

# NAPĘD I STEROWANIE MASZYN

Robert Babiarz

Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa  
Politechnika Rzeszowska

Rzeszów 2020

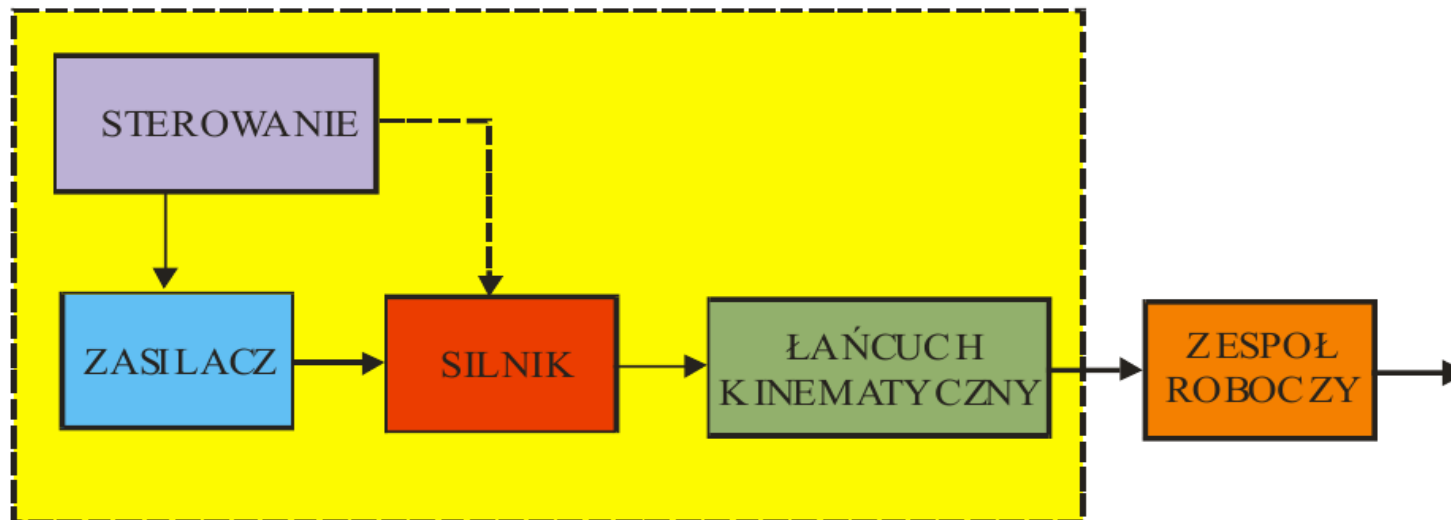
## Literatura:

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

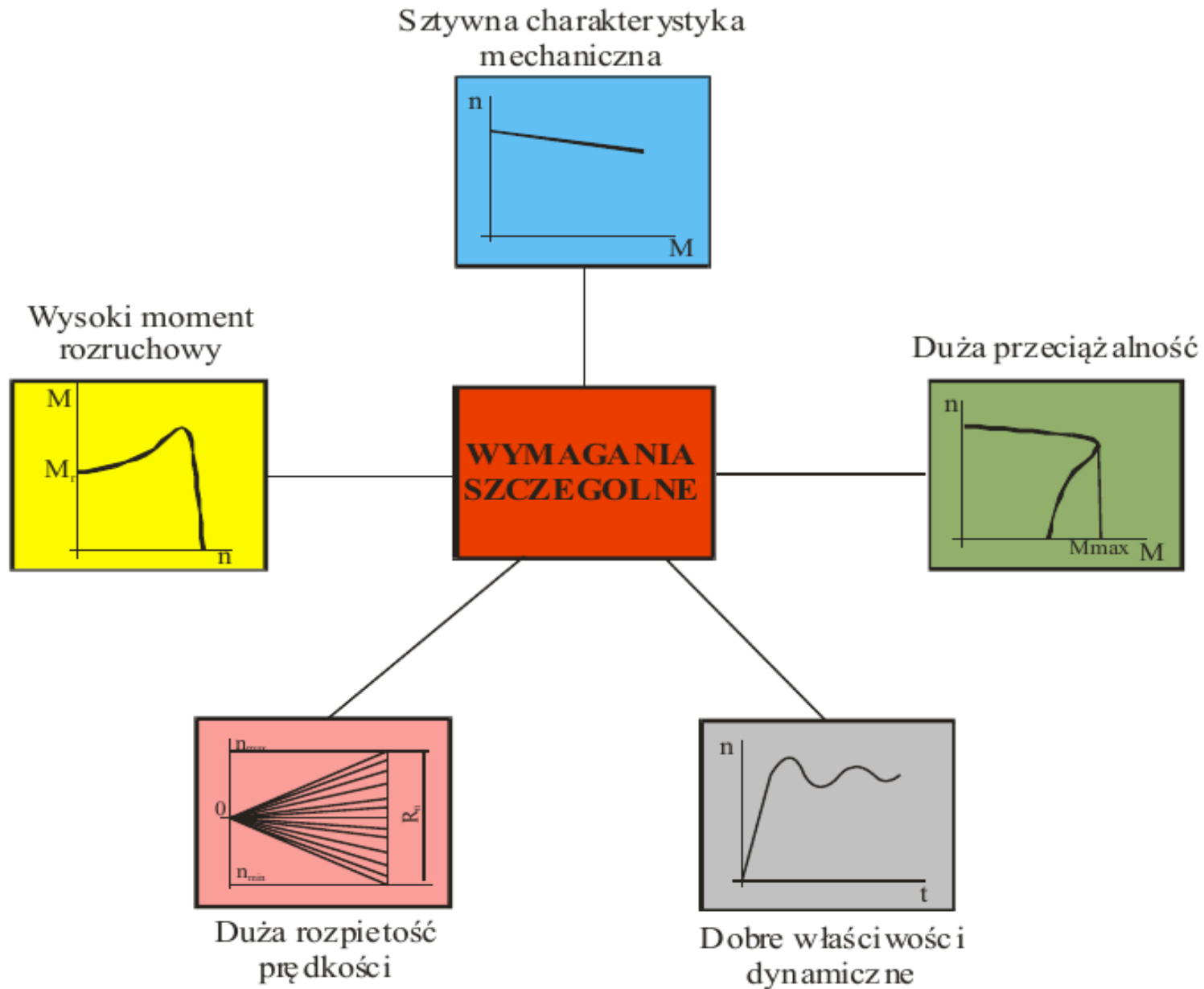
# Definicja napędu:

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).



# 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.

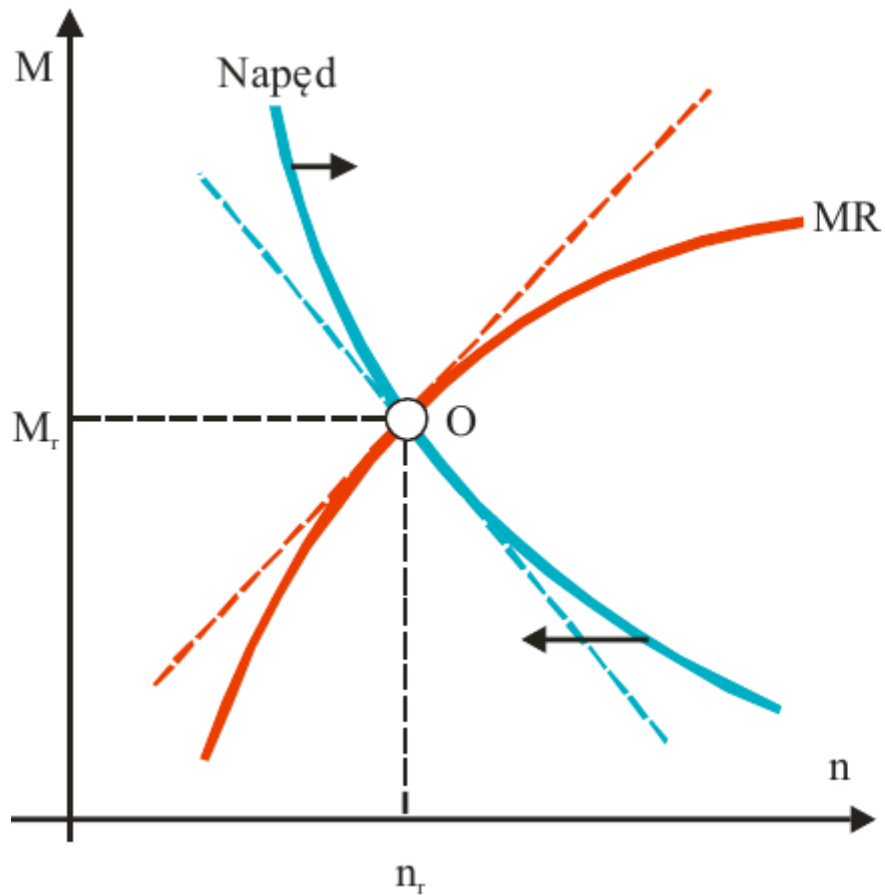
# Wprowadzenie – zadania napędu

Wymagania stawiane napędom:

W zależności od zadania stawianego napędom:

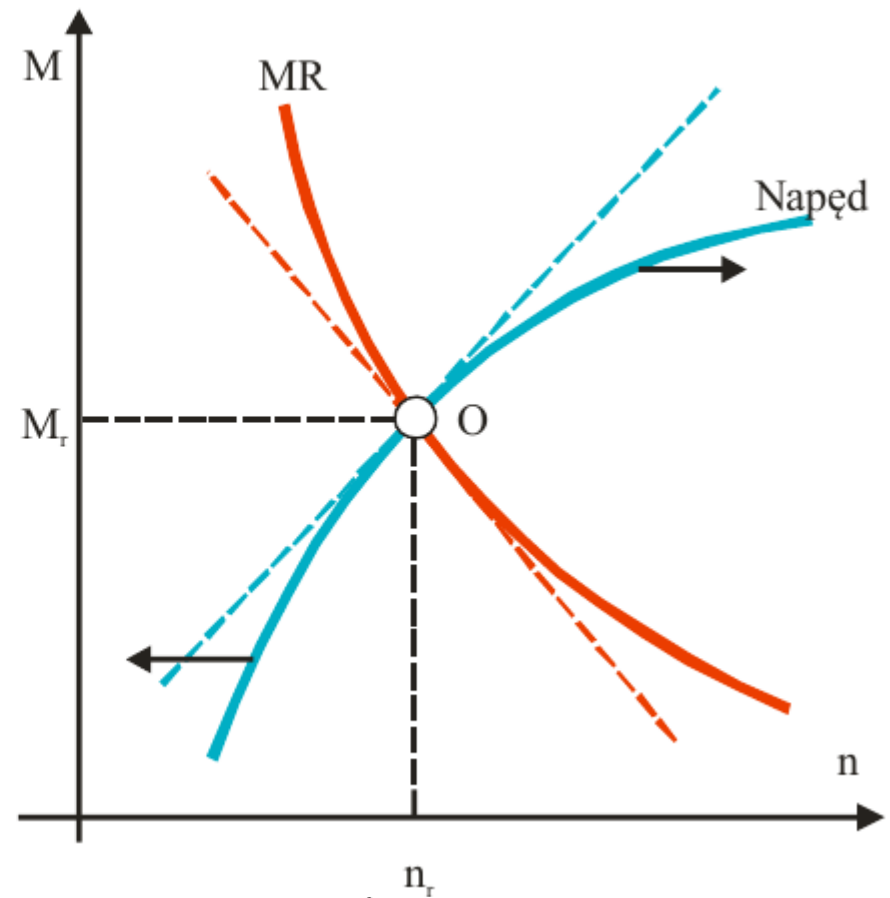
- sztywność charakterystyki mechanicznej,
- odpowiednie charakterystyki rozruchu i hamowania,
- przeciążalność,
- zdolność do sterowania (zmiany) ruchem (sterowanie ilością i kierunkiem ruchu),
- odpowiednie właściwości dynamiczne,
- odpowiednie charakterystyki siłowe (sterowanie wielkością i kierunkiem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

# Wprowadzenie – stateczność (stabilność) napędu



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

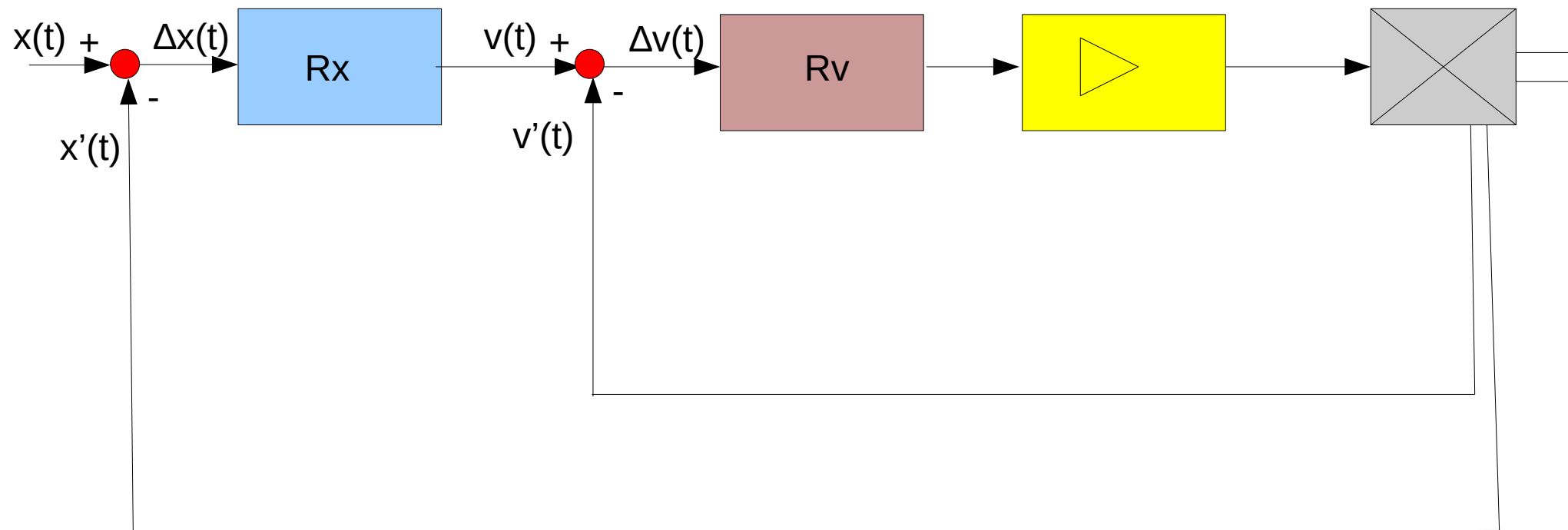
Napęd stateczny (stabilny)



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

Napęd niestateczny (niestabilny)

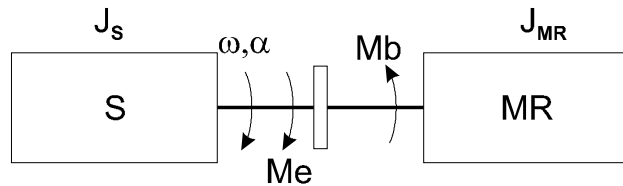
# Ogólna struktura układu serwonapędowego



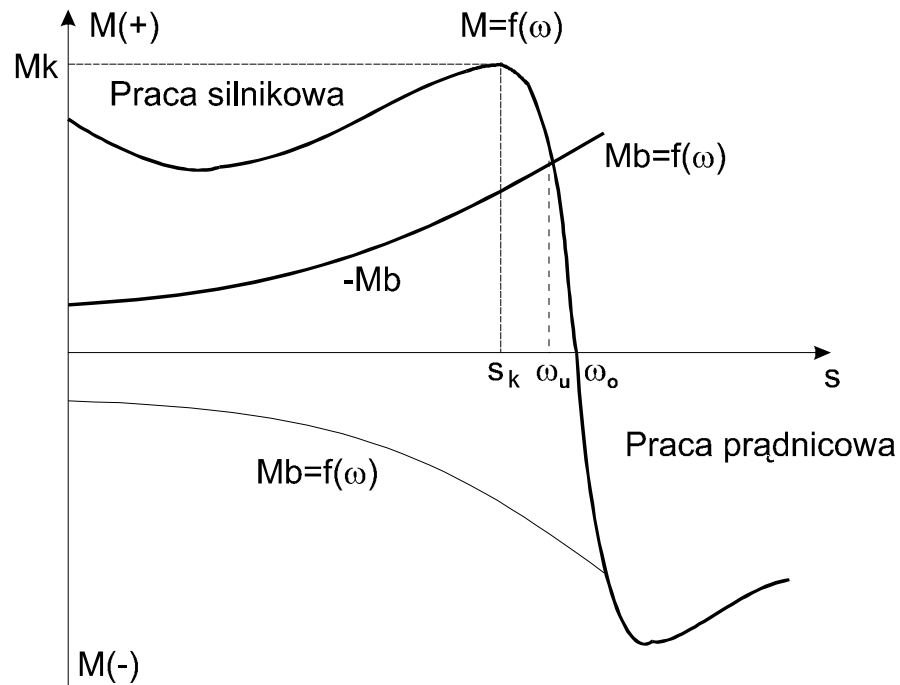


# Równanie ruchu układu napędowego

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.

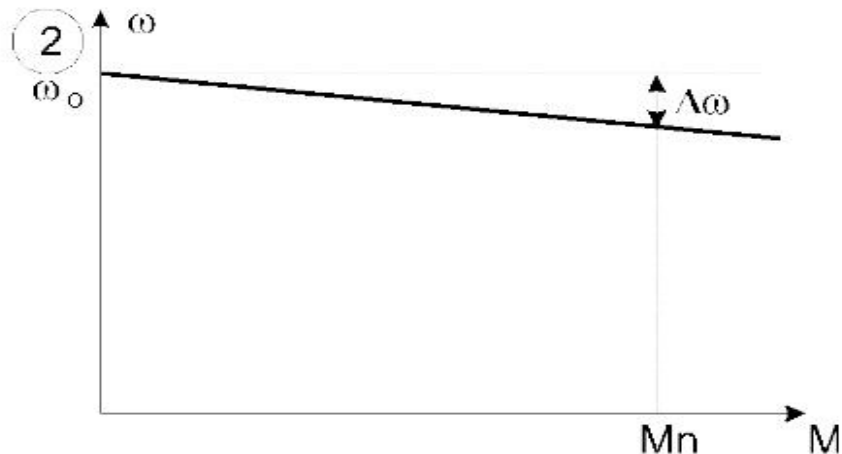
Dowolna różnica momentów

$$M_e - M_b = M_d$$

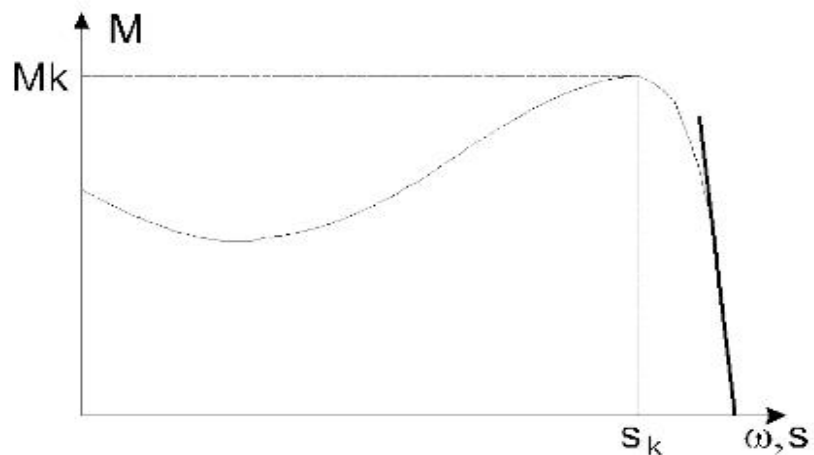
stanowi **moment dynamiczny**.

**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.



$$\frac{\Delta\omega}{\omega_0} * 100\% \leq 10\%$$



# Stan ustalony jest wtedy, gdy jest zerowy moment dynamiczny

Ogólna postać równania ruchu układu napędów:ego posiada następującą postać:

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

gdzie:  $J$  [kgm<sup>2</sup>] – 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:

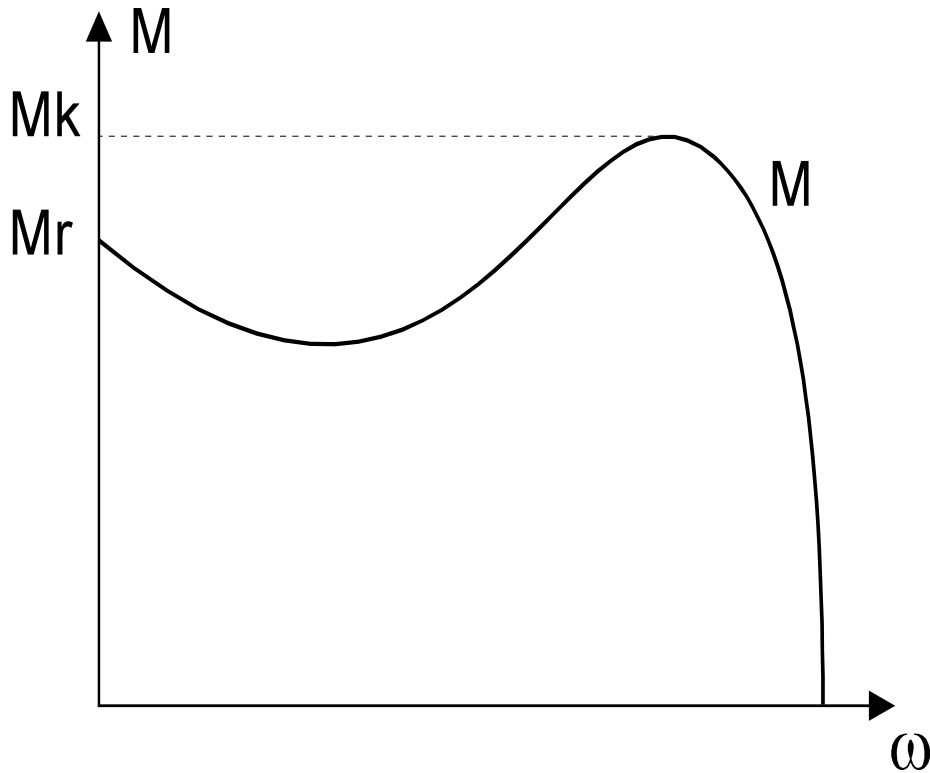
$$t = J \int \frac{d\omega}{(M_e - M_m)}$$

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 NAPIĘDOWE

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 m<sup>2</sup>],
- 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 rozwinać 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.

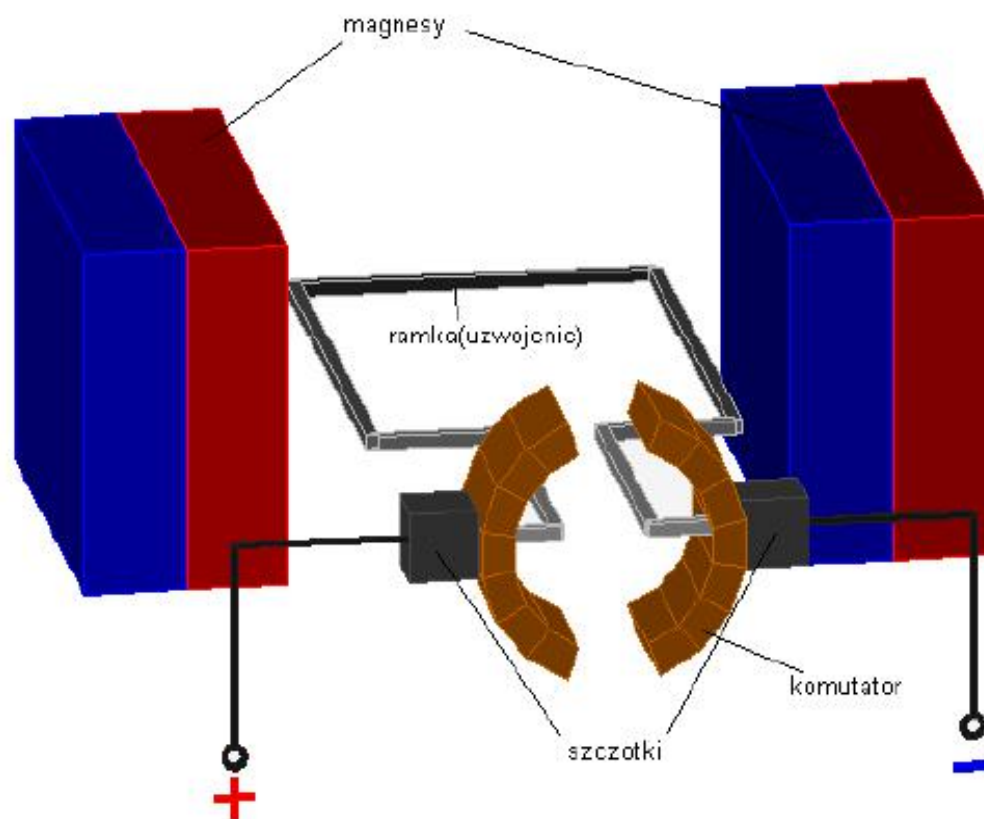
Jako maszyna elektryczna prądu stałego może pracować zamiennie jako silnik lub prądnica. W tym drugim przypadku wirnik napędzany jest energią mechaniczną dostarczoną z zewnątrz, a na zaciskach uzwojenia twornika odbierana jest wytworzona energia elektryczna.

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.

# Budowa i sposób funkcjonowania

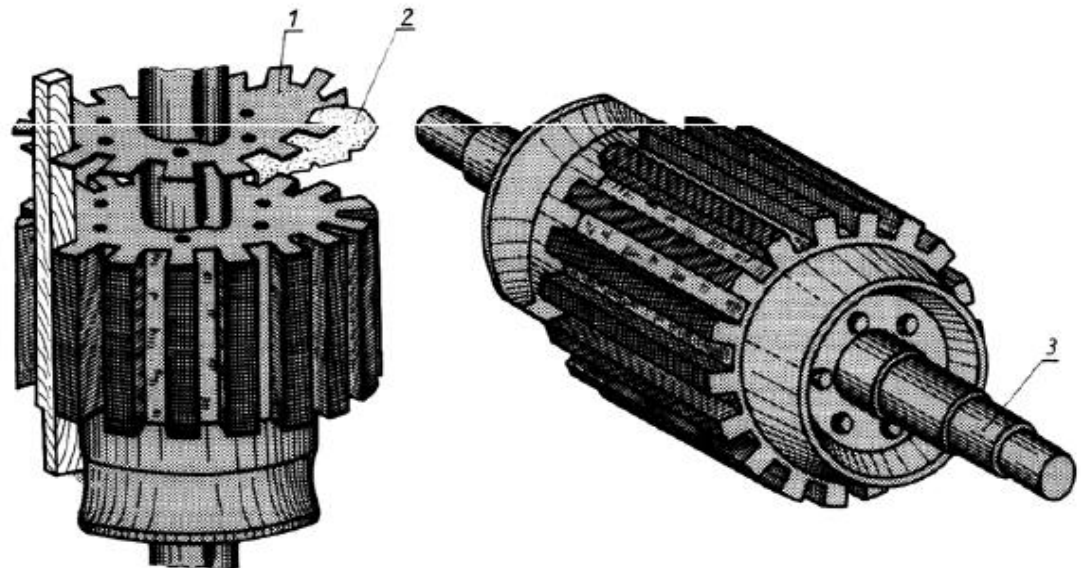
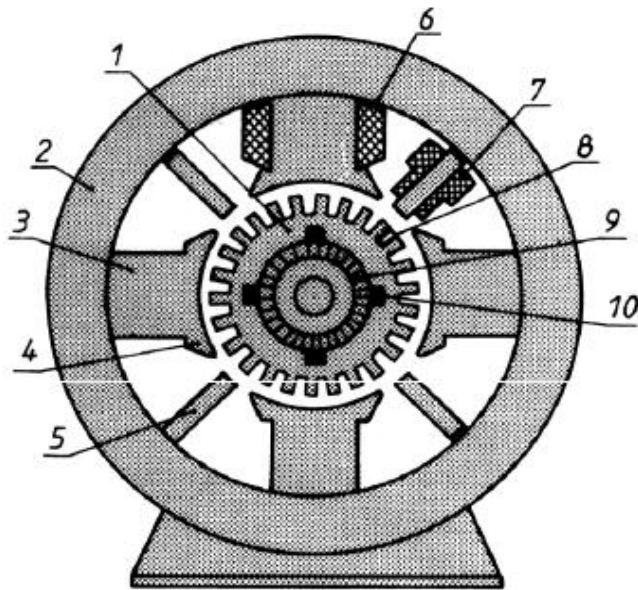
1. stojan z magnesem trwałym
2. wirnik z uzwojeniem twornik  
– prostokątna ramka z drutu;
3. szczotki – doprowadzające prąd do uzwojenia twornika;
4. komutator – pierścień ze stykami – wyprowadzenia z ramki (uzwojenia twornika);
5. wyjścia do zasilania.

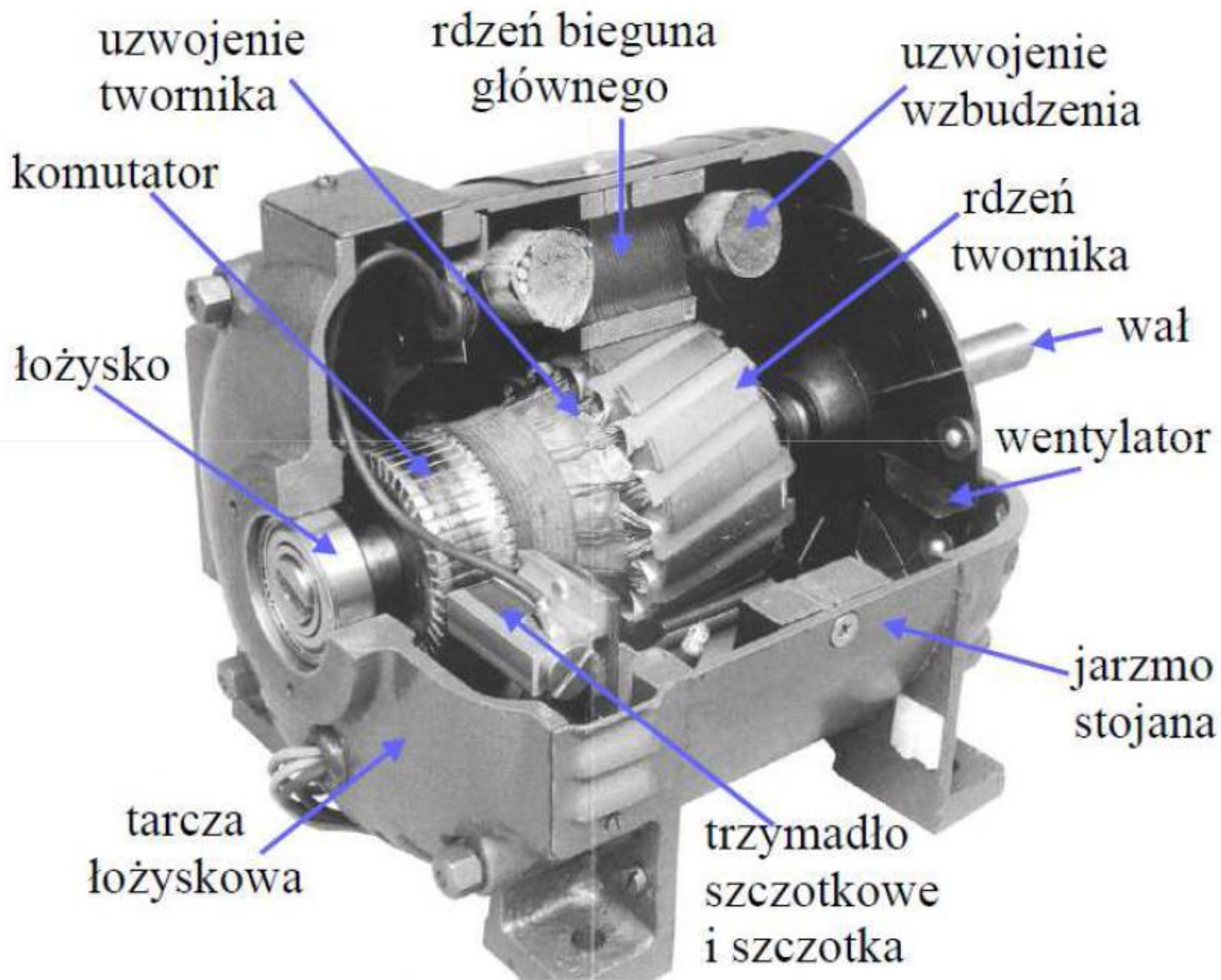


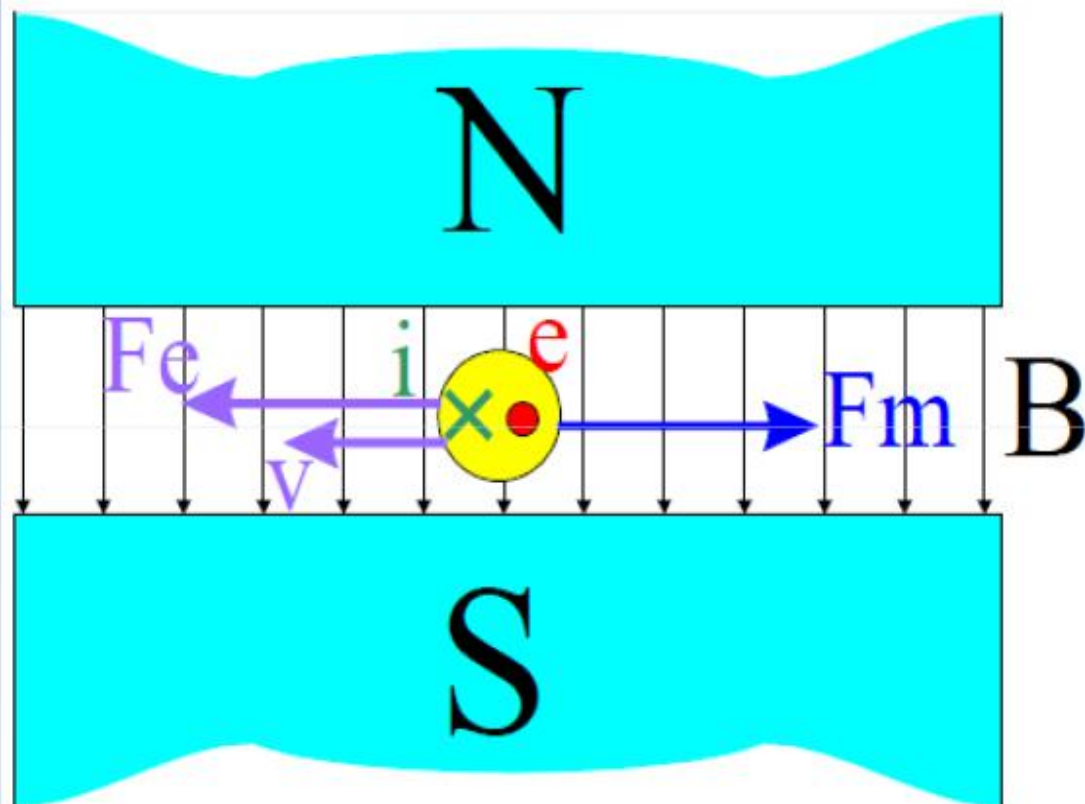


# Silniki prądu stałego - budowa

- Stojan – wytwarza pole magnetyczne
- jarzmo (2),
- bieguny główne z uzwojeniem wzbudzącym (3),
- bieguny pomocnicze (komutacyjne) (5),
- tarcze łożyskowe, trzymadła szczotkowe.







### Moment elektromagnetyczny

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

$c_M$  – stała maszyny

$I_t$  – prąd twornika

### Napięcie indukowane

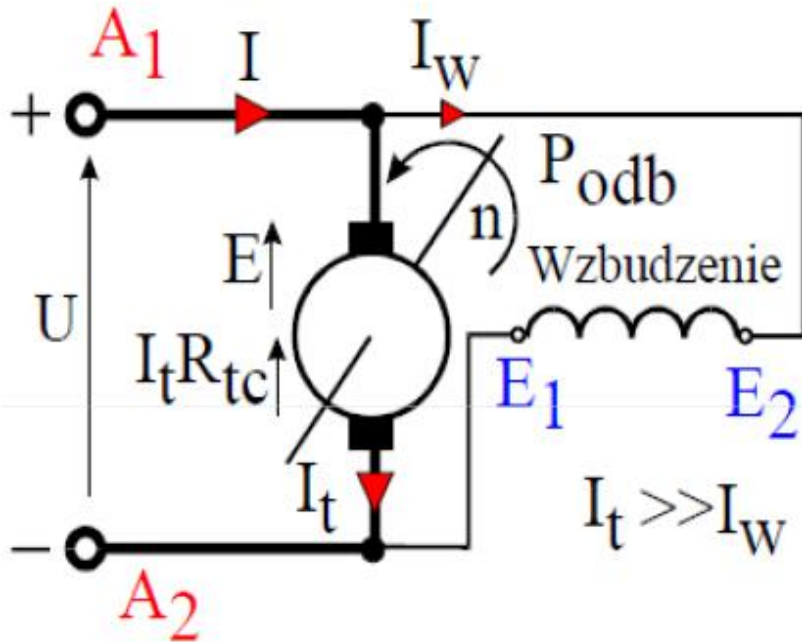
$$E = c_E \cdot \Phi \cdot n$$

$c_E$  – stała maszyny

$\Phi$  – strumień magnetyczny

# Charakterystyka mechaniczna silnika

## Schemat elektryczny



Napięcie na zaciskach silnika

$$U = E + I_t R_{tc} = c_E \Phi n + I_t R_{tc}$$

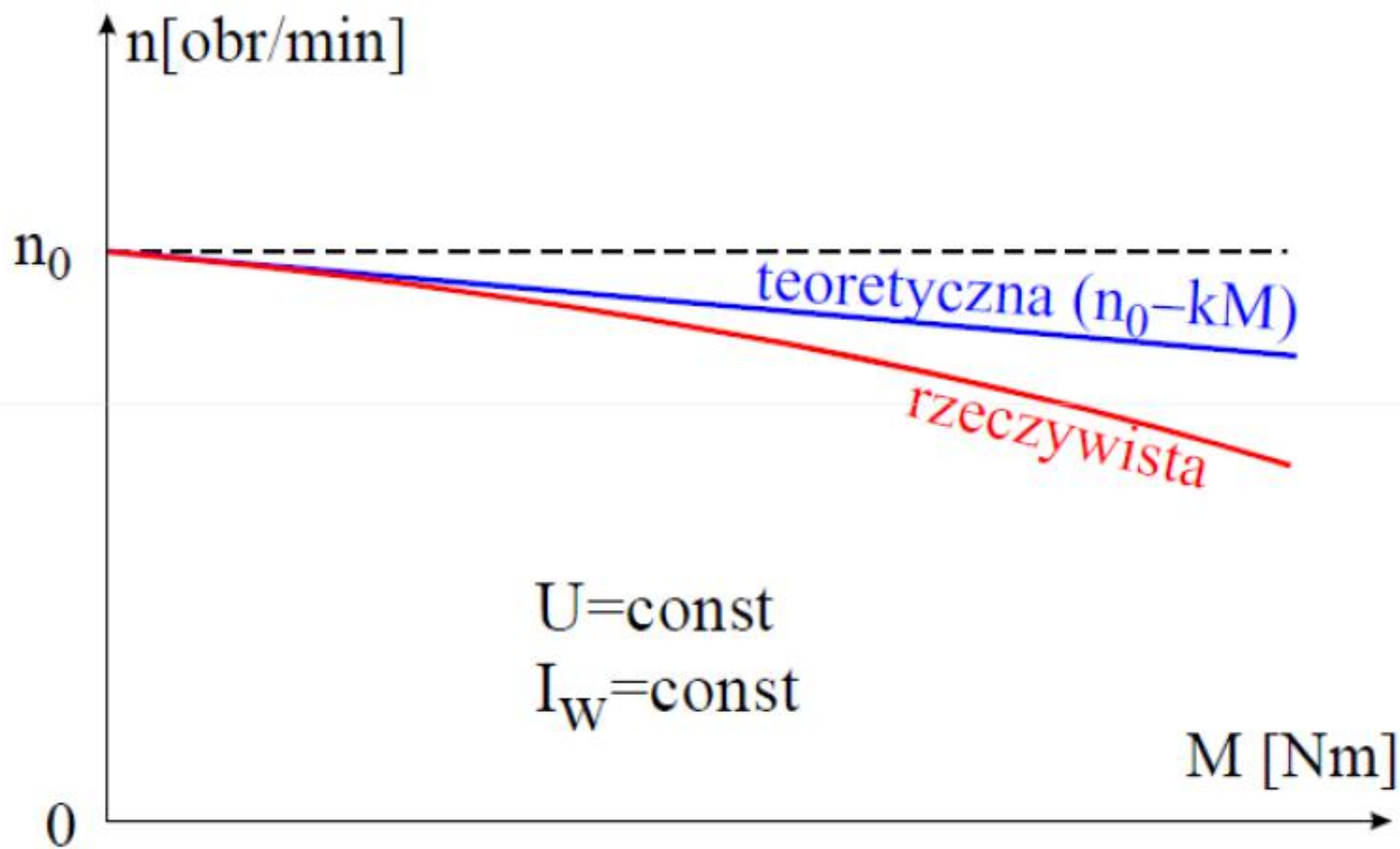
Prędkość obrotowa silnika w funkcji momentu

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

$$n = n_0 - k M_e$$



# Charakterystyka mechaniczna silnika



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

# Regulacja prędkości obrotowej silnika prądu stałego

Przekształcając równanie napięć silnika, można wyprowadzić wzór na prędkość silnika prądu stałego z dodatkową rezystancją w obwodzie twornika  $R_{ar}$

$$n = \frac{U - (R_a + R_{ar}) * I_a}{c \Phi}$$

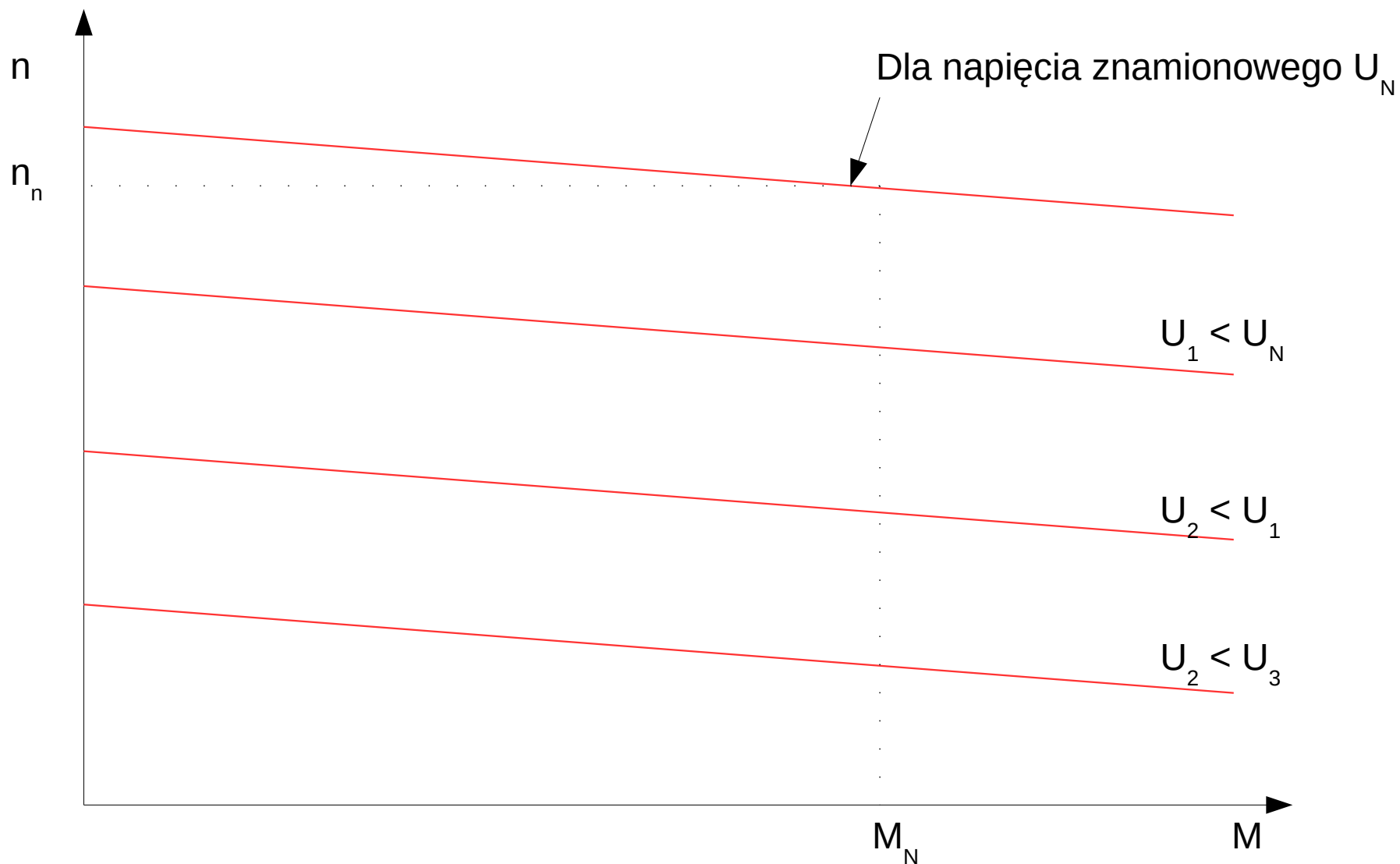
Z zależności tej widać, że na zmianę prędkości wirowania wirnika mają wpływ: napięcie  $U$ , rezystancja  $R_{ar}$  oraz strumień  $\Phi$ .

Oznacza to, że prędkość obrotową można regulować:

- przez zmianę napięcia zasilania twornika  $U$ , - sposób stosowany w układach serwonapędowych,
- przez zmianę rezystancji w obwodzie twornika  $R_{ar}$
- przez zmianę strumienia  $\Phi$ .

Dobór sposobu regulacji zależy od wymagań układu napędowego.

# Regulacja prędkości obrotowej silnika prądu stałego



Charakterystyki mechaniczne silnika prądu stałego dla różnych napięć zasilających

# Silnik BLCD

Nazwa ta wynika z angielskiego określenia brushless DC motor ( bezszczotkowy prądu stałego) 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 zbyt dużym 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.

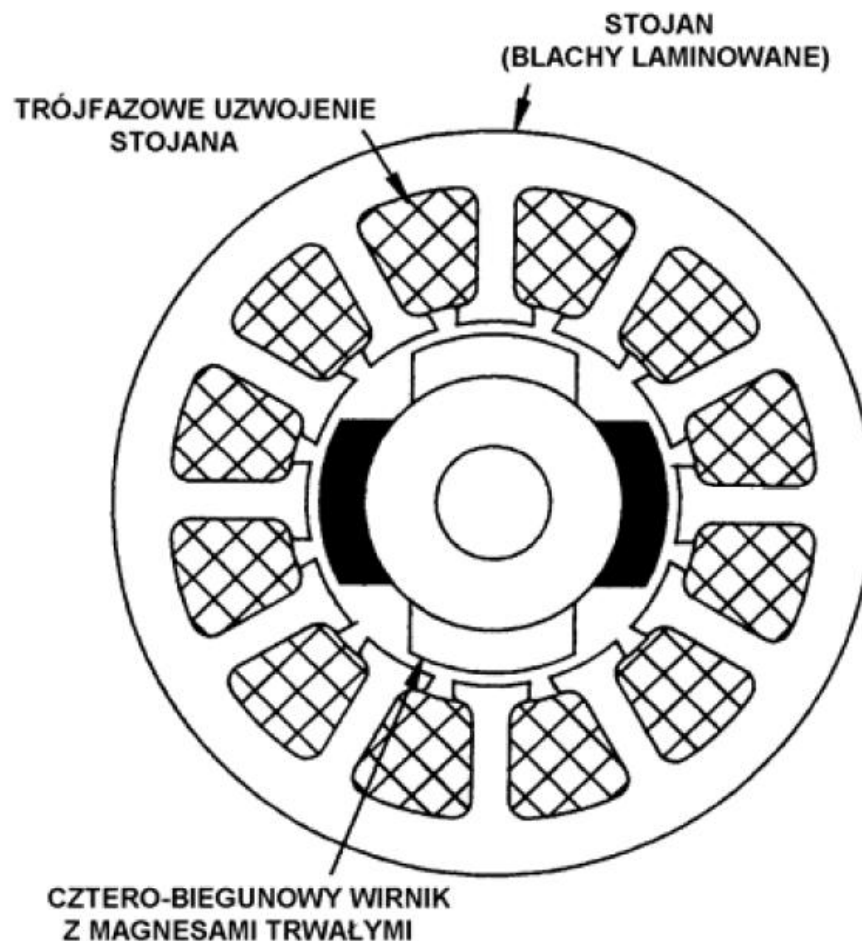
Dziś silniki te możemy spotkać prawie w każdej dziedzinie techniki, zaczynając od modelarstwa, a kończąc na napędach wrzecion i posuwów w obrabiarkach a nawet elektrowniach wiatrowych.

# Silnik BLCD - konstrukcja

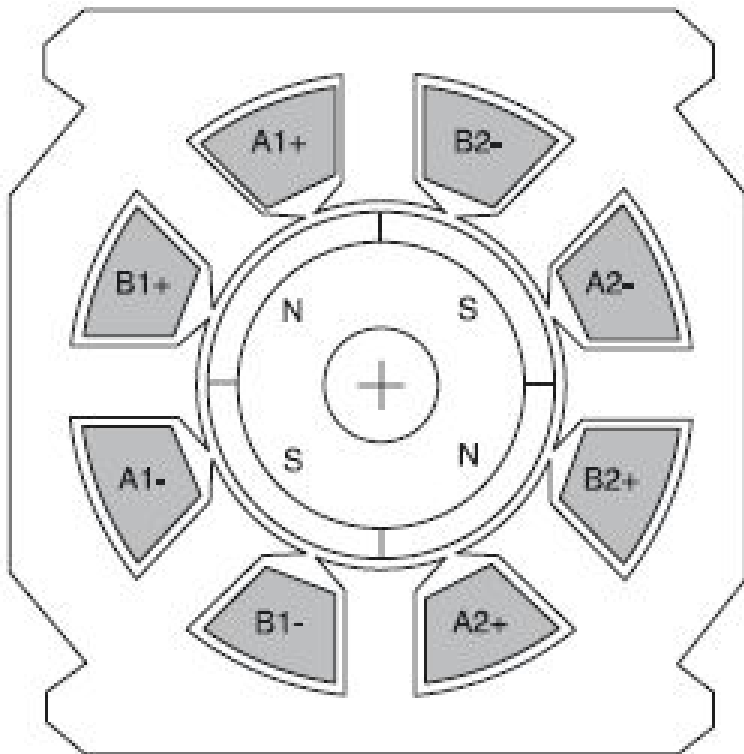
Silnik bezszczotkowy prądu stałego jest odpowiednikiem odwróconego konwencjonalnego silnika prądu stałego z magnesami trwałymi.

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.

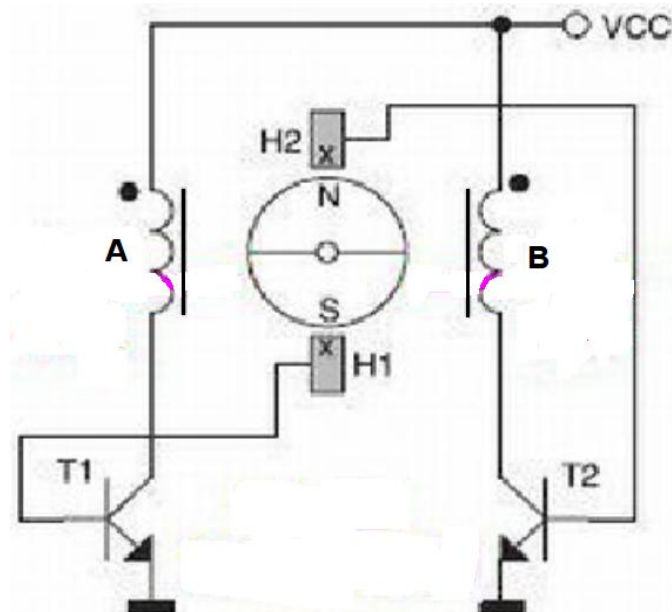
Tak, więc przepływ prądu i jego biegunowość musi być synchronizowana ze zmianą położenia wirnika.



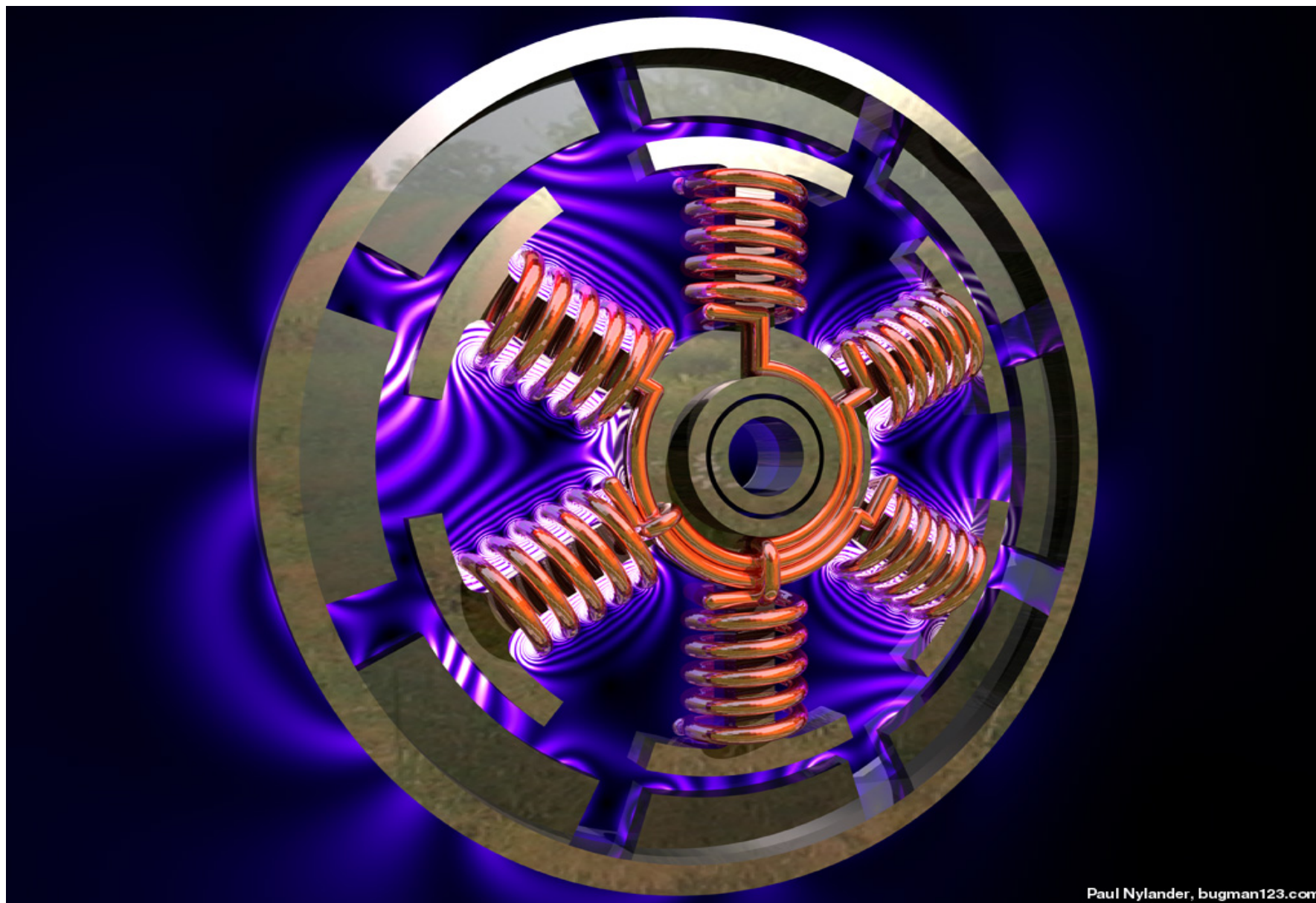
# Silnik BLCD - konstrukcja



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



# Silnik BLCD - konstrukcja



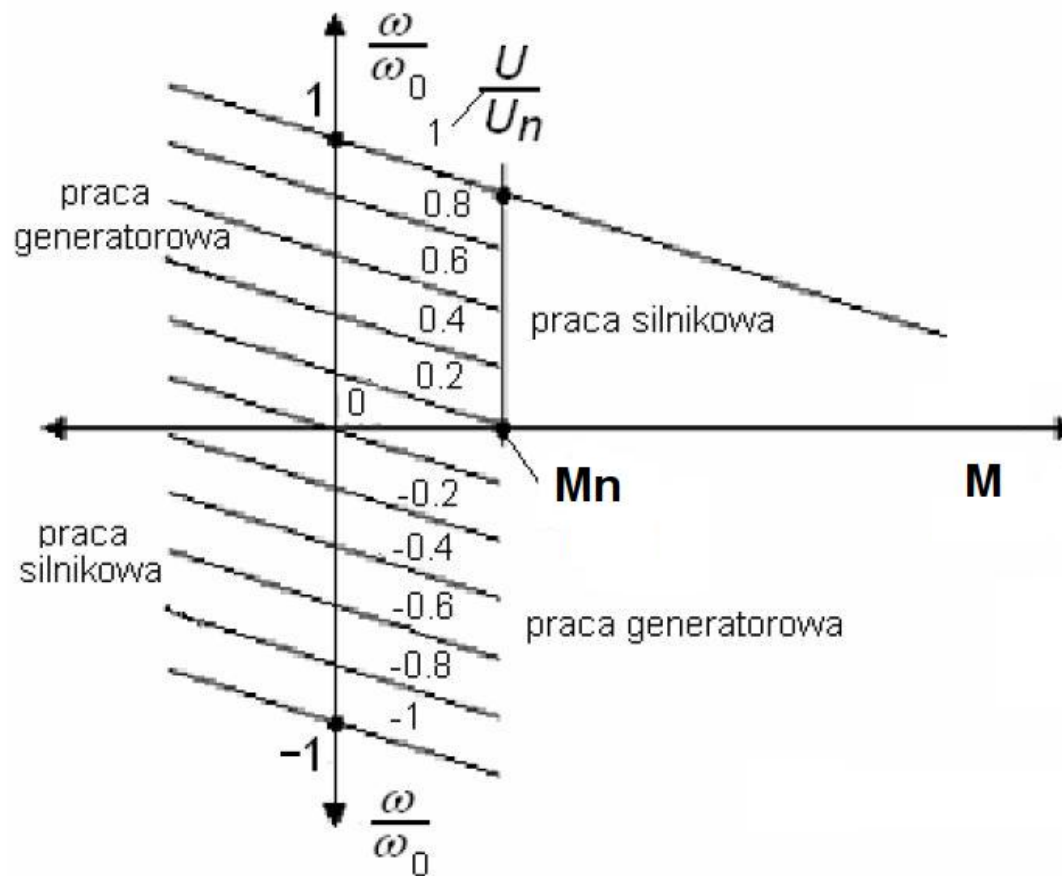
# Silnik BLCD - właściwości

- Główne zalety silnika bezszczotkowego w porównaniu z innymi silnikami to:
- bardzo duża sprawność,
- liniowa charakterystyka mechaniczna, jak w silnikach prądu stałego,
- 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 prądu stałego bezszczotkowy– sterowanie prędkością

Możliwość bezstopniowego sterowania prędkością należy do najważniejszych zalet silników prądu stałego.

## Sposoby sterowania prędkością:

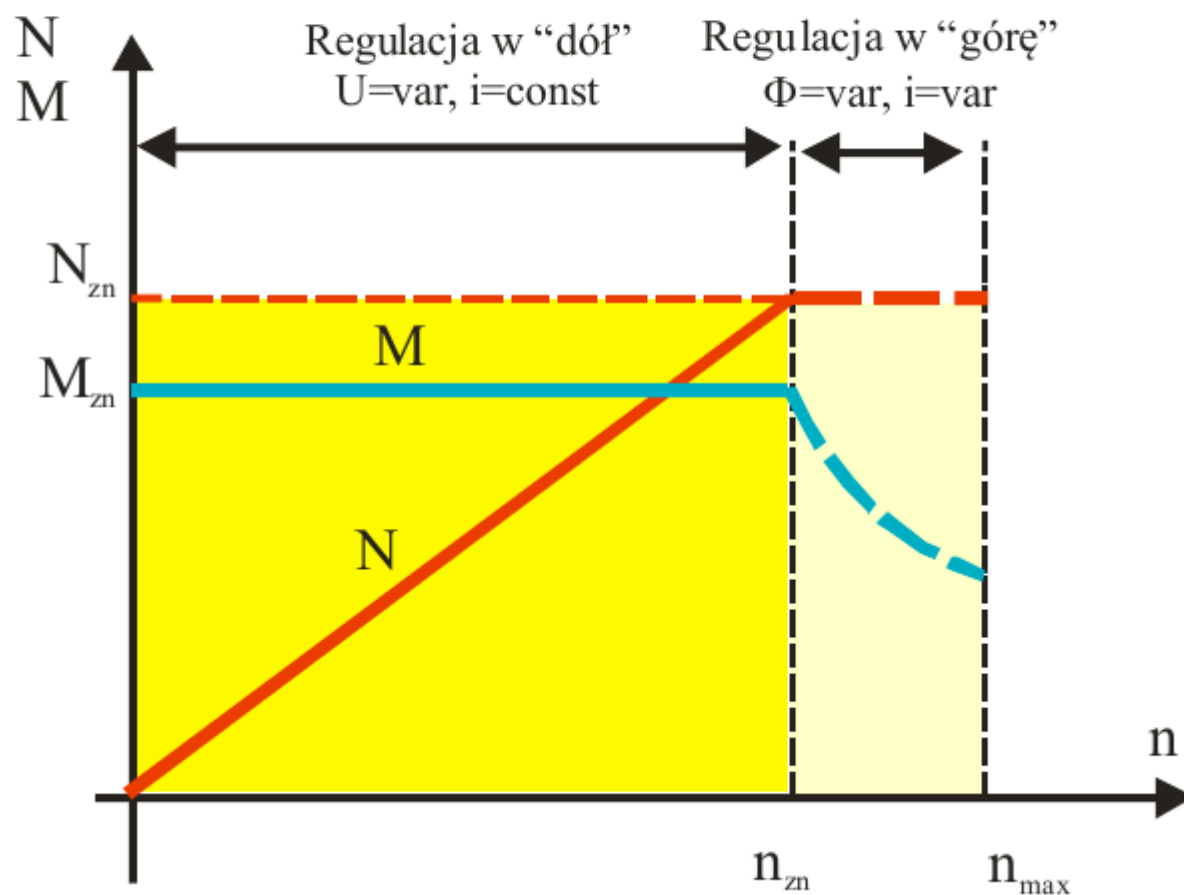
- poprzez zmianę (obniżenie) napięcia (prądu) zasilającego stojan silnika (metoda najkorzystniejsza)
- brak możliwości sterowania prędkością poprzez osłabianie strumienia wzbudzenia (magnesy trwałe). Jest to wada w porównaniu z silnikiem konwencjonalnym. W zaawansowanych systemach sterowania  $\mu P$  istnieje możliwość osłabiania pola magnetycznego wzbudzenia (od magnesów trwałych na wirniku) poprzez sterowanie prądem od magnesowującym stojana.

$$n = \frac{U}{k_e \Phi} - \frac{R_w}{k_e k_m \Phi^2} M$$

$$n = \frac{U}{k_e \Phi} - \frac{R_w}{k_e \Phi} i$$



# Silnik prądu stałego bezszczotkowy – sterowanie prędkością



# Silnik prądu stałego bezszczotkowy – właściwości dynamiczne

Potencjalnie, bardzo dobre właściwości dynamiczne, ponieważ silnik może rozwijać bardzo duże momenty napędowe ( $M_{zw}$ )

$$\varepsilon = \frac{M_{el} - M_{ob}}{\Theta_w + \Theta_{ob}}$$

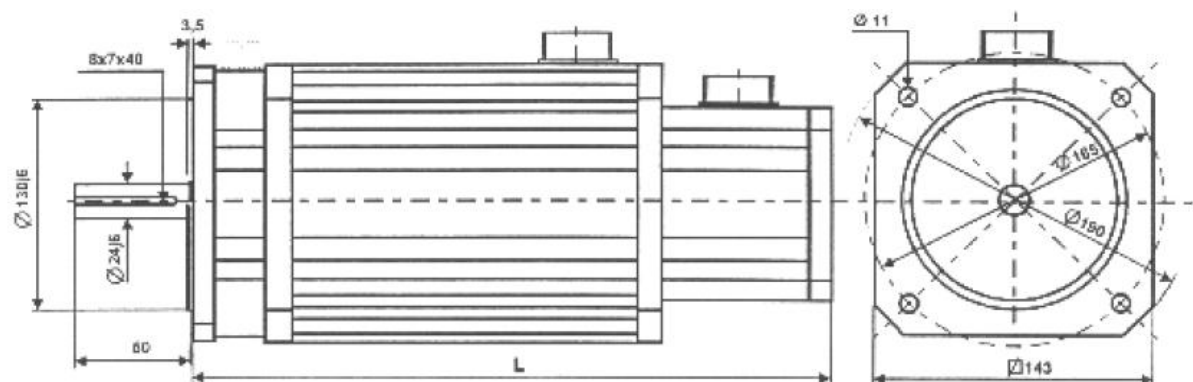
$$M_{el} = M_0 = (3 - 4) M_{zn}$$

$\Theta_w$  silnika bezszczotkowego jest wyraźnie mniejsze niż odpowiedniego silnika konwencjonalnego.

# 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,
6. Znakomite własności dynamiczne,
7. Silniki bezszczotkowe pozbawione są największej wady silników konwencjonalnych, tj komutatora i szczotek. Stąd własności eksploatacyjne tych silników są korzystniejsze.
8. Silniki bezszczotkowe wymagają rozbudowanego układu sterowania i precyzyjnego układu pomiarowego kąta obrotu wirnika. To istotnie podnosi koszt takiego napędu.

# 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 <sup>-1</sup>	120,5	120,5	120,5	123,2	120,5	129	±10
8	Moment bez- władności	I	kgm <sup>2</sup> 1 0 <sup>-4</sup>	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