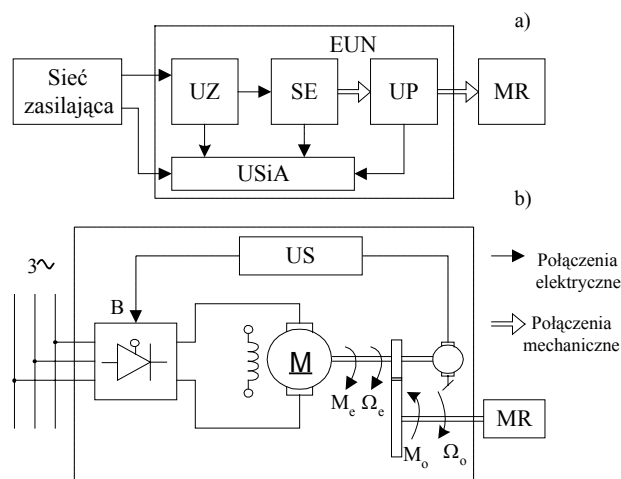


## 1.2 Struktura elektrycznego układu napędowego

*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 pracą tak, by spełniał wymagania narzucane przez maszynę roboczą. Rolę takiego układu może na przykład spełniać prostownik sterowany sygnałami bramkowymi B elementów półprzewodnikowych (rys.1.1.b).

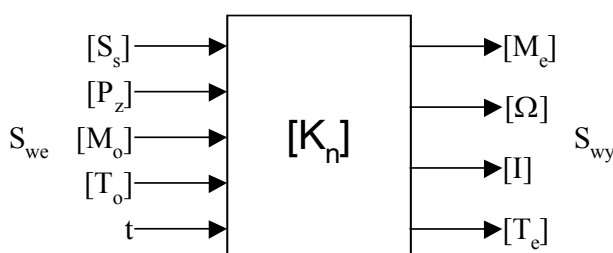
**Silnik elektryczny** przekształca doprowadzoną energię elektryczną w mechaniczną (lub odwrotnie - w niektórych rodzajach hamowania elektrycznego). W wyniku działania momentu siły  $M_e$  wytworzonego w silniku SE następuje ruch obrotowy wirnika silnika oraz wału maszyny roboczej MR z prędkością kątową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

**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  $\mathbf{M}_o$ .

### 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.

Sygnałami wyjściowymi układu napędowego są najczęściej:

- momenty sił  $[M_e]$ ,
- prędkości kątowne  $[\Omega]$ ,
- 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 funkcjami 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 kątownej silnika od momentu obciążenia, przy stałych sygnałach sterujących, stałych parametrach linii zasilającej i stałej temperaturze:

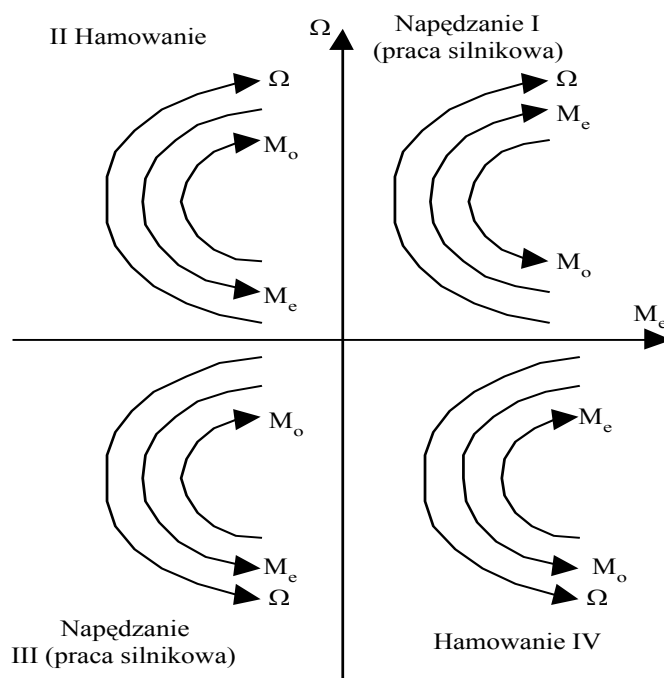
$$\Omega = f(M_o) \text{ przy } S_s = \text{const}, P_z = \text{const}, T_o = \text{const}. \quad (1.2)$$

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

Wstanie 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 znaczną zależność wytwarzanego momentu od prędkości kątovej. 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 ściśle określone stanowi pracy maszyny elektrycznej (rys.1.3).



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

*Ćwiartka I* odpowiada *pracy silnikowej*:

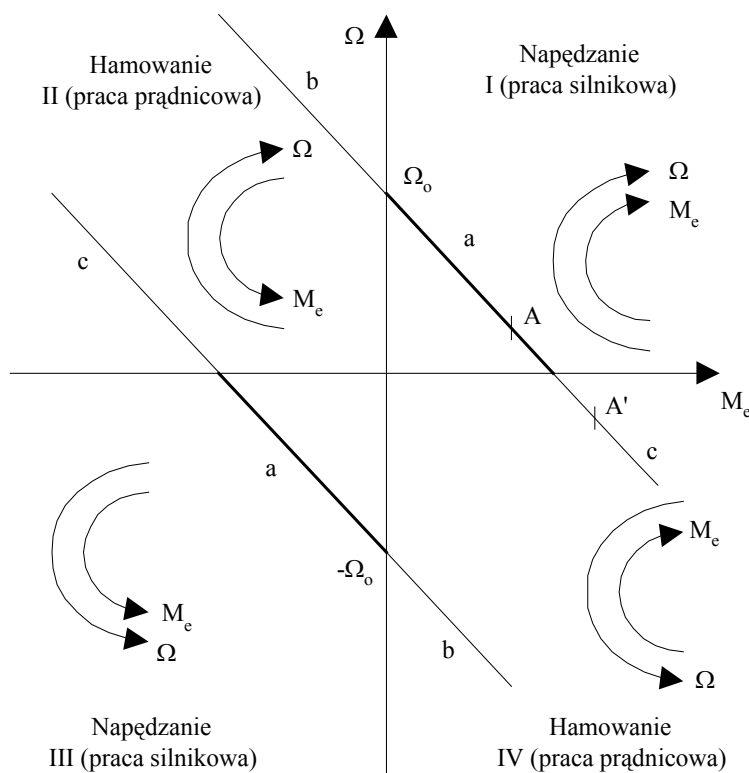
kierunek prędkości kątovej jest zgodny ze zwrotem momentu rozwijanego przez maszynę  $M_e$ , a moment zewnętrzny  $M_o$  jest skierowany przeciwnie.

*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 przeciwne 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

przeciwnie 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 przeciwwłóceniem (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 *sztynności*, jako pochodnej wymuszenia (siły zewnętrznej)  $Q_i$  względem prędkości  $\dot{X}$ :

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

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  $\mathcal{G}$  od siły obciążenia  $F$ , sztywność definiuje się jako:

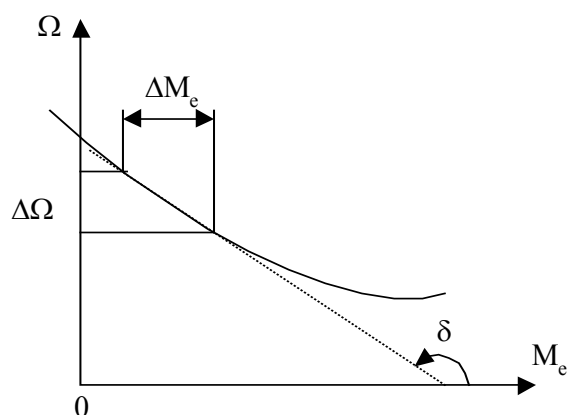
$$\varepsilon = \frac{dF}{d\mathcal{G}} \quad (1.6)$$

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) *sztynność 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 sztywność charakterystyki jest mniejsza od zera.

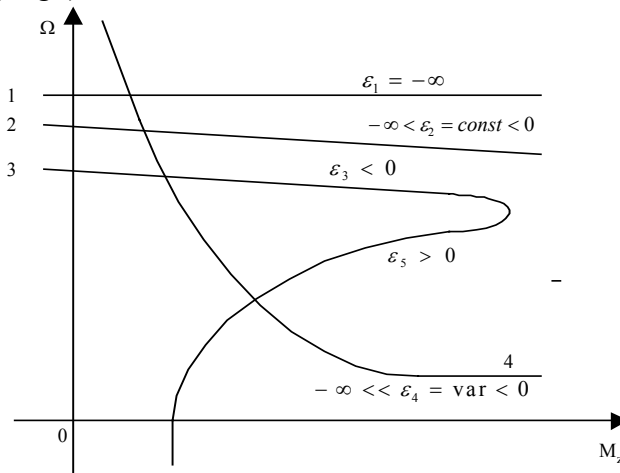


Rys.1.5 Ilustracja metody wyznaczania sztywności charakterystyki mechanicznej.

*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 *ustępliwa* (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 (ustępliwa).

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*.

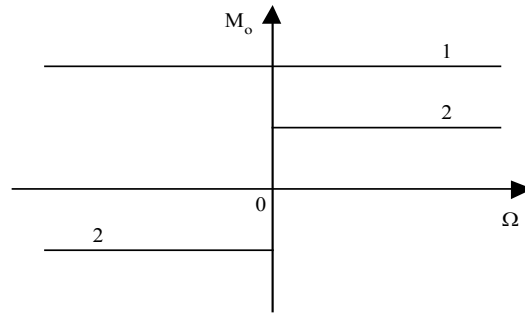
Na tej charakterystyce znajduje się punkt pracy znamionowej, określony wielkościami znamionowymi podanymi na tabliczce znamionowej silnika.

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 gotowość do zwrotu pobranej energii potencjalnej. Momenty oporowe czynne zachowują zawsze ten sam zwrot, niezależnie od kierunku ruchu (rys.1.8 - prosta 1).

Jeżeli zwrot  $M_{ocz}$  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 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 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.

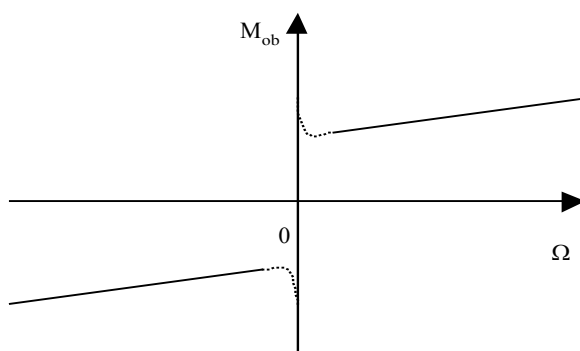
Przykładem momentu biernego jest moment tarcia w maszynach roboczych wirujących (rys.1.9), opisany równaniem (1.8):

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

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 oporowy bierny tarcia.

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

$$M_o = M_{ot} + (M_{oN} - M_{ot}) \left( \frac{\Omega}{\Omega_N} \right)^p + (M_{oN} - M_{ot}) \left( \frac{\mathcal{G}_p}{\mathcal{G}_{pN}} \right)^q, \quad (1.9)$$

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

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

$\mathcal{G}_p$  - prędkość posuwu dla elementów mechanizmu wykonujących ruch postępowy (np. maszyny górnicze),

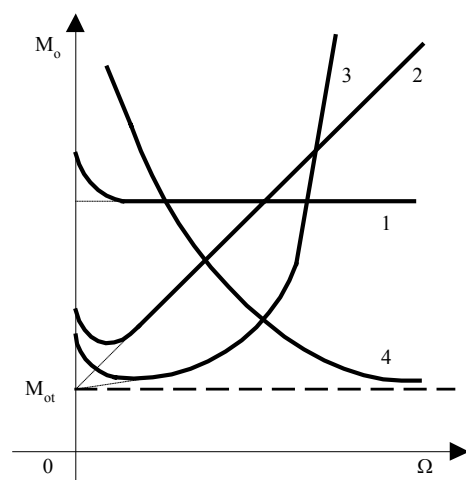
$p, q$  - wykładniki potęg, uwzględniające zależność momentu oporowego od prędkości kątowej lub liniowej.

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 zeru.

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

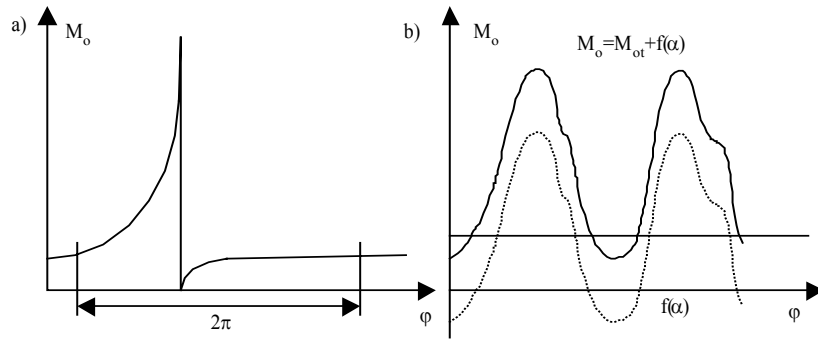
- **grupa I ( $p = 0$ )** - maszyny robocze o stałym momencie oporowym (krzywa 1 na rys.1.10), np.: maszyny wyciągowe, mechanizmy podnoszenia i jazdy urządzeń dźwigowych, walcarki, maszyny papiernicze i kalandry, obrabiarki z posuwem proporcjonalnym do prędkości skrawania, przenośniki taśmowe itp.;

- **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 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, pompy odśrodkowe, turbosprężarki itp.;
- **grupa IV ( $p = -1$ )** - maszyny robocze, których moment oporowy jest odwrotnie proporcjonalny do prędkości kątowej (hiperbola - 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 siła naciągu i stała prędkość liniowa zwijanego wyrobu, wobec czego wraz ze wzrostem promienia nawoju na bębnie maleje jego prędkość kątowa, a rośnie moment oporowy.



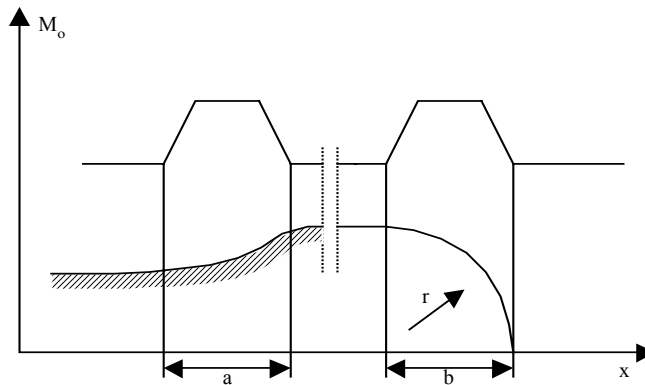
Rys.1.10 Przebiegi typowych charakterystyk mechanicznych maszyn roboczych.

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



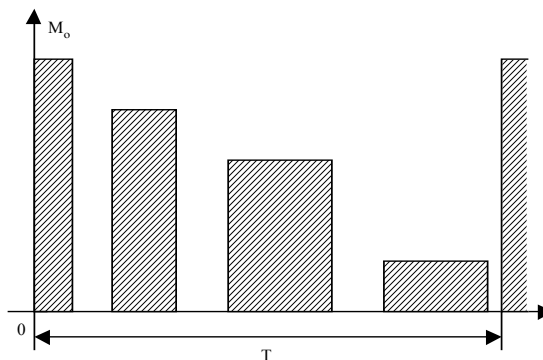
Rys.1.11. Moment oporowy w zależności od kąta obrotu: a-maszyna dociskowa, b-maszyna tłokowa.

Moment oporowy zależny od drogi  $M_0=f(x)$  wykazują pojazdy mechaniczne, w których  $M_0$  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  $M_0=f(t)$  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 cyklu