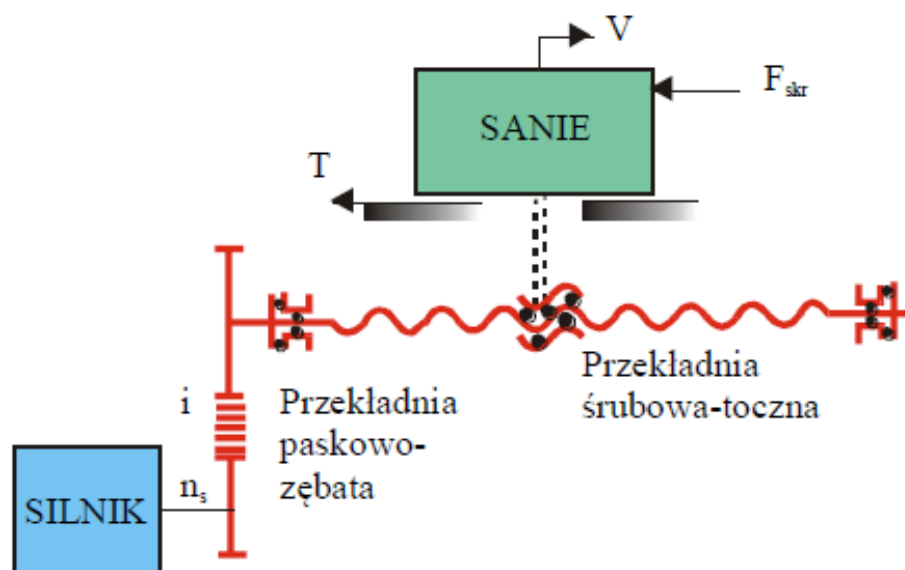


SILNIKI LINIOWE i MOMENTOWE

Silniki liniowe – wiadomości ogólne

Znaczny, a może dominujący udział zespołów i modułów w maszynach i urządzeniach wykonuje ruch postępowy (prostoliniowy) a ponad 90% napędów wykonuje ruch obrotowy (do wyjątków należą napędy hydrauliczne i pneumatyczne z siłownikami). W rezultacie zachodzi konieczność mechanicznej zamiany ruchu obrotowego na postępowy (konieczność stosowania dodatkowych mechanizmów jak: śruba – nakrętka, koło zębate – listwa zębata, mechanizm korbowo-wodzikowy, mechanizmy krzywkowe itp.).



Silniki liniowe – wiadomości ogólne

Stosowanie mechanizmów zamieniających ruch obrotowy na postępowy ma same wady, do który należą:

- zużywanie się i konieczność regeneracji
- okresowa obsługa techniczna (smarowanie, wymiana oleju itp.)
- źródło hałasu
- źródło drgań mechanicznych
- wysoki koszt
- luzy pogarszające precyzję ruchu (pozycjonowanie, równomierność)
- dodatkowe opory ruchu (tarcie w łożyskach, nakrętkach itp.)
- dodatkowe obciążenie bezwładnościowe pogarszające właściwości dynamiczne i stanowiące dodatkowe obciążenie dla silnika (silnik musi być większy)
- pogorszenie sztywności charakterystyki mechanicznej napędu

Silniki liniowe – wiadomości ogólne

Stosowanie mechanizmów zamieniających ruch obrotowy na postępowy ma same wady, do który należą:

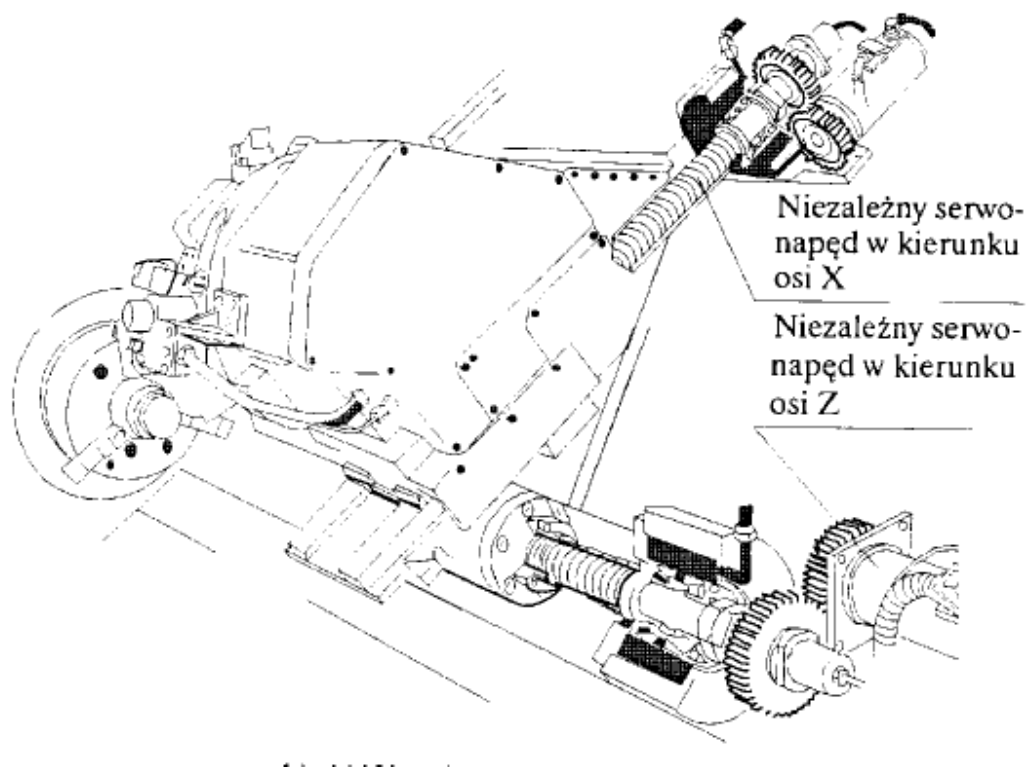
- zużywanie się i konieczność regeneracji
- okresowa obsługa techniczna (smarowanie, wymiana oleju itp.)
- źródło hałasu
- źródło drgań mechanicznych
- wysoki koszt
- luzy pogarszające precyzję ruchu (pozycjonowanie, równomierność)
- dodatkowe opory ruchu (tarcie w łożyskach, nakrętkach itp.)
- dodatkowe obciążenie bezwładnościowe pogarszające właściwości dynamiczne i stanowiące dodatkowe obciążenie dla silnika (silnik musi być większy)
- pogorszenie sztywności charakterystyki mechanicznej napędu

Silniki liniowe – wiadomości ogólne

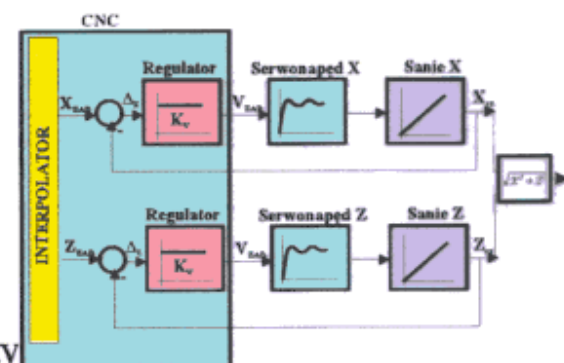
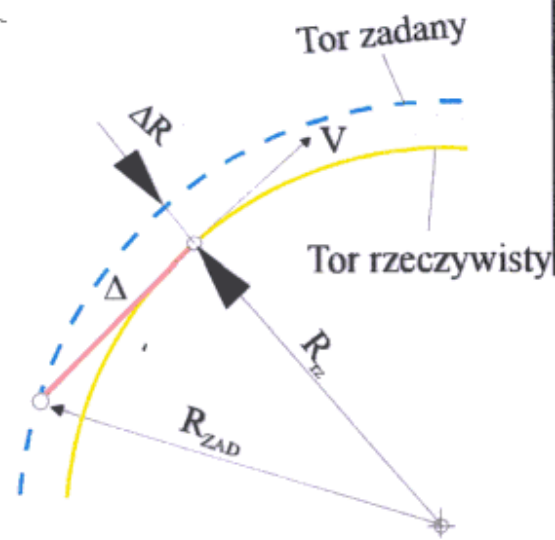
W rozwoju maszyn i urządzeń widoczne są następujące tendencje:

- wzrostu prędkości roboczej w celu podniesienia wydajności
- podnoszenia precyzji ruchu (dokładności pozycjonowania) w maszynach i urządzeniach sterowanych programowo (numerycznie, np. obrabiarki CNC czy roboty przemysłowe)
- wzrostu przyspieszeń ruchów interpolowanych (ruchy maszyn sterowanych numerycznie w wyniku których uzyskuje się dowolne, zaprogramowane kształty przedmiotu)
- podnoszenia równomierności ruchu
- poszerzania bezstopniowo sterowanej prędkości
- do uzyskiwania przemieszczeń na poziomie ułamka μm

Silniki liniowe – wiadomości ogólne



$$a = \frac{V^2}{R}$$

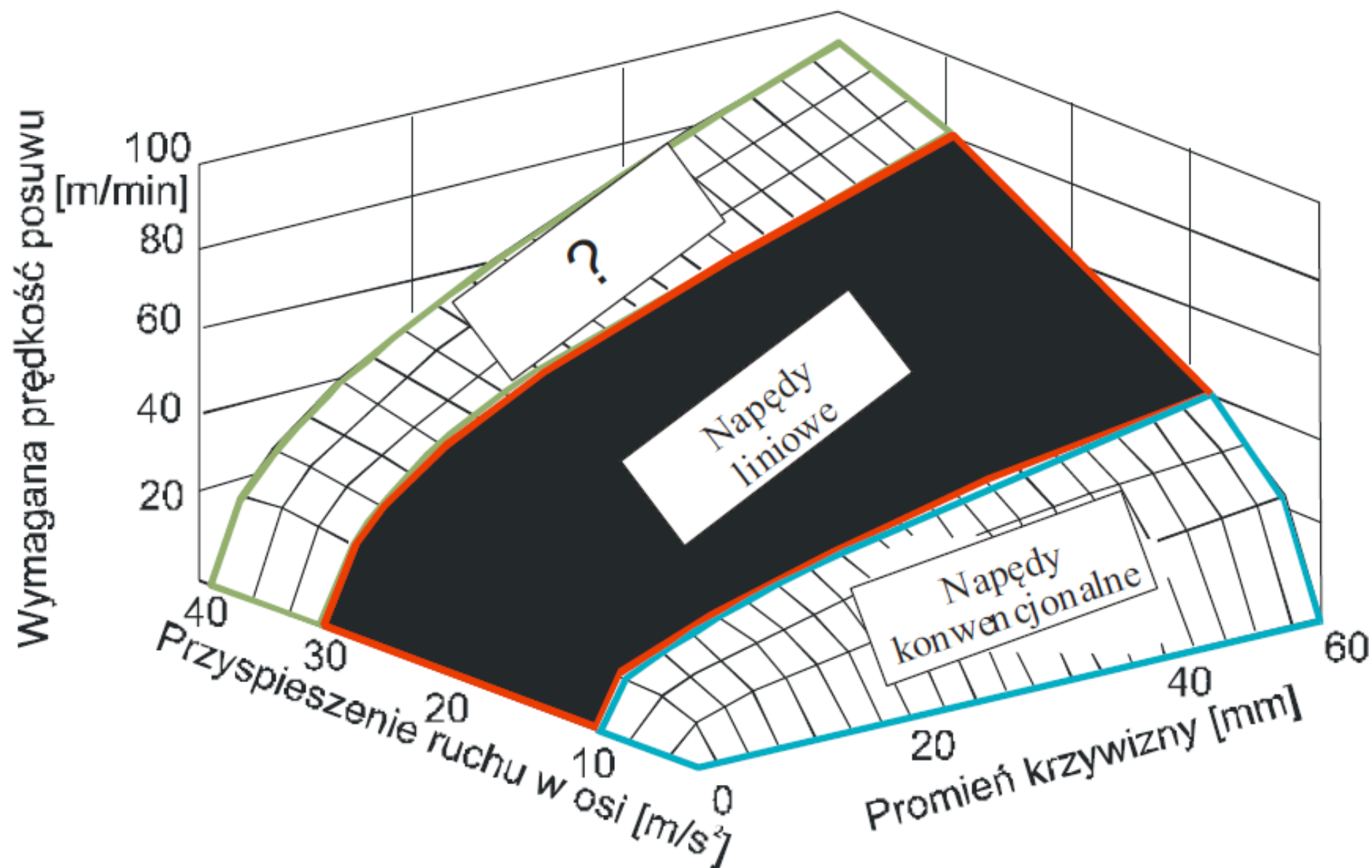


$$V_{\max} \leq \sqrt{a_{\text{dop}} R}$$

$$\Delta R \approx \frac{1}{2R \cdot k_v^2} V^2$$

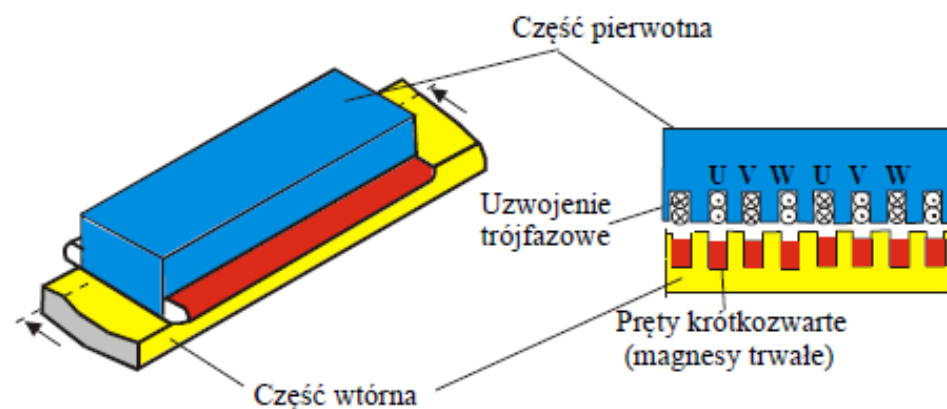
$$a = \frac{F_{\text{sil}} - F_{\text{op}}}{m_{\text{sil}} + m_{\text{zred}}} \left(\frac{M_{\text{sil}} - M_{\text{op}}}{\Theta_{\text{sil}} + \Theta_{\text{zred}}} \right)$$

Silniki liniowe – wiadomości ogólne

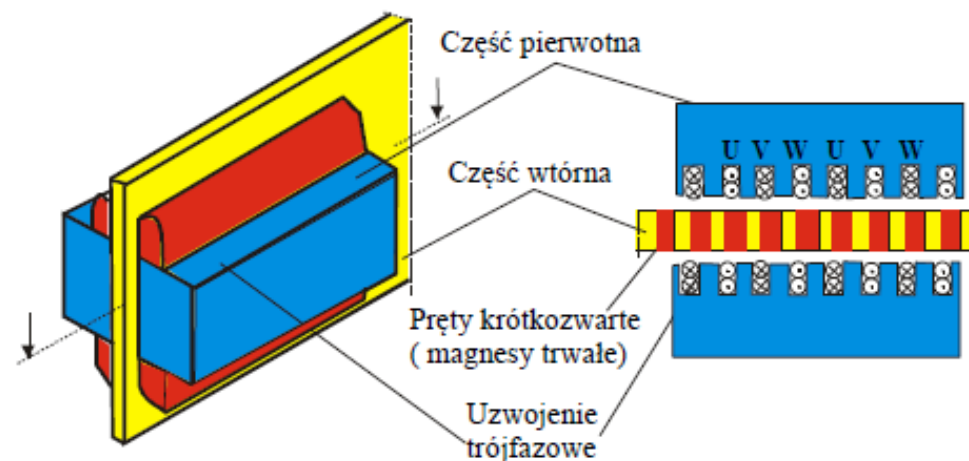


Konkluzja: dotychczas omówione napędy nie pozwalają na zadowalające sprostanie wymaganiom wynikających z ogólnych tendencji rozwojowych.

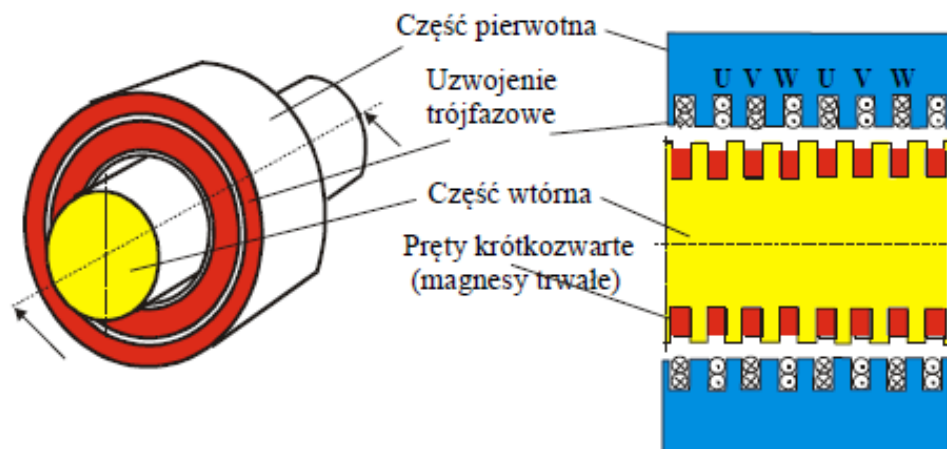
Silniki liniowe – klasyfikacja



Z pojedynczą
częścią pierwotną

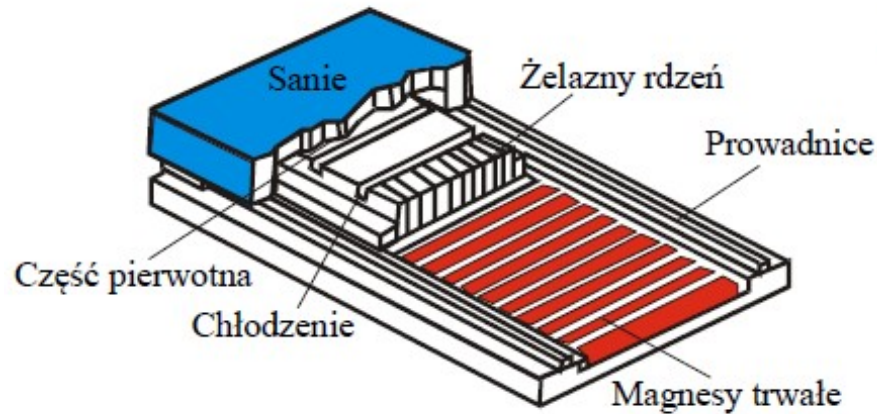


Z podwójną
częścią pierwotną

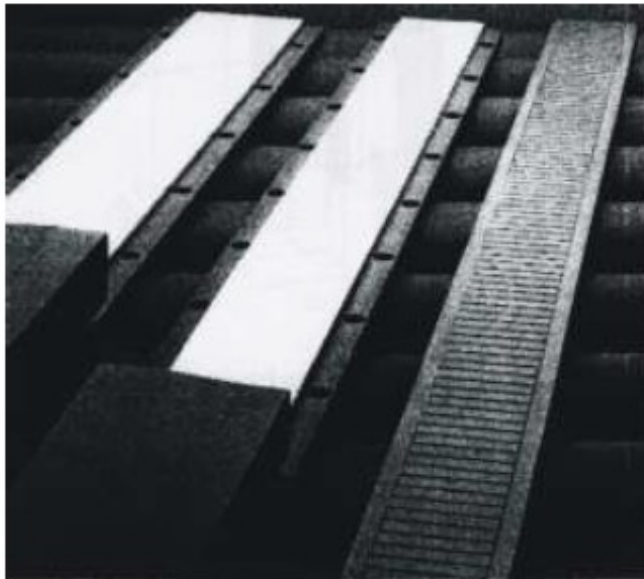
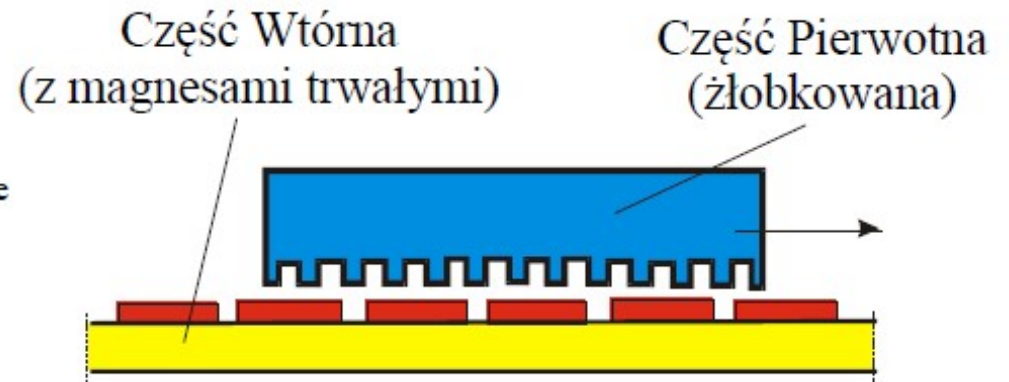


Solenoidalny

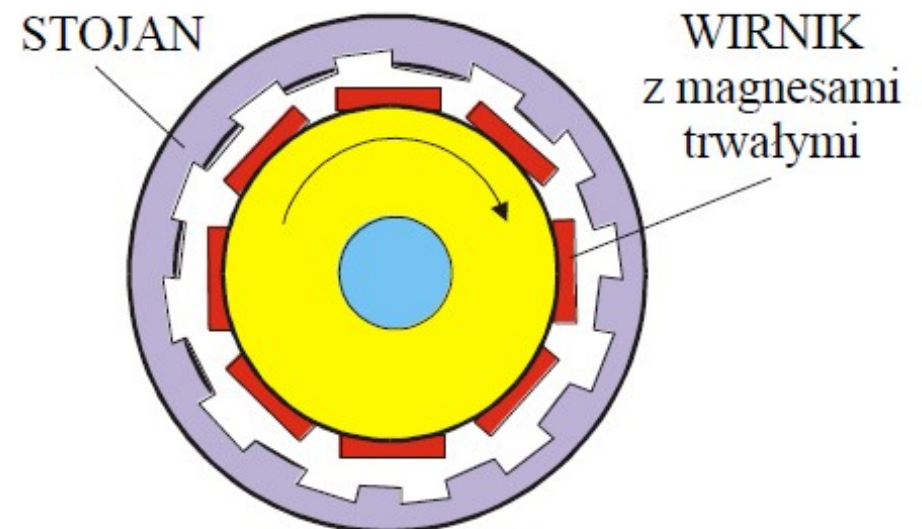
Silniki liniowe – budowa



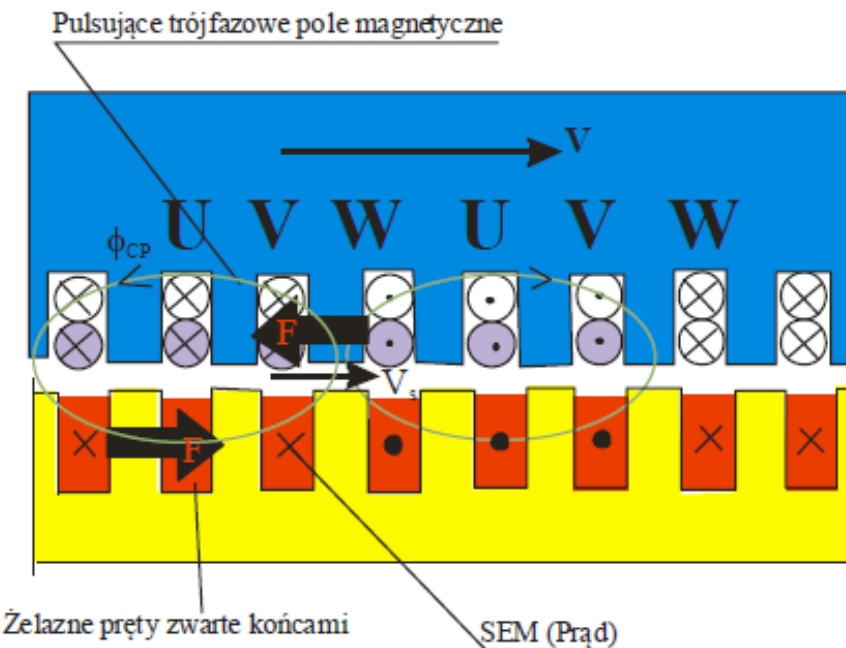
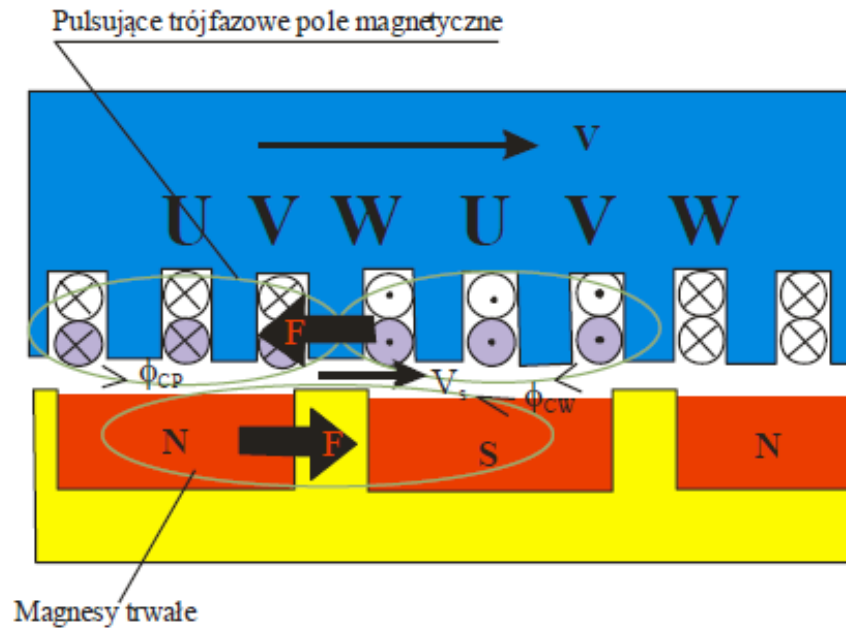
Silnik liniowy



Silnik synchroniczny



Silniki liniowe – działanie



5. W silniku asynchronicznym w wyniku przepływu prądu powstaje siła F , powodująca ruch Części Pierwotnej.

6. Warunkiem ruchu jest wystąpienie poślizgu pomiędzy Częścią Pierwotną i Wtórą, tzn

$$V = V_s(1 - s)$$

7. W silniku synchronicznym wzajemne oddziaływanie obu pól magnetycznych, tj Części pierwotnej ϕ_{CP} i Części Wtórnej ϕ_{CW} jest źródłem ruchu synchronicznego.

$$V_s = V$$

Silniki liniowe – cechy eksploatacyjne

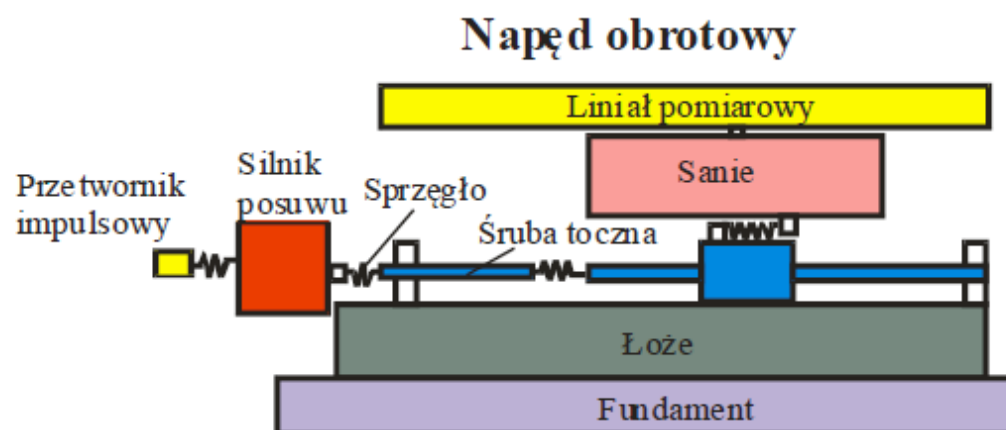
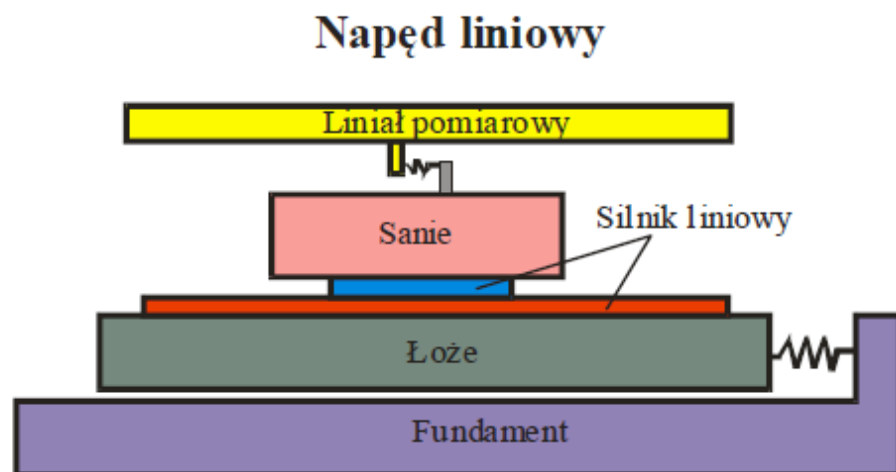
1. W Częściach Pierwotnych silnika synchronicznego i asynchronicznego powstaje bardzo duża ilość ciepła, która musi być odprowadzana metodą chłodzenia wymuszonego (wodnego, powietrznego).
2. W Części Wtórnej silnika asynchronicznego także powstaje bardzo duża ilość ciepła, która powoduje jego nagrzewanie się. Dużym problemem technicznym jest wymuszone odprowadzenie tego ciepła.
3. W silniku synchronicznym powstaje bardzo duża siła elektromagnetyczna, dociskająca Część Pierwotną do Wtórnej (w silniku asynchronicznym siła ta powstaje tylko podczas załączenia zasilania – w silniku synchronicznym występuje bez przerwy). Stwarza to problemy montażowo-demontazowe. Przyczynia się także do bardzo dużych nacisków na prowadnicach.
4. Sterowanie silnika asynchronicznego wymaga zdecydowanie bardziej złożonych algorytmów niż w przypadku silnika synchronicznego.
5. W silniku asynchronicznym wyraźnie gorsza jest równomierność ruchu, co przyczynia się m.in. do pulsacji siły pociągowej.

Silniki liniowe – cechy eksploatacyjne

6. W silniku asynchronicznym występuje większe zapotrzebowanie prądowe (konieczność magnesowania Części Wtórnej).
7. Stosunek siły pociągowej do masy części Pierwotnej jest w przypadku silników synchronicznych o 50 – 100% korzystniejszy niż w silnikach asynchronicznych.
8. Koszt silnika synchronicznego wzrasta w miarę wzrostu drogi przesuwu (wzrasta koszt magnesów trwałych). W silnikach asynchronicznych ten wzrost kosztu jest wyraźnie niższy, co jest głównym atutem tych silników.
9. Na dzień dzisiejszy, na skalę przemysłową są stosowane głównie silniki synchroniczne.
10. Silniki liniowe mogą działać tylko jako napędy nadążne, sterowane numerycznie. W związku z czym, w ich skład, oprócz sterowania numerycznego musi wchodzić bardzo zaawansowany układ pomiaru przemieszczenia i prędkości.

Silniki liniowe – cechy eksploatacyjne

Problem pomiaru przemieszczenia i prędkości w silniku liniowym



Istotnym problemem pomiaru przemieszczenia (prędkości) w silniku liniowym jest wpływ sztywności zamocowania liniału pomiarowego na dokładność pomiaru. Dla prędkości ruchu sięgających 100 m/min oraz dla przyspieszeń ruchu (opóźnień) sięgających 30 (40) m/s², powstają masowe siły bezwładności, które powodują odkształcenia mocowania liniałów pomiarowych, przewyższające elementarną działkę pomiarową (czułość pomiarową).

Silniki liniowe – cechy eksploatacyjne

Problem pomiaru przemieszczenia i prędkości w silniku liniowym

Z uwagi na problemy odkształceń mocowania układów pomiarowych do pomiaru prędkości stosuje się te same czujniki co do pomiaru przemieszczeń (liniały impulsowe zwane enkoderami).

Enkoder jest dyskretnym układem pomiaru przemieszczenia, który generuje impulsy pomiarowe, proporcjonalnie do przebytej drogi. W silnikach synchronicznych elementarny impuls pomiarowy odpowiada nawet 0,1 μm . Oznacza to np. że przebyciu drogi 1 mm towarzyszy wygenerowanie 10.000 impulsów pomiarowych.

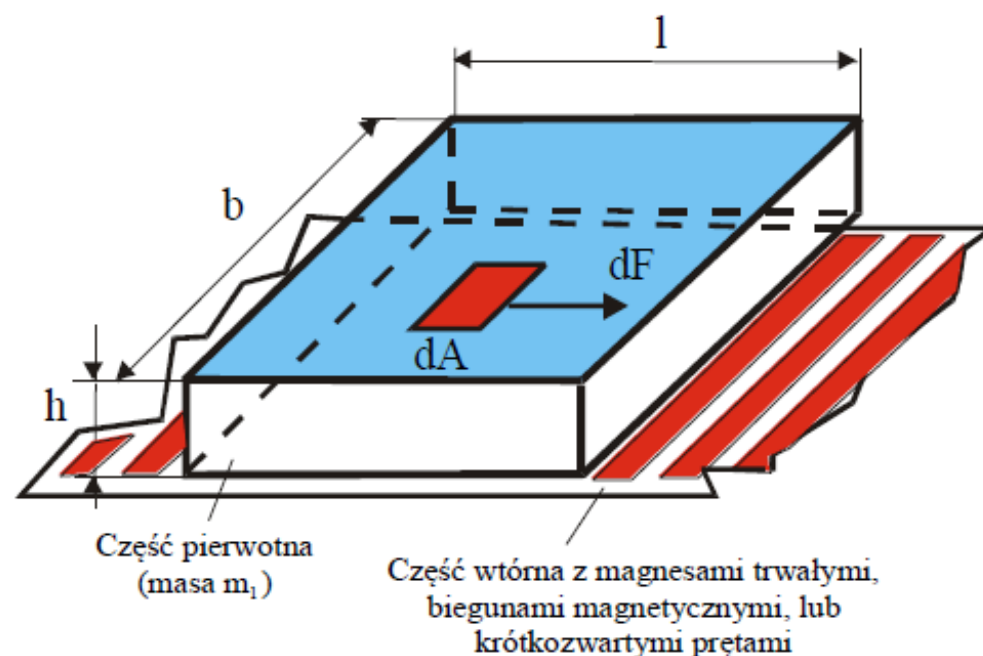
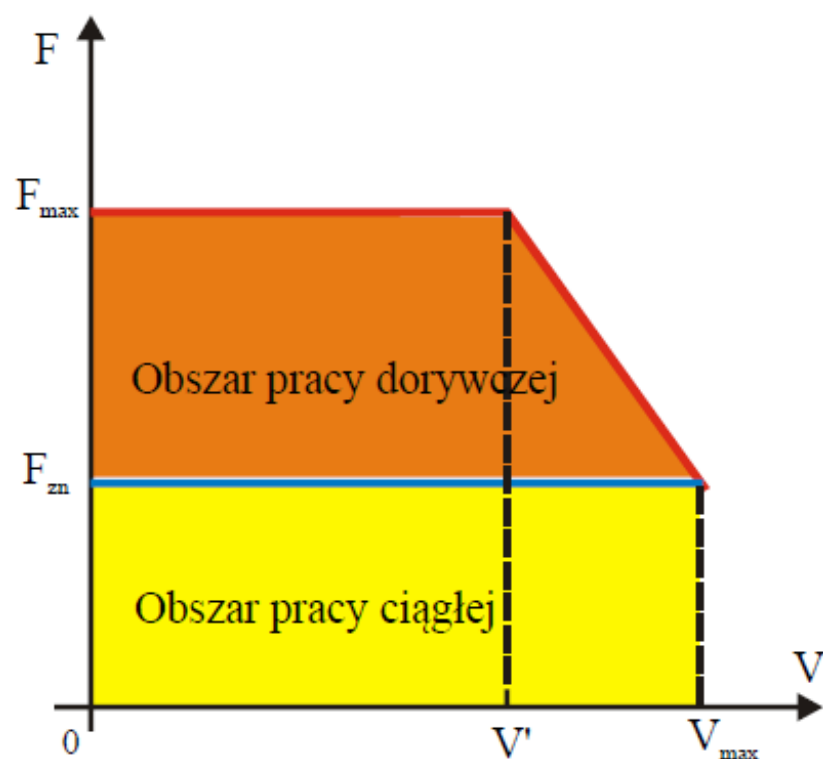
Pomiar prędkości (średniej) odbywa się metodą jej obliczenia, tzn:

$$\bar{V} = \frac{\Delta X}{T_s} \quad \begin{array}{l} \Delta X - \text{zmierzona droga w czasie } T_s \\ T_s - \text{stały okres dla wyznaczania prędkości} \end{array}$$

Przykład: dla $\Delta X = 1 \mu\text{m}$ i dla $T_s = 0,5 \text{ ms}$ można zmierzyć prędkość nie mniejszą niż 120 mm/min. W obrabiarkach CNC zachodzi konieczność pomiaru prędkości od 2 – 5 mm/min do 100.000 mm/min.

Silniki liniowe – charakterystyka mechaniczna

Charakterystyka mechaniczna silnika liniowego to zależność siły pociągowej (posuwu) od prędkości ruchu.



Silniki liniowe – charakterystyka mechaniczna

$$dF = \sigma = \frac{dF}{dA} = A_i B$$

$$\sigma \approx f(S)h$$

$$F = \sigma bl = f(S)hbl$$

$$hbl \approx V$$

$$F = km_1$$

σ – jednostkowa siła [N/m²]

A_i – okład prądowy (wielkość prądu na jednostkę powierzchni)

B – indukcja magnetyczna

S – wielkość powierzchni Części Pierwotnej objętej uzwojeniami prądowymi

h, b, l – wymiary geometryczne Części Pierwotnej

m_1 – masa Części Pierwotnej

k – stała [N/kg]

Z II zasady dynamiki wiadomo że $F = ma$. Oznacza to, że $k = a$. Stąd:

$$k = a = \frac{F}{m_1}$$

$k=25-40 \text{ m/s}^2$ dla chłodzenia powietrznego

$k=50-140 \text{ m/s}^2$ dla chłodzenia wodnego

Silniki liniowe – charakterystyka mechaniczna

Wnioski:

- charakterystyka silnika liniowego jest idealnie sztywna w zakresie pracy ciągłej
- wielkość siły pociągowej zależy od wielkości silnika (masy Części Pierwotnej) i sposobu chłodzenia Części Pierwotnej
- podwyższenie siły pociągowej wymaga zastosowania silnika o wyższej masie Części Pierwotnej albo zastosowania intensywniejszego odprowadzania ciepła z Części Pierwotnej
- silnik liniowy może rozwijać większe wartości sił pociągowych (powyżej wartości znamionowej) ale nie w sposób długotrwały. Wiąże się to jednak z ograniczeniem maksymalnej prędkości ruchu V' .
- Siły pociągowe wytwarzane przez silniki liniowe są w porównaniu z silnikami obrotowymi wyraźnie mniejsze. Ale prędkości ruchu są wyraźnie większe.

Silniki liniowe – charakterystyka mechaniczna

$$F = \frac{2\pi}{iS_p} M$$

S_p – skok śruby pociągowej

i – przełożenie przekładni mechanicznej

M – moment napędowy silnika obrotowego

Przykład: $M=20$ Nm (silnik średniej wielkości)

$S_p=10$ mm (typowa wartość skoku)

$i = 1$

$F = 12560$ N

Katalog silników 1FN1 firmy Siemens

Wielkość silnika		Prędkość v_{\max} dla siły F_{zn} [m/min]	Prędkość v' dla siły F_{\max} [m/min]	Wartość znamionowa siły F_{zn} [N]	Wartość maksymalna siły F_{\max} [N]
Częstość pierwotna	Częstość wtórna				
124	120	145	65	2200	4850
184	180	145	65	3600	7920
186	180	175	90	4800	10600
246	240	175	90	6600	14500
072	070	200	95	790	1720
076	070	200	95	1580	3450
122	120	200	95	1480	3250
126	120	200	95	2950	6500

Silniki liniowe – charakterystyka mechaniczna

- straty mocy w silniku, pomimo wysokiej sprawności, są znaczne i wynoszą od kilkuset W do kilku kW. Ta ilość ciepła musi zostać odprowadzona przez układ chłodzenia.
- zwiększenie intensywności chłodzenia pozwala na podniesienie właściwości eksploatacyjnych silnika.

Fragment katalogu silników liniowych firmy FANUC

Model		1500A	3000B	6000B	9000B
Wartość maksymalna F_{\max} siły ciągu [N]		1500	3000	6000	9000
Wartość znamionowa F_{zn} siły dla obciążenia ciągłego [N]	bez chłodzenia	355	710	1420	2129
	z chłodzeniem powietrznym	426	852	1704	2555
	z chłodzeniem wodnym	710	1420	2839	4259

Silniki liniowe – przeciążalność

Z charakterystyki mechanicznej silnika wynika, że może on zostać przeciążony do wartości F_{\max} . Jest to jednak przeciążalność krótkotrwała, wykorzystywana głównie w stanach przejściowych (rozpędzanie, zwalnianie). Z danych katalogowych firm Siemens czy Fanuc można wnioskować, że przeciążalność ta jest na poziomie ok. 100%.

$$\frac{F_{\max}}{F_{zn}} = 2$$

Silniki liniowe synchroniczne, podobnie jak obrotowe synchroniczne nie mogą zostać przeciążone ponad F_{\max} . Grozi to zatrzymaniem silnika. Dlatego przeciążalność tych silników musi być monitorowana w sposób on-line, przez układ sterowania silnika.

Silniki liniowe – sterowanie prędkością

$$V_s = \frac{60f}{p}$$

Silniki liniowe w zasadzie są stosowane wyłącznie jako silniki sterowane. Możliwość sterowania prędkością wynika z wpływu częstotliwości prądu zasilającego Część Pierwotną silnika f na prędkość V . Oznacza to, że zakres zmian prędkości i maksymalna wartość prędkości jest uwarunkowany sterownikiem falownikowym.

Z danych katalogowych firm Siemens czy Fanuc wynika że dostępne są silniki z maksymalną prędkością przekraczającą 100 m/min, czyli 2-3 - krotnie wyższą niż osiągnęte prędkości za pomocą silników obrotowych.

Silniki liniowe – właściwości dynamiczne

Z danych firmy Siemens czy Fanuc wynika, że silniki liniowe mają współczynniki k nawet do 250 m/s^2 (tylko krótkotrwale). Oznacza to, że silnik taki może osiągać przyspieszenia znacznie przekraczające $10g$. Żaden napęd obrotowy nie jest w stanie osiągnąć takich przyspieszeń. Należy jednak wziąć pod uwagę wpływ obciążenia aktywnego i bezwładnościowego napędzanego urządzenia na przyspieszenie:

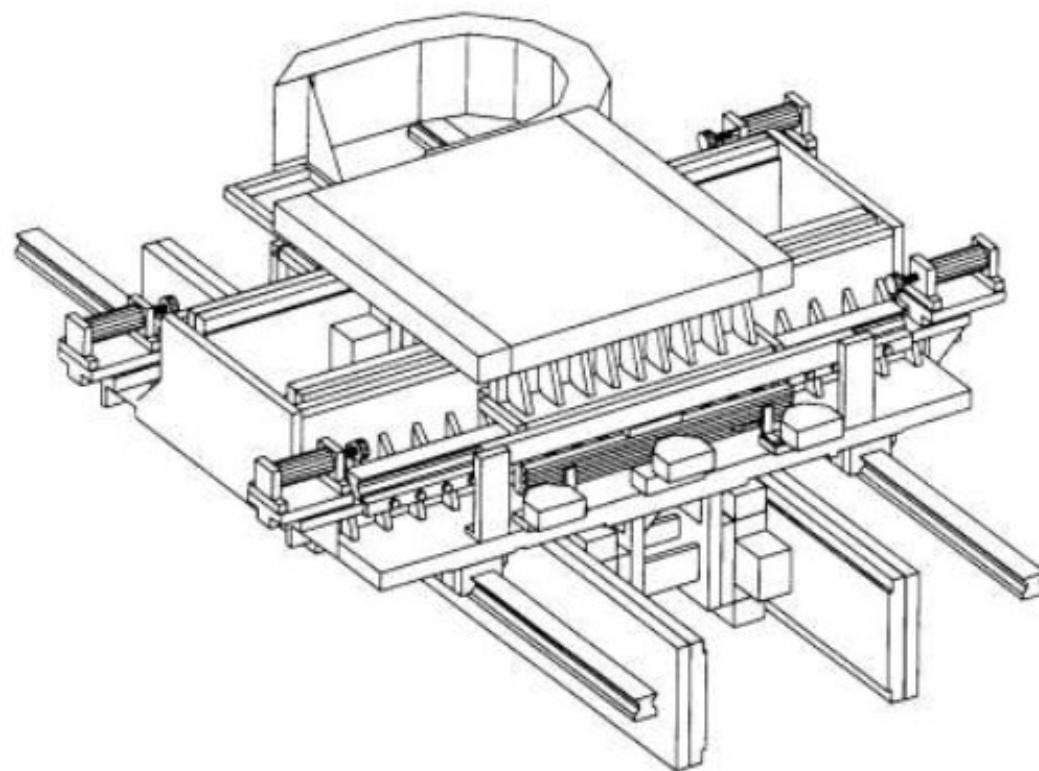
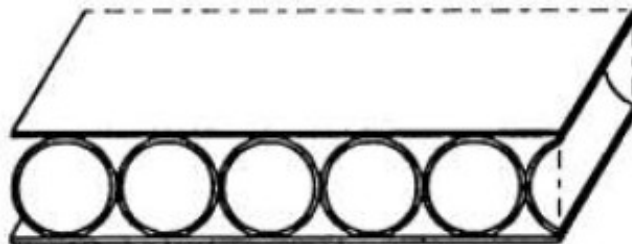
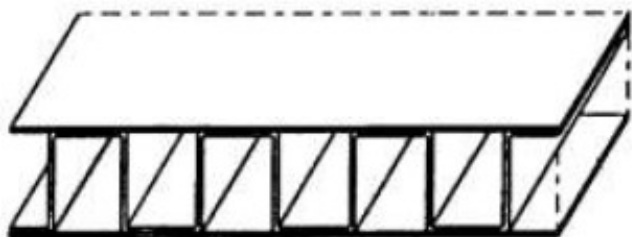
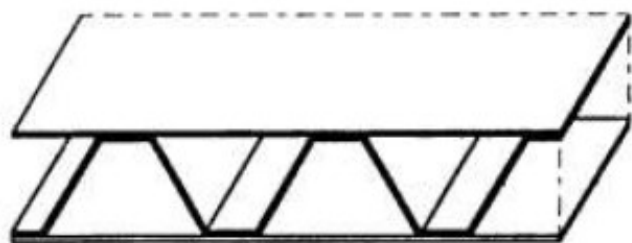
$$a = \frac{F - F_{ob}}{m_1 + m_{ob}}$$

Z powyższej zależności wynika, że jeżeli napędzane urządzenie ma masę m na poziomie masy m_1 Części Pierwotnej, to rzeczywiste przyspieszenie spada o 50% w stosunku do przyspieszenia rozwijanego przez samo silnik. Jeżeli ponadto opory ruchu napędzanego urządzenia F_{ob} są na poziomie siły pociągowej F_{max} to nastąpi obniżenie przyspieszenia o dalsze 50%.

Silniki liniowe przeznaczone są przede wszystkim do napędu urządzeń lekkich i mało obciążonych.

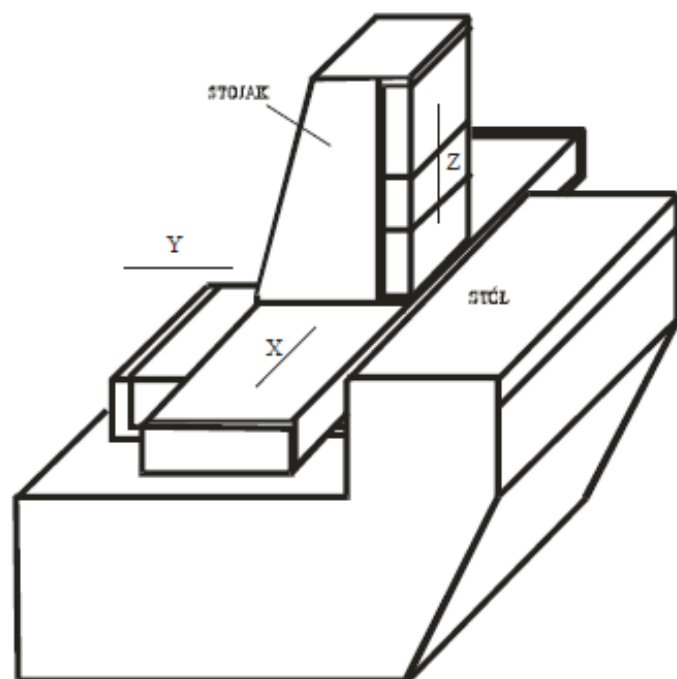
Silniki liniowe – zastosowania

Konstrukcje lekkie

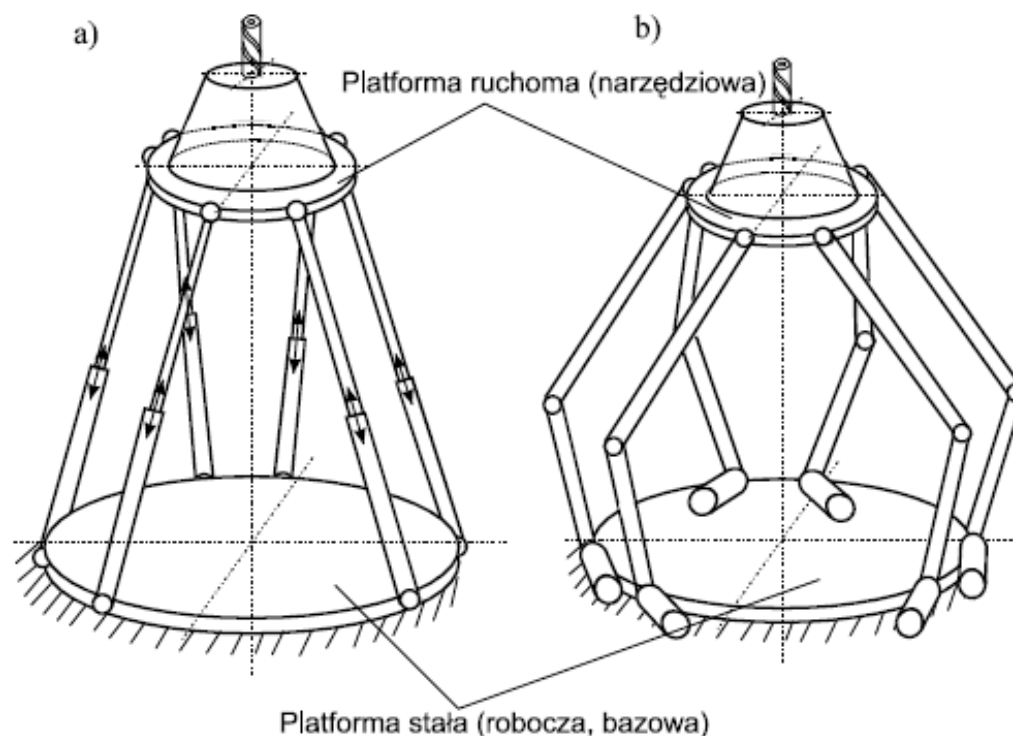


Silniki liniowe – zastosowania

Struktury równoległe (hexapod, tripod)



Struktura szeregowa



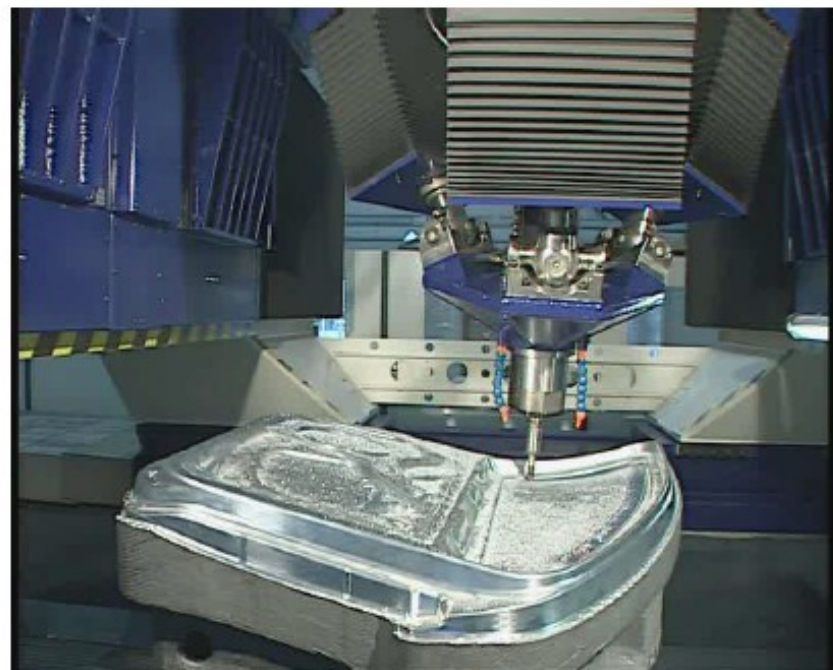
Struktury równoległe (hexapod)

Zalety struktur równoległych:

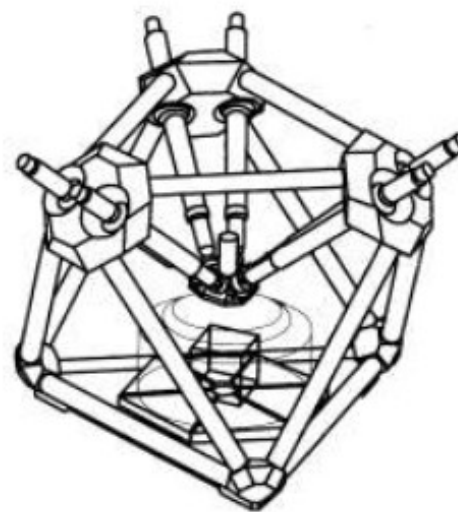
- kilka silników do realizacji ruchu w jednej osi (większa siła pociągowa)
- znacznie większa sztywność takiej maszyny

Silniki liniowe – zastosowania

Struktury równoległe (hexapod, tripod)



Tripod



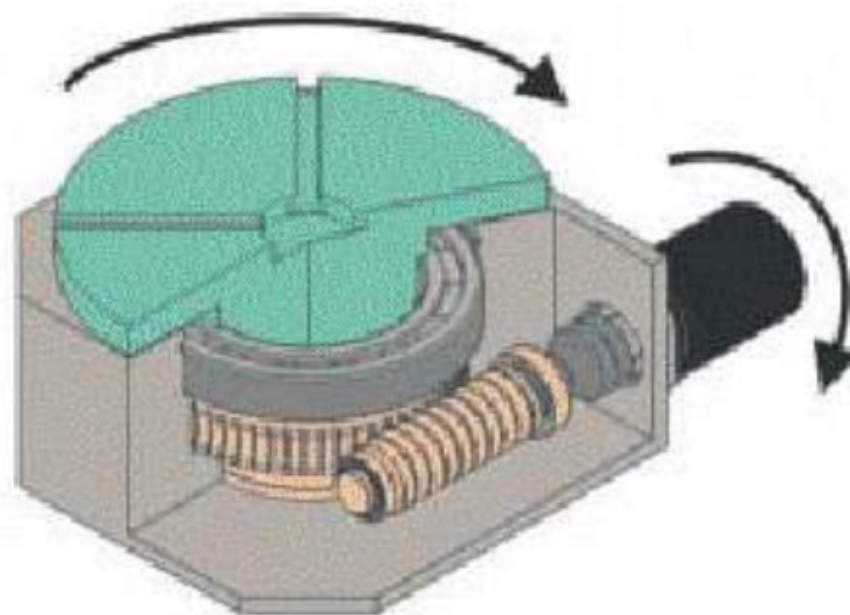
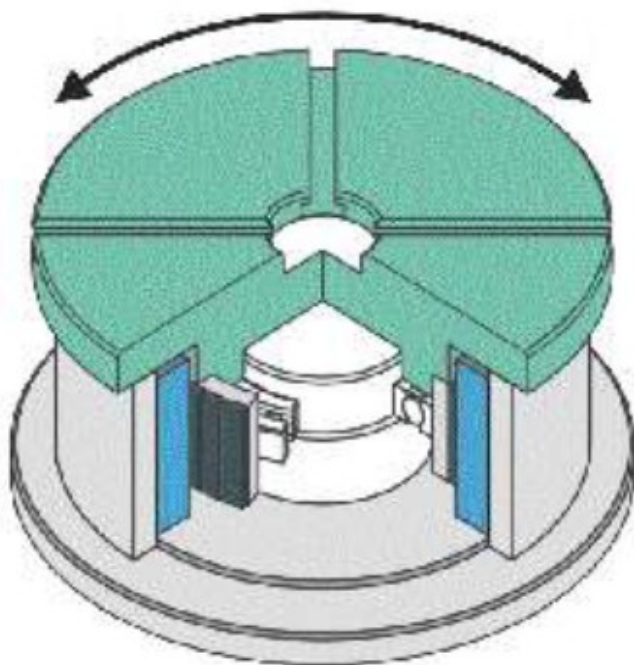
Hexapod

Silniki liniowe – podsumowanie

- Silniki liniowe należą do najnowszych osiągnięć w dziedzinie napędów.
- Pozwalają osiągać prędkości ruchów liniowych, nieosiągalnych dla napędów z silnikiem obrotowym.
- Ich właściwości dynamiczne przewyższają właściwości dynamiczne napędów z silnikami obrotowymi 2 – 3 krotnie.
- Znakomite właściwości eksploatacyjne silników liniowych można wykorzystywać tylko w przypadku maszyn i urządzeń lekkich, tzn. których masy napędzanych zespołów są wyraźnie mniejsze od masy Części Pierwotnej.
- Znakomite właściwości eksploatacyjne silników liniowych można wykorzystywać tylko w przypadku maszyn i urządzeń lekko obciążonych, tj. w których opory ruchu są wyraźnie mniejsze od siły pociągowej F_{zn} .
- Silniki liniowe wymagają zaawansowanych metod sterowania, dużych mocy obliczeniowych układu sterującego oraz zaawansowanych układów pomiarowych przemieszczenia. To wszystko sprawia, że są to napędy kosztowne, wyraźnie droższe od napędów z silnikami obrotowymi.

Silniki momentowe – wiadomości ogólne

Silniki momentowe to silniki synchroniczne prądu przemiennego o bardzo dużym momencie napędowym, przeznaczone do precyzyjnego pozycjonowania kątownego elementów obrotowych. Z założenia, silniki te mają działać jako napędy bezpośrednie, tzn. bez żadnych elementów pośrednich (koła zębate, wałki, paski, łańcuchy itp.) pomiędzy napędzanym zespołem a silnikiem, np. bezpośredni napęd stołu obrotowego w miejsce dotychczasowego napędu za pośrednictwem przekładni ślimakowej.



Silniki momentowe – właściwości eksploatacyjne

- jako napędy bezpośrednie, tzn bezluzowe, bezhisterezowe (histereza mechaniczna), o zminimalizowanym tarciu mechanicznym, czyli jako napędy o wysokiej precyzji (dokładności) pozycjonowania oraz wysokiej trwałości (tam nie ma elementów zużywających się),
- są to napędy nadążne, tzn pracujące w układzie automatycznej regulacji położenia kąтового (serwonapędy), czyli zawierające czujnik pomiarowy kąta obrotu i regulatory cyfrowe,
- napędy o bardzo dużym momencie obrotowym (o rząd większym niż klasyczne silniki obrotowe, serwonapędowe,
- napędy o bardzo dużej sztywności charakterystyki mechanicznej (sztywność kątowa) (wskaźnik sztywności jest taki, że przy zmianie obciążenia od 0 Nm do M_{zn} kąt obrotu wirnika jest rzędu sek kątowej,
- napędy o bardzo dużej sztywności dynamicznej (w zakresie do ok. 100 Hz charakterystyka dynamiczna jest liniowa, tzn dynamiczne zmiany momentu obciążenia nie wywołują zmian kąta obrotu wirnika większych niż wynika to z obciążenia statycznego),

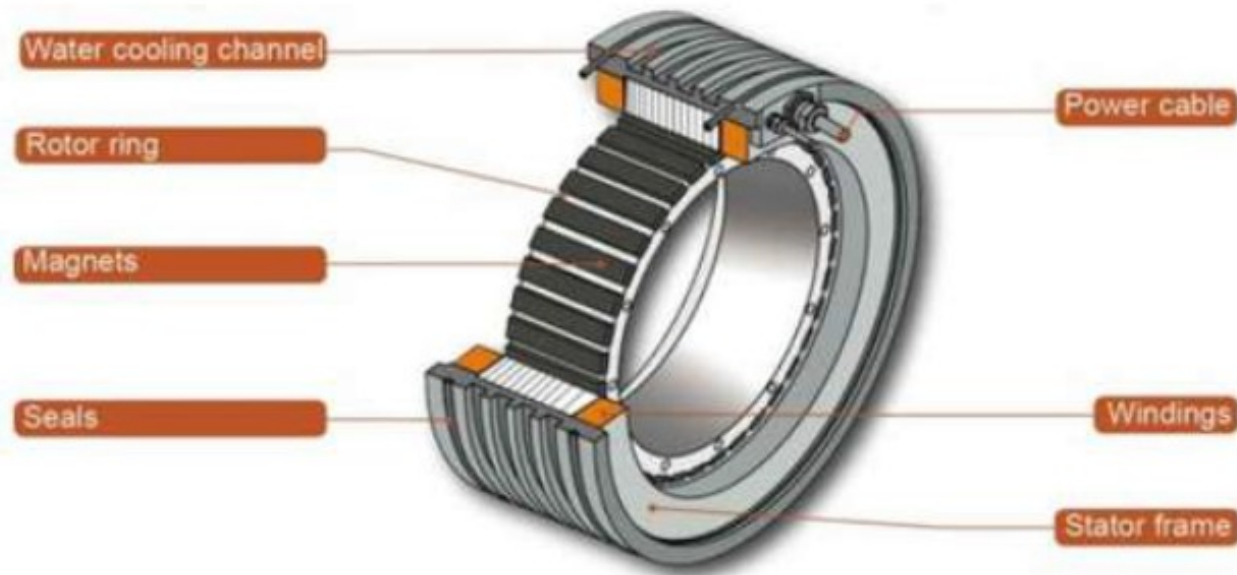
Silniki momentowe – właściwości eksploatacyjne

- dokładność pozycjonowania kąтового zależy wyłącznie od dokładności czujnika kąta obrotu i nastaw regulatorów (np. jeżeli enkoder umożliwia pomiar z rozdzielczością 1'' to taka też będzie dokładność pozycjonowania, a jeżeli tylko 10'' to i dokładność pozycjonowania będzie na tym poziomie),
- napędy o znakomitych właściwościach dynamicznych, wynikających z bardzo dużego momentu szczytowego M_k i stosunkowo małego masowego momentu bezwładności wirnika,
- napędy mogą rozwijać pełny moment napędowy zarówno w pełnym zakresie prędkości jak i dla silnika unieruchomionego ($n=0$) i to w sposób długotwały,
- napędy o znakomitych cechach energetycznych (współczynnik $k_m = M/i$ [Nm/A] jest kilkakrotnie większy niż w klasycznych silnikach obrotowych). Dla porównywalnych wartości prądu moment rozwijany przez silnik jest kilkakrotnie większy,
- napędy o bardzo dużej sprawności (mniejsze straty wynikają z mniejszego prądu potrzebnego do wytworzenia dużego momentu),

Silniki momentowe – właściwości eksploatacyjne

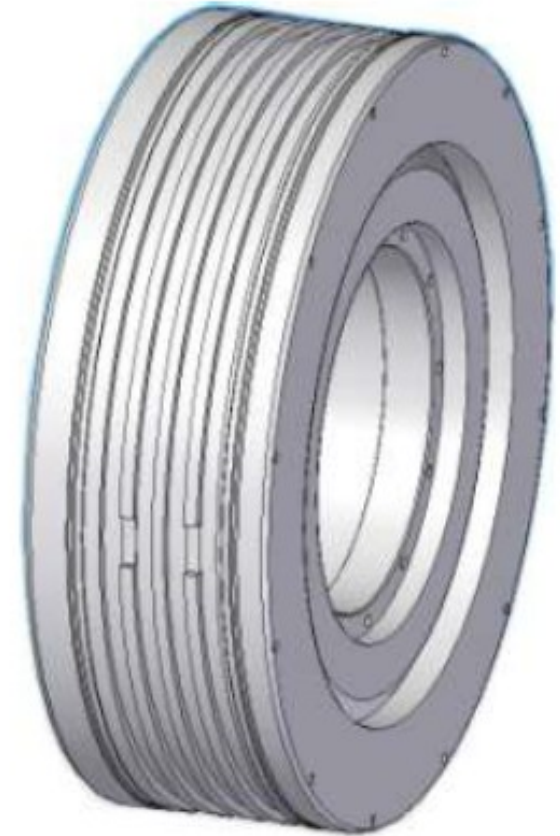
- bardzo wysoka równomierność ruchu, nawet przy najmniejszych prędkościach,
- prawie całkowicie wyeliminowane wahania dynamiczne momentu napędowego (wynikają one z falownikowego zasilania napędu),
- z założenia są to napędy wolnoobrotowe, przeznaczone do pozycjonowania (np. oś „C” lub „B” w obrabiarkach CNC),
- gabaryty silników są niewielkie (w porównaniu do klasycznych silników) co umożliwia ich łatwe wkomponowywanie do napędzanego urządzenia a producenci tych silników nierzadko oferują możliwość dopasowania zewnętrznych wymiarów gabarytowych do potrzeb konstrukcyjnych urządzenia,
- wymagają układu chłodzenia wymuszonego w stojanie silnika (przy nieruchomym silniku nie występuje naturalne chłodzenie wynikające z ruchu obrotowego),
- bardzo duże siły wzajemnego oddziaływania wirnika i stojana (nawet kilka tysięcy N), co bardzo utrudnia montaż i demontaż silnika.

Silniki momentowe – budowa



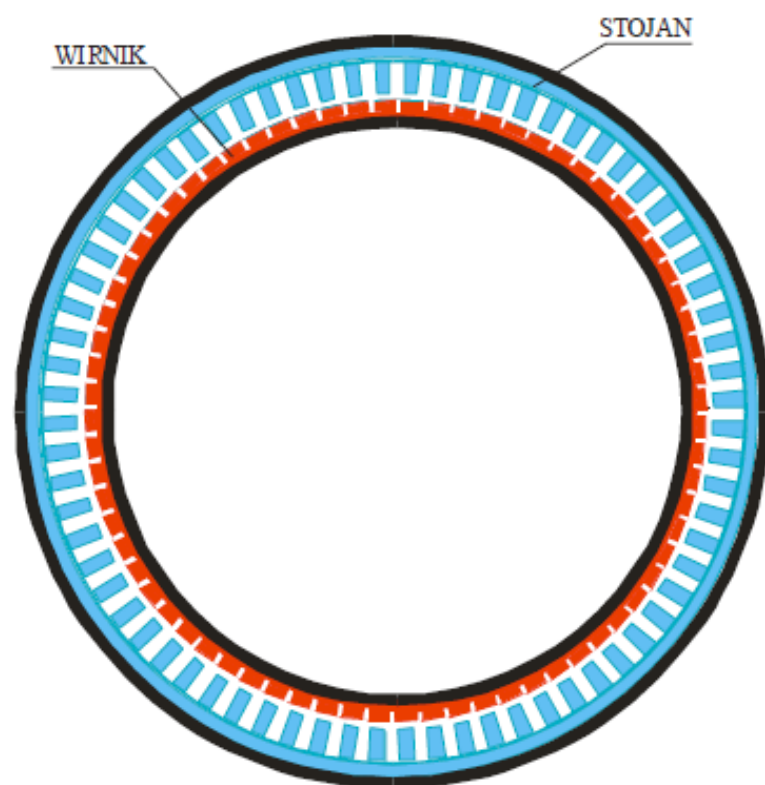
Są to silniki synchroniczne 3-fazowe, wielobiegunowe, z magnesami trwałymi na wirniku.

Silniki momentowe – budowa



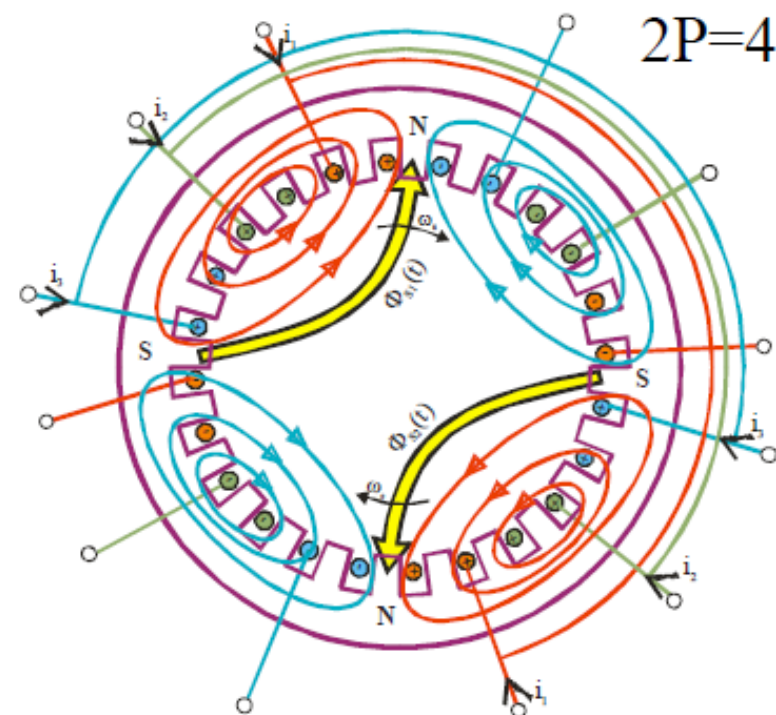
Silniki mogą być dostarczane w postaci oddzielnego stojana i wirnika, które producent maszyny montuje samodzielnie, wg swojego uznania lub w postaci zmontowanej ze stalową zewnętrzną i wewnętrzną piastą do bezpośredniej zabudowy w maszynie.

Silniki momentowe – budowa



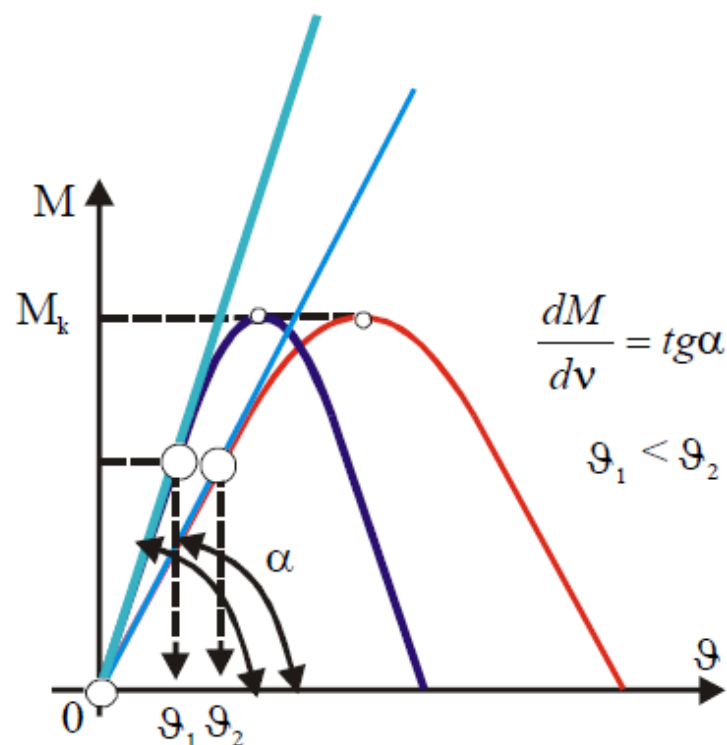
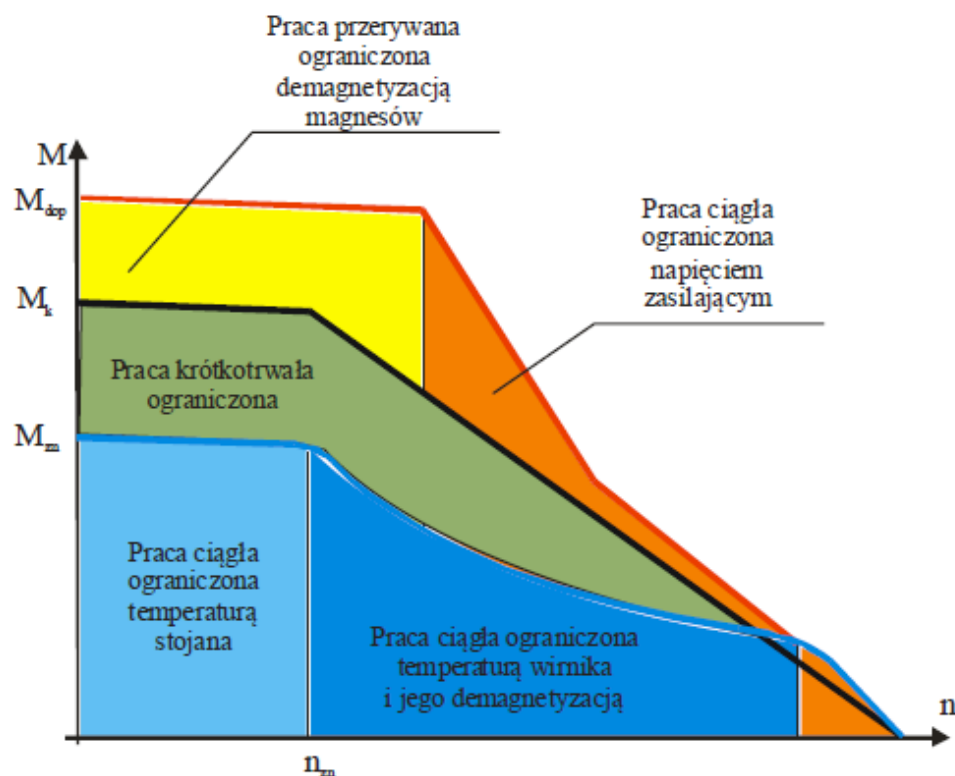
$$2P=66$$

$$n_s = \frac{60f}{p}$$



Wirnik w postaci magnesów trwałych, których liczba sięga kilkudziesięciu, np. silniki f-my ETEL mają 66, 88 lub 144 bieguny. Stojan zawiera uzwojenie trójfazowe zasilane prądem przemiennym, ukształtowane w postaci takiej samej liczby biegunów jak w wirniku.

Silniki momentowe – charakterystyka mechaniczna



M_{zn} – moment znamionowy dla pracy ciągłej w zakresie prędkości $0 - n_{zn}$
 M_k – moment szczytowy dla pracy krótkotrwałej (stany przejściowe), decydujący o właściwościach dynamicznych (także dla $n=0$),
 M_{dop} – moment dopuszczalny ($M_{dop} > M_k$) którego przekroczenie grozi demagnetyzacją magnesów trwałych (tylko jako zabezpieczenie przed nieprzewidzianymi przeciążeniami)

KONIEC