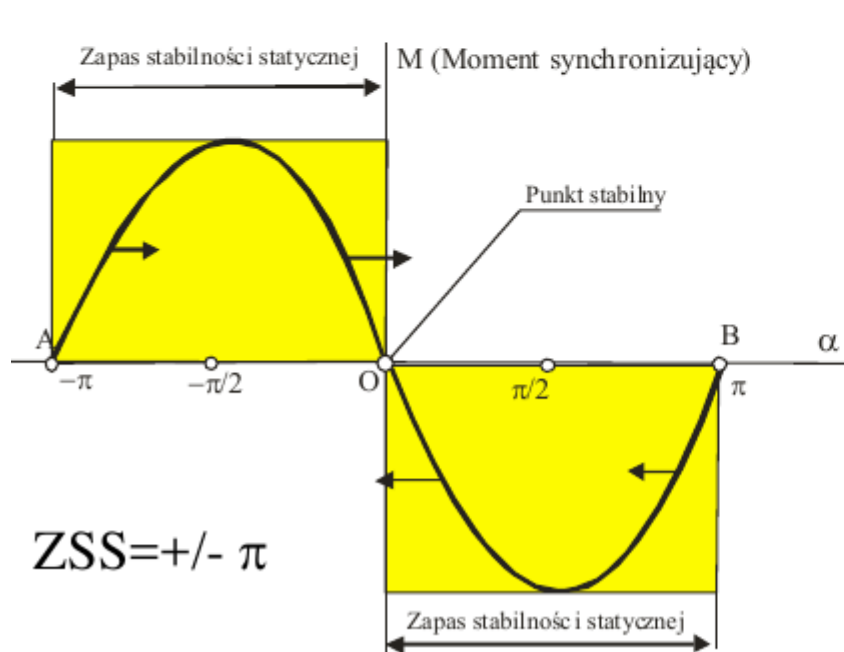
Im $\frac{dM}{d\alpha}$ mniejsze tym błąd statyczny α_s mniejszy

Silniki skokowe – charakterystyka mechaniczna

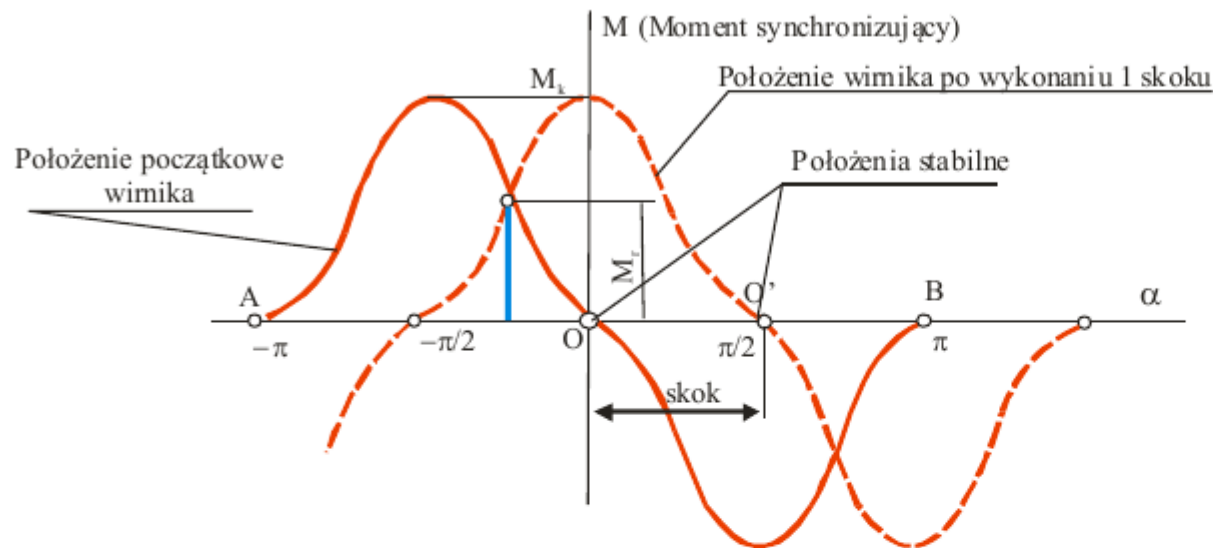
Stabilność statyczna, zapas stabilności statycznej

Zakres stabilności statycznej to taki zakres kąta obrotu wirnika (kąta α), w obszarze którego wirnik powróci do swojej pozycji stabilnej, po zaniku przyczyny która go z tej pozycji wychyliła.

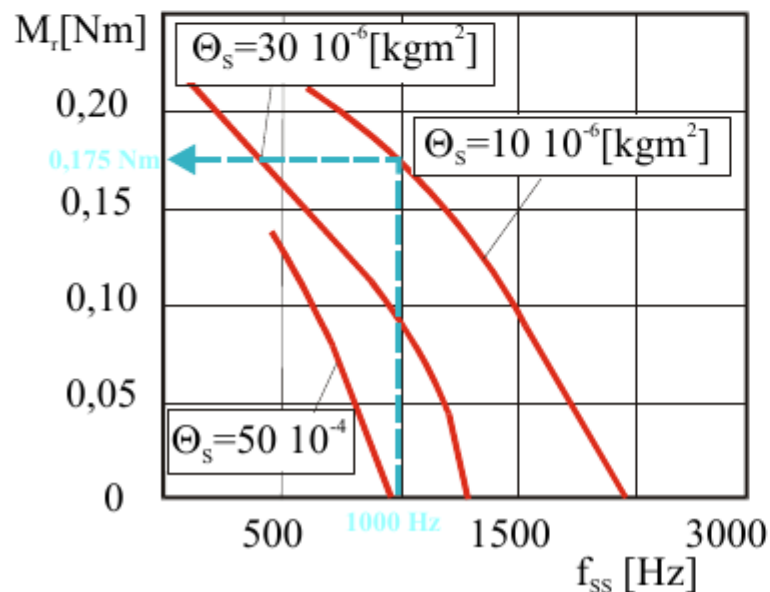
Jeżeli wirnik znajdzie się poza zakresem stabilności statycznej to następuje utrata skoku czyli silnik wypada z synchronizmu.



Silniki skokowe – własności rozruchowe



$$M_r > 0$$

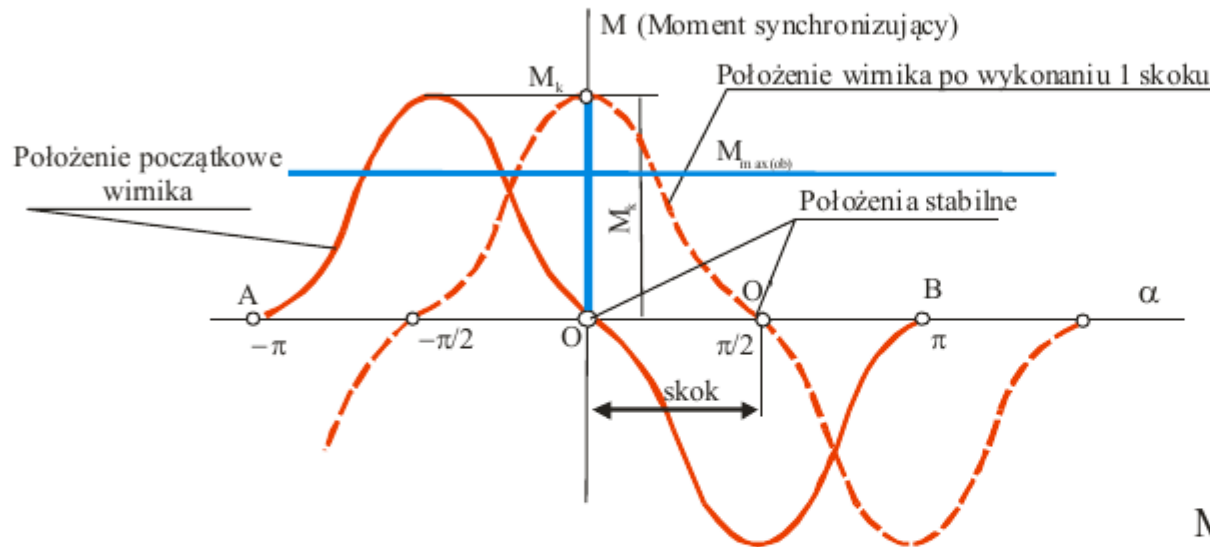


Częstotliwość START-STOP to największa częstotliwość pracy silnika podczas rozruchu (START) lub hamowania (STOP), przy której silnik nie utraci skoku.

Każdej wartości momentu rozruchowego odpowiada dopuszczalna częstotliwość START-STOP

Silniki skokowe – przeciążalność

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



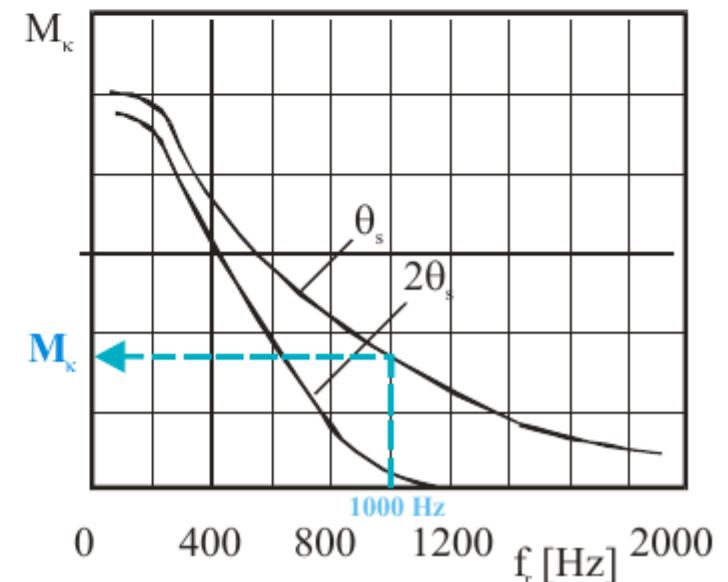
$$\frac{M_k}{M_{zn}} > 1$$

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

gdzie: n – liczba taktów (skoków)

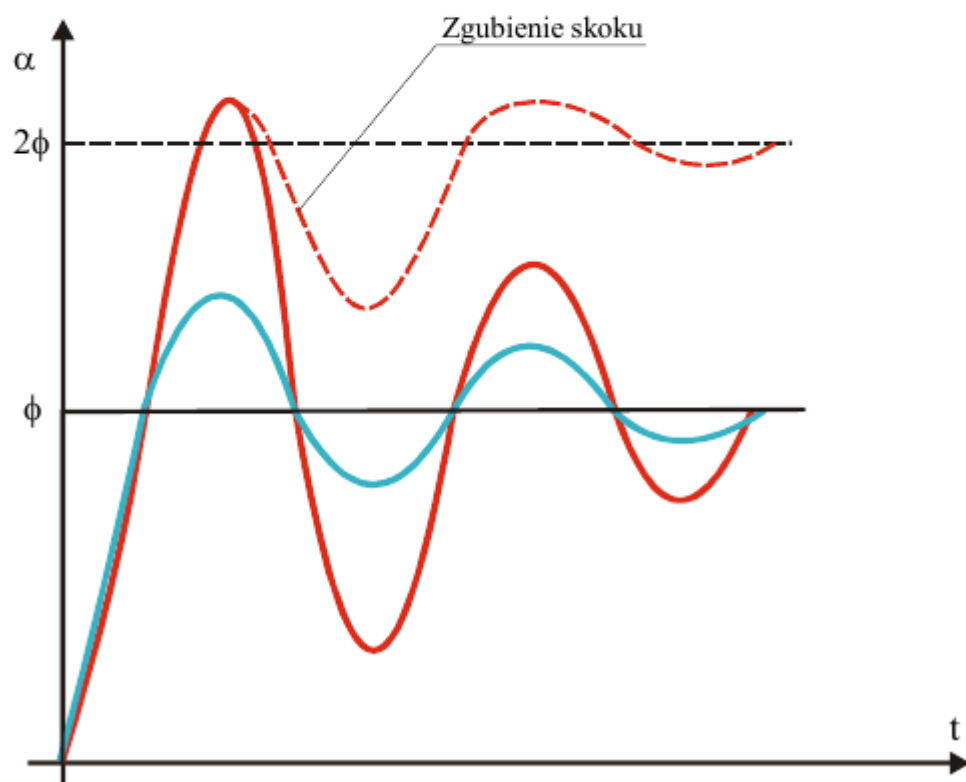
Maksymalna częstotliwość robocza f_r to największa częstotliwość sygnałów sterujących, dla której silnik nie utraci skoku. Decyduje ona o największej prędkości ruchu w stanie ustalonym

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

Zasadniczy rozwój silników krokowych zmierza w kierunku zwiększenia liczby skoków, sprawności i momentu obrotowego a zmniejszeniu inercji mechanicznej.

O parametrach napędu skokowego decyduje konstrukcja mechaniczna danego obiektu i silnika, właściwości elektryczne i magnetyczne materiałów, z których wykonano silnik oraz sposób zasilania jego uzwojeń i wreszcie algorytm sterowania

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.

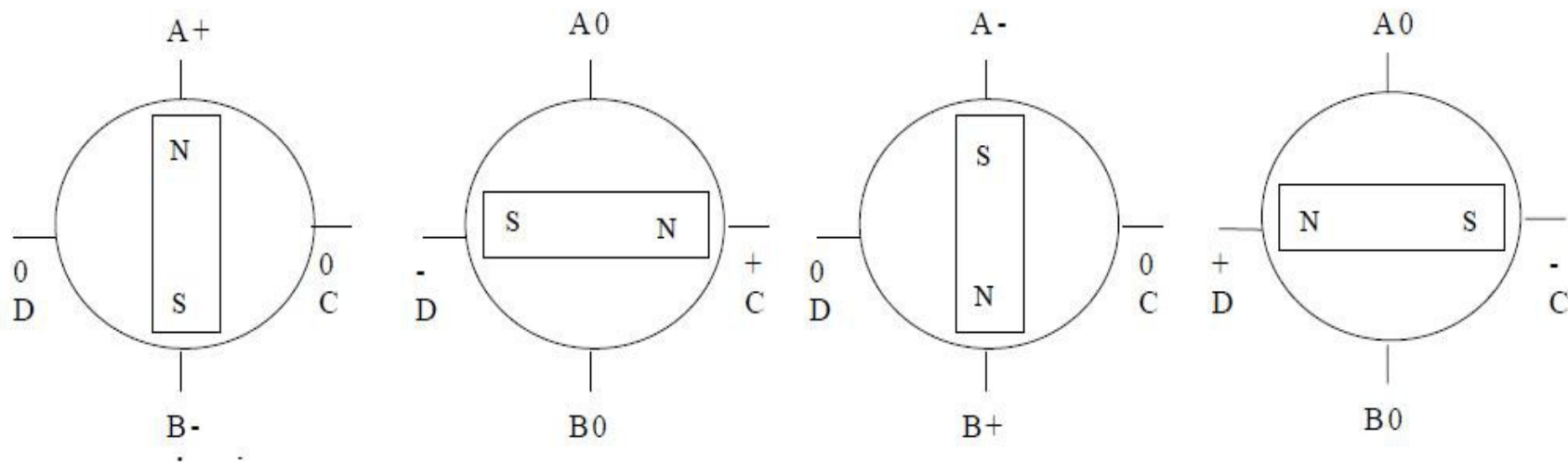
Silniki krokowe – sterowanie

RODZAJE STEROWANIA (KROK, ALGORYTMY KOMUTACJI) :

- falowe,
- pełnokrokowe,
- półkrokowe,
- mikrokrokowe.

Sterowanie falowe

W sterowaniu falowym - jednofazowym w danym momencie zasilana jest jedna faza.



Silniki krokowe – sterowanie falowe

WADA STEROWANIA FALOWEGO

Silniki o uzwojeniach unipolarnych wykorzystują tylko 25%, a o uzwojeniach bipolarnych 50% całkowitego uzwojenia silnika w danej chwili czasu.

Nie wykorzystuje się maksymalnego momentu wyjściowego silnika

Silniki krokowe – sterowanie falowe

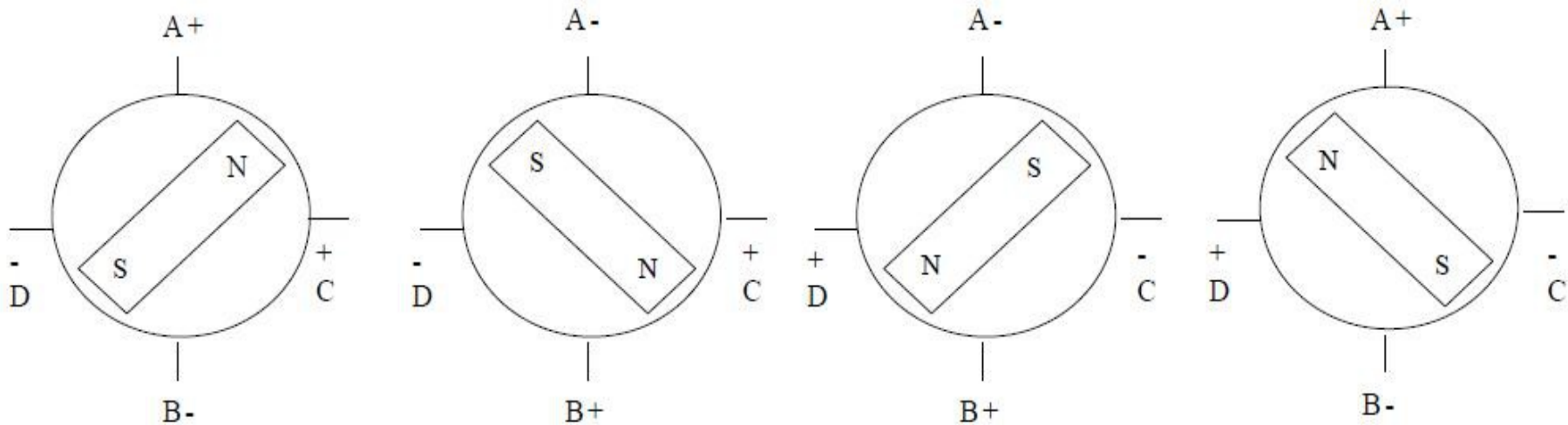
WADA STEROWANIA FALOWEGO

Silniki o uzwojeniach unipolarnych wykorzystują tylko 25%, a o uzwojeniach bipolarnych 50% całkowitego uzwojenia silnika w danej chwili czasu.

Nie wykorzystuje się maksymalnego momentu wyjściowego silnika

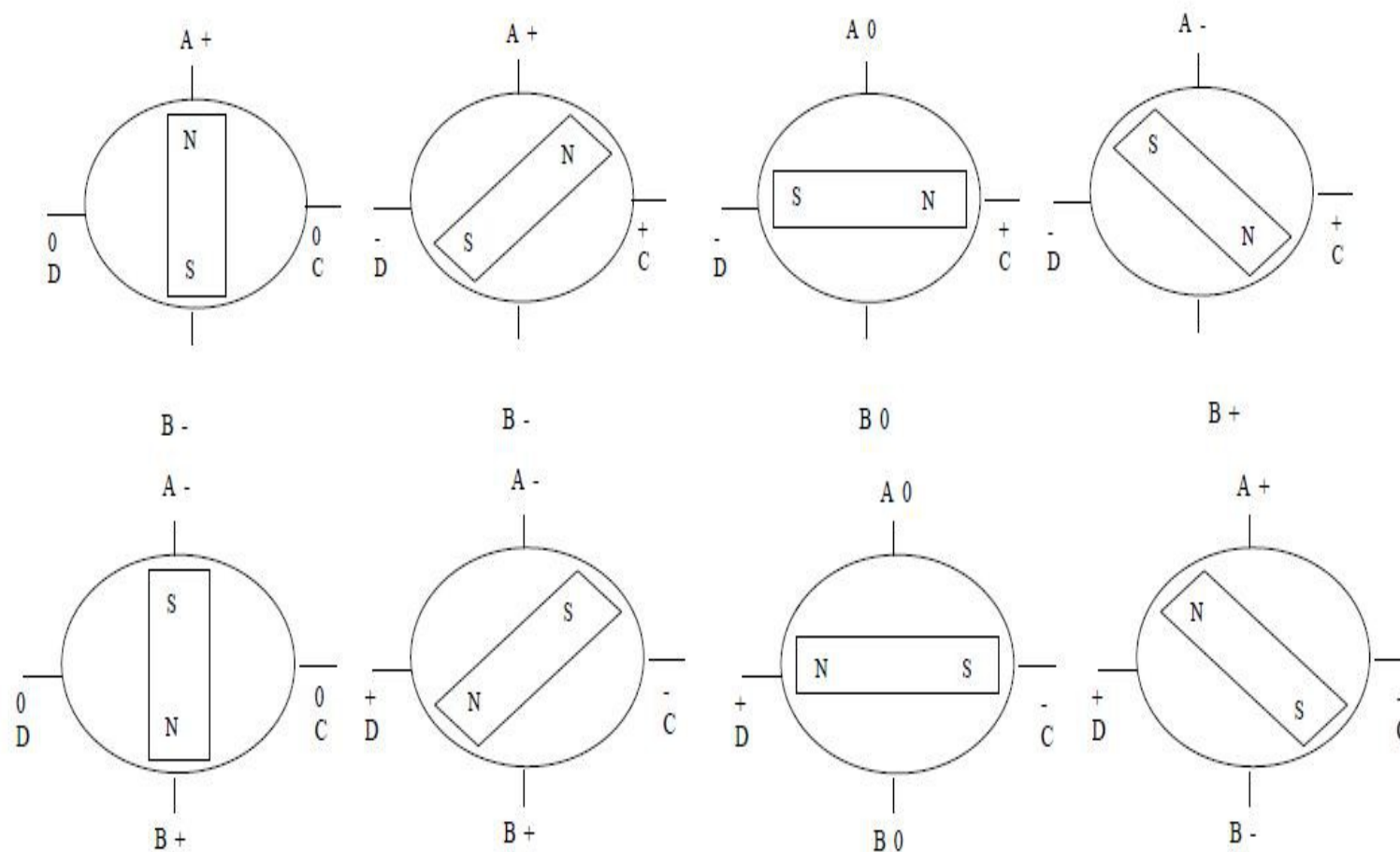
Sterowanie pełnokrokowe

W sterowaniu pełnokrokowym (dwufazowym) w każdej chwili czasu zasilane są dwie fazy. Wynikiem tego rodzaju sterowania są takie same ruchy jak przy sterowaniu jednofazowym z tym, że pozycja wirnika jest przesunięta o pół kroku.



Sterowanie półkrokowe

Sterowanie półkrokowe jest kombinacją sterowania dwufazowego i jednofazowego. Co drugi krok jest zasilana tylko jedna faza, a w pozostałych krokach dwie fazy.



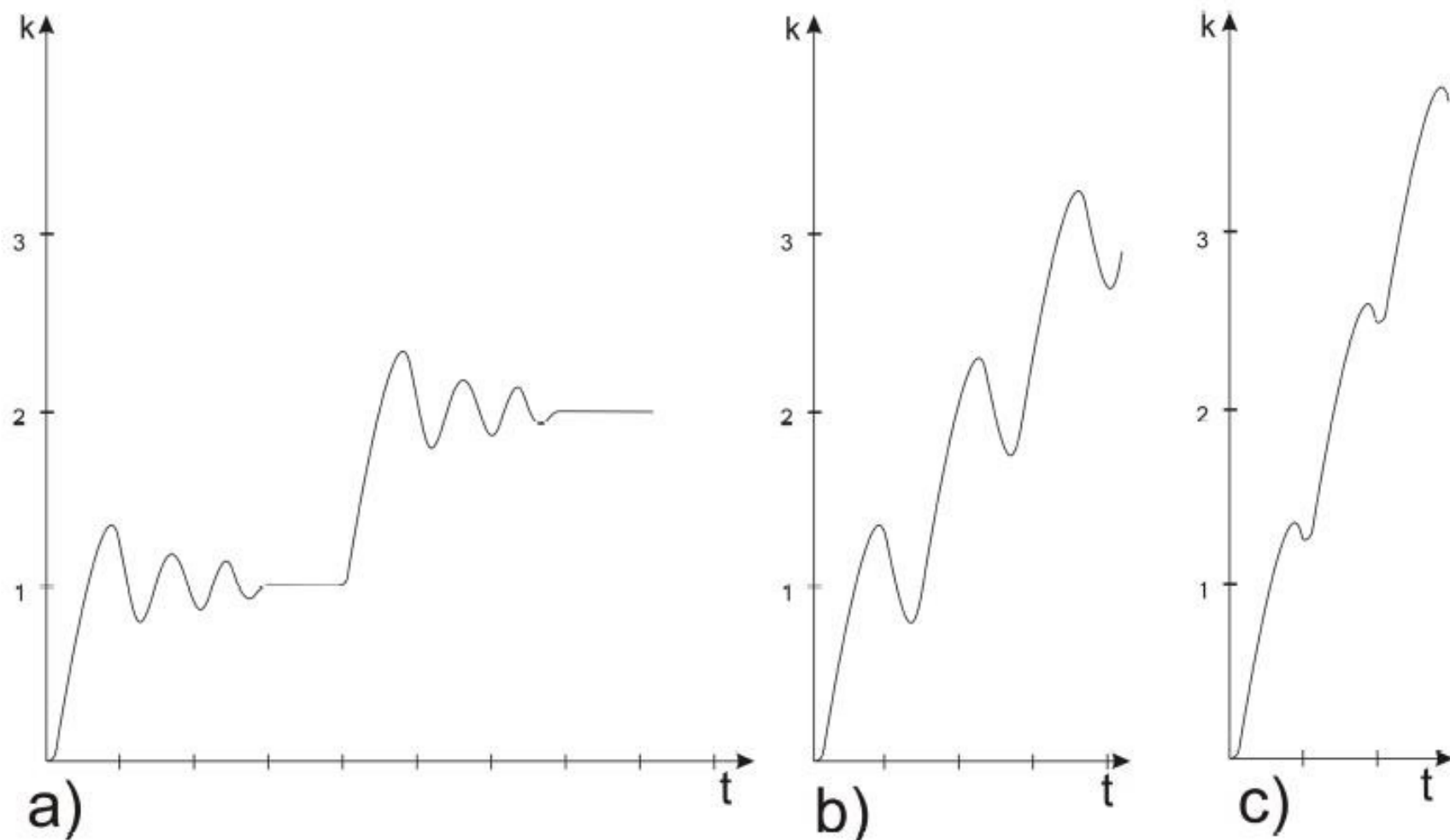
Sterowanie mikrokrokowe

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.

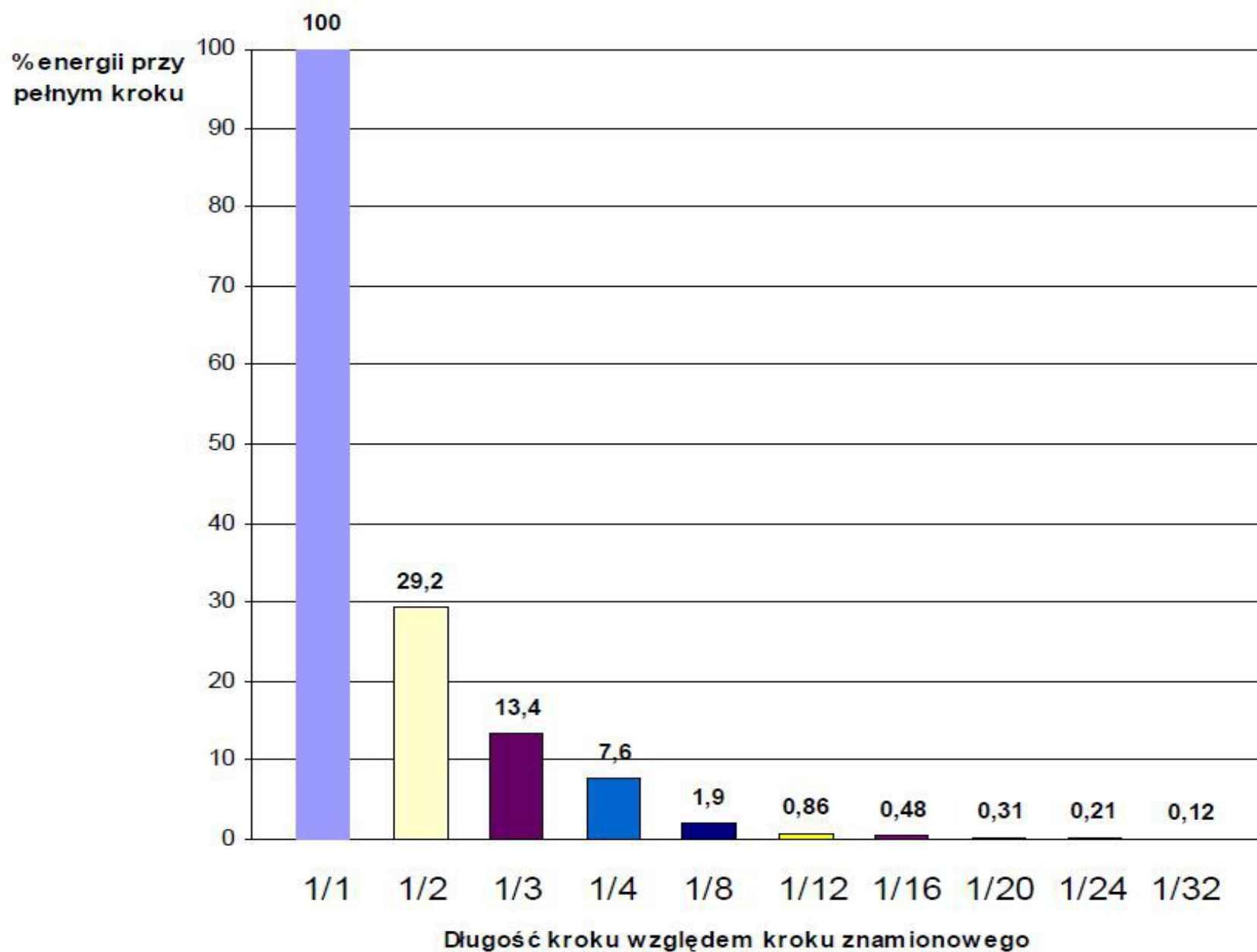
Istnieje wiele różnych typów mikrokroków o podziale od $1/3$ do $1/256$ pełnego kroku lub jeszcze większym.

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 :

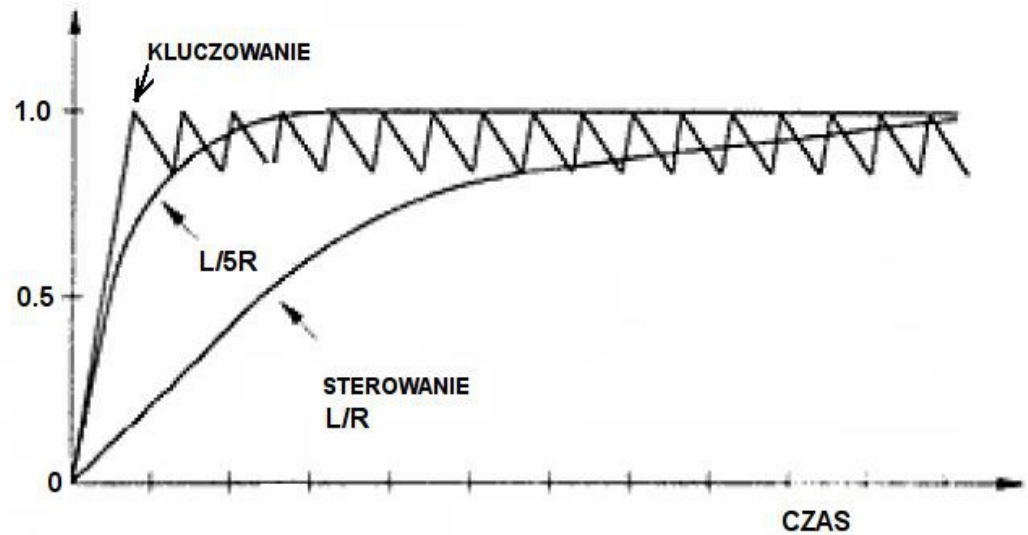
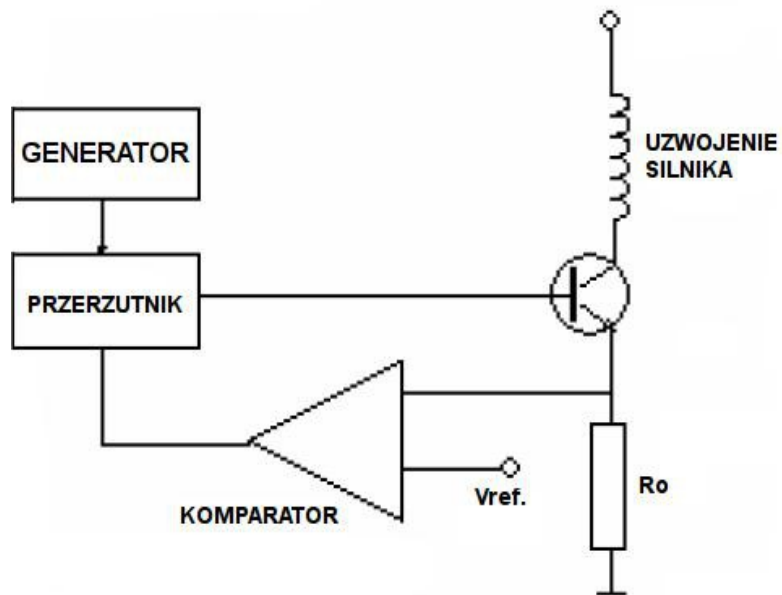
- rezystancją,
- indukcyjnością,
- prądem znamionowym.

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

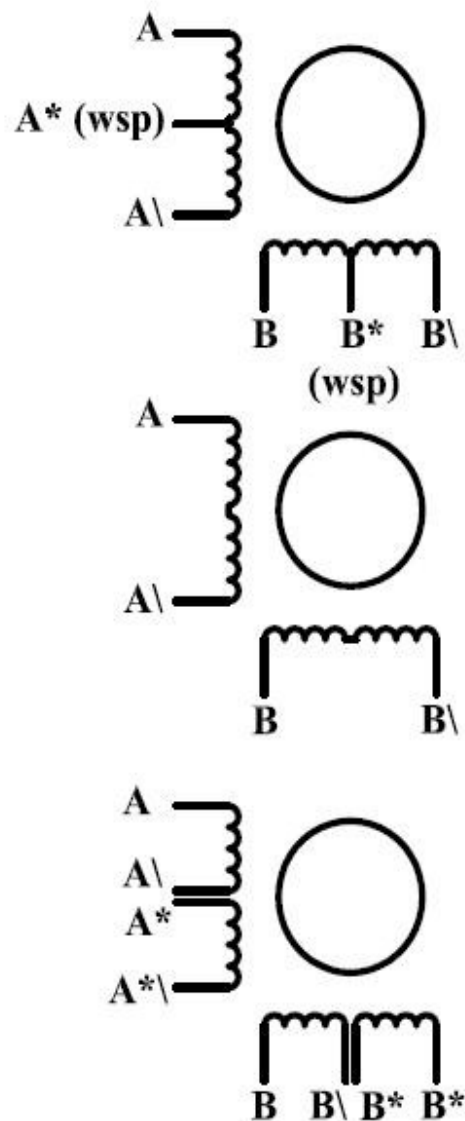
gdzie: $T = \frac{L_s}{R_s}$ $I_s = \left(\frac{U}{R_s} \right) \cdot \left(1 - e^{\left(\frac{-t}{T} \right)} \right)$

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

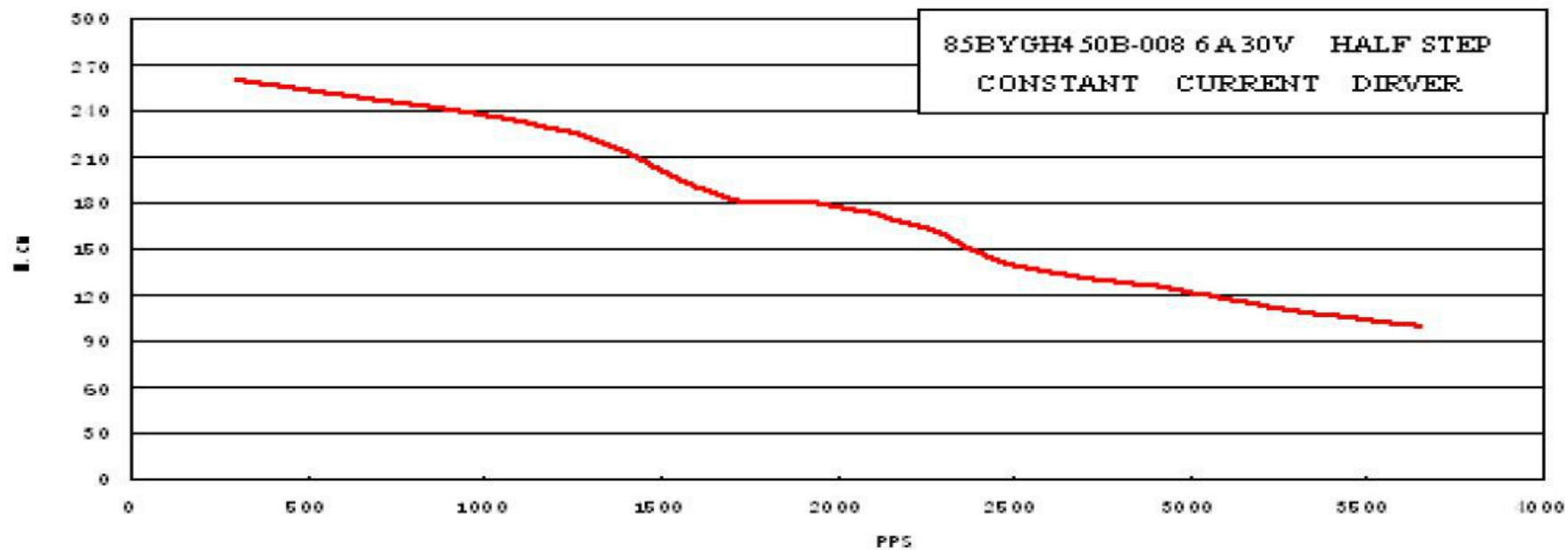
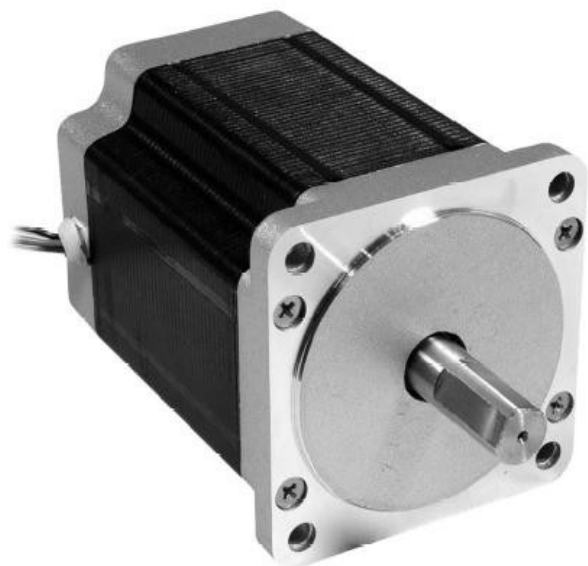
Podstawową charakterystyką silników krokowych, niezbędnych do określenia parametrów napędu jest zależność momentu napędowego od częstotliwości zmian wysterowania faz.

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.

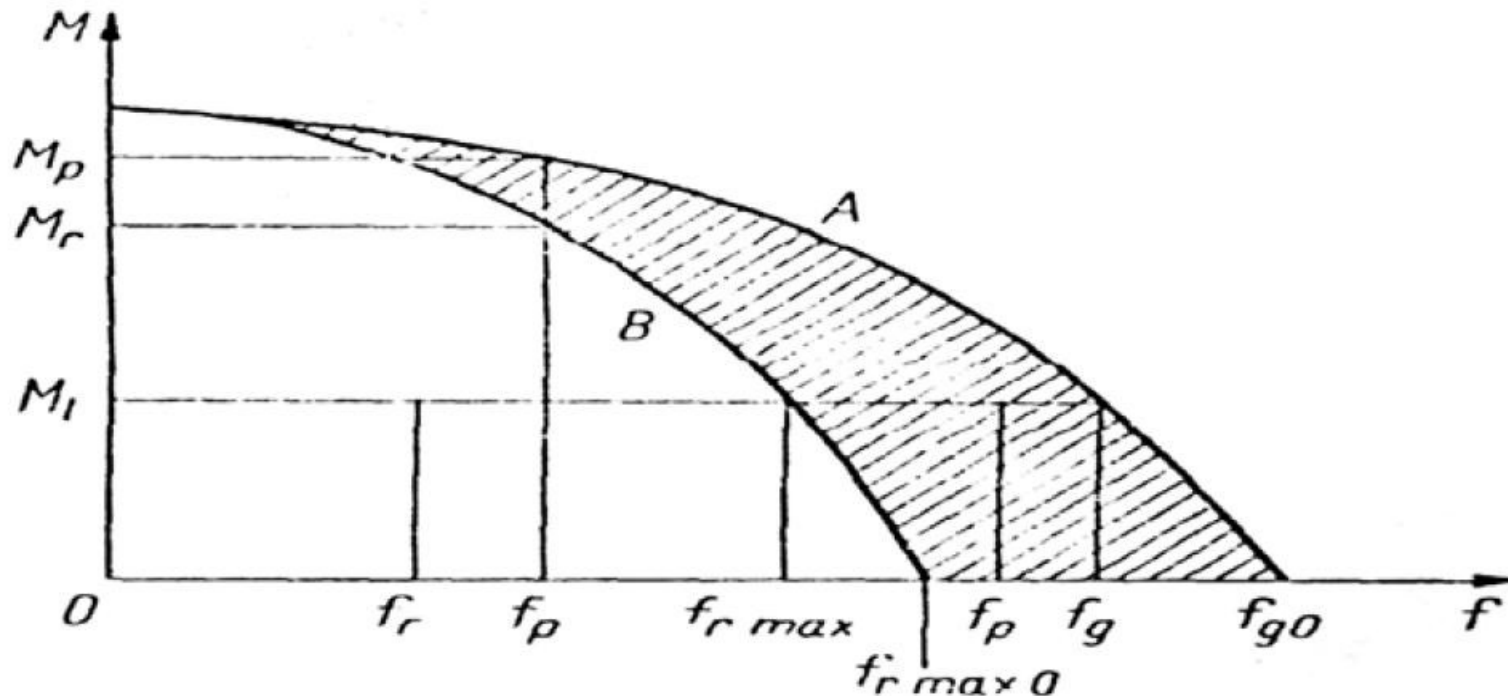
Obszar ograniczony układem współrzędnych i linią a określa zakres pracy start -stopowej .

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 $f_{r\max}$

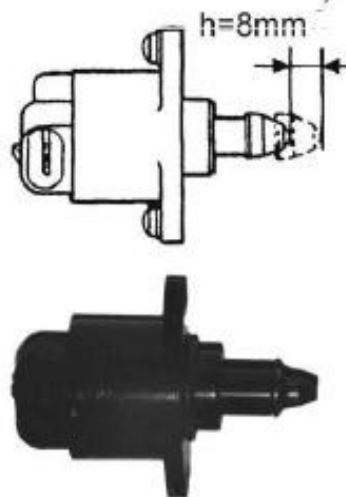
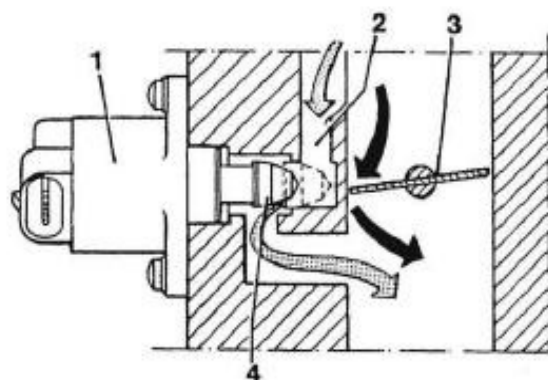
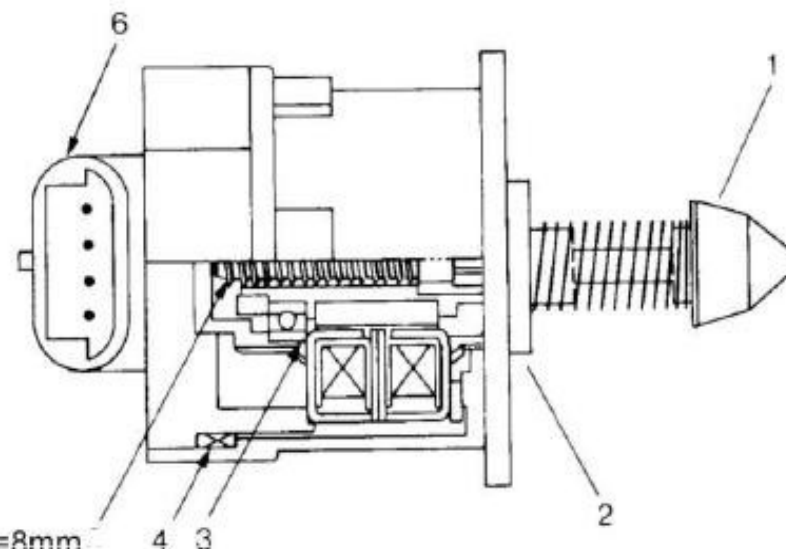
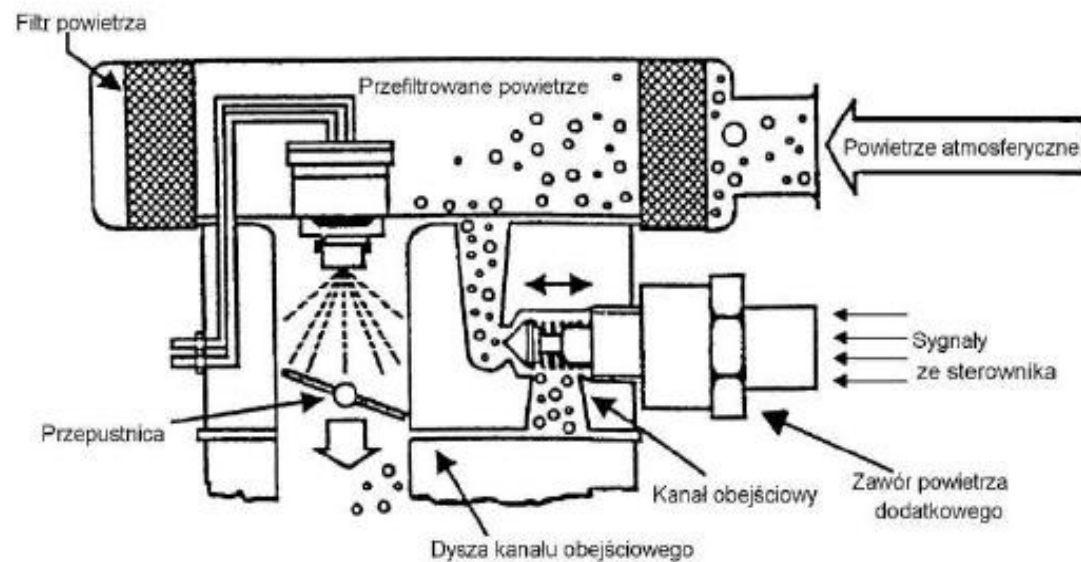
Częstotliwość graniczna f_g

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 .

Silniki krokowe – zastosowania



Silnik BLCD

BLDC. Nazwa ta wynika z angielskiego określenia brushless DC motor i jest powszechnie używana.

Często też mówiąc o silnikach BLDC używa się wyrażenia "silnik z komutacją elektroniczną".

Silnik BLCD - konstrukcja

Silniki bezszczotkowe znane są od dość dawna, jednak do tej pory, pomimo tańszej konstrukcji w stosunku do silników prądu stałego z komutatorem mechanicznym nie cieszyły się zbytnim poważaniem.

Przyczynił się do tego dość wysoki koszt układów sterujących komutatorem elektronicznym silnika bezszczotkowego.

Szybki i dynamiczny rozwój energoelektroniki, a głównie układów sterowania silnikami elektrycznymi, doprowadził do obniżenia kosztów układów komutatorów elektronicznych i znacznego wzrostu zainteresowania silnikami bezszczotkowymi.

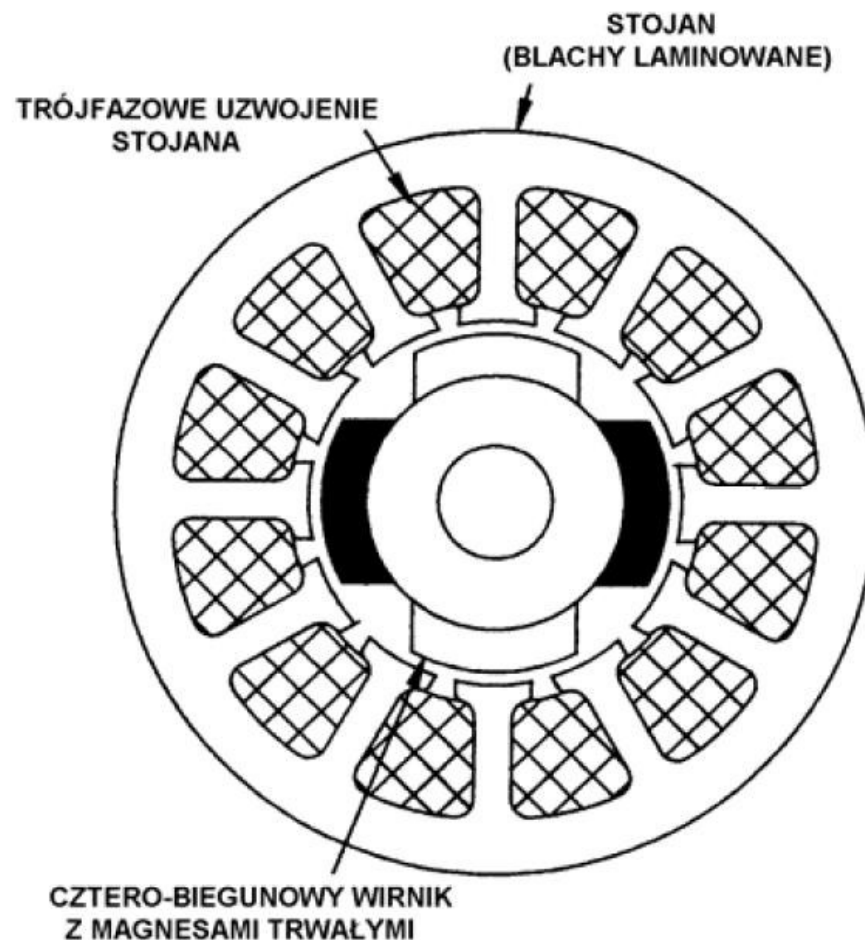
Dziś silniki te możemy spotkać prawie w każdej dziedzinie techniki, zaczynając od modelarstwa, a kończąc na napędach wrzecion i posuwów w obrabiarkach a nawet elektrowniach wiatrowych.

Silnik BLCD - konstrukcja

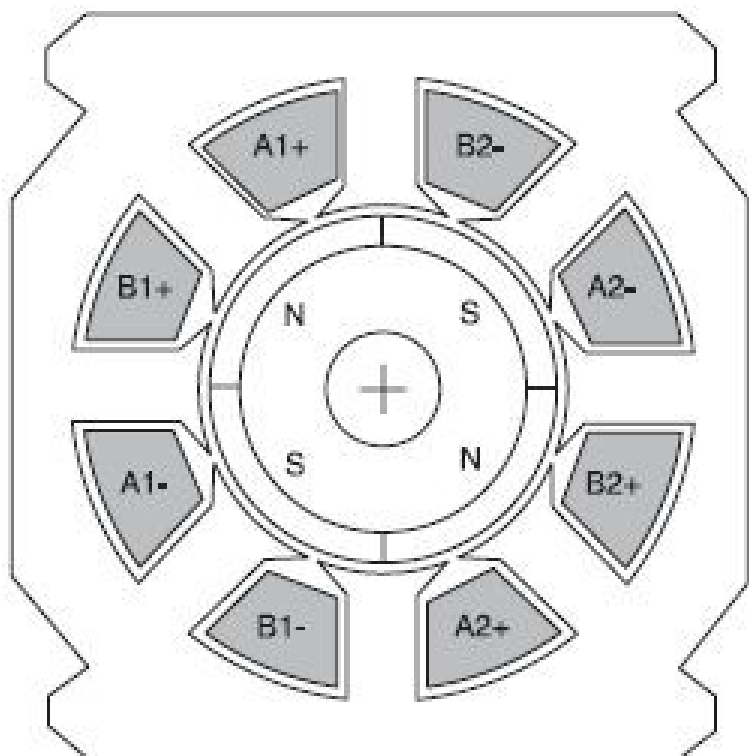
Silnik bezszczotkowy prądu stałego jest odpowiednikiem odwróconego konwencjonalnego silnika prądu stałego z magnesami trwałymi.

W silniku bezszczotkowym prądu stałego wirnik zawierający magnesy stałe przemieszcza się względem uzwojeń umieszczonych w żłobkach stojana. Podobnie jak w wypadku konstrukcji konwencjonalnej, tutaj także prąd płynący w uzwojeniach musi zmieniać swoją biegunowość za każdym razem gdy biegun wirnika minie uzwojenie danej fazy, aby zapewnić jednokierunkowość wytworzonego momentu.

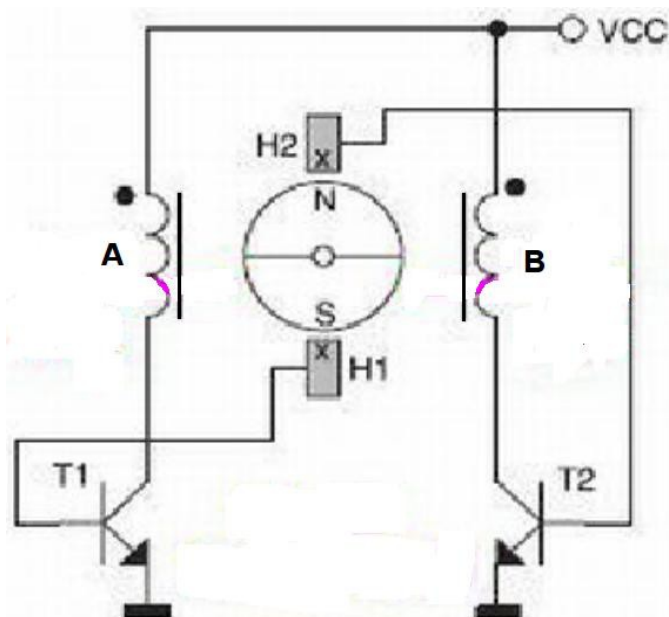
Tak, więc przepływ prądu i jego biegunowość musi być synchronizowana ze zmianą położenia wirnika.



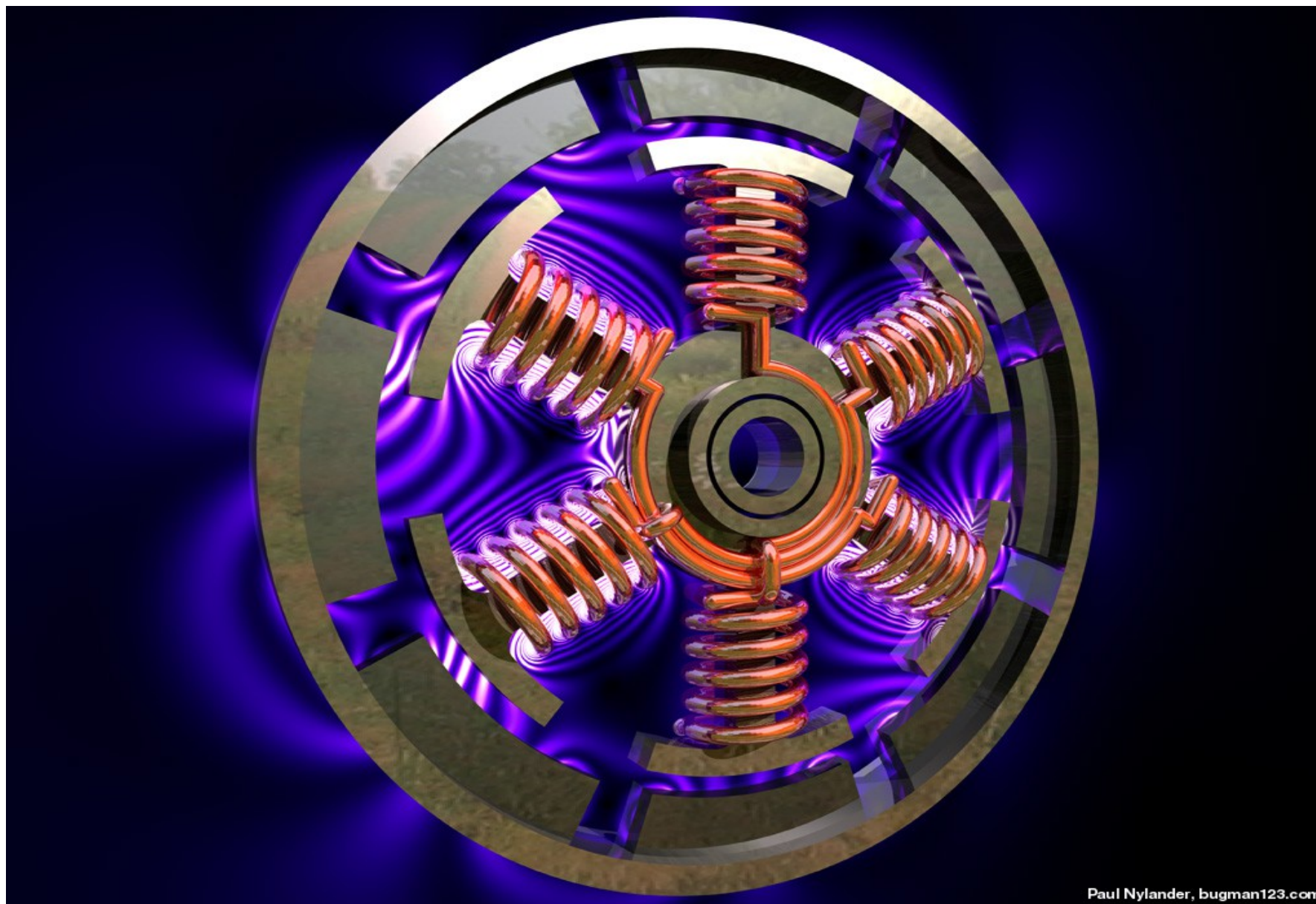
Silnik BLCD - konstrukcja



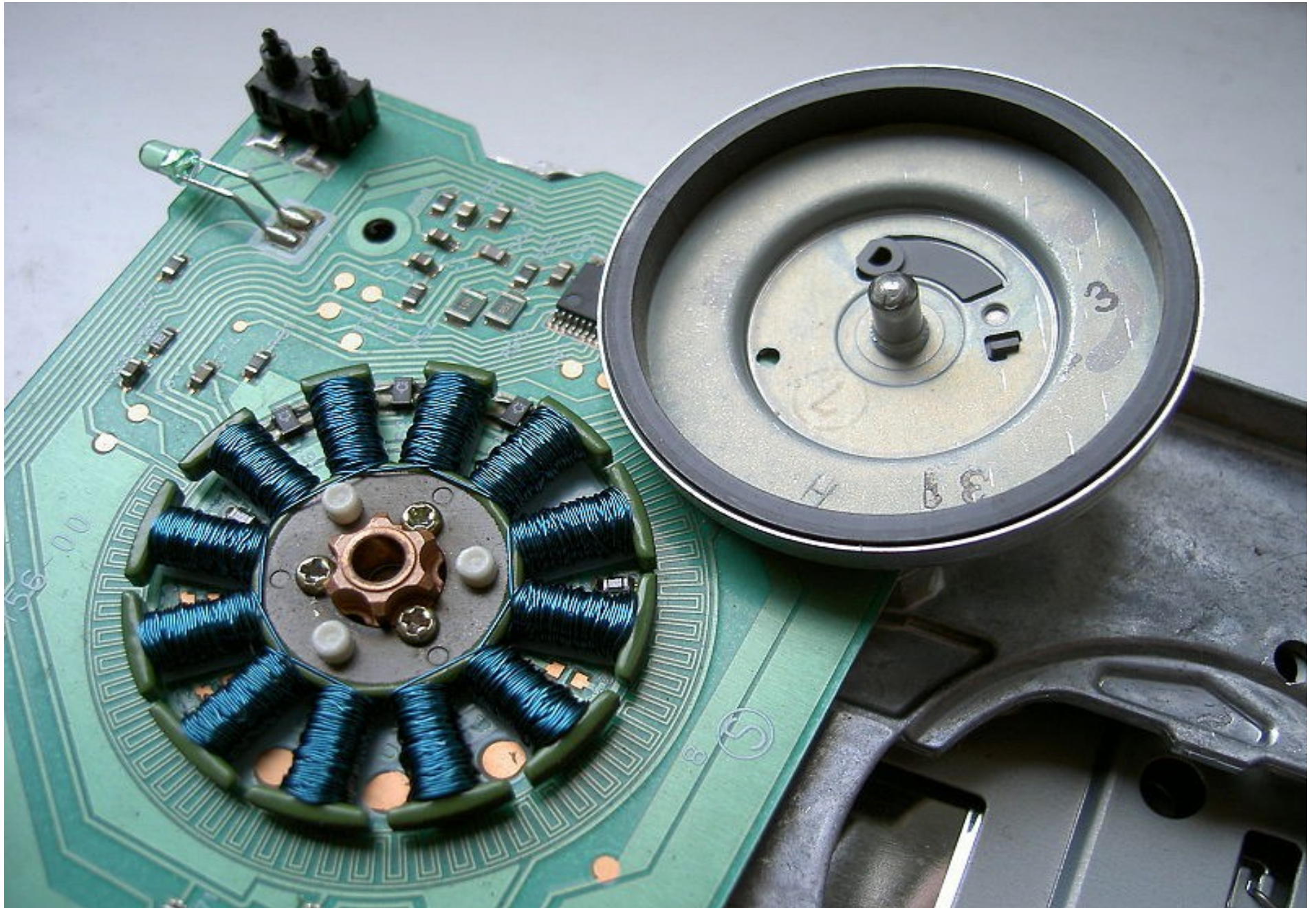
Nie komutator, ale czujniki Halla rozpoznają położenia wirnika i sterują prądami w cewkach stojana. Uzwojenia zasilane są unipolarnie lub bipolarnie



Silnik BLCD - konstrukcja



Silnik BLCD - konstrukcja



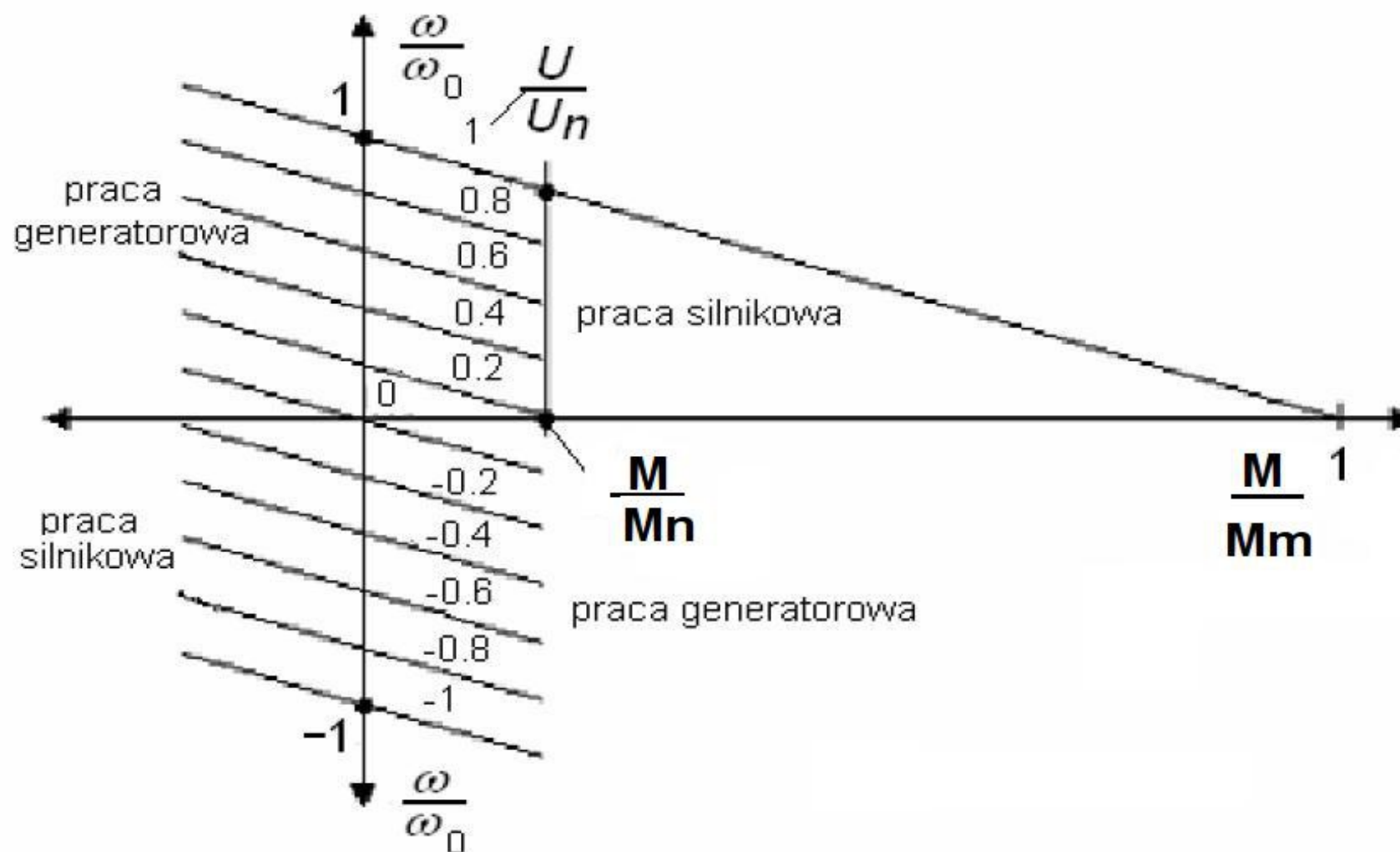
Silnik BLCD - właściwości

- Główne zalety silnika bezszczotkowego w porównaniu z innymi silnikami to:
- bardzo duża sprawność,
- liniowa charakterystyka mechaniczna,
- wysoki stosunek momentu rozwijanego do gabarytów,
- brak komutatora,
- bardzo mała inercja wirnika.

Silnik BLCD - właściwości

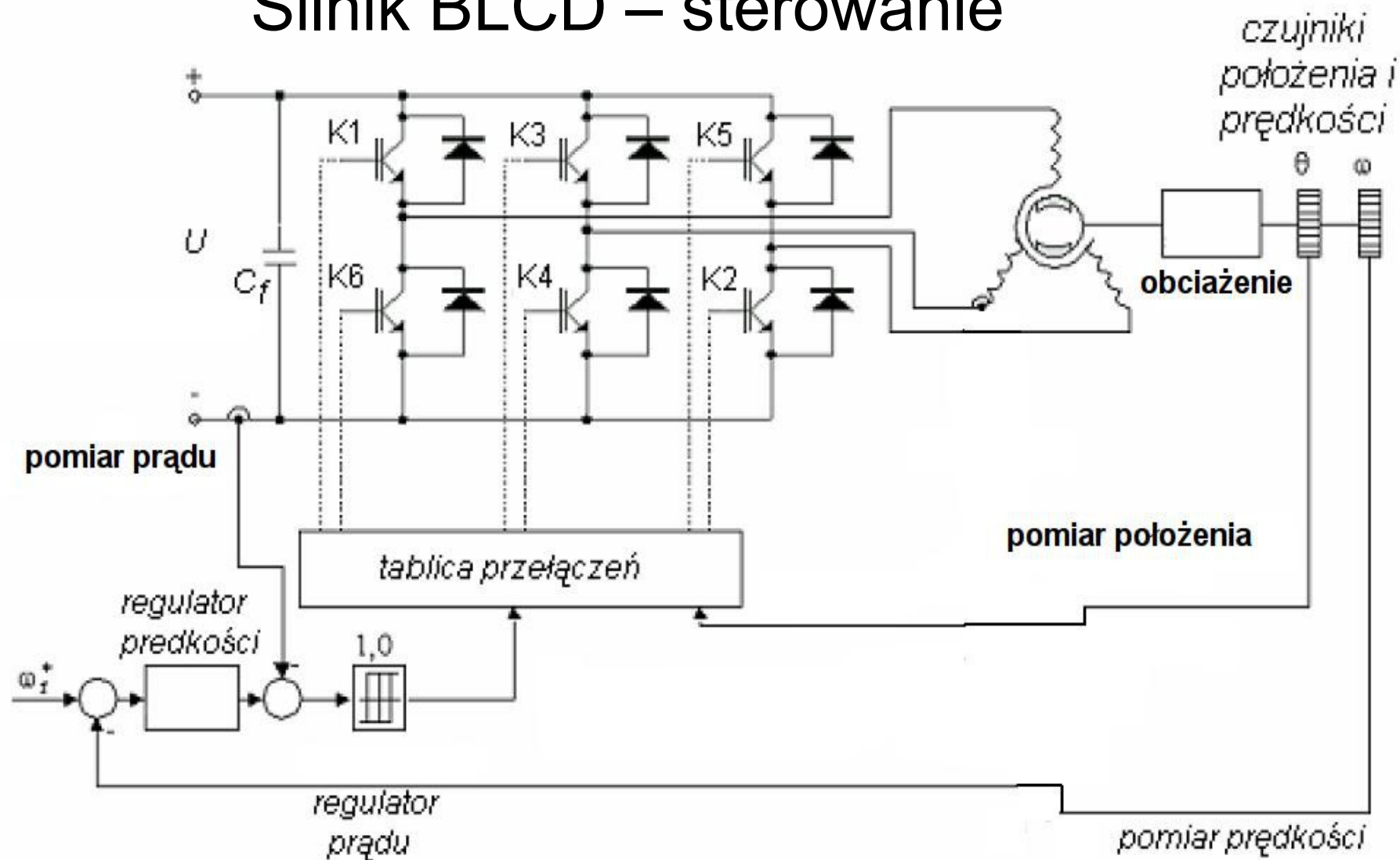
Silniki bezszczotkowe prądu stałego mogą różnić się między sobą kształtem prądu płynącego w pasmach fazowych (prostokątny lub sinusoidalny) oraz sposobem synchronizowania zmiany przepływu prądu z położeniem wirnika (za pomocą zewnętrznego czujnika położenia - najczęściej optycznego lub hallotronowego lub metodą bezczujnikową - wykorzystującą informację o przejściu przez zero napięcia indukowanego w aktualnie niewykorzystywanym uzwojeniu fazowym

Silnik BLCD – charakterystyki



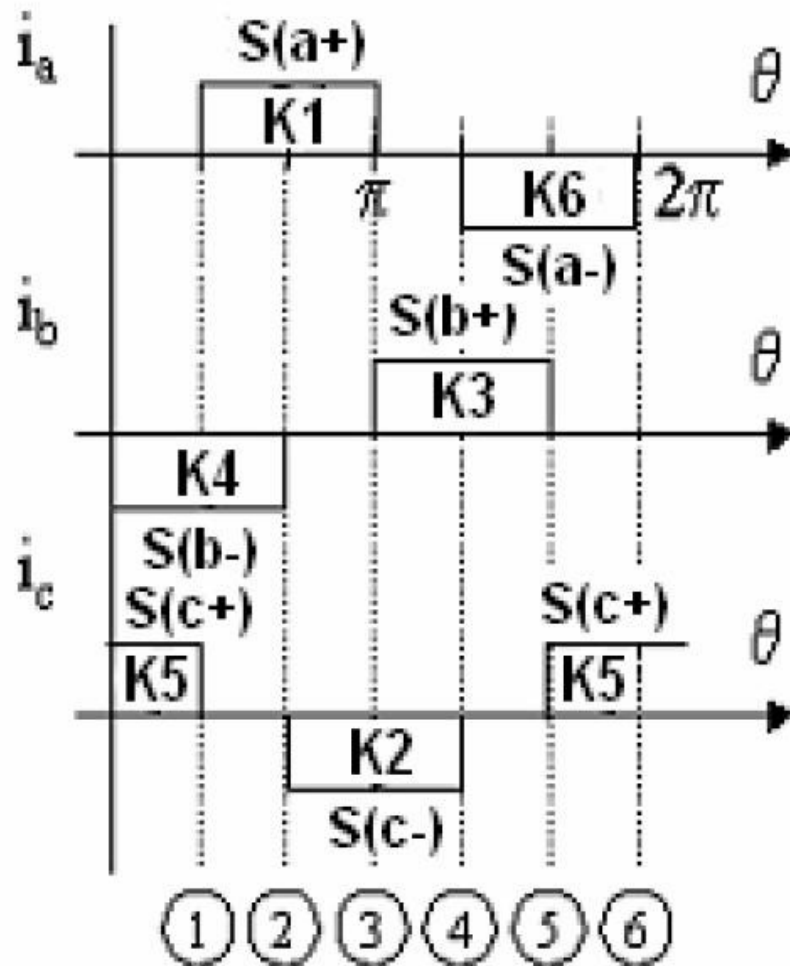
Idealizowana zależność prędkości obrotowej silnika bezszczotkowego prądu stałego od momentu obciążenia.

Silnik BLCD – sterowanie



Najprostszy układ zasilania silnika bezszczotkowego prądu stałego składa się z falownika (układu mostkowego kluczy tranzystorowych) realizującego sterowanie PWM, czujnika położenia wirnika i układu regulacji prędkości obrotowej (napięcia) i kontroli prądu zasilającego

Silnik BLCD – sterowanie



Podczas obrotu wirnika o 360° elektrycznych realizowanych jest kolejno kombinacja 6 różnych stanów pracy (jednoczesnego załączenia) par tranzystorów (kluczy) układu mostkowego - K1 K2 , K2 K3 , K3 K6 , K6 K5 , K5 K4 , oraz K4 K1 .

Silniki prądu stałego – podsumowanie

1. Bardzo dobre własności regulacyjne – silniki przeznaczone do sterowania prędkością i to w szerokim zakresie (nawet do kilkudziesięciu tysięcy razy).
2. Bardzo dobra charakterystyka mechaniczna (sztywna).
3. Potencjalna możliwość rozwijania bardzo dużych momentów rozruchowych (silniki specjalne).
4. Znaczne możliwości hamowania silnika.
5. Potencjalnie duża przeciążalność, nawet kilkukrotna, ale ograniczona komutatorem i szczotkami (silniki bezszczotkowe tego ograniczenia nie posiadają).
6. Znakomite własności dynamiczne, ale w odniesieniu do silników budowy specjalnej (specjalne konstrukcje komutatora i szczotek).

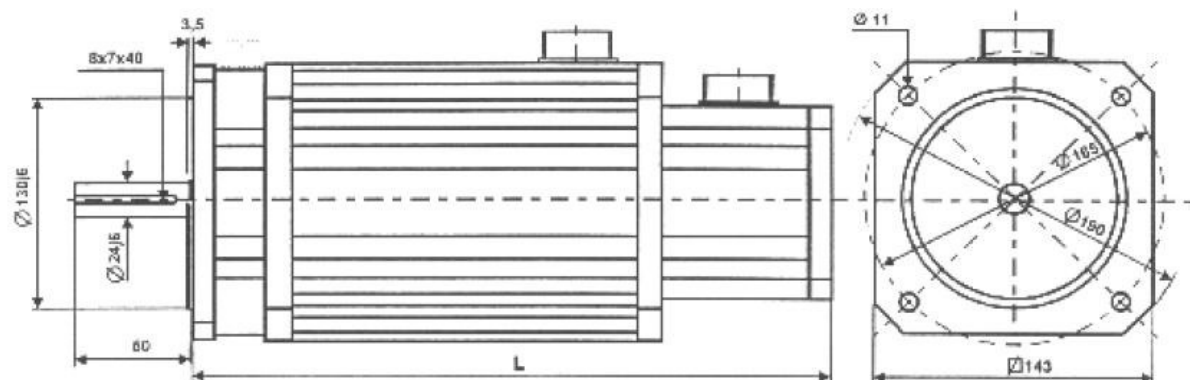
7. Komutator i szczotki to najsłabsze ogniwo silnika konwencjonalnego które istotnie wpływają na możliwość pełnego wykorzystania właściwości eksploatacyjnych.

8. Silniki bezszczotkowe pozbawione są największej wady silników konwencjonalnych, tj komutatora i szczotek. Stąd własności eksploatacyjne tych silników są korzystniejsze.

9. Silniki bezszczotkowe wymagają rozbudowanego układu sterowania (sterowniki mP) i precyzyjnego układu pomiarowego kąta obrotu wirnika. To istotnie podnosi koszt takiego napędu.

10. Znaczącą wadą silnika bezszczotkowego jest wyraźnie większa nierównomierność ruchu (w porównaniu z silnikiem konwencjonalnym), zwłaszcza przy niskich prędkościach. Ogranicza to zastosowanie tych silników do precyzyjnego sterowania maszyn, np. obrabiarek sterowanych numerycznie. ?????

Silnik BLCD – dane techniczne



Lp	Parametr	Symbo- l	Jed- nostka	RTMct 165-10	RTMct 165-14	RTMct 165-18	RTMct 165-23	RTMct 165-27	RTMct 165-30	Tole- rancja %
1	Moment długo- trwały	MD O	Nm	10	14	18	23	27	30	
2	Max. prędkość obrotowa *)	n	rpm	3000	3000	3000	3000	3000	3000	
3	Max. Napięcie pracy *)	U	VDC	540	540	540	540	540	540	
4	Max. moment (impuls)	Mm	Nm	35	49	63	80,5	94,5	105	
5	Max. prąd (im- puls)	Im	A	30,5	42,6	54,8	69	82	85,5	
6	Stała momentu	KT	Nm/A	1,15	1,15	1,15	1,17	1,15	1,23	±10
7	Stała napięcia	KE	V/1000 min ⁻¹	120,5	120,5	120,5	123,2	120,5	129	±10
8	Moment bez- władności	I	kgm ² 1 0 ⁻⁴	14,3	19,5	21,4	29,3	32,4	37	
9	Długość **)	L	mm	295	325	355	385	415	445	
10	Masa	Q	kg	11,8	14,5	17,3	20,0	23	26	

*) - inne wartości do uzgodnienia **) - wymiar dla wersji z hamulcem i bez hamulca
-Silnik z uzwojeniem trójfazowym, 6-cio biegowym. Wirnik z magnesami trwałymi z ziem

Silnik BLCD – charakterystyki

- Napięcie znamionowe U_N [V]
- Moment znamionowy M_N [Nm]
- Prędkość znamionowa n_N [obr/min.]
- Prąd znamionowy I_N [A]
- Prąd rozruchowy I_A [A]
- Moment rozruchowy M_R [Nm]
- Moment bezwładności wirnika J_R (gcm²)
- Prąd szczytowy I_{\max} (A)
- Maksymalne napięcie zasilając U_{\max} (V)

