COMANDA OPTIMALĂ A SISTEMELOR DE POZIȚIONARE CU MOTOR DE CURENT CONTINUU, CU PIERDERI MINIME DE ENERGIE

Prof. dr. ing. Gheorghe MANOLEA,
Universitatea din Craiova

Absolvent al Universității din Petroşani, 1970, doctor inginer din anul 1981; profesor la Universitatea din Craiova, Facultatea de Electromecanică. Conducător de doctorat în domeniul inginerie electrică. Director al Centrului de Inovare şi Transfer Tehnologic. Domenii de competență: sisteme automate de acționare electromecanică, transfer tehnologic, proprietate industrială.

Drd. ing. Ionel-Laurențiu ALBOTEANU,
Universitatea din Craiova

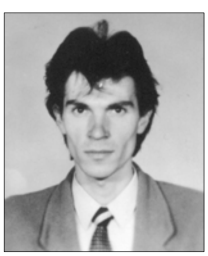
Absolvent al Universității din Craiova, Facultatea de Electromecanică, 2004; absolvent de studii masterale „Sisteme electromecanice complexe”. Domenii de interes: energii regenerabile, sisteme automate de acționare electromecanică. În prezent este doctorand cu frecvență în domeniul ingineriei electrice şi cadru didactic la Facultatea de Electromecanică.

Drd. ing. Cătălin NEDELCUȚ,
Centrului de Implementare a Invențiilor – Craiova

Absolvent al Universității din Craiova, Facultatea de Electromecanică, 1994. În prezent este cercetător ştiințific în cadrul Centrului de Implementare a Invențiilor Craiova şi doctorand cu frecvență în domeniul ingineriei electrice.

Asist. drd. ing. Florin RAVIGAN,
Universitatea din Craiova

Absolvent al Facultății de Electromecanică din cadrul Universității din Craiova, instituție la care desfăşoară din anul 2000 activități didactice din domeniile tehnologiilor neconvenționale, acționărilor electromecanice, liniilor flexibile şi roboți industriali, fiind doctorand în domeniul sistemelor neconvenționale de conducere în robotică.



Drd. ing. Remus MĂTUŞA,
PROMAT – Craiova

Absolvent al Facultății de Electrotehnică a Universității din Craiova, 1998. Este specialist în automatizări şi sisteme industriale de gestiune şi control electronic. În prezent este director tehnic la Promat Craiova.

REZUMAT

Lucrarea prezintă o metodă de analiză privind comanda optimală a sistemelor de poziționare cu motor de curent continuu în vederea reducerii pierderilor de energie electrică. Se utilizează „metoda calculului variațional”.

ABSTRACT

The paper presents one method concerning the optimal command of positioning systems with D.C. motor for reduction of the electric energy loss. It used of the "variables calculus method".

1. INTRODUCERE

Pentru a răspunde cerinţelor impuse de procesul tehnologic a fost necesară transferarea sarcinilor de comandă şi conducere a sistemelor de acţionare electrică de la operatorul uman unor echipamente specializate, care să asigure regimul de lucru dorit, cu atingerea unor performanţe şi ţinându-se seama de toate limitările impuse de sistemul de acţionare.

2. DEFINIREA PROBLEMEI DE OPTIMIZARE

Problema de optimizare implică următoarele aspecte: un sistem de acţionare a cărui funcţionare trebuie optimizată; un obiectiv urmărit; o mulţime a comenzilor care să asigure atingerea obiectivului; datele problemei de optimizare; o măsură a eficienţei comenzii în condiţiile date.

Obiectivul urmărit îl reprezintă creşterea randamentului sistemului, prin reducerea pierderilor energetice.

Datele problemei de optimizare sunt reprezentate de: modelul matematic al sistemului de acţionare; restricţiile impuse comenzilor, variabilelor de stare şi de ieşire; indicele de performanţă, care reprezintă măsura eficienţei comenzii.

Modelul abstract este reprezentat de ecuaţiile de funcţionare în regim staţionar.

Restricţiile pot fi de tip egalitate:

$$gi([x(t)],[u(t)],[p]=0) \tag{1}$$

Indicele de performanţă are în general forma:

$$I = L([x(t)],[u(t)],[p] + M([x(t)],[u(t)],[p])), \tag{2}$$

unde: $[x(t)]$ este vectorul variabilelor de stare; $[u(t)]$ – vectorul variabilelor de comandă; $[p]$ – vectorul parametrilor sistemului.

Vom considera un sistem de poziţionare cu motor de curent continuu (fig.1). Obiectivul pe care dorim să-l atingem este acela de a determina evoluţia tensiunii de alimentare a indusului motorului de curent continuu, astfel încât poziţionarea sistemului să se realizeze cu pierderi minime de energie.

3. REZOLVAREA PROBLEMEI DE OPTIMIZARE CU PIERDERI MINIME DE ENERGIE

Pentru rezolvarea problemei de optimizare, vom utiliza metoda calculului variaţional.

Vom defini modelul abstract al sistemului descris de următoarele ecuaţii:

$$\begin{cases} U_a = R_a I_a + L_a \dfrac{\mathrm{d}I_a}{\mathrm{d}t} + k\Phi_N\omega \\ m = m_s + J\dfrac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} \\ T\dfrac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t} + \theta = \dfrac{R}{A} I_a^2 \\ Q = \int_0^{t_f} R_a I_a^2 \mathrm{d}t \\ h = \int \omega \mathrm{d}t \end{cases} \tag{3}$$

Se adoptă ca mărimi de bază:

– valorile nominale pentru tensiune U_N, curent I_N, flux Φ_N;

– rezistenţa nominală:

$$R_N = \frac{U_N}{I_N} \tag{4}$$

– viteza de funcţionare în gol ideal:

$$\Omega_0 = \frac{U_N}{k\Phi_N} \tag{5}$$

– constanta mecanică de timp:

$$T_M = \frac{J\Omega_0}{M_N} \tag{6}$$

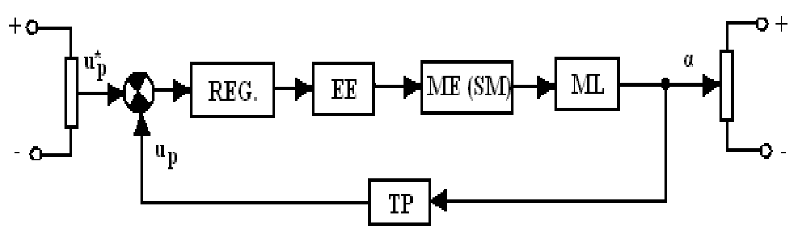


Fig. 1. Structura clasică a sistemului de poziţionare.

– spațiul parcurs de rotor, dacă se roteşte cu viteza Ω_0 un timp T_M:

$$H = \int_0^{T_M} \Omega_0 \mathrm{d}t = \Omega_0 T_M \tag{7}$$

– cantitatea de căldură produsă de curentul nominal I_N, dacă parcurge rezistența rotorului un timp T_M:

$$Q_N = R_a I_N^2 T_M \tag{8}$$

Prin raportarea mărimilor absolute la mărimile de bază, se obțin mărimile relative următoare:

$$\begin{gathered} i = \frac{I_a}{I_N},\ \nu = \frac{\omega}{\Omega_N},\ \varphi = \frac{\Phi}{\Phi_N}, \\ \mathrm{m} = \frac{m}{M_N},\ \tau = \frac{t}{T_M},\ \tau_f = \frac{t_f}{T_M}, \\ \alpha = \frac{h}{H},\ \theta = \frac{Q}{Q_N},\ \rho = \frac{R_a}{R_N},\ u_a = \frac{U_a}{U_N} \end{gathered} \tag{9}$$

Cu aceste notații, modelul abstract în unități relative devine:

$$\begin{cases} u_a = \rho\, i + \rho \dfrac{T_a}{T_M}\dfrac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}\tau} + \nu \\ i = \mu_s + \dfrac{\mathrm{d}\nu}{\mathrm{d}\tau} \end{cases} \tag{10}$$

Ținând seama că pierderile minime determină o încălzire minimă, în aceleaşi condiții de ventilație, se adoptă indicele de performanță pătratic:

$$I_1 = \int_0^{\tau_f} i^2(\tau)\mathrm{d}\tau = \min \tag{11}$$

şi restricțiile: $|i| \le 1;\ \nu(0) = \nu(T) = 0;\ \int_0^T \nu \mathrm{d}\tau = \alpha_d$ – spațiul impus.

Rezultă indicele de performanță global:

$$I_g = \int_0^{\tau_f} \left(i^2 + \lambda_1 \nu\right)\mathrm{d}\tau \tag{12}$$

unde: λ_1 este coeficient de pondere. În aceste condiții, funcționala Lagrange este de forma:

$$L = i^2 + \lambda_1 \nu \tag{13}$$

Considerând $\mu_s = 0$ şi $\varphi = 1$, rezultă că:

$$\frac{\partial \nu}{\partial \tau} = i \tag{14}$$

iar condiția Euler de minimizare a integralei devine:

$$\frac{\partial L}{\partial \nu} - \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}\tau}\left(\frac{\partial L}{\partial i}\right) = 0 \tag{15}$$

În final se obține:

$$\lambda_1 - 2\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}\tau} = 0 \tag{16}$$

iar prin integrare se obține:

$$i(\tau) = \frac{1}{2}\lambda_1 \tau + C_1 \tag{17}$$

Considerând $\mu_s = 0$, rezultă din (10):

$$\frac{\partial \nu}{\partial \tau} = i(\tau) \tag{18}$$

Deci:

$$\frac{\mathrm{d}\nu}{\mathrm{d}\tau} = \frac{1}{2}\lambda_1 \tau + C_1 \tag{19}$$

Integrând această ecuație se obține legea de variație a vitezei

$$\nu(\tau) = \frac{1}{2}\lambda_1 \tau^2 + C_1 \tau + C_2 \tag{20}$$

Ținând seama de condițiile inițiale şi finale, rezultă valorile constantelor:

$$\begin{gathered} C_2 = 0 \\ C_1 = \frac{6\alpha_d}{\tau_f^2};\ \lambda_1 = -\frac{24\alpha_d}{\tau_f^3} \end{gathered} \tag{21}$$

Înlocuind valorile constantelor şi factorul de pondere se obțin legile de variație ale variabilelor de comandă şi de stare (fig. 2).

• ***Variația curentului.*** Considerând curentul ca o mărime de comandă, rezultă legea de comandă optimală a motorului pentru a obține pierderi minime:

$$i(\tau) = -\frac{12\alpha_d}{\tau_f^3}\tau + \frac{6\alpha_d}{\tau_f^2} \tag{22}$$

• ***Variația vitezei:***

$$\nu(\tau) = -\frac{6\alpha_d}{\tau_f^3}\tau^2 + \frac{6\alpha_d}{\tau_f^2}\tau \tag{23}$$

• ***Variația tensiunii.*** Legea de variație a tensiunii care asigură obținerea curentului determinat se obține din ecuația de echilibru a tensiunii din circuitul indusului, în ipoteza $T_a = \dfrac{L_a}{R_a} = 0$:

$$u_a = \rho\left(-\frac{12\alpha_d}{\tau_f^3} + \frac{6\alpha_d}{\tau_f^2}\right) - \frac{6\alpha_d}{\tau_f^3}\tau^2 + \frac{6\alpha_d}{\tau_f^2}\tau \tag{24}$$

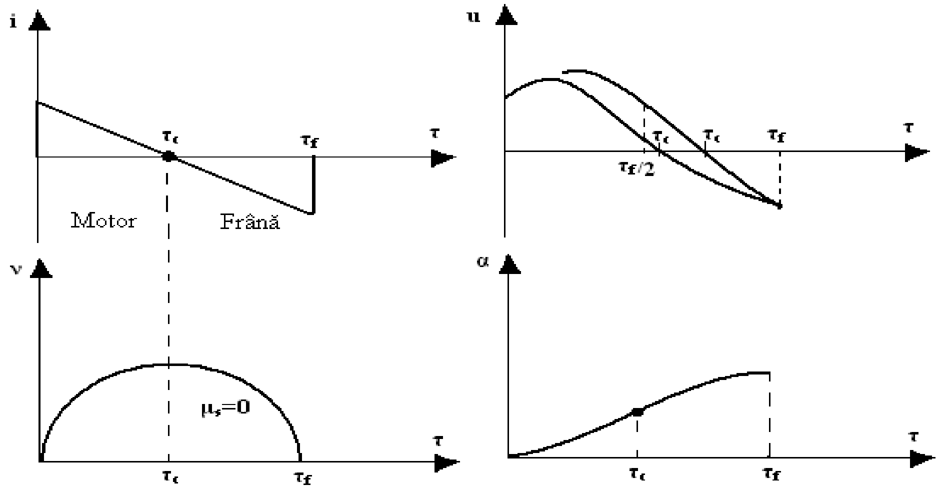


Fig. 2. Legea de variaţie a variabilelor de stare şi de comandă

• ***Variaţia spaţiului:***

$$a(t)=\int n\,dt=\int\left(-\frac{6a_d}{t_f^3}t^2+\frac{6a_d}{t_f^2}t\right)dt= \\ =-\frac{2a_d}{t_f^3}t^3+\frac{3a_d}{t_f^2}t^2+C_3 \qquad (25)$$

dacă: $t=0$; $a=0$, atunci $C_3=0$

• ***Căldura produsă:***

$$q(t)=\int_0^{t_f}\left(-\frac{12a_d}{t_f^3}t+\frac{6a_d}{t_f^2}\right)^2 dt=\frac{12a_d^2}{t_f^3} \qquad (26)$$

Din analiza diagramei din figura 2, rezultă că:

– în intervalul $(0,t_f/2), u_a>0, n>0, i>0$, motorul funcţionează în regim de antrenare;

– în intervalul $(t_f/2,t_c), u_a>0, n>0, i<0$, servomotorul funcţionează în regim de frână recuperativă;

– în intervalul $(t_c,t_f), u_a<0, n>0, i<0$, servomotorul funcţionează în regim de frână contracurent (fig. 3).

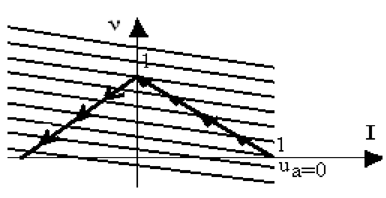


Fig. 3. Deplasarea punctului de funcţionare în planul stărilor.

4. CONCLUZII

Având în vedere cele prezentate, rezultă următoarele concluzii privind structura sistemului: redresorul trebuie să fie de tipul „pentru patru cadrane"; mărimea prescrisă la intrarea sistemului evoluează după o lege asemănătoare cu tensiunea ce trebuie aplicată motorului pentru poziţionarea cu pierderi minime; variabila de reacţie controlată trebuie să fie viteza unghiulară sau tensiunea la bornele indusului.

BIBLIOGRAFIE

1. **Manolea Gh.,** *Sisteme automate de acţionare electromecanică*, Editura Universitaria Craiova, 2004.
2. **Manolea Gh., Drighiciu M.A., Ravigan Fl.,** *The optimal command for the servosystem's position in minimal time.* CNAE, Galaţi, 2002.
3. **Manolea Gh.,** *Loss function optimal control of the posstioning servomotors with static torque proportional to the speed*, AMC'02, Maribor, Slovenia, 2002.
4. **Manolea Gh., Drighiciu M.A., Bălăşoiu T**., *Optimal control of system driving with static torque having a positive component dependent upon space*, OPTIM'94, Braşov, 1994.
5. **Morar Al.,** *Bipolar stepper motor control and drive with dedicated Ics*, E.E.A., vol 53, nr. 1, 2005.
6. **Popescu Mr.,** *Comanda optimală a accelerării acţionărilor electrice cu cuplu static dependent de viteză conform criteriului energetic cu timp final liber*, E.E.A., vol 53, nr. 1., 2005.