

## INFO

- bolos: ±30 pytań z prezentacji, szybkie pytanie - szybka odpowiedź /rysunek
- dr inż. Paweł Ewert → tylko wykłady, które były
- 2 terminy zaliczenia: ostatni wykład + sesja

## LITERATURA

- Z. Grunwald - "Napęd Elektryczny"
- T. Gwózdzik - "Napęd Elektryczny"
- [www.kemnipe.pwr.edu.pl](http://www.kemnipe.pwr.edu.pl) [dostępne w KRK]

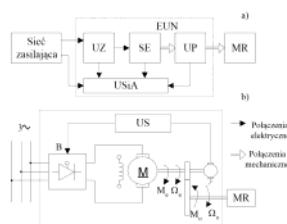
## PODSTAWOWE POJĘCIA

- NAPEŁ ELEKTRYCZNY - zespół połączonych ze sobą i oddziaływujących wzajemnie na siebie elementów przetwarzających energię elektromechaniczną w procesie technologicznym
  - główne elementy: silnik elektryczny, układ zasilający, urządzenie pędne (pot. mechaniczne)
- SILNIK ELEKTRYCZNY - przekształca doprowadzoną energię elektryczną w mechaniczną (lub obrótową - w niektórych odniesiach hamowania elektrycznego)
- UKŁAD ZASILAJĄCY - przekształca energię elektryczną cieci i dostarcza ją do silnika, sterując jej pracę... (stajby)
- URZĄDZENIE PĘDNE
- MASZYNA ROBOCZA - odbiornik mechanizmu



## 1.2 Struktura elektrycznego układu napędowego

*Napęd elektryczny* jest to zespół połączonych ze sobą i oddziaływujących wzajemnie na siebie elementów przetwarzających energię elektromechaniczną w procesie technologicznym.



Główne elementy elektrycznego układu napędowego EUN, to (rys.1.1):

- silniki elektryczne SE,
- układ zasilający UZ,
- urządzenie pędne (połączenie mechaniczne) UP.

W wielu przypadkach napędy elektryczne muszą być sterowane automatycznie, wobec czego muszą zawierać również urządzenia sterowania i automatyki oraz przetworniki pomiarowe (rys.1.1.a - linia przerywana).

*Układ zasilający* przekształca energię elektryczną sieci i dostarcza ją do silnika, sterując jego pracę tak, by spełniał wymagania narzucone przez maszynę roboczą. Rolę takiego układu może na przykład spełniać prostownik sterowany sygnałami bramkowymi B elementów półprzewodnikowych (rys.1.1.b).

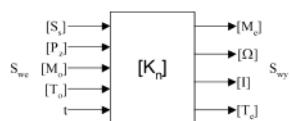
*Silnik elektryczny* przekształca doprowadzoną energię elektryczną w mechaniczną (lub odwrotnie - w niektórych rodzajach hamowania elektrycznego). W wyniku działania momentu siły  $M_e$  wytworzonego w silniku SE następuje ruch obrotowy wirnika silnika oraz wału maszyny roboczej MR z prędkością kątową  $\Omega$  lub  $\Omega_a$  - w przypadku istnienia przekładni mechanicznej.

*Urządzenie pędne* (np. przekładnie redukcyjne - rys.1.1.b - zębate lub pasowe, sprząga) stanowi połączenie mechaniczne pomiędzy silnikiem a maszyną roboczą, zapewniając jednocześnie przepływ mocy mechanicznej i, jeżeli jest to niezbędne, zmianę jej parametrów (prędkości kątowej, momentu itp.).

**Maszyna robocza**, będąc na ogół odbiornikiem energii mechanicznej (lub jej źródłem - w przypadku tzw. czynnego momentu oporowego), realizuje określone zadania w procesie technologicznym i obciąża silnik momentem oporowym  $M_o$ .

### 1.3 Charakterystyki maszyn elektrycznych

Układ napędowy z rys.1.1 można przedstawić w postaci blokowej [ ], wyróżniając w nim sygnały wejściowe i wyjściowe (rys.1.2)



Rys.1.2 Sygnały wejściowe i wyjściowe układu napędowego

Wśród sygnałów wejściowych można wyróżnić:

- sygnały sterujące [ $S_s$ ],
- parametry energetyczne linii zasilającej [ $P_z$ ],
- momenty zewnętrzne oporowe [ $M_o$ ],
- temperaturę otoczenia [ $T_o$ ]
- czas [ $t$ ].

Sygnały wejściowe mogą być funkcją czasu lub też być od czasu niezależne.

Sygnalami wyjściowymi układu napędowego są najczęściej:

- momenty sil [ $M_n$ ],
- prędkości kątowe [ $\Omega$ ],
- prądy [ $I$ ],
- temperatura elementów układu [ $T_e$ ].

Sygnały wyjściowe są funkcjami sygnałów wejściowych oraz parametrów konstrukcyjnych (współczynników) układu napędowego [ $K_n$ ]. Współczynniki te mogą być stałe, jak również mogą być funkcjonalami czasu lub współrzędnych stanu.

$$S_{wy} = f(S_{we}, K_n) \quad (1.1)$$

Jedną z najczęściej wyznaczanych zależności w napędzie elektrycznym jest zależność prędkości kątowej silnika od momentu obciążenia, przy stałych sygnalach sterujących, stałych parametrach linii zasilającej i stałej temperaturze:

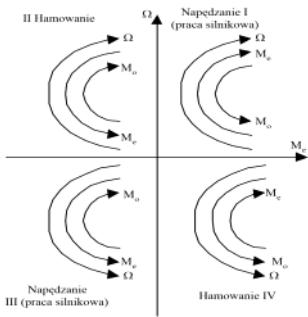
$$\Omega = f(M_e) \text{ przy } S_S=\text{const}, P_Z=\text{const}, T_0=\text{const} \quad (1.2)$$

Zależność (1.2) jest nazywana **charakterystyką mechaniczną silnika**.

W stanie ustalonym moment napędowy silnika  $M_e$  równa się momentowi zewnętrznemu (oporowemu)  $M_o$ , wobec czego równanie charakterystyki mechanicznej przyjmuje postać:

$$\Omega = f(M_e) \quad (1.3)$$

Charakterystyki mechaniczne maszyn elektrycznych są zazwyczaj nieliniowe i wykazują znaczącą zależność wytwarzanego momentu od prędkości kątowej. Są zazwyczaj podawane w formie graficznej w układzie współrzędnych prostokątnych  $\{\Omega, M_e\}$ . Osi układu, przecinając się, tworzą cztery obszary (ćwiartki), z których każdy odpowiada ścisłe określonymu stanowi pracy maszyny elektrycznej (rys. I.3).



Rys. I.3 Obszary pracy napędu we współrzędnych prostokątnych  $\{\Omega, M_e\}$ .

*Ćwiartka I odpowiada pracy silnikowej:*

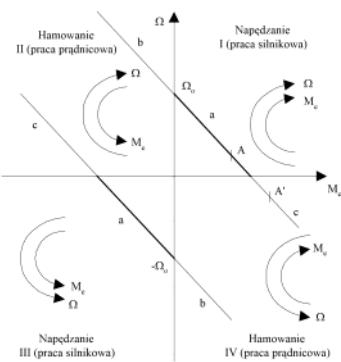
kierunek prędkości kątowej jest zgodny ze zwrotem momentu rozwijanego przez maszynę  $M_e$ , a moment zewnętrzny  $M_o$  jest skierowany przeciwnie.

*Ćwiartka II odpowiada pracy prądnicowej maszyny (hamowanie prądnicowe):* moment zewnętrzny  $M_o$  ma zwrot zgodny z kierunkiem prędkości  $\Omega$  - wówczas stan równowagi występuje tylko wówczas, gdy zwrot momentu maszyny  $M_e$  jest przeciwny do kierunku prędkości.

Praca w *ćwiartce III* odbywa się przy zgodności zwrotu momentu silnika  $M_e$  z prędkością  $\Omega$ , lecz ich zwroty są przeciwe niż w *ćwiartce I*.

W *ćwiartce IV* zwrot prędkości jest ten sam jak w *ćwiartce III*, lecz moment wytwarzany w maszynie, uznany za dodatni, ma zwrot przeciwny - zatem praca w tej *ćwiartce* odpowiada hamowaniu maszyny roboczej przez maszynę elektryczną (*hamowanie prądnicowe*).

Na rys.1.4 zilustrowano te obszary pracy przebiegami charakterystyk mechanicznych.



Rys.1.4 Przykłady charakterystyk mechanicznych w obszarach pracy silnikowej i hamulcowej: a - praca silnikowa w *ćwiartce I* i *III*,  
b - praca prądnicowa (hamowanie prądnicowe) w *ćwiartce II* i *IV*,  
c - hamowanie przeciw włączeniem w *ćwiartce II* i *IV*.

Jeżeli początkowy punkt pracy napędu A mieścił się w *ćwiartce I*, a moment zewnętrzny wymusił zmianę kierunku wirowania tak, że punkt pracy przesunął się do *ćwiartki IV* to nastąpiło hamowanie momentem silnika.

Odcinki „a” charakterystyk mechanicznych odpowiadają pracy silnikowej maszyny elektrycznej, przy czym w *ćwiartce III* praca odbywa się w przeciwnym kierunku wirowania. Silnik pobiera energię elektryczną i oddaje na wale energię mechaniczną.

Odcinki „b” charakterystyk odpowiadają pracy maszyny w charakterze prądnicy - maszyna pobiera na wale energię mechaniczną i oddaje do sieci energię elektryczną. Ze względu na

przeciwne kierunki momentu maszyny i jej prędkości ta praca prądnicowa jest jednocześnie pracą hamulcową (hamowanie odzyskowe).

Odcinki „c” charakterystyk odpowiadają pracy hamulcowej, maszyna pobiera z sieci energię elektryczną, a na wale energię mechaniczną, które zamieniają się w niej na energię cieplną. Odpowiada to tzw. hamowaniu przeciwwiązaniem (hamowanie momentem silnika).

Charakterystyki mechaniczne silników są graficzna ilustracją zmienności prędkości maszyny w funkcji obciążenia (mechanicznego wymuszenia zewnętrznego).

Kształt charakterystyki mechanicznej wyznacza się definiując pojęcie *szywności*, jako pochodnej wymuszenia (sily zewnętrznej)  $Q$ , względem prędkości  $\dot{X}$ :

$$\varepsilon = \frac{dQ}{d\dot{X}} . \quad (1.4)$$

Dla maszyn wirujących:

$$\varepsilon = \frac{dM_e}{d\Omega} . \quad (1.5)$$

a dla maszyn liniowych, dla których charakterystyka mechaniczna jest opisana zależnością prędkości liniowej  $\vartheta$  od siły obciążenia  $F$ , szywność definiuje się jako:

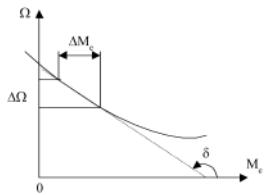
$$\varepsilon = \frac{dF}{d\vartheta} . \quad (1.6)$$

W praktycznych obliczeniach zamiast różniczek można stosować przyrosty skończone (rys.1.5):

$$\varepsilon \approx \frac{\Delta M_e}{\Delta \Omega} = ctg \delta . \quad (1.7)$$

Zgodnie z równaniem (1.7) *szywność charakterystyki mechanicznej jest stosunkiem przyrostu momentu  $\Delta M_e$  wywołującego przyrost prędkości  $\Delta \Omega$  do przyrostu tej prędkości.*

Jeżeli w skutek wzrostu momentu obciążenia zmniejsza się prędkość (ujemne  $\Delta \Omega$ ), to szywność charakterystyki jest mniejsza od zera.



Rys. 1.5 Ilustracja metody wyznaczania sztywności charakterystyki mechanicznej.

*Wartość ujemna sztywności jest warunkiem koniecznym stabilnej pracy silnika.*

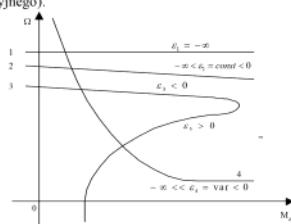
Ze względu na sztywność rozróżnia się cztery rodzaje charakterystyk mechanicznych maszyn elektrycznych (rys.1.6):

1 - charakterystyka *idealnie sztywna* (prosta 1) dla  $\varepsilon_1 = -\infty$ ; prędkość nie zależy od momentu obciążenia (np. silnik synchroniczny lub asynchroniczny synchronizowany),

2 - charakterystyka *sztywna* (prosta 2) dla  $-\infty < \varepsilon_2 = \text{const} < 0$  (lub krzywa 3 dla  $\varepsilon_3 < 0$ ), (np. silnik bocznikowy lub część robocza charakterystyki silnika indukcyjnego),

3 - charakterystyka *ustępowa* (czyli niesztywna - krzywa 4), dla której  $-\infty < \varepsilon_4 = \text{var} < 0$  (np. silnik szeregowy prądu stałego lub przemiennego, silnik repulsyjny),

4 - charakterystyka *niestabilna* (krzywa 3) dla  $\varepsilon_5 > 0$  (część niestabilna charakterystyki silnika indukcyjnego).



Rys.1.6 Charakterystyki mechaniczne maszyn elektrycznych podczas pracy silnikowej: 1-idealnie sztywna, 2- sztywna, 3- z zakresem sztywnym i niestabilnym, 4- niesztywna (ustępowa).

Charakterystyki mechaniczne maszyn elektrycznych są zwykle podawane dla wartości średnich, nie uwzględniają zatem pulsacji momentu napędowego, które mogą występować w funkcji czasu, prędkości czy położenia.

Rys.1.7 Charakterystyka mechaniczna silnika indukcyjnego:  
a - dynamiczna z uwzględnieniem pulsacji  $M_e$ , b- statyczna (dla wartości średnich).

Charakterystyka mechaniczna, wyznaczona w normalnym układzie połączeń silnika, przy zasilaniu napięciem znamionowym oraz braku dodatkowych elementów w jego obwodach elektrycznych, nosi nazwę *charakterystyki naturalnej*.

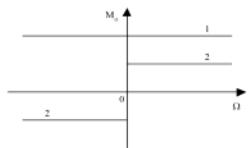
Na tej charakterystyce znajduje się punkt pracy znamionowej, określony wielkościami znamionowymi podanymi na tabliczce znamionowej silnika.

Jeśli którykolwiek z podanych wyżej warunków nie jest spełniony, to tak wyznaczona charakterystyka nosi nazwę *charakterystyki sztucznej*.

#### 1.4 Charakterystyki maszyn roboczych

**Charakterystyka maszyny roboczej** jest to zależność siły oporu (momentu oporowego) od odległości lub prędkości. Siła oporu maszyny roboczej może też być funkcją czasu. Momenty oporowe  $M_o$  (momenty sił oporów) maszyn roboczych pochodzą zarówno od sił tarcia (niepożądanych) jak i użytecznych sił wynikających z procesu technologicznego.

Momenty oporowe dzielimy na **czynne i bierne** (rys.1.8).



Rys.1.8 Charakterystyki momentów oporowych: 1- czynnego, 2- biernego.

**Momenty oporowe czynne**  $M_{ocz}$  występują przy zmianie energii potencjalnej mechanizmu napędzanego. Powstają podczas przemieszczania się masy w polu grawitacyjnym (urządzenia do transportu pionowego: wyciągi, windy, dźwigi itp.), przemieszczania się elementów ferromagnetycznych lub przewodników z prądem w polu magnetycznym, występują w wyniku zmiany wymiarów elementów sprężystych.

Cechą charakterystyczną maszyn roboczych o oporach czynnych jest готовość do zwrotu pobranej energii potencjalnej. Momenty oporowe czynne zachowują zawsze ten sam zwrot, niezależnie od kierunku ruchu (rys.1.8 - prosta 1).

Jeżeli zwrot  $\mathbf{M}_{ocz}$  jest zgodny z kierunkiem ruchu (np. opuszczanie ciężaru), mamy wtedy do czynienia z momentem napędzającym, a silnik może pracować jako prądnica i oddawać energię elektryczną do źródła.

**Momenty oporowe bierne**  $M_{ob}$  występują przy zmianie energii kinetycznej mechanizmu napędzanego i związane z są z silami bezwładności (inercyjnymi). Zwrot  $\mathbf{M}_{ob}$  zależy od zwrotu zmiany prędkości (przyspieszenia).

W większości przypadków  $\mathbf{M}_{ob}$  są skierowane przeciwnie do kierunku ruchu układu oraz zmieniają swój znak wraz ze zmianą kierunku wirowania. Mają zawsze charakter momentu hamującego. W przypadku momentu oporowego biernego energia doprowadzana do maszyny roboczej zamienia się na pracę użyteczną oraz pokonuje siły tarcia w mechanizmie.

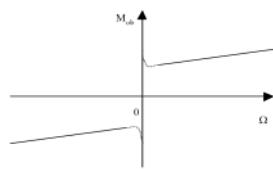
W zależności od rodzaju maszyny roboczej moment oporowy może być funkcją prędkości, przyspieszenia, kąta obrotu i czasu.

Przykładem momentu biernego jest moment tarcia w maszynach roboczych wirujących (rys.1.9), opisany równaniem (1.8):

$$M_{ob} = M_{ob1} + M_{ob2} = k_1 * \Omega + k_2 * sign\Omega , \quad (1.8)$$

gdzie:  $k_2$  jest współczynnikiem tarcia suchego.

Współczynnik ten w układach rzeczywistych jest funkcją wielu zmiennych (np. rodzaju materiałów trących, stopnia ich gładkości, smarowania itp.), ponadto wpływ na moment oporowy bierny ma tarcie spoczynkowe (linia przerywana na rys.1.9)



Rys.1.9 Moment oporowych bierny tarcia.

Dla mechanizmów zawierających elementy poruszające się ruchem obrotowym i postępowym, napędzanych silnikiem wirującym, moment oporowy opisuje się równaniem:

$$M_{\text{ot}} = M_{\text{av}} + (M_{\text{av}} - M_{\text{a}}) \left( \frac{\Omega}{\Omega_N} \right)^p + (M_{\text{av}} - M_{\text{a}}) \left( \frac{\vartheta_p}{\vartheta_{pv}} \right)^q, \quad (1.9)$$

gdzie:  $M_{\text{ot}}$  - moment wywołany tarciem w elementach ruchomych przy  $\Omega \neq 0$ ,

$M_{\text{av}}$  - moment znamionowy odpowiadający prędkości znamionowej  $\Omega_N$ ,

$\vartheta_p$  - prędkość posuwu dla elementów mechanizmu wykonujących ruch postępowy

(np. maszyny górnictwa),

p,q - wykładniki potęg, uwzględniające zależność momentu oporowego od prędkości kątowej lub liniowej.

Wzór (1.9) jest słuszny tylko dla  $\Omega \neq 0$ , gdyż na skutek większych wartości współczynnika tarcia spoczynkowego od wartości współczynnika tarcia kinetycznego (rys. 1.9 i 1.10), charakterystyki wykazują pewien wzrost momentu początkowego dla prędkości bliskich zera.

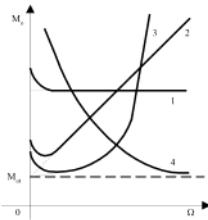
Dla mechanizmów poruszających się tylko ruchem obrotowym ( $\vartheta_p=0$ ) równanie (1.9) upraszcza się i można wówczas rozpatrywać cztery podstawowe grypy maszyn roboczych, w zależności od wartości wykładnika „p” - potęgi prędkości:

- **grupa I ( $p = 0$ )** - maszyny robocze o stałym momencie oporowym (krzywa 1 na rys.1.10), np.: maszyny wyciągowe, mechanizmy podnoszenia i jazdy urządzeń dźwigowych, walcarki, maszyny piernicze i kalandry, obrabiarki z posuwem proporcjonalnym do prędkości skrawania, przenośniki taśmowe itp.;

- **grupa II ( $p = 1$ )** - maszyny robocze o liniowej zależności momentu oporowego od prędkości kątowej (krzywa 2 na rys.1.10). Jest to rzadko spotykany w praktyce przypadek. Przykładem może być prądnica obcowzburona prądu stałego obciążona stałą wartością rezystancji;

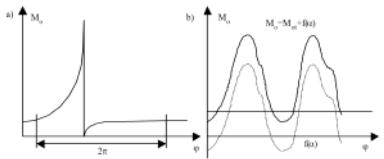
- **grupa III ( $p = 2$ )** - maszyny robocze, których moment oporowy zależy od kwadratu prędkości kątowej (krzywa 3 na rys.1.10). Charakterystyki takie zwane wentylatorowymi (lub parabolicznymi) mają urządzenia pracujące na zasadzie wykorzystywania siły odśrodkowej: wentylatory, śruby okrętowe, bomby odśrodkowe, turbospreżarki itp.;

- **grupa IV ( $p = -1$ )** - maszyny robocze, których moment oporowy jest odwrotnie proporcjonalny do prędkości kątowej (hiperbolka - krzywa 4 na rys.1.10). Charakterystyki takie mają: urządzenia do nawijania i rozwijania taśm, wstęg i drutów, stosowane w przemyśle hutniczym, papierniczym i włókienniczym. W urządzeniach takich musi być zachowana stała sila naciągu i stała prędkość liniowa zwijanego wyrobu, wobec czego wraz ze wzrostem promienia nawoju na bieżnie maleje jego prędkość kątowa, a rośnie moment oporowy.



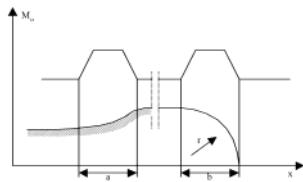
Rys.1.10 Przebiegi typowych charakterystyk mechanicznych maszyn roboczych.

*Moment oporowy zależny od kąta obrotu  $M_o=f(\varphi)$*  (rys.1.11) mają mechanizmy korbowodowe lub mimośrodowe, np. bomby i sprężarki tłokowe, nożyce do cięcia metali, prasy mimośrodowe itp.



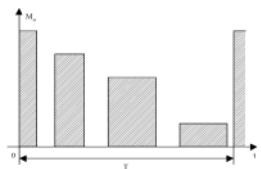
Rys.1.11.Moment oporowy w zależności od kąta obrotu: a-maszyna dociskowa, b-maszyna tłokowa.

*Moment oporowy zależny od drogi*  $M_o=f(x)$  wykazują pojazdy mechaniczne, w których  $M_o$  zależy między innymi od wzniesienia i krzywizny toru (rys.1.12) oraz maszyny wyciągowe bez pełnego zrównoważenia liny.



Rys.1.12 Moment oporowy pojazdu trakcyjnego zależny od drogi:  
a - wzniesienie, b - krzywizna toru.

*Momenty oporowe zależne od czasu*  $M_o=f(t)$  dotyczą maszyn roboczych o programowanym przebiegu pracy, np. suwnice, walcarki, wyciągi (rys.1.13) itp.

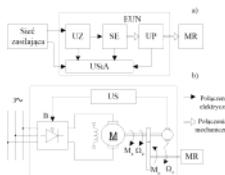


Rys.1.13 Moment oporowy walcarki zgniatacz zależny od czasu, T - czas cyku

## 1 Podstawowe pojęcia i zależności w napędzie elektrycznym

### 1.2 Struktura elektrycznego układu napędowego

Napęd elektryczny jest to zespół połączonych ze sobą i oddziałyujących wzajemnie na siebie elementów przetwarzających energię elektromechaniczną w procesie technologicznym.



Główne elementy elektrycznego układu napędowego EUN, to (rys. 1.1):

- silniki elektryczne SE,
- układ zasilający UZ,
- urządzenie pędne (połączenia mechaniczne) UP.

W wielu przypadkach napędy elektryczne muszą być sterowane automatycznie, wobec czego muszą zawierać również urządzenia sterowania i automatyki oraz przetworniki pomiarowe (rys. 1.1.a - linia przerywana).

**Układ zasilający** przekształca energię elektryczną sieci i dostarcza ją do silnika, sterując jego pracę tak, by spełniać wymagania narzucone przez maszynę roboczą. Rolę takiego układu może na przykład spełniać prostownik sterowany sygnałami bramkowymi B elementów poliprzewodnikowych (rys. 1.1.b).

**Silnik elektryczny** przekształca doprowadzoną energię elektryczną w mechaniczną (lub odwrotnie - w niektórych rodzajach hamowania elektrycznego). W wyniku działania momentu siły  $M_e$  wytworzonego w silniku SE następuje ruch obrótowy wirnika silnika oraz walu maszyny roboczej MR z prędkością kątową  $\Omega$  lub  $\Omega_e$  - w przypadku istnienia przekładni mechanicznej.

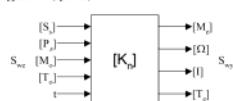
**Urządzenie pędne** (np. przekładnie redukcyjne - rys. 1.1.b - zębate lub pasowe, sprzęgła) stanowi połączenie mechaniczne pomiędzy silnikiem a maszyną roboczą, zapewniając jednocześnie przepływ mocy mechanicznej i, jeżeli jest to niezbędne, zmianę jej parametrów (prędkości kątowej, momentu itp.).

1

**Maszyna robocza**, będąc na ogół odbiornikiem energii mechanicznej (lub jej źródłem - w przypadku tzw. czynnego momentu oporowego), realizuje określone zadania w procesie technologicznym i obciąża silnik momentem oporowym  $M_o$ .

### 1.3 Charakterystyki maszyn elektrycznych

Układ napędowy z rys. 1.1 można przedstawić w postaci blokowej [ ], wyróżniając w nim sygnały wejściowe i wyjściowe (rys. 1.2)



Rys. 1.2 Sygnały wejściowe i wyjściowe układu napędowego

- Wśród sygnałów wejściowych można wyróżnić:
- sygnały sterujące [ $S_s$ ],
  - parametry energetyczne linii zasilającej [ $P_z$ ],
  - momenty zewnętrzne oporowe [ $M_o$ ],
  - temperatury otoczenia [ $T_o$ ]
  - czas [ $t$ ].

Sygnały wyjściowe mogą być funkcją czasu lub też być od czasu niezależne.

- Sygnalami wyjściowymi układu napędowego są najczęściej:
- momenty sił [ $M_e$ ],
  - prędkości kątowe [ $\Omega$ ],
  - prady [ $I$ ],
  - temperatury elementów układu [ $T_e$ ].

Sygnały wyjściowe są funkcjami sygnałów wejściowych oraz parametrów konstrukcyjnych (współczynników) układu napędowego [ $K_e$ ]. Współczynniki te mogą być stałe, jak również mogą być funkcjonalne czasu lub współzależne stancji.

$$S_{ej} = f(S_{we}, K_e) \quad (1.1)$$

Jedną z najczęściej wyznaczanych zależności w napędzie elektrycznym jest zależność prędkości kątowej silnika od momentu obciążenia, przy stałych sygnałach sterujących, stałych parametrach linii zasilającej i stałej temperaturze:

2

$$\Omega = f(M_o) \text{ przy } S_s = \text{const}, P_z = \text{const}, T_o = \text{const}. \quad (1.2)$$

Zależność (1.2) jest nazywana charakterystyką mechaniczną silnika. W stanie ustalonym moment napędowy silnika  $M_e$  równa się momentowi zewnętrznemu (oporowemu)  $M_o$ , wobec czego równanie charakterystyki mechanicznej przyjmuje postać:

$$\Omega = f(M_e). \quad (1.3)$$

Charakterystyki mechaniczne maszyn elektrycznych są zazwyczaj nieliniowe i wykazują znaczącą zależność wytwarzanego momentu od prędkości kątowej. Są zazwyczaj podawane w

### PARAMETRY ZMIENNE W CZASIE:

- temperatura  $\rightarrow$  rezystancja rośnie re wzrostem  $T \rightarrow$  prąd maleje
- tarcie

- trzeba opisywać osią charakterystyk
- $n$  - prędkość obrótowa ;  $\omega$  - prędkość kątowa
- przeliczanie  $n \rightarrow \omega \quad \omega = n \cdot \frac{2\pi}{60}$  radiany sekundy

$$n: \frac{\text{obr}}{\text{s}}$$

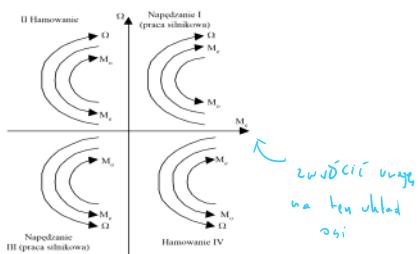
rysujemy  $\uparrow \omega_{n_e}$

$$\Omega = f(M_o) \text{ przy } S_s=\text{const}, P_e=\text{const}, T_a=\text{const}. \quad (1.2)$$

Zależność (1.2) jest nazywana **charakterystyką mechaniczną silnika**.  
W stanie ustalonym moment napędowy silnika  $M_s$  równa się momentowi zewnętrznemu (oporowemu)  $M_o$ , wobec czego równanie charakterystyki mechanicznej przyjmuje postać:

$$\Omega = f(M_o). \quad (1.3)$$

Charakterystyki mechaniczne maszyn elektrycznych są zazwyczaj nielinowe i wykazują znaczącą zależność wytwarzanego momentu od prędkości kątowej. Są zazwyczaj podawane w formie graficznej w układzie współrzędnych prostokątnych  $(\Omega, M_o)$ . Osi układu, przecinające się, tworzą cztery obszary (ćwiartki), z których każdy odpowiada ściśle określonemu stanowi pracy maszyny elektrycznej (rys.1.3).



Rys.1.3 Obszary pracy napędu we współrzędnych prostokątnych  $\{\Omega, M_o\}$ .

Ćwiartka I odpowiada pracy silnikowej:

kierunek prędkości kątowej jest zgodny ze zwrotem momentu rozwijanego przez maszynę  $M_s$ , a moment zewnętrzny  $M_o$  jest skierowany przeciwnie.

Ćwiartka II odpowiada pracy prądnicowej maszyny (hamowanie prądnicowe): moment zewnętrzny  $M_o$  ma zwrot zgodny z kierunkiem prędkości  $\Omega$  - wówczas stan równowagi występuje tylko wówczas, gdy zwrot momentu maszyny  $M_s$  jest przeciwny do kierunku prędkości.

3

- przedłużanie  $n \rightarrow \omega$   $\omega = n \cdot \frac{2\pi}{60} \text{ sekundy}$

$$n: \text{obr}$$

$$\omega: \frac{\alpha}{T}$$

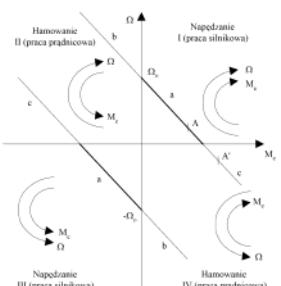
• rysujemy  $\uparrow \omega_{n_e}$

- dwa slany pracy silnikowej i generatorowej, zmienia się kierunek obrotu, należy pamiętać w której ćwiartce się "znajdujemy"
- moment oporowy z reguły przeciwny do m. obrotowego

Praca w ćwiartce III odbywa się przy zgodności zwrotu momentu silnika  $M_s$  z prędkością  $\Omega$ , lecz ich zwroty są przeciwnie niż w ćwiartce I.

W ćwiartce IV zwrot prędkości jest ten sam jak w ćwiartce III, lecz moment wytworzony w maszynie, uznany za dodatni, ma zwrot przeciwny - zatem praca w tej ćwiartce odpowiada hamowaniu maszyny roboczej przez maszynę elektryczną (hamowanie prądnicowe).

Na rys.1.4 zilustrowano te obszary pracy przebiegami charakterystyk mechanicznych.



Rys.1.4 Przykłady charakterystyk mechanicznych w obszarach pracy silnikowej i hamulcowej: a - praca silnikowa w ćwiartce I i III, b - praca prądnicowa (hamowanie prądnicowe) w ćwiartce II i IV, c - hamowanie przeciw włączeniem w ćwiartce II i IV.

Jeżeli początkowy punkt pracy napędu A mieścił się w ćwiartce I, a moment zewnętrzny wymusił zmianę kierunku wirowania tak, że punkt pracy przesunął się do ćwiartki IV to nastąpiło hamowanie momentem silnika.

Odcinki „a” charakterystyk mechanicznych odpowiadają pracy silnikowej maszyny elektrycznej, przy czym w ćwiartce III praca odbywa się w przeciwnym kierunku wirowania. Silnik pobiera energię elektryczną i oddaje na wale energię mechaniczną.

Odcinki „b” charakterystyk odpowiadają pracy maszyny w charakterze prądnicy - maszyna pobiera na wale energię mechaniczną i oddaje do sieci energię elektryczną. Ze względu na

• hamowanie prądnicowe

• silnik prądu stałego obcowzbudny (charakterystyka jest linią prostej)

- a - praca silnikowa
- b - praca prądnicowa
- c - hamowanie przeciw włączeniu

4

przeciwne kierunki momentu maszyny i jej prędkości ta praca prądnicowa jest jednocześnie pracą hamulcową (hamowanie odzyskowe).

Odcinki „ $\varepsilon$ ” charakteryzuje pracy hamulcowej, maszyna pobiera z sieci energię elektryczną, a na wale energię mechaniczną, które zamieniają się w niej na energię cieplną. Odpowiada to tzw. hamowaniu przeciwstawieniem (hamowanie momentem silnika).

Charakterystyki mechaniczne silników są graficzną ilustracją zmienności prędkości maszyny w funkcji obciążenia (mechanicznego wymuszenia zewnętrznego).

Kształt charakterystyki mechanicznej wyznacza się definiując pojęcie **szywności**, jako pochodnej wymuszenia (sily zewnętrznej)  $Q_i$  względem prędkości  $X$ :

$$\varepsilon = \frac{dQ_i}{dX} . \quad (1.4)$$

Dla maszyn wirujących:

$$\varepsilon = \frac{dM_e}{d\Omega} . \quad (1.5)$$

a dla maszyn liniowych, dla których charakterystyka mechaniczna jest opisana zależnością prędkości liniowej  $\vartheta$  od siły obciążenia  $F$ , szywność definiuje się jako:

$$\varepsilon = \frac{dF}{d\vartheta} . \quad (1.6)$$

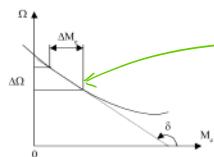
W praktycznych obliczeniach zamiast różniczek można stosować przyrosty skończone (rys.1.5):

$$\varepsilon \approx \frac{\Delta M_e}{\Delta \Omega} = \operatorname{ctg} \delta . \quad (1.7)$$

Zgodnie z równaniem (1.7) **szywność charakterystyki mechanicznej jest stosunkiem przyrostu momentu  $\Delta M_e$ , wynikającego przyrost prędkości  $\Delta\Omega$  do przyrostu tej prędkości.**

Jeżeli w skutek wzrostu momentu obciążenia zmniejsza się prędkość (ujemne  $\Delta\Omega$ ), to szywność charakterystyki jest mniejsza od zera.

5



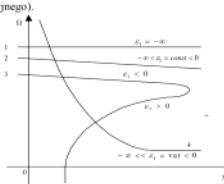
Rys.1.5 Ilustracja metody wyznaczania szywności charakterystyki mechanicznej.

- może pojawić się pytanie: „co to znaczy, że ch-ba jest sztywna?”

- czyli prostoliniowo: przyrost momentu, zmiana prędkości
- wybierany przyrost jednego parametru, sprawdzamy jak się zmienia drugi → sztywność

*synchroniczny, asynchroniczny synchronizowany*

*bocznikowy*



Rys.1.6 Charakterystyki mechaniczne maszyn elektrycznych podczas pracy silnikowej: 1-idealnie sztywna, 2-szywna, 3- z zakresem sztywnym i niestabilnym, 4- nieszywna (ustępstwa).

6

Charakterystyki mechaniczne maszyn elektrycznych są zwykle podawane dla wartości średnich, nie uwzględniając zatem pulsacji momentu napędowego, które mogą występuwać w funkcji czasu, prędkości czy położenia.

Rys.1.7 Charakterystyka mechaniczna silnika indukcyjnego:

a - dynamiczna z uwzględnieniem pulsacji  $M_t$ , b- statyczna (dla wartości średnich).

Charakterystyka mechaniczna, wyznaczona w normalnym układzie połączeń silnika, przy zasilaniu napięciem znamionowym oraz braku dodatkowych elementów w jego obwodach elektrycznych, nosi nazwę charakterystyki naturalnej.

Na tej charakterystyce znajduje się punkt pracy znamionowej, określony wielkościami znamionowymi podanymi na tabliczce znamionowej silnika.

Jeli którykolwiek z podanych wyżej warunków nie jest spełniony, to tak wyznaczona charakterystyka nosi nazwę charakterystyki sztucznej.

#### 1.4 Charakterystyki maszyn roboczych

**Charakterystyka maszyny roboczej** jest to zależność siły oporu (momentu oporowego) od odległości lub prędkości. Siła oporu maszyny roboczej może też być funkcją czasu. Momenty oporowe  $M_o$  (momenty sił oporów) maszyn roboczych pochodzą zarówno od sił tarcia (niepożądanych) jak i użytecznych sił wynikających z procesu technologicznego.

Momenty oporowe dzielimy na **czynne** i **bierne** (rys.1.8).



Rys.1.8 Charakterystyki momentów oporowych: 1- czynnego, 2- biernego.

**Momenty oporowe czynne**  $M_{oc}$  występują przy zmianie energii potencjalnej mechanizmu napędzanego. Powstają podczas przemieszczania się masy w polu grawitacyjnym (urządzenia do transportu pionowego: wyciągi, windy, dźwigi itp.), przemieszczania się elementów ferromagnetycznych lub przewodników z prądem w polu magnetycznym, występują w wyniku zmiany wymiarów elementów sprężystych.

Cechą charakterystyczną maszyn roboczych o oporach czynnych jest готовość do zwrotu pobranej energii potencjalnej. Momenty oporowe czynne zachowują zawsze ten sam zwrot, niezależnie od kierunku ruchu (rys.1.8 - prosta).

Jeli zwrot  $M_{oc}$  jest zgodny z kierunkiem ruchu (np. opuszczanie ciężaru), mamy wtedy do czynienia z momentem napędzającym, a silnik może pracować jako prądnica i oddawać energię elektryczną do zródła.

**Momenty oporowe bierne**  $M_{ob}$  występują przy zmianie energii kinetycznej mechanizmu napędzanego i związane z są z siłami bezwładności (inercyjnymi). Zwrot  $M_{ob}$  zależy od zwrotu zmian prędkości (przyspieszenia).

W większości przypadków  $M_{ob}$  są skierowane przeciwnie do kierunku ruchu układu oraz zmieniają swój znak wraz ze zmianą kierunku wrotowania. Mają zawsze charakter momentu hamującego. W przypadku momentu oporowego biernego energia doprowadzana do maszyny roboczej zamienia się na pracę użyteczną oraz pokonuje siły tarcia w mechanizmie.

W zależności od rodzaju maszyny roboczej moment oporowy może być funkcją prędkości, przyspieszenia, kąta obrótu i czasu.

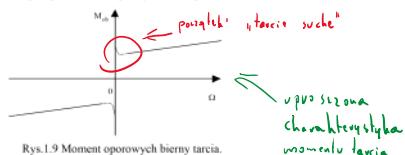
Przykładem momentu biernego jest moment tarcia w maszynach roboczych wirujących (rys.1.9), opisany równaniem (1.8):

$$M_{ob} = M_{obs} + M_{ob2} = k_1 * \Omega + k_2 * \text{sign} \Omega \quad (1.8)$$

gdzie:  $k_2$  jest współczynnikiem tarcia suchego.

8

Współczynnik ten w układach rzeczywistych jest funkcją wielu zmiennych (np. rodzaju materiałów trących, stopnia ich gładkości, smarowania itp.), ponadto wpływ ma moment oporowy bierny ma tarcie spoczynkowe flina przerwana na rys.1.9)



Dla mechanizmów zawierających elementy poruszające się ruchem obrotowym i postępowym, napędzanych silnikiem wirującym, moment oporowy opisuje się równaniem:

$$M_o = M_{ot} + (M_{av} - M_{ot}) \left( \frac{\Omega}{\Omega_v} \right)^p + (M_{av} - M_{ot}) \left( \frac{\theta_p}{\theta_{pv}} \right)^q \quad (1.9)$$

- wszystkie parametry zuamionowe
- wszystkie ch-tyle odnoszą się do naturalnej
- "kształtujacy" ch-tyle bazują na naturalnej
- nie ma czegoś takiego jak "ch-tyle znamionowa"
- np. zmiana prądu wzbudzenia, wprowadzenie rezystora
- mogą być zmienne w czasie, etc.
- czynny - raz może być napadem, a raz obciążeniem

[SKONCZYLISMY NA SLAJDZIE 36]

- moment oporowy czynny - zwrot energii, trzeba być przygotowanym
- przykład: winda → opuszczanie ciężaru = napędzanie = oddawanie energii do sieci

- m.o.b. → zmiana energii kinetycznej
  - zwrot zależy od kierunku wrotowania
  - zawsze moment hamujący (przeciwnie do kierunku ruchu układu)
  - $M_t = M_{ts} + M_{tc} + M_{tw} + M_{tue}$
  - moment tarcia, np. moment tarcia
  - mom. tarcia suchego, coulomba, wilgotyzującego, wentylatorowego
  - małe prędkości, moment ruszania, uruchamianie
  - stała prędkość, zależna od kierunku prędkości
  - prędkość proporcjonalna do prędkości
  - prędkość proporcjonalna do prędkości
  - moment tarcia proporcjonalna do kwadratu prędkości
- $$M_t = M_{ts} + M_{tc} + M_{tw} + M_{tue}$$
- $$M_{ts} = k_1 \cdot \Omega$$
- $$M_{tc} = k_2 \cdot \text{sign} \Omega$$
- $$M_{tue} = k_3 \cdot \Omega^2$$

- przykład: chowaki, tłumienia, przepływ laminarnej

$M_t \propto M_{tw}$

Dla mechanizmów zawierających elementy poruszające się ruchem obrotowym i postępowym, napędzanych silnikiem winiącym moment oporowy opisuje się równaniem:

$$M_{\alpha} = M_{\alpha'} + (M_{\alpha'Y} - M_{\alpha}) \left( \frac{\Omega}{\Omega_Y} \right)^p + (M_{\alpha'Y} - M_{\alpha}) \left( \frac{\dot{\theta}_p}{\dot{\theta}_{pY}} \right)^q . \quad (1.9)$$

gdzie:  $M_{\alpha}$  - moment wywołany tarciem w elementach ruchomych przy  $\Omega \neq 0$ ,

$M_{\alpha'Y}$  - moment znamionowy odpowiadający prędkości znamionowej  $\Omega_Y$ ,

$\dot{\theta}_p$  - prędkość posuwu dla elementów mechanizmu wykonujących ruch postępowy

(np. maszyny górnictwa),

$p,q$  - wykładniki potęg, uwzględniające zależność momentu oporowego od prędkości kątowej lub liniowej.

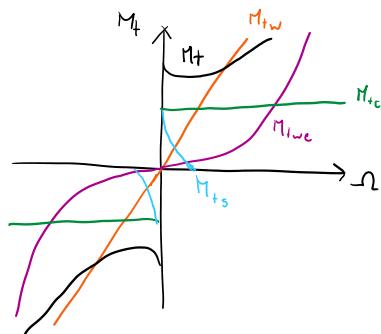
Wzór (1.9) jest słuszny tylko dla  $\Omega \neq 0$ , gdyż na skutek większych wartości współczynnika tarcia spoczynkowego od wartości współczynnika tarcia kinetycznego (rys. 1.9 i 1.10), charakterystyki wykazują pewien wzrost momentu początkowego dla prędkości bliskich zero.

Dla mechanizmów poruszających się tylko ruchem obrotowym ( $\dot{\theta}_p=0$ ) równanie (1.9) upraszcza się i można wówczas rozpatrywać cztery podstawowe grypy maszyn roboczych, w zależności od wartości wykładnika „ $p$ ” potęgi prędkości:

- grupa I ( $p = 0$ ) - maszyny robocze o stałym momencie oporowym (krzywa 1 na rys.1.10), np.: maszyny wyciągowe, mechanizmy podnoszenia i jazdy urządzeń dźwigowych, wałarki, maszyny papiernicze i kalandry, obrabiarki z posuwem proporcjonalnym do prędkości skrawania, przenośniki taśmowe itp.;

9

- wynikających charakt. tłumienia, przepływu laminowania



- upraszcza się to do następującej zależności:

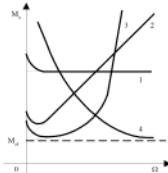
$$M_t = M_{tw} + M_{tc} = k_1 \Omega + k_2 \operatorname{sign} \Omega$$

$k_1, k_2 \rightarrow \text{wsp. tarcia winietacyjnego i Coulomba}$

- grupa II ( $p = 1$ ) - maszyny robocze o liniowej zależności momentu oporowego od prędkości kątowej (krzywa 2 na rys.1.10). Jest to rzadko spotykany w praktyce przypadek. Przykładem może być prądnica obcowzbudna prądu stałego obciążona stałą wartością rezystancji;

- grupa III ( $p = 2$ ) - maszyny robocze, których moment oporowy zależy od kwadratu prędkości kątowej (krzywa 3 na rys.1.10). Charakterystyki takie zwane wentylatorowymi (lub parabolicznymi) mają urządzenia pracujące na zasadzie wykorzystywania siły odśrodkowej: wentylatory, śruby okrętowe, pumy odśrodkowe, turbosprężarki itp.;

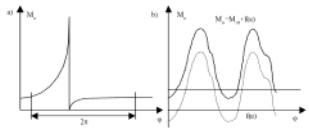
- grupa IV ( $p = -1$ ) - maszyny robocze, których moment oporowy jest odwrotnie proporcjonalny do prędkości kątowej (hiperbolka - krzywa 4 na rys.1.10). Charakterystyki takie mają: urządzenia do nawijania i rozwijania taśm, wstęgi i drutów, stosowane w przemyśle hutniczym, papierniczym i włókienniczym. W urządzeniach takich musi być zachowana stała siła naciągu i stała prędkość linowa zwijanego wyrobu, wobec czego wraz ze wzrostem promienia nawijania na bieżni maleje jego prędkość kątowa, a rośnie moment oporowy.



Rys.1.10 Przebiegi typowych charakterystyk mechanicznych maszyn roboczych.

Moment oporowy zależny od kąta obrotu  $M_t = f(\phi)$  (rys.1.11) mają mechanizmy korbowodowe lub mimośrodowe, np. pumy i sprężarki tłokowe, nożyce do cięcia metali, prasy mimośrodowe itp.

10



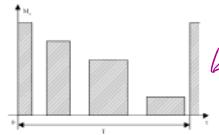
Rys.1.11.Moment oporowy w zależności od kąta obrotu: a-maszyna dociskowa, b-maszyna tłokowa.

Moment oporowy zależny od drogi  $M_o=f(x)$  wykazują pojazdy mechaniczne, w których  $M_o$  zależy między innymi od wzniesienia i krzywizny toru (rys.1.12) oraz maszyny wyciągowe bez pełnego zrównoważenia lin.



Rys.1.12 Moment oporowy pojazdu trakcyjnego zależny od drogi:  
a - wzniesienie, b - krzywizna toru.

Momenty oporowe zależne od czasu  $M_o=f(t)$  dotyczą maszyn roboczych o programowanym przebiegu pracy, np. suwnice, walarki, wyciągi (rys.1.13) itp.



Rys.1.13 Moment oporowy walarki zgniatacz zależny od czasu, T - czas cyku

## Wykład 2

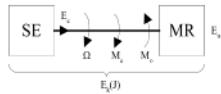
poniedziałek, 7 października 2019 18:26



### 1.5 Równanie ruchu układu napędowego

Równanie ruchu można sformułować na podstawie zasady najmniejszego działania Hamiltona, lub zasady zachowania energii, która ma prostą interpretację fizyczną.

Całkowita energia  $E_e$  dostarczona przez silnik SE do maszyny roboczej MR (rys.1.14) składa się z energii użytecznej  $E_u$  oraz energii kinetycznej zmagazynowanej w układzie napędowym  $E_k$  (w masach wirujących):



Rys.1.14 Przepływ energii w układzie napędowym w stanie dynamicznym

$$E_e = E_u + E_k; \quad (1.10)$$

czyli:

$$\int_0^t P_e dt = \int_0^t P_u dt + J \frac{\Omega^2}{2}. \quad (1.11)$$

Przyjmując że dostarczona przez silnik moc wynosi:

$$P_e = M_e \cdot \Omega, \quad (1.12)$$

a moc mechaniczna użyteczna:

$$P_u = M_o \cdot \Omega, \quad (1.13)$$

oraz różnicując względem czasu wyrażenie (1.11) i dzieląc je następnie przez  $\Omega$  otrzymujemy się:

$$M_e - M_o = J \frac{d\Omega}{dt} + \frac{\Omega}{2} \frac{dJ}{dt}. \quad (1.14)$$

Uwzględniając, że  $\Omega = \frac{da}{dt}$ , (gdzie a - kąt obrotu waha), mamy:

$$M_e - M_o = J \frac{d\Omega}{dt} + \frac{\Omega}{2} \frac{da}{dt} \frac{dJ}{da} = J \frac{d\Omega}{da} + \frac{\Omega^2}{2} \frac{dJ}{da} = M_d. \quad (1.15)$$

12

- im częstszy wirnik, tym dłużej się kierci  $\rightarrow$  ma więcej energii kinetycznej

- $M_o$  - moment oporowy

$E_u$  - energia użyteczna,  $E_k$  - energia kinetyczna

gdzie  $M_d$  jest nazywany momentem dynamicznym napędu.

W równaniu (1.15) moment dynamiczny zawiera dwie składowe zmiennej energii kinetycznej:  
- pierwsza - wynikająca ze zmiany prędkości

przy stałym momencie bezwładności  $\rightarrow J \frac{d\Omega}{dt}$

- druga - uwzględniająca zmienność momenta bezwładności  $\rightarrow \frac{\Omega^2}{2} \frac{dJ}{da}$

W równaniu (1.15) nie występują w sposób jasny straty (tarcie, luzy) towarzyszące przenoszeniu energii od silnika do mechanizmu. W pierwszym przybliżeniu można przyjąć, że są one uwzględnione w wartościach  $M_o$  lub  $M_d$ , jako ich dodatkowe składniki, np.:

$$M_o = M_o(\Omega, \varphi, x, t) + M_t, \quad (1.16)$$

gdzie  $M_t$  wyrażone jest wzorem (1.8).

W większości układów napędowych ma stały, niezależny od czasu ani od położenia, moment bezwładności. Dla takich napędów równanie ruchu przyjmuje postać:

$$M_e - M_o = J \frac{d\Omega}{dt} = M_d. \quad (1.17)$$

Najważniejsze

RÓWNANIE RUCHU

### 1.6 Stany pracy układu napędowego

Z punktu widzenia zmiany prędkości kątowej rozróżnia się dwa stany pracy:

- stan ustalony, w którym prędkość  $\Omega = \text{const}$  (lub  $\dot{\varphi}_p = \text{const}$ ), czyli:

$$\frac{d\Omega}{dt} = 0 \quad \text{lub} \quad \frac{d\varphi}{dt} = 0, \quad (1.18)$$

- stan nieustalony (przejściowy, dynamiczny), w którym prędkość  $\Omega \neq \text{const}$  (lub  $\dot{\varphi}_p \neq \text{const}$ ), czyli:

$$\frac{d\Omega}{dt} \neq 0 \quad \text{lub} \quad \frac{d\varphi}{dt} \neq 0. \quad (1.19)$$

#### 1.6.1 Stan ustalony - równowaga statyczna

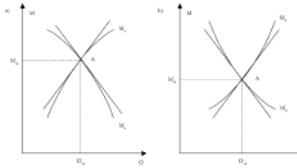
Stan ustalony, zwany również stanem równowagi statycznej napędu występuje wówczas, gdy, zgodnie z (1.18), moment dynamiczny  $M_d=0$ ,

czyli moment obciążenia jest równoważony przez moment silnika.

Stan ten jest charakteryzowany na wykresie  $\Omega$ - $M$  charakterystyką mechaniczną silnika i maszyny roboczej, punktem przecięcia A charakterystki  $\Omega = f(M_d)$  i  $\Omega = f(M_s)$ .

13  
pkt. przy ustalonej

Punkt A jest stabilnym punktem równowagi, czyli układ napędowy w stanie ustalonym jest stabilny (stacjonarny) wówczas, gdy zakłócenie stanu równowagi wywołuje powstanie momentu dążącego do sprowadzenia układu ponownie do położenia równowagi w punkcie A (rys. I.15a). Jeżeli to nie nastąpi, to układ jest niestabilny (niestacjonarny - rys. I.15b).



Rys. I.15 Ilustracje stabilności statycznej układu napędowego:  
a - układ stabilny, b - układ niestabilny.

Przy założeniu małych, dostatecznie wolno przebiegających odchyleń od punktu pracy ustalonej, równania rzeczywistych charakterystyk silnika i maszyny roboczej można zastąpić równaniami stycznymi, poprowadzonych przez punkt A odpowiadający stanowi równowagi (rys. I.15), czyli:

$$\Delta M_c = a\Delta\Omega \text{ , oraz } \Delta M_o = b\Delta\Omega, \quad (I.20)$$

gdzie:

$$a = \left( \frac{dM_c}{d\Omega} \right)_{\Omega=\Omega_s}; \quad b = \left( \frac{dM_o}{d\Omega} \right)_{\Omega=\Omega_s}. \quad (I.21)$$

Równanie ruchu (w przypadku  $J = \text{const}$ ), napisane dla przyrostów momentów i prędkości, przyjmuje postać:

$$a\Delta\Omega - b\Delta\Omega = J \frac{d\Delta\Omega}{dt},$$

czyli po przekształceniu:

$$\frac{d\Delta\Omega}{dt} - \frac{a-b}{J}\Delta\Omega = 0. \quad (I.22)$$

14

Rozwiązywanie równania różniczkowego (I.23) wyznacza przebieg prędkości kątowej przy małym zaburzeniu w punkcie pracy A:

$$\Delta\Omega = C e^{\frac{a-b}{J}t}. \quad (I.23)$$

Rozważany punkt pracy A będzie stateczny tylko wówczas, gdy odchyłka prędkości będzie dążyła do zera:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \Delta\Omega = 0. \quad (I.24)$$

Warunek (I.24) zostanie spełniony, jeśli wykładnik potęgi w równaniu (I.23) będzie ujemny, czyli przy uwzględnieniu że  $J > 0$ , gdy będzie spełniony warunek:

$$a - b < 0 \quad \text{lub} \quad a < b.$$

Wartości  $a$  i  $b$  określają nachylenia funkcji w punkcie przecięcia charakterystyk mechanicznych.

A więc punkt pracy A będzie stateczny, jeśli będzie spełniony

warunek stabilności statycznej układu napędowego:

$$\left( \frac{dM_c}{d\Omega} \right)_{\Omega=\Omega_s} < \left( \frac{dM_o}{d\Omega} \right)_{\Omega=\Omega_s}. \quad (I.25)$$

Z zależności (I.25) wynika, że:

przy pracy statycznej napędu - ze wzrostem prędkości kątowej moment oporowy  $M_o$  powinien rosnąć szybciej niż moment obrotowy  $M_c$  silnika napędowego.

Wówczas, przy wzroście prędkości,  $M_o > M_c$  i następuje hamowanie, natomiast przy jej zmniejszaniu się,  $M_c > M_o$  i mamy przyspieszenie napędu.

W obydwu przypadkach układ napędowy wraca do poprzedniego punktu pracy.

Analogicznie, na podstawie analizy równania (I.23) można również podać warunek niestabilności statycznej układu napędowego, a mianowicie:

$$\left( \frac{dM_o}{d\Omega} \right)_{\Omega=\Omega_s} \geq \left( \frac{dM_c}{d\Omega} \right)_{\Omega=\Omega_s}. \quad (I.26)$$

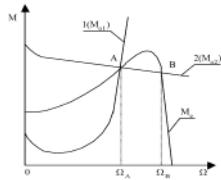
W tym przypadku działanie zakłócenia powoduje zawsze oddalanie się punktu pracy układu od poprzedniego punktu A.

Z przedstawionej analizy wynika, że o równowadze statycznej układu napędowego decyduje charakter przebiegów statycznych charakterystyk mechanicznych silnika i maszyny roboczej.

Na rys. I.16 przedstawiono przykład, z którego wynika, że ten sam punkt A pracy ustalonej może być jednocześnie, w zależności od przebiegu charakterystyki maszyny roboczej:

15

- **stabilnym** (dla krzywej 1),
- **niestabilnym** (dla krzywej 2) punktem pracy.



Rys.1.16 Ilustracja stabilności statycznej układu napędowego:

- A- punkt pracy stabilnej dla krzywej 1 ( $M_0=C\omega^2$ ) i niestabilnej dla krzywej 2 ( $M_0=\text{const}$ ).
- B- punkt pracy stabilnej dla krzywej 2.

Przy szybkich zmianach momentu i prędkości kątowej układu napędowego, mechaniczne charakterystyki statyczne nie mają charakteru decydującego, należy więc badać zachowanie się układu w stanach dynamicznych (nieustalonych) i analizować je między innymi z punktu widzenia stabilności dynamicznej (kryterium Hurwitz, Nyqista, D-rozbicia płaszczyzny i inne).

#### 1.6.1 Stany nieustalone

*Stan nieustalony* (przejściowy, dynamiczny) wiąże się ze zmianą punktu pracy napędu w skutek działania trzech rodzajów zaburzeń:

- zakłócen (np. wahania napięcia lub częstotliwości w sieci zasilającej),
- awarii (np. zwarcie w układzie zasilania, chwilowy zanik napięcia sieci, zablokowanie wirnika)
- celowych działań układu sterującego (lub człowieka) wymuszonych przez specyfikę procesu technologicznego.

Wśród tych ostatnich można wyróżnić następujące stany dynamiczne:

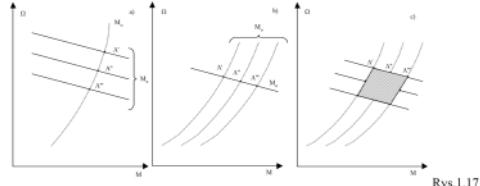
- **rozruch** - przejście ze stanu spoczynkowego do określonego stanu pracy ustalonej (np. praca przy obciążeniu i prędkości znamionowej, praca na biegu jałowym, praca przy obniżonej prędkości kątowej itp.),
- **zatrzymanie** (wybieg) - proces odwrotny do powyższego, przy czym zmniejszanie prędkości do zera następuje w sposób naturalny, tj. w wyniku sił tarcia w układzie,
- **hamowanie** - proces, podczas którego układ napędowy jest zatrzymywany przez dostarczenie dodatkowego momentu większego niż moment tarcia; przy czym

16

moment hamujący (spowalniający) może być uzyskiwany na wiele sposobów (mechaniczny, hydrauliczny lub elektromechaniczny),

- **nawrót** (rewers - czyl zmiana kierunku obrotów) - proces w którym następuje przejście ze stanu pracy ustalonej przy jednym kierunku wirowania do pracy ustalonej w przeciwnym kierunku wirowania. Rewers prędkości związany jest z zatrzymaniem lub hamowaniem silnika i następuje z natychmiastowym rozruchem w przeciwnym kierunku wirowania,
- **regulacja prędkości kątowej** - polega na zmianie charakterystyk  $\Omega=f(M)$  silnika przy utrzymywaniu niezmienionej charakterystyki maszyny roboczej. Następuje wówczas przejście jednej prędkości ustalonej (w punkcie pracy A jdo innej (punkt A') przy stałej charakterystyce  $M_0$  (rys.1.17a), kolejne punkty pracy leżą na charakterystyce maszyny roboczej,
- **regulacja momentu obciążenia** - polega na zmianie charakterystyk  $\Omega=f(M)$  maszyny roboczej przy niezmienionej charakterystyce silnika. Powoduje to przejście do innego punktu pracy na charakterystyce silnika (rys.1.17b); kolejne punkty pracy leżą na charakterystyce mechanicznej silnika.

W szczególnych przypadkach regulacja może wymagać zmian obu charakterystyk mechanicznych: silnika i maszyny roboczej (np. w układach napędowych lokomotyw elektrycznych). W takim przypadku kolejne punkty pracy pokrywają cały obszar wyznaczony granicznymi charakterystykami uzyskanymi w procesie regulacji (rys.1.17c).



Ilustracje regulacji prędkości i momentu obciążenia

17

## 1.7 Zagadnienia szczegółowe związane z równaniem ruchu

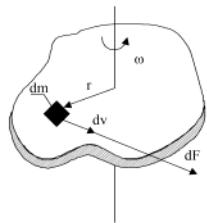
## 1.7.1 Moment bezwładności i moment zamachowy

Równanie równowagi sił działających na element masy  $dm$  pokazany na rys.1.18 będzie miało postać:

$$dF = dm \frac{d\vartheta}{dt}$$

a stąd elementarny moment dynamiczny:

$$dM_d = r * dm \frac{d\vartheta}{dt} = r^2 * dm \frac{d\omega}{dt}$$



Rys.1.18 Ilustracja pojęcia momentu bezwładności:  
 $dm$ - masa elementarna,  $dF$ - elementarna siła przyspieszająca masę  $dm$

Sumując elementarne momenty dla całej masy  $m$ , rozpatrywanej bryły, otrzymuje się:

$$M_d = \frac{d\omega}{dt} \int_0^m r^2 dm = J \frac{d\omega}{dt},$$

skąd wynika, że moment bezwładności  $J$  opisany jest wzorem:

$$J = \int_0^m r^2 dm \quad (1.27)$$

• na masę  $dm$  działa pewna siła  $dF$

Wyznaczenie momentu bezwładności jest szczególnie proste dla regularnych brył geometrycznych. Na przykład, dla wydłużonego cylindra (o promieniu wewnętrznym  $r_1$  i zewnętrznym  $r_2$ ) o masej właściwej  $\gamma$  [kg/m<sup>3</sup>] będzie:

$$dm = \gamma \cdot dv = (\gamma \cdot 2\pi \cdot r \cdot l)dr$$

stąd

$$J = \int_{r_1}^{r_2} r^2 (\gamma \cdot 2\pi \cdot r \cdot l) dr = \frac{\gamma}{2} l \pi (r_2^4 - r_1^4)$$

a po wstawieniu  $m = \gamma l \pi (r_2^2 - r_1^2)$ , otrzymuje się:

$$J = \frac{m}{2} (r_2^2 + r_1^2) [\text{kg m}^2]$$

Dla bardziej złożonych brył moment bezwładności oblicza się dla ich składników prostych, sumując je bezpośrednio.

Jeśli przyjąć, że ciało o masej zredukowanej  $m_b$  wiruje względem osi przechodzącej przez punkt ciężkości, to moment bezwładności jest równy iloczynowi masy ciała i kwadratu zastępczego promienia bezwładności masy  $r_b$  [kg m<sup>2</sup> lub Nm s<sup>2</sup>]:

$$J = m_b \cdot r_b^2$$

W katalogach jest podawana niekiedy wartość tzw. momentu zamachowego:

$$GD^2 = g m (2r_b)^2 = 4Jg$$

gdzie: g - przyspieszenie ziemskie [m/s<sup>2</sup>].

Tak więc:

$$J = \frac{GD^2}{4g}, \quad (1.28a)$$

przy czym  $GD^2$  jest wyrażone w [Nm<sup>2</sup>].

Jeśli  $GD^2$  jest wyrażone w [kg m<sup>2</sup>], to przelicznik będzie wynosił:

$$J = \frac{GD^2}{4}, \quad (1.28b)$$

Jeśli prędkość jest wyrażona w obrotach na minutę, to moment dynamiczny wyznacza się z zależności:

$$M_d = J \frac{d\omega}{dt} = \frac{GD^2}{4g} \frac{\pi}{30} \frac{dn}{dt} = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt}, \quad (1.29)$$

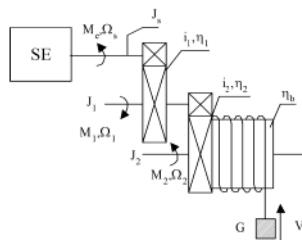
$$\frac{2\pi}{60}$$

przy czym:  $M_d$  [Nm],  $GD^2$  [Nm<sup>2</sup>],  $n$  [1/min].

### 1.7.2 Zastępczy moment bezwładności

Techniczne rozwiązania układów napędowych zawierają zwykle przekładnie mechaniczne zmieniające prędkość obrotową i zmieniające ruch obrotowy na postępowy (rys.1.19).

Elementy maszyny roboczej, położone z silnikiem napędowym oraz między sobą za pomocą przekładni mechanicznych mają różne prędkości kątowe lub linijowe, różne momenty oporowe. Dlatego zarówno do obliczeń statycznych (np. wyznaczenie mocy znamionowej silnika) jak i dynamicznych (rozwiązywanie równania ruchu), należy sprowadzić momenty oporowe i momenty bezwładności poszczególnych elementów układu na wóz silnika.



Przy wyznaczaniu zastępczego momentu bezwładności korzysta się z zasad zachowania energii, czyli, że całkowita energia kinetyczna układu zastępczego musi być równa sumie energii kinetycznych poszczególnych elementów układu rzeczywistego.

Dla układu zawierającego elementy o ruchu obrotowym i postępowym (przy oznaczeniach jak na rys.1.19) będzie:

$$E_k = J_z \frac{\omega_s^2}{2} = J_s \frac{\omega_s^2}{2} + J_1 \frac{\omega_1^2}{2} + J_2 \frac{\omega_2^2}{2} + m_G \frac{g^2}{2}$$

a po przekształceniu:

$$J_z = J_s + J_1 \frac{1}{i_1^2} + J_2 \frac{1}{(i_1 i_2)^2} + m_G \left( \frac{g}{\omega_s} \right)^2$$

• moment zastępczy → suma po wszystkich przekładniach

gdzie:  $i_1 = \frac{\omega_s}{\omega_1}$ ,  $i_2 = \frac{\omega_1}{\omega_2}$  - przełożenia poszczególnych przekładni.

Czyli ogólna zależność będzie miała postać:

gdzie:

$$J_z = \sum_{j=1}^n J_j \left( \frac{\omega_j}{\omega_s} \right)^2 + \sum_{k=1}^m m_k \left( \frac{g_k}{\omega_s} \right)^2, \quad (1.30)$$

$J_j$  - momenty bezwładności elementów wirujących z prędkością kątową  $\omega_j$   
(indeks j=1 dotyczy silnika napędowego),

$m_k$  - masy elementów poruszających się ruchem postępowym z prędkością liniową  $g_k$ .

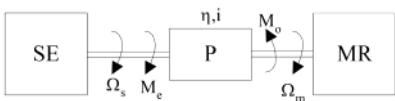
Uwzględniając zależność (1.28a), zastępczy moment zamachowy układu można wyrazić wzorem:

$$GD_z^2 = \sum_{j=1}^n GD_j^2 \left( \frac{\omega_j}{\omega_s} \right)^2 + 4 \sum_{k=1}^m G_k \left( \frac{g_k}{\omega_s} \right)^2. \quad (1.31)$$

gdzie:  $G_k = m_k \cdot g$ .

### 1.7.3 Zastępczy moment oporowy

Zastępczy (zredukowany) moment oporowy na wale silnika elektrycznego wyznacza się na podstawie zasad zachowania energii w stanie ustalonym, tzn.: przyjmuje się, że moc wydawana przez silnik napędowy równa jest sumie mocy pobieranych przez poszczególne elementy maszyny roboczej, powiększonej o straty w przekładniach.



Rys.1.20 Schemat układu napędowego z przekładnią jednostopniową

Rozpatrując to zagadnienie dla prostego układu napędowego, w którym maszyna robocza wirująca z prędkością  $\Omega_m$  jest połączona z silnikiem wirującym z prędkością  $\omega_s$ , za pośrednictwem jednostopniowej przekładni mechanicznej (rys.1.20), otrzymujemy zależność momentu oporowego z dwóch przypadkach:

1 - dla przypadku pracy silnikowej - przepływ energii od silnika do maszyny roboczej:

$$P_e = M_e \Omega_s \eta = M_o \Omega_m$$

skąd zastępczy moment oporowy sprowadzony do wału silnika będzie wynosił:

$$M_{oz} = M_e = \frac{M_o}{\eta \cdot i}. \quad (1.32)$$

gdzie przełożenie przekładni -  $i = \frac{\Omega_s}{\Omega_m}$ ;

2 - dla przypadku pracy hamulcowej - przepływ energii od maszyny roboczej do silnika:

$$P_e = M_e \Omega_s = M_o \Omega_m \eta,$$

stąd:

$$M_{oz} = M_e = \frac{M_o}{i} \eta. \quad (1.33)$$

Jeżeli w układzie zastosowana jest przekładnia k-stopniowa, to wypadkowa sprawność i wypadkowe przełożenie przekładni są równe odpowiednio:

$$\eta = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdots \cdot \eta_k$$

$$i = i_1 \cdot i_2 \cdots \cdot i_k \quad (1.34)$$

W przypadku złożonego układu napędowego, w którym moc silnika jest doprowadzona za pośrednictwem przekładni do kilku elementów maszyny roboczej oraz dodatkowo ruch obrotowy silnika jest przekształcony w ruch postępowy elementu roboczego o prędkości liniowej  $v$ , jak to ma miejsce w urządzeniach transportowych (klatka wyciągu pionowego, most i wózek suwniczy - rys.1.19), to przy podnoszeniu (praca silnikowa) moc silnika będzie równa:

$$P_s = M_e \Omega_s = M_1 \frac{\Omega_1}{\eta_1} + M_2 \frac{\Omega_2}{\eta_1 \eta_2} + m_G \frac{\vartheta_g}{\eta_1 \eta_2 \eta_b} .$$

czyli:

$$M_{oz} = M_e = M_1 \frac{1}{\eta_1 i_1} + M_2 \frac{1}{\eta_1 \eta_2 i_1 i_2} + m_G \frac{\vartheta_g}{\Omega_b} \frac{1}{\eta_1 \eta_2 \eta_b i_1 i_2} . \quad (1.35)$$

gdzie  $\Omega_b = \Omega_2$  - prędkość kątowa bębna na rys.1.19.

Podobnie *przy opuszczaniu* (praca hamulcowa silnika) będzie:

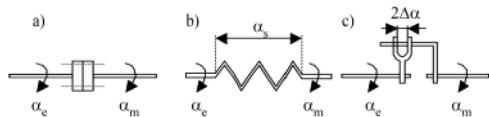
$$M_{oz} = M_1 \frac{\eta_1}{i_1} + M_2 \frac{\eta_1 \eta_2}{i_1 i_2} + m_G \frac{\vartheta_g}{\Omega_b} \frac{\eta_1 \eta_2 \eta_b}{i_1 i_2} . \quad (1.36)$$



### 1.8 Połączenie silnika z maszyną roboczą

Silnik elektryczny może być połączony z mechanizmem roboczym tak, jak to pokazano na rys.1.21 tzn.:

- a - w sposób sztywny, gdy  $\alpha_e = \alpha_m = \alpha$ ,
- b - poprzez element elastyczny, dzięki skręceniu którego pojawi się kąt skręcenia wału  $\alpha_s = \alpha_e - \alpha_m$
- c - za pomocą elementów z lukami, gdzie ruch części elektrycznej jest przekazywany mechanizmowi po tzw. wybraniu luku, czyli obróceniem się jednej części mechanizmu o kąt  $\Delta\alpha$  przy drugiej nieruchomej.



Rys.1.21 Połączenie silnika z mechanizmem: a - sztywne, b- poprzez element sprężysty, c- z lukami;  $\alpha_e, \alpha_m$  - kąty obrotu wału silnika i mechanizmu

Dla przypadku połączenia sztywnego obowiązują wcześniej już omówione zależności, przy założeniu, że  $J = \text{const}$ :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = M_e - M_o = M_d \quad (1.17)$$

Po uwzględnieniu, że moment oporowy może być funkcją prędkości  $\Omega$  i mieć składową zewnętrzną  $M_o(t)$  będącą dowolną funkcją czasu oraz składową typu tarcia suchego (1.8), otrzymuje się następujące równanie momentu mechanicznego maszyny roboczej:

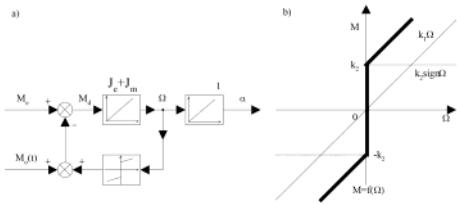
$$M_o = M_o(t) + k_1 \Omega + k_2 \text{sign} \Omega \quad (1.37)$$

Wówczas strukturę układu opisanego równaniem ruchu (1.17) można przedstawić za pomocą następującego schematu blokowego (rys.1.22a):

- fazy podstawowe połączenia
- sztywne: kąt obrotu maszyny i maszyny roboczej są równe
- elem. elastyczny: jest różnicą kątów
- pot. z lukiem: najpierw musimy wybrać luk: gdy spręgłość się rozgałęzi, mamy kąty różne
- połączeniem sprężystym jest również kąt obrotu wału

- przyjmujemy stały moment bezwładności

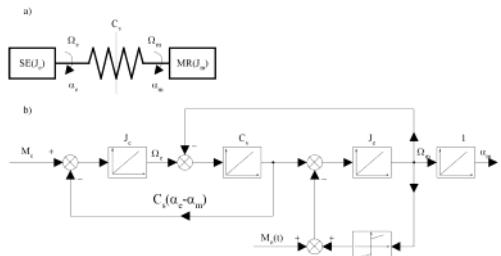
- momenty oporowe - po uwzględnieniu szybkości



Rys.1.22 Połączenie sztywnego silnika i maszyny roboczej:  
a- schemat struktury, b- momenty mechaniczne tarcia.

W niektórych napędach można wyodrębnić elementy mechaniczne, które w sposób wyraźny stanowią **połączenia elastyczne** (np. długie wały).

Grupując część układu wokół silnika, a pozostałą część przypisując maszynie roboczej, otrzymujemy się **strukturę dwumową ze sprężystym elementem łączącym**, pokazaną na rys.1.23.



Rys.1.23 Połączenie sprężyste silnika SE i maszyny roboczej MR:  
a- schemat ideowy, b- schemat struktury.

Jeśli wprowadzi się pojęcie **współczynnika sprężystości  $C_s$** , jako zależność między kątem skręcenia  $\alpha$  a momentem przenoszonym:

$$C_s = \frac{\partial M_s}{\partial \alpha_s} \quad [\text{Nm/rad}], \quad (1.38)$$

to **moment skrętny** będzie wyrażony następującym wzorem:

$$M_s = C_s \alpha_s = C_s (\alpha_e - \alpha_m). \quad (1.39)$$

Wówczas równania równowagi mechanicznej (równania ruchu) przyjmą następującą postać:

$$J_e \frac{d\Omega_e}{dt} = M_e - C_s \int (\Omega_e - \Omega_m) dt, \quad (1.40)$$

$$C_s \int (\Omega_e - \Omega_m) dt - M_o = J_m \frac{d\Omega_m}{dt}.$$

przy czym:

$$M_o = M_o(t) + k_1 \Omega_m + k_2 \operatorname{sign} \Omega_m. \quad (1.41)$$

Równaniem (1.40) i (1.41) odpowiada schemat blokowy na rys.1.23b.

Jak widać, rzad równania różniczkowego podwyższa się o dwa w porównaniu z przypadkiem połączenia sztywnego.

Wymka to faktu, że wspólny poprzeczny magazyn energii kinetycznej związany z masą o momencie bezwładności  $J = (J_e + J_m)$  został teraz rozzielony na dwa, a ponadto pojawił się jeszcze jeden w postaci elementu sprężystego, który magazynuje energię potencjalną (wyrażoną w [Ws]):

$$E_p = \frac{1}{2} C_s \alpha_s^2.$$

Dokładniejsza analiza układu z masami i elementami sprężystymi wykazuje istnienie drgań własnych układu o częstotliwościach równych odpowiednio dla silnika i mechanizmu:

$$f_{oe} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C_s}{J_e}}; \quad f_{om} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C_s}{J_m}} \quad (1.42a)$$

dla całego układu:

- dla  $\omega = 0$  mamy pokonać tarcie statyczne, potem jest liniowe

- np. długie wały
- w tej sytuacji, długie wały dzielą się na pół; części grupują się z silnikiem w części z maszyną roboczą: mamy układ dwumasowy z elementem sprężystym
- silnik robi uderzenie, maszyna reaguje z opóźnieniem
- schematy nie są wymagane na kolosie

- moment zależy od czasu; te same dwa współczynniki tarcia

$$f_o = \frac{1}{2\pi} \sqrt{C_s \frac{J_e + J_m}{J_e J_m}} \quad (1.42b)$$

Organia te mogą ujawnić się w sposób niebezpieczny jeśli któryś z wymuszeń (tzn.  $M_e$  lub  $M_o$ ) będzie zawierało składową o bliskiej im częstotliwości.

Normalne przekładnie zębate oraz niektóre połączenia przegubowe wykazują *luzy*. Analiza układu napędowego z takim typem połączenia mechanicznego przeprowadza się w podobny sposób jak w przypadku połączenia sprężystego, tzn. stosuje się *podział układu na dwa zespoły zlokalizowane po obydwu stronach elementu wykazującego luz*.

Rozważa się dwa przedziały czasowe:  
• *pierwszy* - w którym na skutek występowania luzu zespoły silnika i maszyny roboczej z rys. 1.24 należy traktować jako rozdzielone;

• *drugi* - w którym zespół napędowy przechodzi w układ sztywny.

Przedział pierwszy nazywany jest *wybieraniem luzu* i równanie dynamiki w tym przedziale przyjmuje następującą postać:

$$J_e \frac{d\Omega_e}{dt} = M_e - M_o' \quad (1.43)$$

gdzie:

$$M_o' = k_1 \Omega_e + k_2 \operatorname{sign} \Omega_e \quad (1.44)$$

Natomiast w przedziale drugim - bezzużowym równanie dynamiki odpowiada połączeniu sztywnemu:

$$J \frac{d\Omega_m}{dt} = M_e - M_o \quad (1.45)$$

gdzie  $M_o$  jest wyrażone zależnością (1.37).

Przejście z przedziału pierwszego do drugiego jest połączone niekiedy z niebezpiecznymi udarami obciążeniem elementów układu. Wyznaczenie ich w sposób anałtyczny jest bardzo trudne, prostszym rozwiązaniem jest modelowanie matematyczne i badania symulacyjne.

• może pojawić się rezonans drgań

• położenie z luzem: najpierw pracuje z luzem, potem położenie sztywne

• luz: napędzająca cię obrotu, napędzana stoi w miejscu  
• sztywy: traktując ją jak pot. sztywne

# Wykład 5

poniedziałek, 4 listopada 2019 11:18

## Ogólne zasady doboru silnika:

- współczesne silniki elektryczne, np. z serii e i f, są projektowane ekonomicznie tzn. według kryteriów: materiałoszczędne i energooszczędne. W związku z tym:
  - mniejsze współczynniki zapasu niż silniki starych serii
  - są bardziej wrażliwe na przeciążenia elektryczne i mechaniczne
  - niezbędne staje się wnikiowe i prawidłowe dobranie silnika napędowego

## Źle dobrany silnik - źródło wielu strat

- Jeżeli zostanie dobrany silnik o zbyt dużej mocy:
  - większe rozmiary i ciężar
  - większe straty biegu jałowego
  - mniejsza sprawność
  - mniejszy współczynnik mocy  $\cos \phi$  (jeśli SI)
  - duży moment dynamiczny - rozruch bardziej gwałtowny - uszkodzenie elementów przegązujących i maszyny roboczej
  - w efekcie aparatura sterująca i zabezpieczająca musi być dobrana na wyższe parametry znamionowe niż przy właściwym doborze silnika
- Jeżeli zostanie dobrany silnik o zbyt małej mocy:
  - częste jego odłączenie przez zabezpieczenia np.. termiczne
  - natomiast nastawienie większego prądu zadziałania zabezpieczenia może doprowadzić do zniszczenia izolacji uzwojeń silnika
  - częste odłączanie silnika spowoduje zakłócenia w procesie technologicznym, a w konsekwencji straty ekonomiczne
- **Przystępując do doboru silnika należy na wstępnie zapoznać się z wymogami i warunkami pracy maszyny roboczej (na podstawie jej dokumentacji), a następnie rozpatrzyć poniższe zagadnienia:**
  1. Wybór rodzaju prądu silnika: stały czy przemienny
  2. Wybór typu silnika i wartości napięcia znamionowego
  3. Wybór typu budowy mechanicznej silnika
  4. Wybór znamionowej prędkości obrotowej silnika
  5. Wybór mocy znamionowej silnika
- Przy wyznaczaniu mocy znamionowej silnika należy uwzględnić następujące warunki:
  - I. silnik nie powinien nadmiernie się grzać
  - II. moment maksymalny silnika  $M_{max}$  powinien być większy niż moment oporowy  $M_{0\ max}$  odczytany z wykresu przewidywanego obciążenia silnika  $M_{max} > M_{0\ max}$
  - III. moment rozruchowy silnika  $M_r$  powinien być większy niż moment oporowy maszyny roboczej  $M_{or}$  podczas całego okresu rozruchu  $M_r > M_{or}$
  - warunki II i III są na ogół wymaganiami dodatkowymi, natomiast podstawowe znaczenie ma sprawdzenie silnika na warunek I (nagrzewanie się)
- Jeżeli na wykresie obciążień MR - krótkotrwałość przeciążenia  $M_{0\ max}$  (rys. 1a), to:
  - dla SI powinien być spełniony warunek:  $M_{max}=M_k > M_{0\ max}$  (rys. 1b)
  - dla silnika bocznikowego prądu stałego musi być spełniona nierówność:  $3M_N > M_{0\ max}$  (rys. 1c)
- Dobór pod względem  $M_r$  - sprawdzenie  $M_{or} / MR$  przy  $\omega = 0$  jest mniejszy od  $M_r$  silnika.
- Spełnienie nierówności  $M_r > M_{or}$  jest warunkiem rozruchu
- W SI pierścieniowym lub prądu stałego poprzez włączenie odpowiedniej rezystancji

rozruchowej  $R_r$  można osiągnąć warunek rozruchu, tj.  $M_r > M_{or}$

- Rodzaj pracy silnika napędowego, dyktowany przez maszynę roboczą, zależy od wymagań procesu produkcyjnego, np.:
  - przenośniki taśmowe, wentylatory, pompy mogą pracować wiele godzin w sposób ciągły - **praca ciągła**
    - obciążenie może się wachać
  - zasuwy w zaporach wodnych, śluzy, mosty zwodzone i obrotowe, mechanizmy obrotu żurawia, pracują krótko, a następnie mają długą przerwę w pracy - **praca dorywcza**
  - dźwigi są przykładem urządzeń wykonujących pracę cykliczną (załączony, wyłączony, itd.) - tzw. **praca okresowo przerywana**
- Silnik zbudowany do pracy ciągłej będzie nagrzewał się inaczej przy pracy przerywanej i inaczej przy pracy dorywczej
- W celu maksymalnego wykorzystania silnika, należy dostosować jego właściwości cieplne do rodzaju pracy napędzanego urządzenia
- Uwzględniając różne rodzaje pracy umożliwia się obciążenie silnika mocą większą niż przy pracy ciągłej
- Symbole rodzaju pracy są umieszczone na tabliczkach znamionowych silników i niektórych elementów w układzie napędowym

#### **Praca ciągła S1**

- Odbywa się z obciążeniem o wartości stałej, trwającym co najmniej do osiągnięcia przez maszynę ustalonej temperatury

#### **Praca dorywcza S2**

- Odbywa się z obciążeniem o wartości stałej, trwającym przez określony czas  $t_p$  krótszy niż to jest potrzebne do osiągnięcia przez maszynę ustalonej temperatury
- Po tym czasie następuje **postój trwający tak długo, aż maszyna stanie się zimna** (czyli jej temperatura nie różnie się od czynnika chłodzącego więcej niż 2 stopnie C)
- Symbol pracy dorywczej składa się z **oznaczenia S2 oraz czasu pracy wyrażonego w minutach**, np. S2 10min - praca dorywcza 10 minutowa. Wielkością charakterystyczną pracy dorywczej jest czas trwania pracy: 10, 30, 60, 90 minut

#### **Praca okresowo przerywana S3**

- Składa się z okresów  $t_0$ , z których każdy obejmuje czas pracy przy obciążeniu o stałej wartości  $t_p$  oraz czasu postoju  $t_s$ , przy czym czasy pracy i postoju każdego okresu nie są wystarczające do osiągnięcia przez silnik ustalonej temperatury
- Praca trwa zazwyczaj do osiągnięcia przez silnik stanu równowagi cieplnej, a ciepło wydzielane przy rozruchu nie wpływa w sposób istotny na nagrzewanie maszyny
- wielkością charakterystyczną pracy S3 jest wzajemny czas pracy: 15,25,40,60% gdzie  $\varepsilon = \frac{t_p}{t_p + t_s} \cdot 100\%$
- symbol tego rodzaju pracy zawiera oznaczenie S3 i wartość względnego czasu pracy np. S3 40%

#### **Inne rodzaje pracy**

- S4 - praca okresowo przerywana z rozruchem
- S5 - praca okresowo przerywana z hamowaniem elektrycznym
- S6 - praca okresowa długotrwała z przerwami jałowymi
- S7 - praca okresowa długotrwała z hamowaniem elektrycznym
- S8 - praca okresowa długotrwała ze zmianami prędkości
- S9 - praca z nieokresowymi zmianami obciążenia i prędkości