

1. INTRODUCERE

Instalațiile electromecanice industriale destinate proceselor tehnologice de extracție, de transport și de prelucrare a materiilor prime și materialelor se compun din trei părți (fig.1.1):

- mașina de lucru sau mecanismul de execuție – asigură obținerea produsului;
- partea de adaptare – mecanismul de transmitere a mișcării, de transformare a parametrilor energiei primite;
- partea de antrenare – motorul;
- partea de comandă – alimentare cu energie, protecție, automatizare.

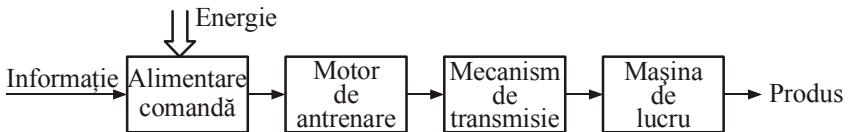


Fig.1.1. Schema structurală bloc a unei instalații electromecanice

Mașina de lucru are rolul de a efectua una sau mai multe operații specifice procesului tehnologic deservit de instalația din care face parte: extragere, deplasare, deformare. În acest scop primește la intrare energie mecanică de anumiți parametri.

Mecanismul de transmisie are rolul de a transfera energia mecanică primită la intrare spre mașina de lucru, putând schimba sau nu parametrii acesteia: felul mișcării (rotație, translație – continuă sau discontinuă), sensul mișcării, valoarea parametrilor (reducere, multiplicare).

Motorul de antrenare are rolul de a transforma energia primară primită (electrică, chimică, pneumatică, hidrolică) în energie mecanică.

Acest ansamblu este cunoscut în literatura de specialitate și în practica industrială sub denumirea de acționare electrică sau acționare electromecanică, dacă se are în vedere că energia electrică este transformată, în final, în energie mecanică. Se poate afirma că acționarea electromecanică este prezentă în cea mai mare parte a echipamentelor tehnice, fie că sunt destinate unor activități industriale complexe și de anvergură, fie că sunt utilizate în echipamente electrocasnice. Răspândirea și importanța lor a făcut ca multe colective să-și axeze preocupările de investigare în sfera acționărilor electromecanice și să devină catalizator pentru activitatea didactică și de cercetare.

- În România, acționările electromecanice reprezintă o școală prin faptul că:
- disciplina de acționări a fost introdusă în planurile de învățământ ale tuturor facultăților cu profil electric sau înrudit;
 - dispune de concepte și teorii proprii, de modele și metode de investigare specifice;
 - este organizată o Conferință națională periodică, itinerantă, dedicată acționărilor electrice care a condus la formarea unei comunități științifice;
 - a generat direcții de cercetare care, în ultimii ani, au devenit și ele școli științifice, un exemplu indubitabil fiind domeniul convertoarelor statice, indisolubil legat de acționările clasice atât prin legătura funcțională cât și prin specialiștii care s-au format în ultimii 20 de ani;
 - a fost posibilă aplicarea teoriei sistemelor cu rezultate remarcabile, a metodelor de investigare experimentală pentru lămurirea aspectelor de detaliu, de finețe, determinate de interacțiunea elementelor din structură.

Prin această lucrare se valorifică experiența didactică, experiența de cercetare și experiența inginerească a autorului dar și a colectivului în care își desfășoară activitatea. Comparativ cu literatura cunoscută, este aprofundată alegerea și verificarea puterii motoarelor electrice de acționare astfel încât să se evite supradimensionarea acestora, cu consecințele economice cunoscute.

Tehnicile de analiză teoretică sunt completate de studii de caz pentru definirea unei metode de cercetare bazată pe suport teoretic și dirijată spre aplicație. Elementele fundamentale legate de determinarea parametrilor pentru pornirea, reglarea vitezei și frânarea acționărilor electromecanice sunt sistematizate și dirijate spre formare inginerească creativă.

Bibliografia indicată constituie o bază de documentare în domeniu și proiectează o imagine cuprinzătoare asupra școlii de acționări electrice din România, asupra colectivelor de cercetare active din domeniul acționărilor electromecanice.

2. CARACTERISTICILE MAȘINILOR DE LUCRU

2.1. Caracteristicile statice ale mașinilor de lucru

Cuplul pe care îl opune mașina de lucru motorului electric de acționare în timpul desfășurării procesului tehnologic se numește cuplu static, notat cu M_s , și caracterizează comportarea mecanismului executor în regim staționar.

În general M_s este o funcție de viteza unghiulară Ω , de spațiul x , de poziția unghiulară α , de timp t ,

$$M_s = f(\Omega, x, \alpha, t, k)$$

și are două componente:

- o componentă utilă M_{su} corespunzătoare lucrului mecanic util pe care trebuie să-l efectueze mașina de lucru;
- o componentă de pierderi M_{sf} determinată de frecările specifice elementelor în mișcare.

$$M_s = M_{su} + M_{sf}$$

Prin caracteristica statică a mașinii de lucru se înțelege dependența dintre cuplul static și parametrii Ω , x , α în regim staționar. Pentru simplificarea formei analitice a acestei dependențe, caracteristicile statice se definesc prin relații de forma $M_s = f_1(\Omega)$, $M_s = f_2(x)$, $M_s = f_3(\alpha)$. Dependența $M_s = f(t)$ se numește diagrama cuplului static.

2.1.1. Convenția de semn și de circulație a energiei

După semn, convențional, cuplurile statice pot fi (fig.2.1):

- pozitive - dacă se opun sensului vitezei;
- negative - dacă acționează în sensul vitezei;

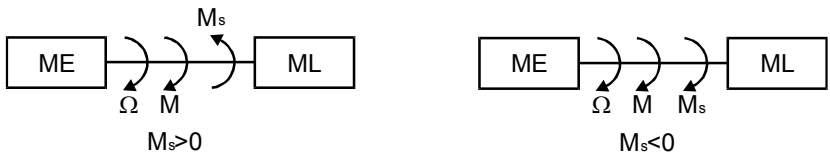


Fig.2.1. Stabilirea semnului cuplului static

Din punct de vedere energetic cuplurile statice se grupează în două categorii:

- cupluri statice pasive, caracterizate de faptul că se opun mișcării. Aceste cupluri sunt dezvoltate de majoritatea mașinilor unelte care execută operații de deformare neelastică, aşchiere, tăiere, răsucire, întindere etc., iar energia circulă numai de la mașina electrică la mașina de lucru (fig.2.2a);

- cupluri statice active sau potențiale, caracterizate de faptul că pot întreține mișcarea (conțin surse de energie). Aceste cupluri sunt dezvoltate de mașinile de lucru care efectuează operații de deformare elastică (comprimarea unui resort, comprimarea unui gaz), de mașinile de lucru care modifică poziția unui obiect față de o referință orizontală (instalații de ridicat), (fig.2.2b).

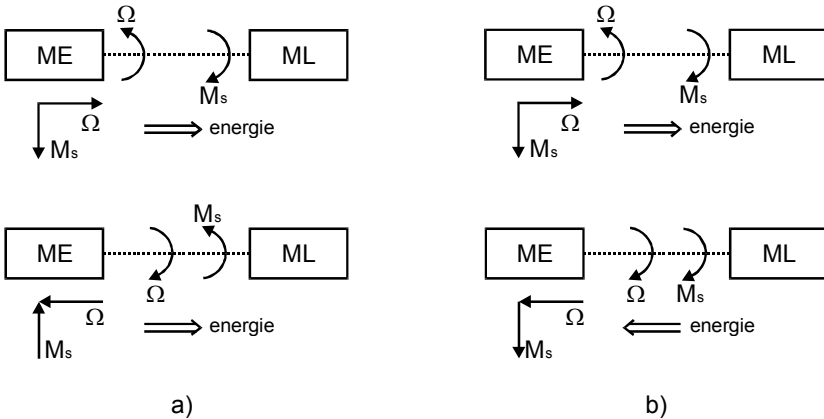


Fig.2.2. Explicativă privind circulația energiei

2.1.2. Cupluri statice constante

Caracteristica statică a mașinilor de lucru care dezvoltă un cuplu constant activ este de forma (fig.2.3):

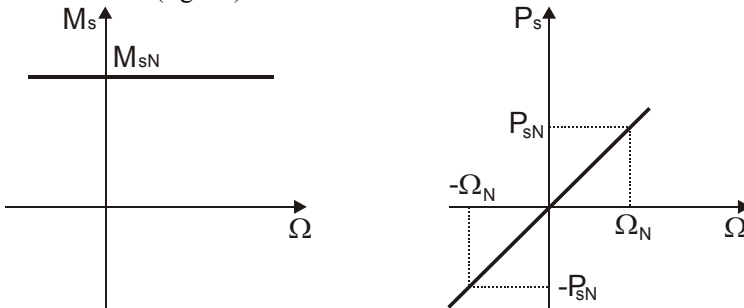


Fig.2.3. Variația cuplului static și a puterii statice în cazul $M_s=M_{sN}$ (activ)

$$M_s = M_{sN} \text{ sau } M_s = K$$

M_{sN} fiind cuplul static nominal al mașinii de lucru.

Puterea statică:

$$P_s = M_s \Omega = P_{sN} \Omega / \Omega_N$$

Deoarece cuplurile statice pasive se opun totdeauna mișcării, caracteristica statică a mașinilor de lucru care dezvoltă cuplu static pasiv este de forma (fig.2.4):

$$M_s = M_{sN} \text{sign} \Omega$$

Puterea statică:

$$P_s = M_s \Omega = P_{sN} \frac{\Omega}{\Omega_N} \text{sign} \Omega$$

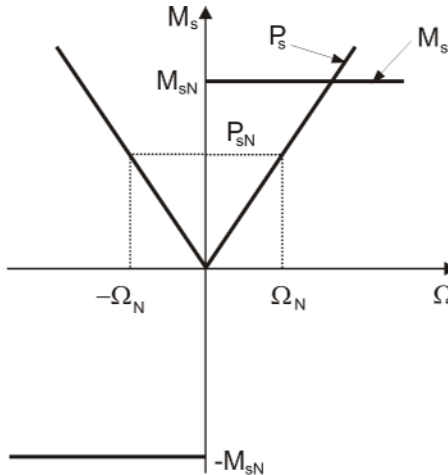


Fig.2.4. Variația cuplului static și a puterii statice în cazul $M_s = M_{sN}$ (pasiv)

Exemple de mașini de lucru care dezvoltă cuplu static constant: instalații de ridicat de mică înălțime, benzi transportoare cu încărcare uniformă, vehicule de transport la deplasarea în aliniament sau rampă cu înclinare constantă, mașini de imprimare, mașini-unelte pentru un regim de așchiere constant.

2.1.3. Cupluri statice dependente de viteza unghiulară [9],[55]

Expresia generală a caracteristicii statice este de forma:

$$M_s = K \Omega^\alpha = K \Omega_N^\alpha \left(\frac{\Omega}{\Omega_N} \right)^\alpha = M_{sN} \left(\frac{\Omega}{\Omega_N} \right)^\alpha$$

exponentul putând lua valori $\alpha = -1 \dots 6$ în funcție de mașina de lucru.

Pentru $\alpha = -1$ ecuația caracteristicii statice este:

$$M_s = M_{sN} \left(\frac{\Omega}{\Omega_N} \right)^{-1} = M_{sN} \frac{\Omega_N}{\Omega}$$

Puterea statică corespunzătoare:

$$P_s = M_s \Omega = M_{sN} \Omega_N = P_{sN}$$

Rezultă că pentru cupluri statice invers proporționale cu viteza, puterea statică cerută de mașina de lucru rămâne constantă (fig.2.5).

Aceste tipuri de caracteristici statice se întâlnesc la mașinile-unelte pe durata unui proces de așchiere: operația de degroșare-viteză mică, cuplu rezistent mare, operația de finisare-viteză mare, cuplu rezistent mic.

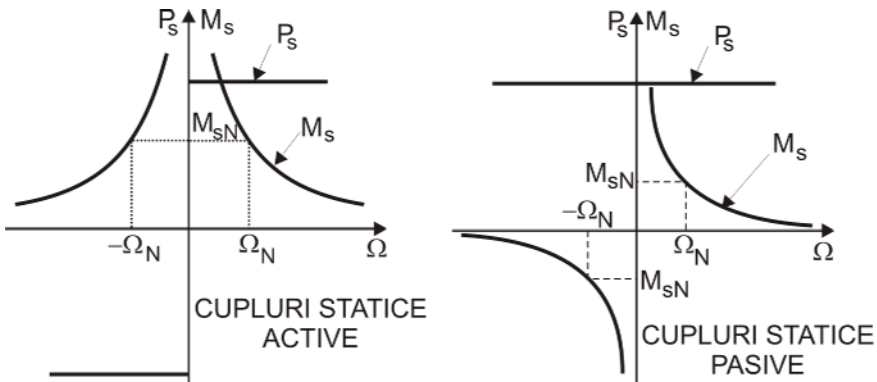


Fig. 2.5. Variația cuplului static și a puterii statice pentru $\alpha = -1$

De asemenea, ele sunt specifice mașinilor de înfășurat sârmă, tablă, fire, hârtie, la care forța de tragere și viteza liniară a produsului trebuie să rămână constantă, pentru ca produsul înfășurat să nu se rupă sau să facă bucle (fig.2.6).

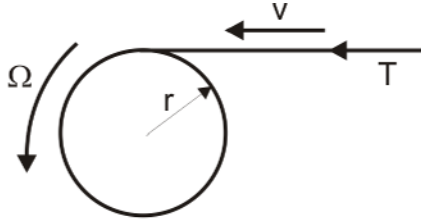


Fig.2.6. Principiul mecanismului de înfășurat

Se știe că:

$$M_s = T r ; v = \Omega r$$

Rezultă

$$M_s = \frac{T v}{\Omega} = \frac{K}{\Omega}$$

Pentru $\alpha = 1$ ecuația caracteristicii devine:

$$M_s = \frac{\Omega}{\Omega_N} M_{sN}$$

Puterea statică:

$$P_s = M_s \Omega = P_{sN} \left(\frac{\Omega}{\Omega_N} \right)^2$$

Aceste caracteristici statice (fig.2.7) sunt specifice mașinilor electrice funcționând în regim de generator debitând pe o sarcină de impedanță constantă.

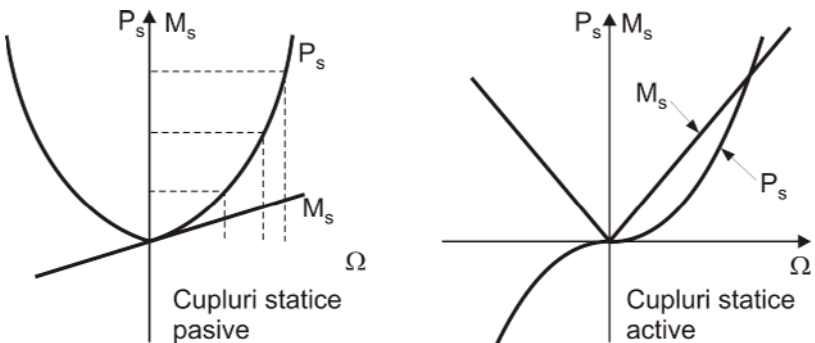


Fig.2.7. Variația cuplului static și a puterii statice pentru $\alpha = 1$

Spre exemplu, în cazul unui generator de curent continuu (fig.2.8) curentul va fi:

$$I = \frac{E}{R_a + R_s} = \frac{k_m \Phi \Omega}{R_a + R_s}$$

Cuplul electromagnetic este:

$$M = k_m \Phi I = \frac{(k_m \Phi)^2 \Omega}{R_a + R_s}$$

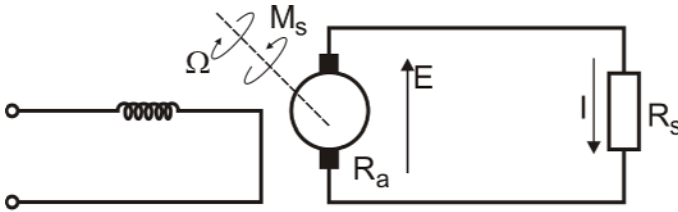


Fig.2.8. Explicativă pentru cuplu static proporțional cu viteza

Pentru $\alpha = 2$ ecuația caracteristicii statice devine:

$$M_s = M_{sN} \left(\frac{\Omega}{\Omega_N} \right)^2$$

Puterea statică:

$$P_s = M_s \Omega = P_{sN} \left(\frac{\Omega}{\Omega_N} \right)^3$$

Aceste caracteristici statice (fig.2.9) sunt specifice ventilatoarelor centrifugale, pompelor centrifugale, propulsoarelor de nave.

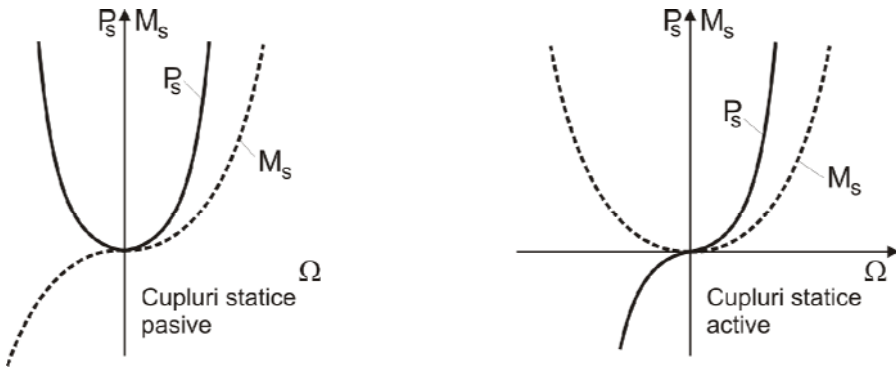


Fig.2.9. Variația cuplului static și a puterii statice pentru $\alpha = 2$

Cuplurile statice proporționale cu viteza Ω la puteri $\alpha = 3 \dots 6$ sunt specifice instalațiilor centrifugale din industria chimică și alimentară.

2.1.4. Cupluri statice dependente de deplasarea liniară [11]

Ecuția caracteristicii statice este de forma:

$$M_s = a + bx$$

Aceste cupluri statice sunt specifice instalațiilor de ridicat de mare înălțime sau de mare adâncime la care greutatea cablului de tracțiune este comparabilă cu greutatea utilă: macarale, ascensoare, instalații de extracție minieră, instalații de foraj, ancora navelor maritime.

Pentru a determina forma explicită a ecuației caracteristicii statice se consideră o instalație de ridicat (fig.2.10) cu roată de fricțiune. Cele două cabine sunt legate de capetele cablului care este trecut peste roata de fricțiune. Rotirea roții de fricțiune cu viteza unghiulară Ω determină deplasarea cabinelor în plan vertical cu viteza v .

Notând cu:

G_V - greutatea unei cabine;

G_U - greutatea utilă;

γ_1 - greutatea pe metru liniar a cablului de tracțiune;

γ_2 - greutatea pe metru liniar a cablului de echilibrare;

forța statică la periferia roții de fricțiune va fi:

$$F_S = F_p - F_g$$

$$F_p = G_V + G_U + \gamma_1(H - x) + x\gamma_2$$

$$F_g = G_V + x\gamma_1 + \gamma_2(H - x),$$

respectiv

$$F_S = G_U + (H - 2x)(\gamma_1 - \gamma_2),$$

iar cuplul static devine:

$$M_s = \frac{1}{2} F_S D = \frac{D}{2} [G_U + (H - 2x)(\gamma_1 - \gamma_2)]$$

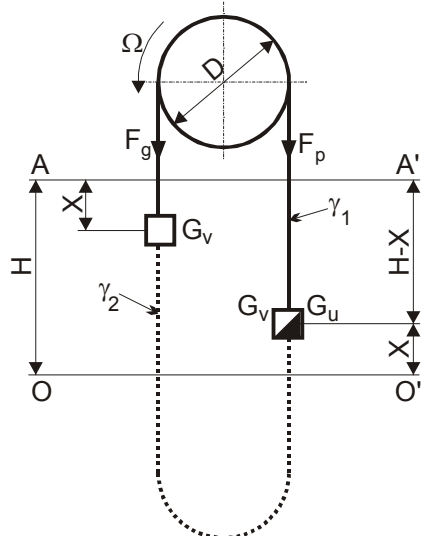


Fig.2.10. Principiul unei instalații de ridicat cu roată de fricțiune

În cazul instalațiilor de ridicat fără cablu de echilibrare (neechilibrate $\gamma_2=0$), ecuația caracteristicii statice (fig.2.11) devine:

$$M_s = \frac{D}{2} [G_U + (H-2x)\gamma_1]$$

Se observă că în acest caz valoarea maximă a cuplului static se obține pentru $x=0$, caracteristica statică având panta negativă.

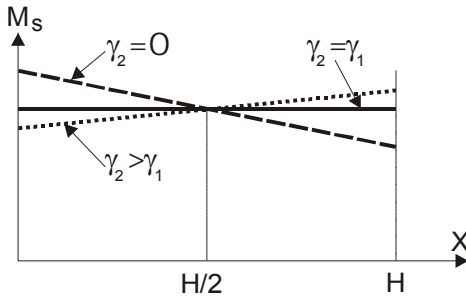


Fig.2.11. Variația cuplului static dependent de spațiul linear

În cazul instalațiilor de ridicat prevăzute cu cablu de echilibrare $\gamma_1=\gamma_2$ (static echilibrate) cuplul static este constant:

$$M_s = \frac{D}{2} G_U$$

iar pentru cele având $\gamma_2 > \gamma_1$ (dinamic echilibrate) caracteristica statică are panta pozitivă, valoarea maximă a cuplului static obținându-se pentru $x = H$,

$$M_s = \frac{D}{2} [G_U + (H-2x)(\gamma_2 - \gamma_1)]$$

În cazul macaralelor, podurilor rulante etc., cablul de ridicare se înfășoară pe tobă într-un strat (fig.2.12) sau în mai multe straturi iar ecuația caracteristicii statice devine:

$$M_s = \frac{D}{2} [G_U + G_V + (H-x)\gamma]$$

Diametrul D poate fi considerat constant la înfășurarea într-un singur strat și variabil la înfășurarea în mai multe straturi.

În cazul instalațiilor de transport pe orizontală (fig.2.13), cuplul are o variație discontinuă, în ipoteza că înclinarea pantei este constantă:

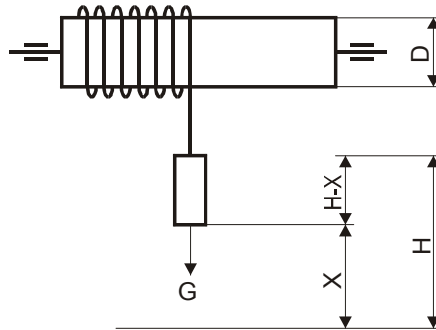


Fig.2.12. Principiul instalației de ridicat cu tobă

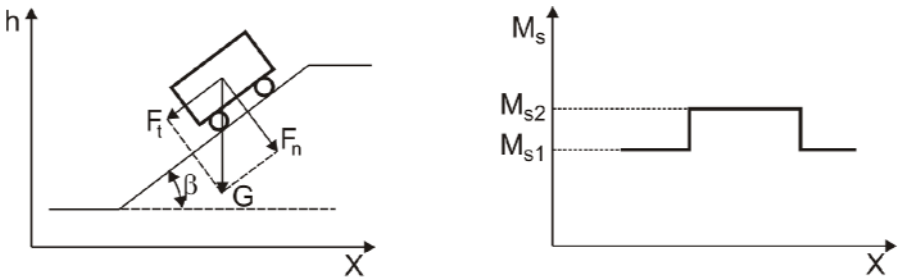


Fig.2.13. Cuplul static al vehiculelor de transport pe orizontală

$$M_s = \mu G \frac{D}{2} \text{ la deplasarea în aliniament;}$$

$$M_s = (\mu G \cos \beta + G \sin \beta) \frac{D}{2} \text{ la deplasarea în pantă;}$$

μ este coeficientul de aderență roată - șină.

2.1.5. Cupluri statice dependente de deplasarea unghiulară [10],[23],[87]

Aceste cupluri statice sunt specifice mașinilor de lucru care au organe de tipul bielă-manivelă cum sunt: pompe și compresoare cu piston, fierăstraie mecanice, prese, foarfeci, puțuri de extracție a țițeiului. Pentru determinarea expresiei caracteristicii statice a acestor mașini de lucru se consideră un mecanism bielă-manivelă (fig.2.14) și forța statică constantă F_s ce acționează pe direcția axei Ox .

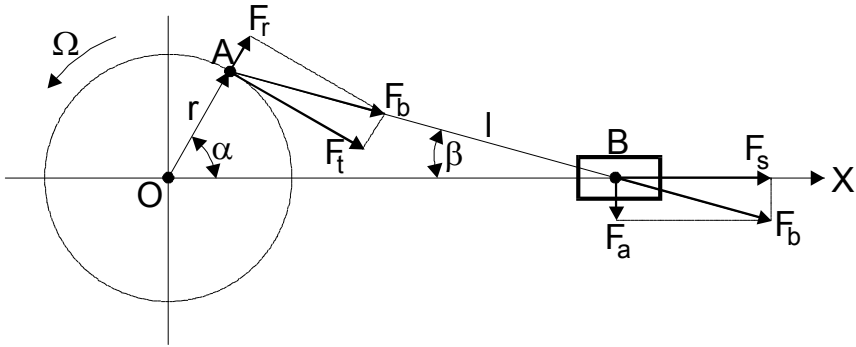


Fig.2.14. Schema mecanismului bielă - manivelă

Aceasta determină o componentă perpendiculară pe axa Ox și o componentă pe direcția bielei,

$$F_b = \frac{F_s}{\cos \beta}$$

care se descompune în punctul de racord al bielei cu manivela în două componente: o componentă radială F_r și o componentă tangențială

$$F_t = F_b \sin(\alpha + \beta)$$

care produce cuplul static

$$M_s = r F_t = r F_s \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\cos \beta} = r F_s \left(\sin \alpha + \frac{\sin \beta}{\cos \beta} \cos \alpha \right)$$

Ținând seama că $\sin \beta = \frac{r}{l} \sin \alpha$ și considerând că $\beta \approx 0$, rezultă:

$$M_s = r F_s \left(\sin \alpha + \frac{1}{2} \frac{r}{l} \sin 2\alpha \right)$$

Pentru $\frac{r}{l} < \frac{1}{5}$ se poate considera că $\tan \beta \approx 0$, iar cuplul static devine:

$$M_s = r F_s \sin \alpha = M_{\max} \sin \alpha$$

Această formă simplificată pune în evidență dependența sinusoidală (fig.2.15) a cuplului static în funcție de poziția unghiulară a manivelei în raport cu axa de referință Ox. Cuplurile statice dependente de deplasarea unghiulară pot avea forme particulare, în funcție de destinația mașinii de lucru.

Astfel, cuplul static dezvoltat de un foarfece de tăiat tablă are o variație în salt pentru o cursă completă și depinde de forma lamelor tăietoare.

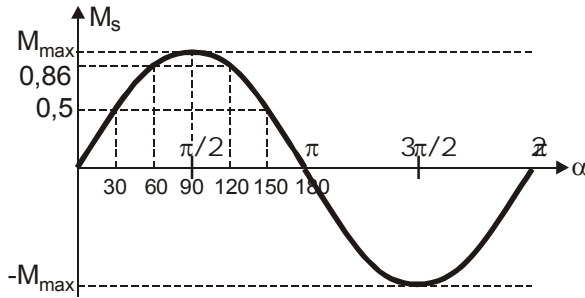


Fig.2.15. Variația cuplului static dependent de spațiul unghiular

2.2. Diagrama cuplului static

2.2.1. Clasificarea mașinilor de lucru în funcție de diagrama cuplului static [74]

Pentru instalațiile care dezvoltă cuplu static dependent de viteză, de deplasarea liniară sau unghiulară, se poate stabili și o dependență în funcție de timp, dacă se cunoaște diagrama vitezei $v=f(t)$, spațiului $x=f(t)$ sau $\alpha=f(t)$. Se obține astfel diagrama cuplului static $m_s=f(t)$ care poate avea diferite forme particulare, în funcție de succesiunea regimurilor de funcționare. Regimurile de funcționare ale unei mașini de lucru se definesc ca ansamblul valorilor variabilelor de intrare - stare - ieșire (cuplu, viteză, putere etc.) care caracterizează funcționarea acestora la un moment dat. Cunoașterea regimurilor de funcționare este necesară pentru alegerea corespunzătoare a mecanismului de transmisie, a motorului electric de acționare și a ansamblului de comandă. Ținând seama de regimul de funcționare, mașinile de lucru se împart în șapte grupe:

1. Mașini de lucru cu funcționare de durată și sarcină constantă.

Timpul de funcționare este mai mare de 10 minute iar sarcina rămâne constantă (fig.2.16) sau se modifică cu cel mult 10-20 % în jurul unei valori medii. În această categorie intră: pompele și ventilatoarele antrenate la viteză constantă, mașinile de fabricat hârtie, benzile transportoare, magistralele din cariere.



Fig.2.16. Diagrama cuplului static pentru regimul de durată cu sarcină constantă

2. Mașini de lucru cu funcționare de durată și sarcină variabilă.

Timpul de funcționare este mai mare de 10 minute iar sarcina se modifică în timp (fig.2.17). Duratele t_i și cuplurile M_{Si} se pot modifica de la un ciclu la altul. Din această categorie fac parte: macaralele, ascensoarele, vehiculele de transport, laminoarele reversibile, majoritatea mașinilor-unelte.

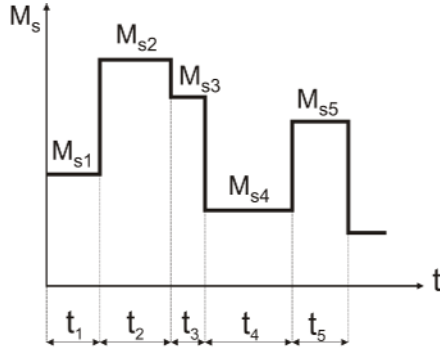


Fig.2.17. Diagrama cuplului static pentru regimul de durată cu sarcină variabilă

3. Mașini de lucru cu funcționare de durată și șocuri de sarcină

Timpul de lucru este mai mare de 10 minute, intervalele de funcționare la sarcină constantă alternează cu intervalele de funcționare în gol sau la sarcină redusă (fig.2.18), $M_{s\max}/M_{s0} \geq 3$.

Exemple: prese, ciocane mecanice pentru forje, gatere etc.

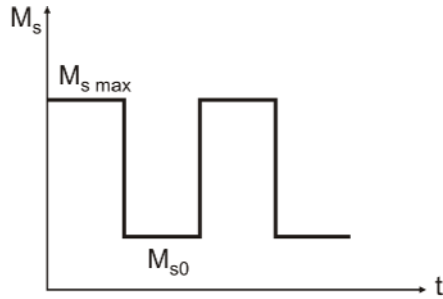


Fig.2.18. Diagrama cuplului static pentru regimul de durată și șocuri de sarcină

4. Mașini de lucru cu funcționare de durată și sarcină pulsatorie

Timpul de funcționare este mai mare de 10 minute iar mașina de lucru conține ca organ principal un mecanism bielă-manivelă (fig.2.19).

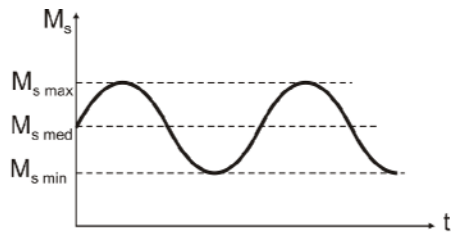


Fig.2.19. Diagrama cuplului static pentru regimul de durată cu sarcină pulsatorie

5. Mașini de lucru cu funcționare de durată și sarcină aleatorie

Timpul de funcționare este mai mare de 10 minute iar sarcina are o variație aleatorie (fig.2.20). Aceste cupluri se întâlnesc la instalațiile de foraj, excavatoarele cu rotor cu cupe, fierăstraiele de tăiat lemne, defibratoarele din industria textilă, morile cu bile, malaxoare.

Pentru a putea obține o expresie analitică a acestor caracteristici statice ele se pot înlocui prin funcții empirice, liniare sau neliniare, determinate prin tratarea matematică a datelor experimentale.

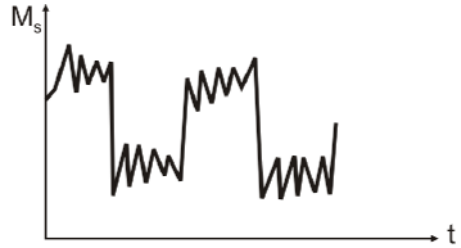


Fig.2.20. Diagrama cuplului static pentru regimul de durată cu sarcină aleatorie

6. Mașini de lucru cu funcționare intermitentă

Regimul de funcționare este format dintr-o succesiune de cicluri identice, fiecare ciclu fiind format dintr-un interval de lucru t_l la sarcină constantă și un interval de pauză t_p (fig.2.21). Durata unui ciclu $t_c = t_p + t_l$ este mai mică de 10 minute. Pentru regimul de funcționare intermitent se definește durata relativă de funcționare:

$$DF \% = \frac{t_l}{t_c} 100\%$$

În funcție de valoarea duratei relative, regimurile de funcționare pot fi:

- regim de funcționare ușor, $10\% < DF\% \leq 25\%$;
- regim de funcționare mediu, $25\% < DF\% \leq 60\%$;
- regim de funcționare greu, $60\% < DF\% \leq 80\%$.

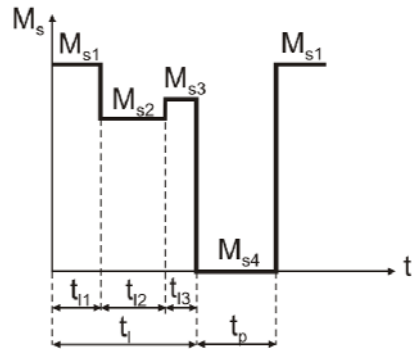
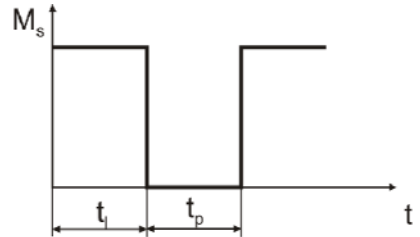


Fig.2.21. Diagrama cuplului static pentru regimul intermitent

Dacă $DF > 80 \%$ sau t_c este mai mare de 10 minute, se consideră că, regimul de funcționare este de durată. Din această grupă fac parte instalațiile de ridicat materiale (instalații de extracție cu schip), mașinile-unelte automate care efectuează o singură operație etc.

7. Mașini de lucru cu funcționare de scurtă durată

Regimul de scurtă durată este format dintr-o succesiune de cicluri (fig.2.22). Fiecare ciclu are durata de 10, 30, 60, 90 minute și este format dintr-un interval de lucru la sarcină constantă t_l și un interval de pauză t_p , durata relativă de funcționare $DF \% < 10 \%$.

Exemple: polizoare industriale, macazuri de cale ferată, stăvilarele ecluzelor, dispozitive de strângere ale mașinilor-unelte etc..

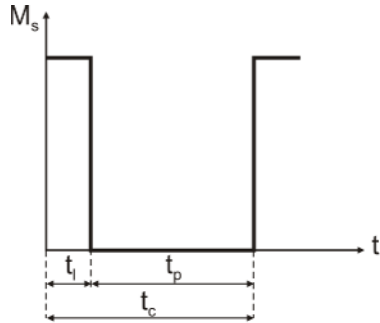


Fig.2.22. Diagrama cuplului static pentru regimul de scurtă durată

3. ECUAȚIILE DE BAZĂ ALE MIȘCĂRII ÎN SISTEMELE DE ACȚIONARE ELECTROMECHANICĂ

3.1. Ecuația fundamentală a mișcării [13], [37]

Expresia analitică prin care se descrie interdependența funcțională dintre parametrii motorului electric de acționare și ai mașinii de lucru este cunoscută sub numele de ecuația fundamentală a mișcării. Se consideră o acționare (fig.3.1) formată din motorul electric ME și mașina de lucru ML cuplate rigid între ele.

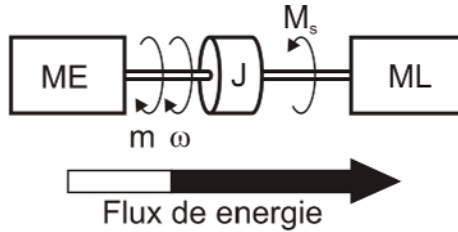


Fig.3.1. Schema de principiu a unei acționări cu cuplaj rigid

Mașina de lucru dezvoltă cuplul static M_s pentru învingerea căruia motorul dezvoltă cuplul M . Dacă cele două cupluri sunt egale și de sens contrar $M=M_s$ sau $M-M_s=0$ acționarea funcționează în regim staționar. Se poate spune că punctul de funcționare staționară se obține la intersecția caracteristicii statice a motorului cu caracteristica statică a mașinii de lucru (fig.3.2a).

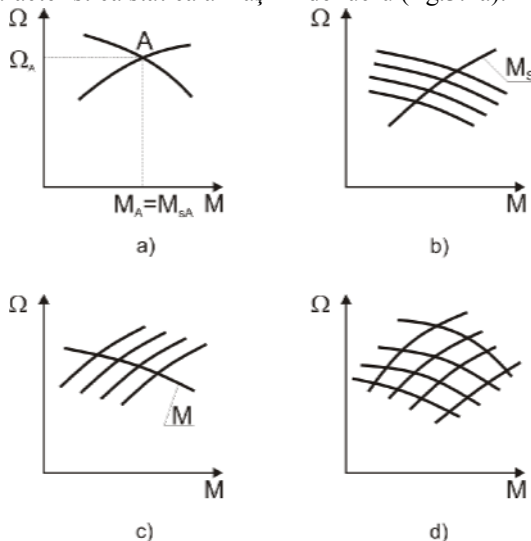


Fig.3.2. Explicativă privind punctul de funcționare staționară

Dacă în timpul procesului tehnologic se reglează viteza acționării, punctele de funcționare aparțin unei porțiuni a caracteristicii statice a mașinii de lucru (fig.3.2b). Dacă în timpul procesului tehnologic se schimbă poziția caracteristicii statice a mașinii de lucru, locul geometric al punctelor de funcționare aparține unei porțiuni din caracteristica mecanică a motorului de acționare (fig.3.2c).

Dacă în timpul procesului tehnologic se modifică atât caracteristica statică a mașinii de lucru cât și cea a motorului de acționare, locul geometric al punctelor de funcționare staționară este o suprafață în planul $MO\Omega$ (fig.3.2d). Trecerea de la un regim staționar caracterizat de o anumită viteză la un alt regim staționar caracterizat de o altă viteză se numește regim tranzitoriu sau regim dinamic.

În timpul regimului tranzitoriu se modifică energia totală a sistemului, iar variația energiei în timp reprezintă puterea dinamică. Pentru sistemul considerat, energia potențială $W_p=0$ și deci:

$$P_d = \frac{d}{dt} W_c = \frac{d}{dt} \left(J \frac{\omega^2}{2} \right) = J \omega \left(\frac{d\omega}{dt} \right) + \frac{1}{2} \omega^2 \frac{dJ}{dt} = J \omega \frac{d\omega}{dt} + \frac{1}{2} \omega^3 \frac{dJ}{d\alpha}$$

Cuplul corespunzător puterii dinamice se numește cuplu dinamic,

$$m_d = \frac{P_d}{\omega} = J \frac{d\omega}{dt} + \frac{1}{2} \omega^2 \frac{dJ}{d\alpha}$$

unde J este momentul de inerție al întregului sistem de acționare. Dacă momentul de inerție este constant, atunci:

$$m_d = J \frac{d\omega}{dt}$$

În aceste condiții ecuația de echilibru a cuplurilor devine:

$$m = m_s + J \frac{d\omega}{dt}$$

și reprezintă ecuația fundamentală a mișcării.

Din analiza ecuației mișcării, ce poate fi considerată diagrama de sarcină a motorului, rezultă:

$$- \text{dacă } m > m_s, \frac{d\omega}{dt} > 0 \quad \text{sistemul accelerează, } m = m_s + m_d;$$

- dacă $m < m_s$, $\frac{d\omega}{dt} < 0$ sistemul decelerează, $m = m_s - m_d$;

- dacă $M = M_s$, $\Omega = \text{ct}$, $\frac{d\omega}{dt} = 0$ sistemul funcționează în regim staționar;

- dacă cuplul static este activ și se pornește motorul din starea de repaus în sensul coborârii greutateii: $m = m_s - m_d$;

- dacă decelerarea se face prin aducerea motorului în regim frână electromagnetică: $-m = m_s - m_d$ adică $m_d = m_s + m$.

În cazul mișcării de translație, energia cinetică este:

$$W_c = \frac{1}{2} m_a v^2$$

unde m_a este masa întregului sistem, iar puterea dinamică este:

$$P_d = \frac{d}{dt} W_c = m_a v \frac{dv}{dt} + \frac{v^2}{2} \frac{dm_a}{dt} = m_a v \frac{dv}{dt} + \frac{v^3}{2} \frac{dm_a}{dx}$$

Forța dinamică corespunzătoare:

$$f_d = \frac{P_d}{v} = m_a \frac{dv}{dt} + \frac{v^2}{2} \frac{dm_a}{dx}$$

iar ecuația fundamentală a mișcării de translație este:

$$f = f_s + f_d.$$

3.2. Raportarea cuplurilor statice și a forțelor statice

Deoarece ecuația fundamentală a mișcării este valabilă numai dacă ME și ML se rotesc cu aceeași viteză unghiulară, este necesar ca în cazul sistemelor cu mecanisme de transmisie să se facă raportarea cuplurilor statice la un arbore comun, de regulă arborele motorului electric. Raportarea cuplurilor statice se face pe baza condiției de conservare a puterii.

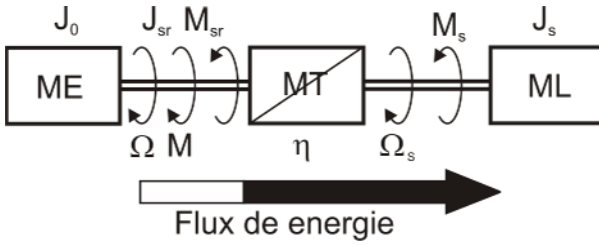


Fig.3.3. Explicativă pentru raportarea cuplurilor statice și a momentelor de inerție

Ținând seama de notațiile din fig.3.3 rezultă că:

$$M_{sr} \Omega = \frac{1}{\eta} M_s \Omega_s$$

de unde:

$$M_{sr} = \frac{1}{\eta} \frac{1}{i} M_s$$

raportul de transmisie fiind definit prin expresia $i = \Omega / \Omega_s$. Dacă energia este transmisă de la mașina de lucru la motorul electric, randamentul trece la numărător și diferă de η ,

$$M_{sr} = \frac{\eta}{i} M_s.$$

Dacă trebuie raportate mai multe cupluri statice,

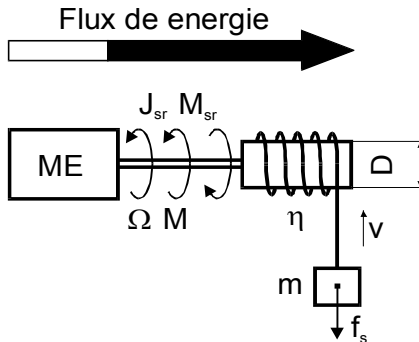


Fig.3.4. Explicativă pentru raportarea forțelor statice și a maselor în mișcare de translație

$$M_{sr} = \sum_{j=1}^n \frac{M_{sj}}{i_j \eta_j}.$$

În cazul mișcării de translație, ecuația de conservare a puterilor devine (fig.3.4):

$$M_{sr} \Omega = F_s v \frac{1}{\eta},$$

de unde:

$$M_{sr} = \frac{1}{\eta} F_s \frac{v}{\Omega}.$$

3.3. Raportarea momentelor de inerție și a maselor

Raportarea momentelor de inerție se face pe baza condiției de conservare a energiei cinetice:

$$J_{sr} \frac{\Omega^2}{2} = J_s \frac{\Omega_s^2}{2} \frac{1}{\eta},$$

de unde

$$J_{sr} = J_s \frac{1}{\eta} \frac{1}{i^2}.$$

Dacă fluxul de energie este dirijat de la mașina de lucru la motor, atunci:

$$J_{sr} = J_s \frac{\eta}{i^2}.$$

În cazul mișcării de translație condiția de conservare a energiei este:

$$J_{sr} \frac{\Omega^2}{2} = m_a \frac{v^2}{2},$$

de unde:

$$J_{sr} = m_a \left(\frac{v}{\Omega} \right)^2 \frac{1}{\eta}.$$

Dacă fluxul de energie este de la ML la ME, atunci:

$$J_{sr} = m_a \left(\frac{v}{\Omega} \right)^2 \eta'.$$

Ținând seama că la mașina de lucru unele organe se găsesc în mișcare de rotație, iar altele în mișcare de translație, expresia generală de calcul a momentului de inerție total raportat la arborele motorului devine:

$$J_{sr} = J_0 + \sum_{j=1}^n \prod_{p=1}^r J_{sj} \frac{1}{\eta_p} \frac{1}{i_p^2} + \sum_{k=1}^q m_{ak} \frac{v_k^2}{\Omega^2} \frac{1}{\eta_k},$$

unde J_0 este momentul de inerție al rotorului motorului și al elementelor cuplate direct pe acesta și care se rotesc cu viteza unghiulară Ω .

3.4. Diagramele de mișcare ale elementelor acționărilor electromecanice [25]

La calculul diagramei de sarcină a motorului $m=f(t)$, pe baza ecuației fundamentale a mișcării, este necesar să se cunoască diagrama cuplului static $m_s=f(t)$ precum și diagrama vitezei sau a accelerației într-un ciclu complet, pentru calculul cuplului dinamic $m_d=f(t)$. Calculul elementelor diagramelor de mișcare se face dacă se cunoaște sau se impune una din dependențele:

- | | |
|--------------------------|------------------------|
| - accelerația liniară | $a=f_1(t)$; |
| - viteza liniară | $v=f_2(t)$; |
| - spațiul liniar | $x=f_3(t)$; |
| - accelerația unghiulară | $\varepsilon=f_4(t)$; |
| - viteza unghiulară | $\omega=f_5(t)$; |
| - spațiul unghiular | $\alpha=f_6(t)$; |
| - șocul | $s=f_7(t)$; |

pe baza următoarelor relații diferențiale dintre aceste elemente:

$$v = \frac{dx}{dt} ; \quad \omega = \frac{d\alpha}{dt} ; \quad a = \frac{dv}{dt} ;$$

$$\varepsilon = \frac{d\omega}{dt} ; \quad s = \frac{da}{dt} ; \quad s = \frac{d\varepsilon}{dt} ,$$

respectiv pe baza relațiilor integrale:

$$a = \int s dt + c_1 ; \quad \varepsilon = \int s dt + c_2 ; \quad v = \int a dt + c_3 ;$$

$$\omega = \int \varepsilon dt + c_4 ; \quad x = \int v dt + c_5 ; \quad \alpha = \int \omega dt + c_6 .$$

La calculul elementelor diagramelor de mișcare trebuie ținut cont de:

- condițiile inițiale și finale (viteza inițială, viteza finală, spațiul final etc.);
- restricțiile impuse de instalație sau procesul tehnologic $v \leq v_{\max}$, $a \leq a_{\max}$, $s \leq s_{\max}$ etc.;
- indicele de performanță: productivitate maximă, șoc minim, pierderi minime, consum minim de energie.

3.4.1. Diagramele de mișcare în cazul tahogramelor trapezoidale

La majoritatea acționărilor electromecanice se pot distinge în diagrama vitezei (tahograma) pe durata unui ciclu de funcționare patru intervale (fig.3.5):

- un interval de pornire t_p ;
- un interval de funcționare în regim stabilizat t_s ;
- un interval de decelerare t_d ;
- un interval de repaus t_0 .

Timpul unui ciclu se definește prin suma:

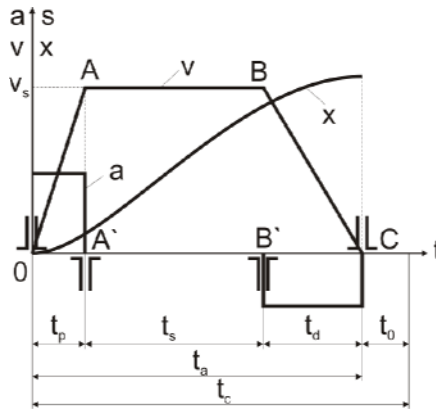


Fig.3.5. Elementele diagramelor cinematice

$$t_c = t_p + t_s + t_d + t_0;$$

iar timpul activ prin suma:

$$t_a = t_p + t_s + t_d.$$

Conform tahogramei considerate, în intervalul de pornire, viteza crește liniar de la zero la valoarea staționară $v = a_p t$.

Pe baza relațiilor fundamentale se poate determina modul de variație al celorlalte elemente ale diagramei de mișcare în intervalul de pornire:

- accelerația: $a = \frac{dv}{dt} = a_p$;

- spațiul: $x = \int v dt + x_0 = \frac{1}{2} a_p t^2 + x_0 ;$

- șocul: $s = \frac{da}{dt}$

are o variație sub formă de impuls la începutul și sfârșitul intervalului de pornire și este nul în interiorul acestui interval. Constanta de integrare x_0 se determină din condițiile inițiale:

$$t=0, x=0 \Rightarrow x_0=0.$$

Spațiul total parcurs în acest interval va fi:

$$x_p = \frac{1}{2} a_p t_p^2$$

și este proporțional cu suprafața triunghiului OAA'.

În intervalul de funcționare în regim stabilizat viteza rămâne constantă $v=v_s$, accelerația este nulă $a=0$, șocul este nul $s=0$, iar spațiul:

$$x = \int v dt + x_1 = v_s t + x_1 .$$

Constanta de integrare x_1 se determină din condiția finală pentru spațiul de pornire:

$$t=t_p, x=x_p \Rightarrow x_1=x_p-v_s t_p.$$

Spațiul parcurs în acest interval $x_s=v_s t_s$ este proporțional cu suprafața dreptunghiului ABB'A', iar spațiul total parcurs la sfârșitul acestui interval

$$x_{ps}=v_s t_s+x_p.$$

În intervalul de decelerare viteza descrește liniar de la valoarea staționară la zero:

$$v = - a_d t + v_1.$$

Accelerația:

$$a = \frac{dv}{dt} = -a_d .$$

Spațiul:

$$x = \int v dt + x_2 = \int (-a_d t + v_1) dt + x_2 = -\frac{1}{2} a_d t^2 + v_1 t + x_2 .$$

Șocul are o variație sub formă de impuls la începutul și sfârșitul intervalului de decelerare și este nul în interiorul acestuia. Constantele de integrare v_1 și x_2 se determină din condițiile inițiale pentru intervalul de decelerare:

$$t = t_p + t_s, v = v_s, x = x_{ps} = x_p + x_s .$$

Rezultă:

$$v_1 = v_s + a_d (t_p + t_s);$$

$$x_2 = x_{ps} + \frac{1}{2} a_d (t_p + t_s)^2 - v_s (t_p + t_s) - a_d (t_p + t_s)^2;$$

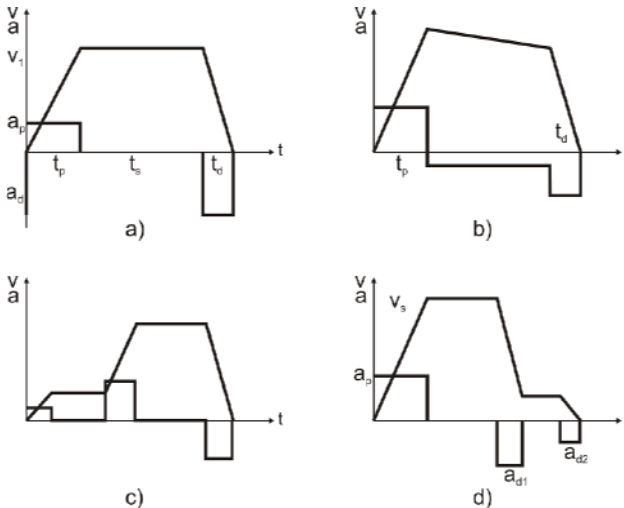
$$x_2 = x_{ps} - \frac{1}{2} a_d (t_p + t_s)^2 - v_s (t_p + t_s).$$

Spațiul parcurs în acest interval:

$$x_d = \frac{1}{2} a_d t_d^2$$

și este proporțional cu suprafața triunghiului BCB'. Dacă accelerația și decelerația sunt egale în valoare absolută, tahograma are forma unui trapez isoscel.

În practică se întâlnesc și alte tipuri de tahograme trapezoidale sau cu trei perioade. Astfel, în cele mai multe cazuri, accelerația și decelerația nu sunt egale (fig.3.6a). De asemenea, este posibil ca, după intervalul de pornire, viteza să aibă o descreștere lentă, așa cum este cazul tramvaielor inerțiale (fig.3.6b). În alte cazuri



3.6. Forme particulare de tahograme trapezoidale

(laminoare de sârmă sau de tablă), se distinge un interval de pornire până la o viteză redusă în care are loc prinderea laminatului pe tamburul de înfășurare, după care urmează un interval de accelerare până la viteza de regim (fig.3.6c) sau, în

cazul sistemelor de poziționare, intervalul de funcționare la o viteză redusă apare la sfârșitul ciclului, pentru creșterea preciziei de poziționare (fig.3.6d).

Tahogramele trapezoidale au avantajul că se pot obține cu dispozitive de comandă simple, dar au dezavantajul că în punctele de discontinuitate ale diagramei vitezei șocul are valori foarte mari, cu influențe negative asupra elementelor mecanice din instalație și senzații neplăcute asupra oamenilor.

3.4.2. Tahograme optime

a) Tahograme pentru mărirea productivității

Pentru utilizarea eficientă a unei instalații trebuie ca productivitatea acesteia să fie maximă. O metodă de mărire a productivității este reducerea timpului ciclului de funcționare cu menținerea spațiului ce trebuie parcurs. Pentru determinarea tahogramei optime din punct de vedere al productivității, în lipsa restricțiilor impuse vitezei, accelerației și șocului, se pornește de la o tahogramă trapezoidală și se pune condiția ca timpul activ să fie minim. Se observă că spațiul total H este proporțional cu suprafața trapezului $OABC$ (fig.3.5).

$$H = \frac{t_a + t_a - t_p - t_d}{2} v.$$

Ținând seama că:

$$t_p = \frac{v}{a_p}; \quad t_d = \frac{v}{a_d},$$

rezultă:

$$H = t_a v - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{a_p} + \frac{1}{a_d} \right) v^2,$$

respectiv

$$t_a = \frac{H}{v} + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{a_p} + \frac{1}{a_d} \right) v.$$

Pentru determinarea timpului minim se pune condiția:

$$\frac{dt_a}{dv} = 0;$$

$$\frac{dt_a}{dv} = -\frac{H}{v^2} + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{a_p} + \frac{1}{a_d} \right) = 0.$$

Valoarea optimă a vitezei este:

$$v_{\text{opt}} = \sqrt{\frac{2H}{\frac{1}{a_p} + \frac{1}{a_d}}}$$

iar timpul minim este:

$$t_{a0} = \sqrt{2H \left(\frac{1}{a_p} + \frac{1}{a_d} \right)}$$

În ipoteza că accelerația și decelerația sunt egale $a_p = a_d$ rezultă:

- viteza optimă:

$$v_{\text{opt}} = \sqrt{H a_p}$$

- timpul minim:

$$t_{a0} = \sqrt{4H \frac{1}{a_p}}$$

Din ultima relație se explicitează spațiul total și, prin câteva transformări, se obține:

$$H = \frac{1}{2} v_{\text{opt}} t_{\text{opt}}$$

Acesta este proporțional cu suprafața unui triunghi având înălțimea egală cu viteza optimă și baza egală cu timpul optim (fig.3.7). Din forma tahogramei rezultă că sistemul se află în permanență în regim tranzitoriu, ceea ce nu convine

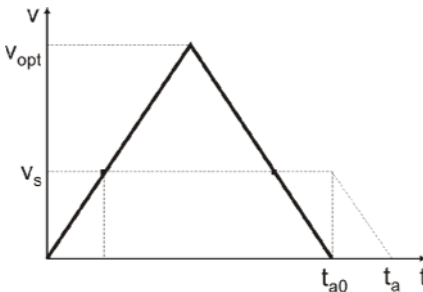


Fig.3.7. Tahogram[cu timp activ minim



Fig.3.8. Tahograma unei mașini de lucru cu curs[de revenire

din punct de vedere al încălzirii motorului, iar uneori, nici din punct de vedere al funcționării mașinii de lucru, așa cum este cazul mașinilor unelte la care, în timpul generării unei suprafețe, viteza piesei sau sculei trebuie să rămână constantă pentru ca rugozitatea să fie uniformă. Totuși, această tahogramă se utilizează la mașinile de lucru având cursa de revenire fără proces tehnologic (fig.3.8).

b) Tahograme cu șoc limitat

Pentru a diminua efectele șocului este necesar ca accelerația să evolueze după o lege cu grad mai mare decât zero: trapezoidală (fig.3.9), parabolică (fig.3.10) sau sinusoidală (fig.3.11).

Metodica de calcul a celorlalte elemente ale diagramelor cinematice este asemănătoare cu cele prezentate anterior. Relațiile pentru calculul elementelor diagramelor cinematice sunt prezentate sintetic sub formă de scheme logice (fig.3.12 și fig.3.13) care permit transpunerea ușoară pe un sistem de calcul.

Variantele de calcul țin seama de parametrii cunoscuți. Astfel, în cazul accelerației parabolice, pot apărea trei situații dacă se impun șocul și accelerația, șocul și viteza, accelerația și viteza. Spațiul total rămâne, evident, același.

În cazul accelerației sinusoidale pot fi puse în evidență patru variante dacă se impun șocul și viteza, accelerația și viteza, șocul și accelerația, șocul și timpii de accelerare, respectiv decelerare.

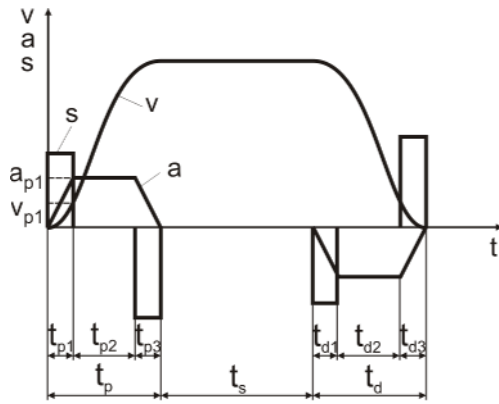


Fig.3.9. Diagramele cinematice pentru accelerație trapezoidală

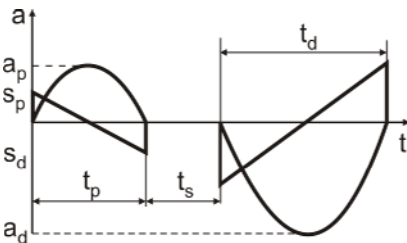


Fig.3.10. Diagrama accelerației parabolice

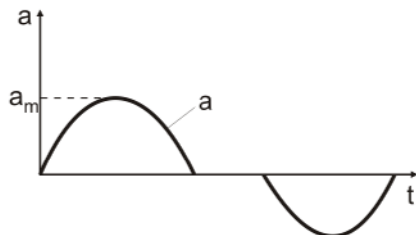


Fig.3.11. Diagrama accelerației sinusoidale