

ANALIZA SENSIBILITĂȚII UNUI SISTEM DE REGLARE AUTOMATĂ

Prof. dr. ing. Ștefan Ungureanu

ing. Corneliu Petrilă

Asistent ing. Fiorina Ungureanu

Facultatea de Chimie Industrială

Universitatea Tehnică "Gh. Asachi" Iași

Rezumat: Lucrarea prezintă rezultatele aplicării analizei de sensibilitate la un sistem de reglare automată. Se apreciază importanța relativă a diverșilor parametri dinamici ai buclei, din punct de vedere al influențelor pe care le au asupra calității procesului de reglare. Graficele obținute pentru coeficienții sensibilităților adimensionale ale criteriilor integrale de calitate ale sistemului de reglare (IAE, ISE, ITAE, ITSE) în raport cu parametrii procesului și ai regulatorului sunt utile atât pentru acordarea optimă a regulatorului, cât și pentru estimarea parametrilor procesului.

Cuvinte cheie: analiza de sensibilitate, sistem de reglare automată, criterii integrale de calitate.

1. Introducere

1.1 Analiza generală de sensibilitate

Analiza de sensibilitate este un instrument modern pentru aprofundarea cunoașterii comportării unui sistem de orice natură ar fi acesta: tehnic, economic, biologic, social ș.a. Ea stabilește gradul și sensul în care variații relativ mici ale valorilor unor mărimi caracteristice ale sistemului, considerate independente, influențează comportarea sa în timp și/sau spațiu. În esență, dacă desfășurarea unui proces (comportarea unui sistem) descrisă de traiectoriile stării și ale ieșirii în coordonate temporale și/sau spațiale, suferă modificări semnificative la abateri, relativ mici, ale unui parametru, de pildă, de la valoarea sa nominală, vom spune că procesul (sistemul) este "sensibil" în raport cu parametrul respectiv.

Expresia cantitativă a sensibilității este "funcția (coeficientul) de sensibilitate", S_{α}^{Ω} și exprimă gradul în care variațiile mici ale mărimii α , considerată independentă, influențează valorile altei mărimi, Ω , considerată dependentă:

$$S_{\alpha}^{\Omega} = \frac{\Delta \Omega}{\Delta \alpha} \quad (1)$$

Pentru ierarhizarea mai multor mărimi independente α_i , $i = \overline{1, n}$ după influența pe care o au asupra aceleiași mărimi dependente Ω , se

utilizează "funcții de sensibilitate relativă (adimensională)", S_{α}^{Ω} :

$$S_{\alpha_i}^{\Omega} = \frac{\partial \ln \Omega}{\partial \ln \alpha_i} = S_{\alpha_i}^{\Omega} \frac{\alpha_i}{\Omega} \quad i = \overline{1, n} \quad (2)$$

Vom preciza semnificația atributelor de "independent" și "dependent", folosite în analiza de sensibilitate, plecând de la modelul matematic, sub forma ecuațiilor vectoriale de stare și de ieșire, al unui sistem determinist, dinamic, cu parametri concentrați, invariant, uniform și continuu:

$$\begin{cases} \dot{\bar{x}} = \bar{f}(\bar{x}, \bar{u}, \bar{p}, \tau) \\ \bar{x}(\tau) = \bar{x}_0 \\ \bar{y} = \bar{g}(\bar{x}, \bar{u}, \bar{p}, \tau) \end{cases} \quad (3)$$

unde:

- $\bar{x}(\tau) \in \mathcal{R}^n$ - vectorul mărimilor de stare
- $\bar{u}(\tau) \in \mathcal{R}^l$ - vectorul mărimilor de intrare (comandă)
- $\bar{p} \in \mathcal{R}^m$ - vectorul parametrilor
- $\bar{y}(\tau) \in \mathcal{R}^r$ - vectorul mărimilor de ieșire.

Comanda $\bar{u}(\tau)$ determină trecerea sistemului (3), dacă acesta este stabil, de la starea inițială, $\bar{x}_0 = \bar{x}(\tau_0)$, corespunzătoare momentului inițial $\tau = \tau_0$, la starea finală $\bar{x}_f = \bar{x}(\tau_f)$, corespunzătoare momentului final $\tau = \tau_f$, pe traiectoria $\bar{x}(\tau)$ - soluție ecuația (3):

$$\begin{cases} \bar{x} = \bar{x}(\bar{x}_0, \bar{u}, \bar{p}, \tau_0, \tau) \\ \bar{y} = \bar{y}(\bar{x}_0, \bar{u}, \bar{p}, \tau_0, \tau) \end{cases} \quad (4)$$

Dacă intrările \bar{u} sunt invariante în timp, ele pot fi tratate ca parametri. Se notează cu \bar{q} vectorul

format prin juxtapunerea vectorilor \bar{x}_0 , \bar{u} și \bar{p} , numindu-l "vector al parametrilor generali". De asemenea, se introduce vectorul \bar{w} care, după caz, este $\bar{w} \equiv \bar{x}$ sau $\bar{w} \equiv \bar{y}$. Cu aceste notații soluțiile (4) se scriu:

$$\bar{w} = \bar{w}(q, \tau_0, \tau) \quad (5)$$

Se ia în considerare mulțimea $M = \{\bar{w}, \bar{q}\}$. În principiu, formal, din punctul de vedere al analizei de sensibilitate, oricare dintre elementele mulțimii M poate fi mărime independentă sau mărime dependentă. Ținând cont de această observație, analiza generală de sensibilitate, AGS, este divizată în două categorii:

- analiza sensibilității elementare, ASE, la care mărimi independente sunt $\bar{\alpha} \equiv \bar{q}$, iar mărimi dependente, $\bar{\Omega} \equiv \bar{w}$, obținând matrici ale funcțiilor de sensibilitate de forma $\bar{S}_q^w(\tau)$;

- analiza sensibilităților derivate, ASD, la care mărimi independente sunt unele elemente din \bar{w} sau, respectiv, din \bar{q} , $\alpha_i \equiv w_i$ sau q_j , iar mărimi dependente -

$$\bar{S}_p^x(\tau) = \left[S_{p_j}^{x_i}(\tau) \right] \quad i = \bar{1}, n, \quad j = \bar{1}, m$$

matricea funcțiilor de sensibilitate parametrică a stării

$$\bar{S}_p^y(\tau) = \left[S_{p_j}^{y_i}(\tau) \right] \quad i = \bar{1}, r, \quad j = \bar{1}, m$$

matricea funcțiilor de sensibilitate parametrică a mărimilor de ieșire

$$\bar{f}_x = \left[\frac{\partial f_i}{\partial x_j} \right], \quad \bar{f}_p = \left[\frac{\partial f_i}{\partial p_k} \right] \quad i = \bar{1}, n, \quad j = \bar{1}, n, \quad k = \bar{1}, m$$

matricile jacobiene ale funcției vectoriale \bar{f} în raport cu \bar{x} și \bar{p} , respectiv

$$\bar{g}_x = \left[\frac{\partial g_i}{\partial x_j} \right], \quad \bar{g}_p = \left[\frac{\partial g_i}{\partial p_k} \right] \quad i = \bar{1}, r, \quad j = \bar{1}, n, \quad k = \bar{1}, m$$

matricile jacobiene ale funcției vectoriale \bar{g} în raport cu \bar{x} și \bar{p} , respectiv.

celelalte elemente din \bar{q} , respectiv, \bar{w} , $\Omega = q_k$ sau w_l obținând funcții de sensibilitate de formele:

$$S_{w_l}^{q_k}(\tau), \quad S_{q_j}^{q_k}(\tau), \quad S_{w_l}^{w_i}(\tau).$$

1.2 Metode de calcul în analiza de sensibilitate

Pentru calculul funcțiilor de sensibilitate ale sistemelor dinamice au fost elaborate, dezvoltate și aplicate, în ultimii ani, metode bine puse la punct: metoda diferențială directă (Direct Differential Method, DDM) sau metoda ecuațiilor de sensibilitate, metoda funcției Green (Green's Function Method, GFM) cu varianta AIM (The Analytically Integrated Magnus Method) ș.a. [1].

Se dau, în continuare, reperele principale ale algoritmului metodei ecuațiilor de sensibilitate pentru analiza sensibilității parametrică.

Pentru un sistem dinamic, descris de modelul matematic dat de ecuația (3), matricile ecuațiilor de sensibilitate ale stării și ale ieșirilor în raport cu parametrii (sensibilitate parametrică) sunt [2]:

$$\begin{cases} \dot{\bar{S}}_p^x(\tau) = \bar{f}_x(\bar{x}, \bar{u}, \bar{p}, \tau) \cdot \bar{S}_p^x + \bar{f}_p & (6) \\ \bar{S}_p^x(\tau_0) = \bar{0} \\ \bar{S}_p^y(\tau) = \bar{g}_x(\bar{x}, \bar{u}, \bar{p}, \tau) \cdot \bar{S}_p^x + \bar{g}_p(\bar{x}, \bar{u}, \bar{p}, \tau) & (7) \end{cases}$$

în care:

Integrarea sistemului de ecuații de sensibilitate (6), (7) se efectuează simultan cu cea a modelului matematic (3). Descrierea detaliată și schema algoritmului metodei funcțiilor de sensibilitate este expusă în [2].

1.3 Stadiul actual al analizei de sensibilitate a buclelor de reglare automată

Analiza de sensibilitate a sistemelor de reglare automată este orientată către calculul și interpretarea unei funcții de sensibilitate, care exprimă influența modificărilor relative ale funcției de transfer al procesului $G_p(\bar{p}, s)$ asupra funcției de transfer al întregii bucle $G_{or}(\bar{p}, s)$ (figura 1) [3,4].

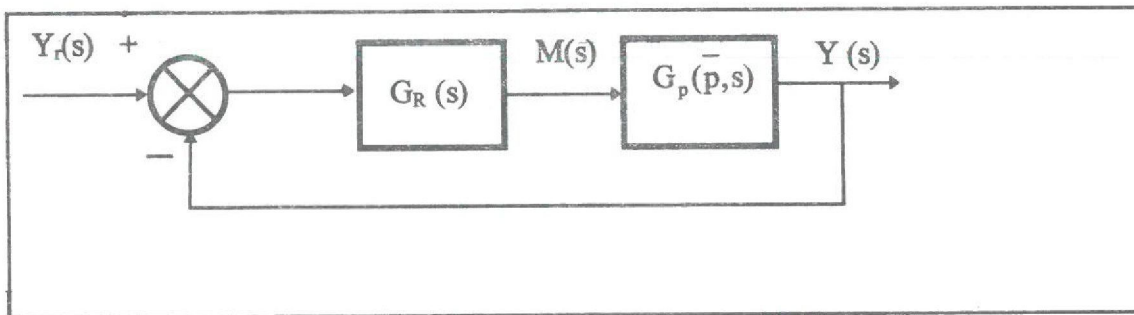


Figura 1. Schema bloc a unui sistem de reglare

Această funcție de sensibilitate, notată $S_{or}^*(s)$, este definită prin relația (8):

$$S_{or}^*(s) = S_{Gp}^{*Gor}(s) \triangleq \frac{d \ln G_{or}(\bar{p}, s)}{d \ln G_p(\bar{p}, s)} = \frac{d G_{or}(\bar{p}, s)}{d G_p(\bar{p}, s)} \cdot \frac{G_p(\bar{p}, s)}{G_{or}(\bar{p}, s)} \quad (8)$$

Cu condițiile:

- funcția de transfer a regulatorului, $G_R(s)$ este invariantă;
- structura și ordinul modelului matematic al procesului sunt cunoscute și sunt invariante;
- singurele elemente care se modifică sunt parametrii procesului, \bar{p} ; modificările sunt lente în comparație cu dinamica buclei, astfel încât procesul poate fi privit ca quasi-invariant în timp.

În aceste condiții, funcția de sensibilitate $S_{or}^*(s)$ are expresia:

$$S_{or}^*(s) = \frac{1}{1 + G_R(s)G_p(\bar{p}, s)} \quad (9)$$

Utilizând relația (9) se poate calcula, în domeniul complex, sensibilitatea transformatei Laplace a parametrului reglat $Y(s)$ în raport cu parametrul procesului:

$$S_{p_i}^{*Y}(s) = G_R(s) [S_{or}^*(s)]^2 \frac{\partial G_p(\bar{p}, s)}{\partial p_i} \quad (10)$$

$$Y_r(s) \cdot \frac{p_i}{Y(s)}, \quad i = \overline{1, m}$$

Informațiile obținute prin funcția de sensibilitate (9) sunt prea generale și vagi. Funcția de sensibilitate $S_{p_i}^{*Y}(s)$, dată de ecuația (10), deși mai precisă decât (9), are următoarele inconveniente:

- pentru obținerea $S_{p_i}^{*Y}(\tau)$ trebuie găsită $\mathcal{L}^{-1}[S_{p_i}^{*Y}(s)]$;
- calculează numai funcții de sensibilitate elementară iar, dintre acestea, doar sensibilitatea parametrului reglat în raport numai cu parametrul procesului;
- ia în considerare numai problema **servo** a reglării automate;
- nu se poate calcula sensibilitatea unor criterii globale de calitate a procesului de reglare, de tipul IAE, ISE, ITAE, ITSE.

Alături de aceste inconveniente, trebuie remarcate și avantajele:

- obținerea unor funcții de sensibilitate sub formă analitică, având deci un grad mai ridicat de generalitate;
- cu unele completări s-ar putea calcula și sensibilitatea parametrului reglat, în raport cu parametrul regulatorului și, probabil, sensibilitatea parametrului reglat al buclei pentru cazul complet - "servo" și "reglare".

Studiul sensibilității buclei de reglare, cu metodele de calcul deja cunoscute, poate oferi informații mult mai precise și mai complete atât în ceea ce privește sensibilitatea elementară, cât și sensibilitățile derivate, atât ale parametrului reglat, cât și ale criteriilor integrale de calitate a procesului de reglare.

Un astfel de studiu apare destul de târziu, ținând cont de faptul că, pentru prima oară, conceptul de "coeficient de sensibilitate" a fost folosit de Bode (1945) [5] cu referire tocmai la bucla de reglare. Dezvoltarea ulterioară a analizei generale de sensibilitate s-a orientat cu precădere către sisteme dinamice de ordin general, cu aplicații în domenii foarte diverse, mai puțin cel al reglării automate. În momentul de față, există o bogată literatură științifică în care este tratată, de exemplu, analiza de sensibilitate a sistemelor dinamice chimice și chimico-ingineresti.

În cele ce urmează, se aplică teoria analizei generale de sensibilitate la determinarea sensibilităților parametrice ale mărimii reglate și ale criteriilor integrale de calitate în cazul unei bucle particulare de reglare automată.

2. Analiza sensibilității parametrice a unui sistem de reglare automată (SRA)

2.1 Modelul matematic al SRA

Fie sistemul particular de reglare automată descris de schema de elemente din figura 2.

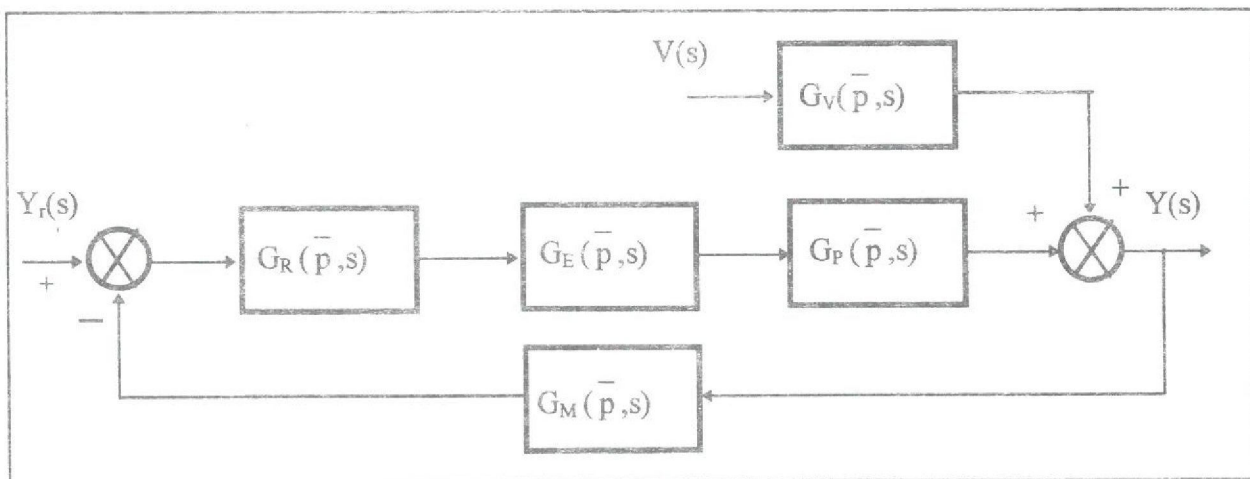


Figura 2. Schema bloc detaliaiă a SRA considerat

în care:

$$G_R(\bar{p}, s) = k_R \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) \quad \text{funcția}$$

de transfer a regulatorului PID

$$G_E(\bar{p}, s) = k_E \quad \text{funcția de transfer a elementului de execuție}$$

$$G_P(\bar{p}, s) = \frac{k_P}{T_P^2 s^2 + 2\xi T_P s + 1} \quad \text{funcția de transfer a procesului în raport cu variabila manipulată}$$

(11)

$$G_V(\bar{p}, s) = \frac{k_V}{T_V s + 1} \quad \text{funcția de transfer a procesului în raport cu variabila perturbatoare}$$

$$G_M(\bar{p}, s) = \frac{k_M}{T_M s + 1} \quad \text{funcția de transfer a aparatului de măsură pe calea de reacție}$$

Se tratează cazul reglării automate de stabilizare, $y_r(\tau) = \text{const.} = 0$; funcția de transfer echivalentă a SRA, $G_{ov}(s)$, între mărimea reglată $Y(s)$ și mărimea perturbatoare, $V(s)$, este:

$$G_{OV}(\bar{p}, s) = \frac{G_V(\bar{p}, s)}{1 + G_R(\bar{p}, s) \cdot G_P(\bar{p}, s) \cdot G_E(\bar{p}, s) \cdot G_M(\bar{p}, s)} \quad (12)$$

După aplicarea ecuațiilor (11) în (12), $G_{OV}(s)$ este adus la forma:

$$G_{OV}(\bar{p}, s) = \frac{b_4 s^4 + b_3 s^3 + b_2 s^2 + b_1 s + b_0}{s^5 + a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0} \quad (13)$$

cu:

$$a_0 = \frac{kk_M}{T_I T_P^2 T_M T_V},$$

$$k = k_R k_E k_P \quad b_0 = 0$$

$$a_1 = \frac{kk_M}{T_I T_P^2 T_M} + \frac{1 + kk_M}{T_P^2 T_M T_V},$$

$$b_1 = \frac{k_V}{T_P^2 T_M T_V}$$

$$a_2 = \frac{1 + kk_M}{T_P^2 T_M} + \frac{T_M + 2\zeta T_P + kk_M T_D}{T_P^2 T_M T_V},$$

$$b_2 = \frac{k_V (2\zeta T_P + T_M)}{T_P T_M T_V}$$

$$a_3 = \frac{T_M + 2\zeta T_P + kk_M T_D}{T_P^2 T_M} + \frac{2\zeta T_M + T_P}{T_P T_M T_V},$$

$$b_3 = \frac{k_V (2\zeta T_M + T_P)}{T_P T_M T_V}$$

$$a_4 = \frac{2\zeta}{T_P} + \frac{1}{T_M} + \frac{1}{T_V}, \quad b_4 = \frac{k_V}{T_V} \quad (14)$$

Folosind variabilele generalizate Lur'e drept variabile de stare, funcția de transfer (13) are drept corespondent ecuația vectorială de stare (15) - sistem de ecuații liniare [6], [7], caz particular al modelului (3):

$$\begin{cases} \dot{\bar{x}} = \bar{A}(\bar{p}) \cdot \bar{x} + \bar{B}(\bar{p}) \cdot \bar{u} \\ \bar{y} = \bar{C}(\bar{p}) \cdot \bar{x} + \bar{D}(\bar{p}) \bar{u} \end{cases} \quad (15)$$

unde:

$$\bar{x} = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5]^T$$

$$\bar{u} = v \quad \bar{y} = x_5$$

$$\bar{p} = [k \ k_M \ k_V \ T_I \ T_D \ T_P \ T_V \ T_M \ \zeta]^T$$

$$\bar{A}(\bar{p}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -a_0(\bar{p}) \\ 1 & 0 & 0 & 0 & -a_1(\bar{p}) \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -a_2(\bar{p}) \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -a_3(\bar{p}) \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -a_4(\bar{p}) \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\bar{B}(\bar{p}) = [b_0(\bar{p}) \ b_1(\bar{p}) \ b_2(\bar{p}) \ b_3(\bar{p}) \ b_4(\bar{p})]^T$$

De remarcat că în forma (15), modelul matematic conține ca o variabilă de stare, mărimea reglată ($y = x_5$).

Pentru a introduce criteriile integrale de calitate a procesului de reglare în modelul matematic (15), acestea se asimilează cu variabile de stare.

- Integrala pătratului abaterii (ISE - Integral of the Square of the Error):

$$x_6 = ISE = \int_0^{\tau} \Delta y^2(\tau) d\tau = \int_0^{\tau} x_5^2(\tau) d\tau; \quad (17)$$

- Integrala valorii absolute a abaterii (IAE - Integral of the Absolute Value of the Error):

$$x_7 = IAE = \int_0^{\tau} |\Delta y(\tau)| d\tau = \int_0^{\tau} |x_5(\tau)| d\tau \quad (18)$$

- Integrala pătratului abaterii, ponderată în timp (ITSE - Integral of the Time-weighted Square Error):

$$x_8 = ITSE = \int_0^{\tau} \Delta y^2(\tau) \tau d\tau = \int_0^{\tau} x_5^2(\tau) \tau d\tau \quad (19)$$

- Integrala abaterii absolute, ponderată în timp (ITAE - Integral of the Time-weighted Absolute Error):

$$x_9 = ITAE = \int_0^{\tau} |\Delta y(\tau)| \tau d\tau = \int_0^{\tau} |x_5(\tau)| \tau d\tau \quad (20)$$

Prin introducerea noilor mărimi de stare, modelul matematic devine neliniar, cu forma dată de sistemul de ecuații:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = f_1 = -a_0(\bar{p})x_5 + b_0(\bar{p}) \cdot v & \dot{x}_6 = f_6 = x_5^2 \\ \dot{x}_2 = f_2 = x_1 - a_1(\bar{p})x_5 + b_1(\bar{p}) \cdot v & \dot{x}_7 = f_7 = |x_5| \\ \dot{x}_3 = f_3 = x_2 - a_2(\bar{p})x_5 + b_2(\bar{p}) \cdot v & \dot{x}_8 = f_8 = x_5^2 \cdot \tau \\ \dot{x}_4 = f_4 = x_3 - a_3(\bar{p})x_5 + b_3(\bar{p}) \cdot v & \dot{x}_9 = f_9 = |x_5| \cdot \tau \\ \dot{x}_5 = f_5 = x_4 - a_4(\bar{p})x_5 + b_4(\bar{p}) \cdot v & y = x_5 \end{cases} \quad (21)$$

2.2 Sensibilitatea parametrică a SRA

Integrarea numerică a modelului matematic (21) împreună cu sistemul de ecuații de sensibilitate (6), (7) a fost făcută cu următoarele valori numerice nominale:

$k_R=0.8$	$k_E=250$	$k_p=0.08$	$k_v=0.02$	$k_M=0.032$
$T_I=3$		$T_p=2.5768$	$T_v=2$	$T_M=0.5$
$T_D=1.5$		$\zeta=0.1668$		

Pentru funcțiile de sensibilitate ale mărimilor care interesează, $x_5(=y)$, $x_6(=ISE)$, $x_7(=IAE)$, $x_8(=ITSE)$, $x_9(=ITAE)$ în raport cu parametrii definiți în relația (16) au fost trasate graficele de evoluție în timp. În figurile 3, 4 și 7 înfățișează cele mai reprezentative dintre aceste grafice.

Privitor la sensibilitatea mărimii reglate y în raport cu principalii parametri ai buclei de reglare se remarcă:

- Toate funcțiile de sensibilitate dimensionale $S_{p_i}^y$, $i = 1, 9$ (figurile 3 și 4) au o variație oscilatorie amortizată, tinzând la zero la sfârșitul regimului tranzitoriu; după primele 2-3 perioade, funcțiile de sensibilitate oscilează cu aceeași frecvență cu care oscilează mărimea reglată, dar cu anumite defazaje. Astfel, funcțiile $S_{T_I}^y(\tau)$ și $S_{T_D}^y(\tau)$ (figura 4) sunt defazate cu 180° față de $y(\tau)$, ceea ce înseamnă că T_I și T_D influențează la fel pe y la un anumit moment τ_1 ; la o creștere a lui T_I și T_D , sistemul răspunde cu o micșorare a lui $y(\tau_1)$, cu excepția punctelor în care graficele trec prin zero. Graficul sensibilității dimensionale $S_k^y(\tau)$ (figura 3) este defazat cu 90° față de graficul $y(\tau)$ ceea ce arată că mărimea reglată este cel mai puternic influențată de K în momentele în care y trece prin zero și

cel mai puțin când graficul $y(\tau)$ trece printr-un maxim pozitiv sau negativ.

- Deoarece $y(t)$ oscilează în jurul abscisei zero, graficele funcțiilor de sensibilitate adimensionale calculate cu relația (2) au discontinuități. Prezintă interes însă graficele sensibilităților adimensionale $S_{p_i}^{*y}(\tau)$ în zona regimului tranzitoriu în care se manifestă abaterea maximă a mărimii reglate y . În figura 5, se dau aceste grafice, iar în figura 6 - graficele coeficienților adimensionali de sensibilitate, corespunzătoare momentului abaterii maxime. Graficele din figura 6 ne arată că abaterea maximă crește o dată cu creșterea factorului de amplificare al procesului în raport cu perturbația K_v și cu creșterea constantei de timp T_p (sensibilități pozitive) și scade la creșterea factorului de amplificare al regulatorului și al lui T_D (sensibilități negative). Aceste comportări sunt cunoscute. Necunoscut este însă gradul în care parametrii influențează abaterea maximă. Analiza de sensibilitate, concentrată în graficele din figura 6, dă și aceste informații cantitative, ce permit ierarhizarea parametrilor după importanța lor. Se remarcă faptul că influența cea mai puternică asupra abaterii maxime o are K_v , urmat de T_p , cu cca 40% mai slab și de K , cu cca 70% mai slab. Parametrii ceilalți (T_I , T_D , T_M , ζ) au influență ne semnificativă practic.

În ceea ce privește sensibilitatea criteriilor de calitate ISE, IAE, ITSE, ITAE în raport cu parametrii p_i , $i = 1, 9$, se observă:

- Aceste criterii având caracter integral, analiza sensibilităților este semnificativă numai la sfârșitul procesului tranzitoriu. Se dă cu titlu de curiozitate evoluția în timp a funcției $S_{p_i}^{*ITAE}(\tau)$ (figura 7).
- În schimb, graficele coeficienților de sensibilitate adimensională ale criteriilor integrale de calitate a procesului de reglare furnizează numeroase și interesante informații (figurile 8-11). Sintetizăm aici câteva dintre ele:
 - * criteriile de tipul ISE și ITSE sunt cel mai puternic influențate de K_v pe când cele de tipul IAE și ITAE, de T_p ;
 - * comparând între ele sensibilitățile criteriilor ISE și IAE, se observă că

importanța parametrilor influenți își schimbă între ei locul în ierarhie: la ISE, K_V este mai important decât T_P iar la IAE, invers; la fel, în ceea ce privește T_I și T_D :

- * criteriul IAE este mai puțin sensibil la parametrii K , K_V , T_I , T_P , și mai sensibil la parametrul ξ , decât criteriul ISE;
- * sensibilitatea cea mai ridicată în raport cu majoritatea parametrilor o are criteriul ITAE, iar cea mai coborâtă, IAE.
- * la criteriile integrale, ponderate în timp, crește importanța parametrilor de tipul constantelor de timp, al timpului integral și al timpului derivativ.

3. Concluzii

Aplicarea metodelor teoriei analizei generale de sensibilitate la studiul unei bucle de reglare a permis determinarea importanței relative a diversilor parametri dinamici ai buclei, din punct de vedere al influențelor pe care le au asupra calității procesului de reglare. Graficele comparative ale coeficienților sensibilităților adimensionale ale criteriilor integrale de calitate a procesului de reglare (IAE, ISE, ITAE, ITSE) pot fi deosebit de utile, cel puțin în următoarele situații:

1. Acordarea optimală a regulatorului PID: odată ales criteriul integral de calitate (din considerente tehnologice), graficele coeficienților de sensibilitate adimensională ne precizează ce parametru dinamic al regulatorului influențează cel mai puternic criteriul integral ales. Vom ști astfel, în acțiunea de acordare, care parametru ($BP\%$, T_I , T_D) trebuie determinat cu mai mare acuratețe și care parametru ne interesează mai puțin.
2. Estimarea parametrilor procesului: graficele funcțiilor, ale coeficienților de sensibilitate parametrică adimensională a variabilei reglate și ale criteriilor integrale de calitate ne vor ghida în alegerea preciziei cu care trebuie estimați, pe cale experimentală, parametrii dinamici ai procesului. În același mod, suntem informați despre influența pe care o au parametrii dinamici ai tractoarelor de măsură și elementelor de execuție asupra aceluiași mărimi caracteristice (y , IAE, ISE, ITAE, ITSE), ceea ce ne

poate determina să alegem anumite tipuri de astfel de elemente.

Lista de simboluri

a_i, b_i - coeficienții polinomiali ai unei funcții de transfer;

$\bar{A}, \bar{B}, \bar{C}, \bar{D}$ - matrici din ecuația vectorială de stare (15);

\bar{f}, \bar{g} - funcții vectoriale;

\bar{f}, \bar{g} - matricile iacobiene ale funcțiilor vectoriale

\bar{f} și \bar{g} ;

$G(s)$ - funcție de transfer;

k_R, T_I, T_D - parametrii regulatorului;

k_E - factorul de amplificare al elementului de execuție;

k_P, T_P, ζ - parametrii procesului în raport cu variabila manipulată;

k_V, T_V - parametrii procesului în raport cu perturbația;

k_M, T_M - parametrii aparatului de măsură;

\bar{p} - vectorul parametrilor;

S_α^Ω - funcția (coeficientul) de sensibilitate a mărimii dependente Ω în raport mărimea independentă α ;

S_α^Ω - funcția de sensibilitate adimensională a mărimii dependente Ω în raport mărimea independentă α ;

S_p^x, S_p^y - matricile de sensibilitate ale stării și ieșirii în raport cu parametri;

\bar{u} - vectorul mărimilor de intrare (comandă);

\bar{x} - vectorul mărimilor de stare;

\bar{y} - vectorul mărimilor de ieșire.

α - mărime independentă;

Ω - mărime dependentă;

τ, τ_i, τ_f - timpul, timpul inițial și timpul final;

$\mathcal{L}, \mathcal{L}^{-1}$ - transformata Laplace și transformata inversă Laplace;

Bibliografie

1. UNGUREANU, ȘT., CURTEANU, S.: Revista de Chimie, vol. 44, nr. 8, 1993, pp. 742 - 749.
2. UNGUREANU, ȘT.: Sensibilitatea sistemelor dinamice, Editura Tehnică, București, 1988.

3. **GOULD, L. A.:** Chemical Process Control, Addison - Wesley Publishing Co., Reading, Massachusetts, 1969.
4. **MORARI, M., ZAFIRIOU, E.:** Robust Process Control, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1989.
5. **BODE, H. W.:** Network Analysis and Feedback Amplifier Design, Van Nostrand, N. Y., 1945.
6. **BOUDAREL, R., DELMAS, J., GUICHET P.:** Commande optimale des processus, Dunod, Paris, I, 1967.
7. **CSÁKI, F.:** State - Space Methods for Control Systems, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1977.

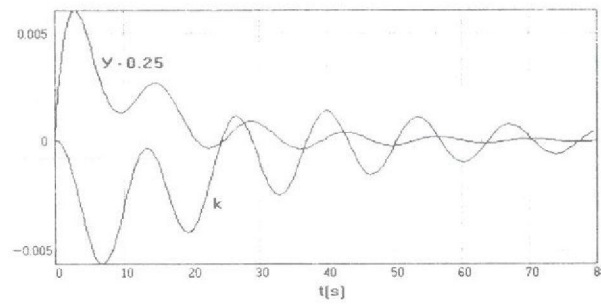


Figura 3. Sensibilitatea parametrului reglat la k

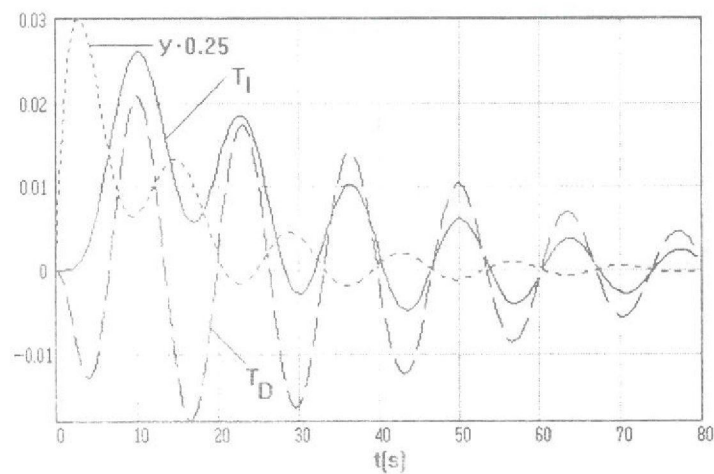


Figura 4. Sensibilitatea parametrului reglat la T_1 și T_D

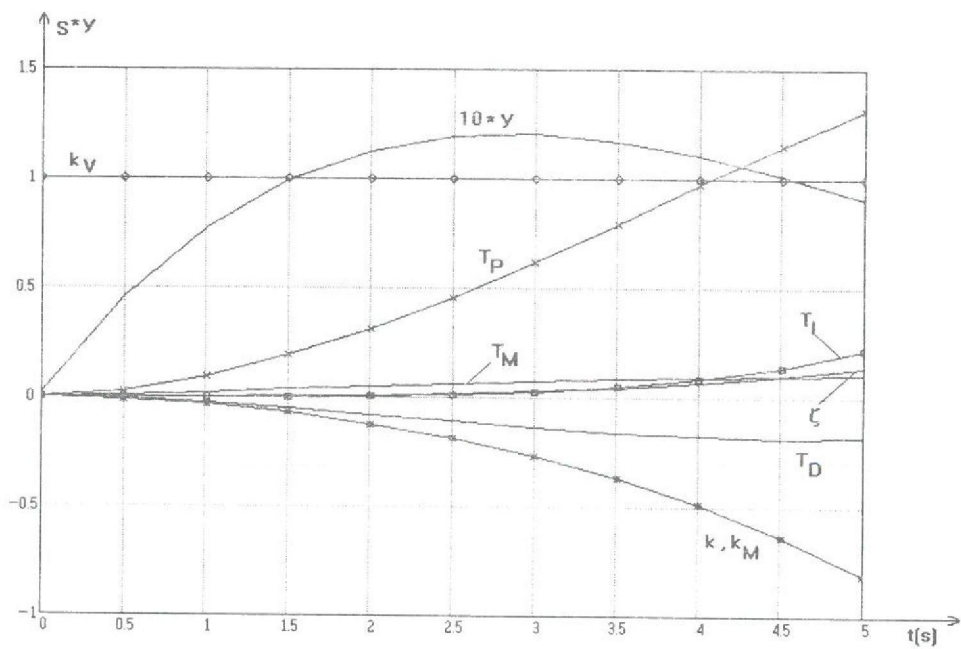


Figura 5. Sensibilități adimensionale ale parametrului reglat în zona primului maxim

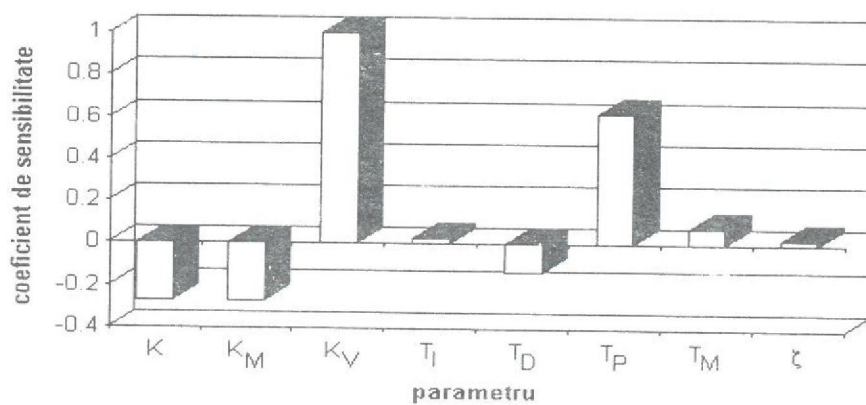


Figura 6. Sensibilități adimensionale ale abaterii maxime

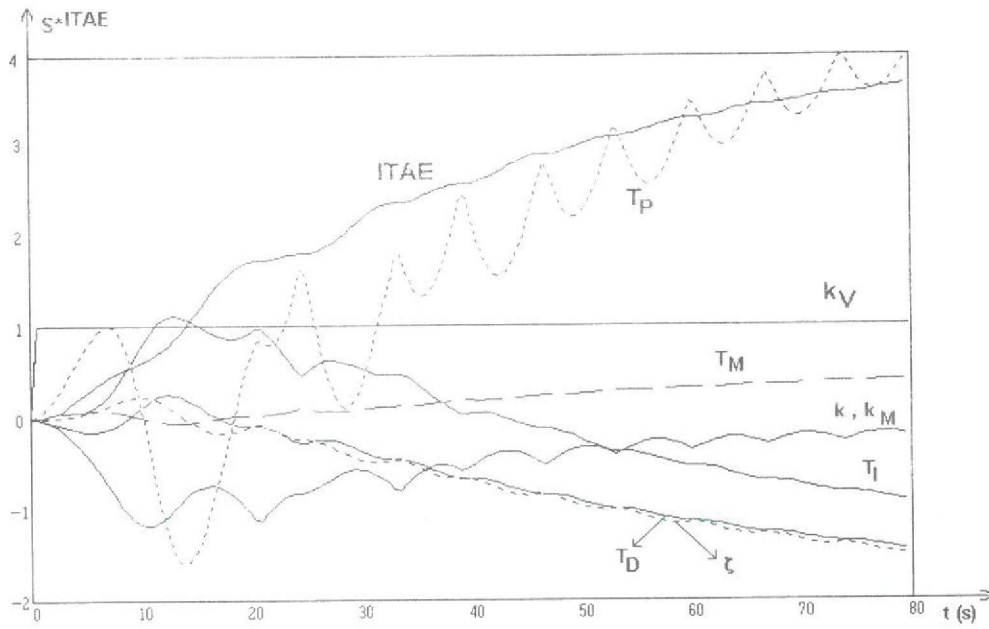


Figura 7. Sensibilități adimensionale ale criteriului ITAE

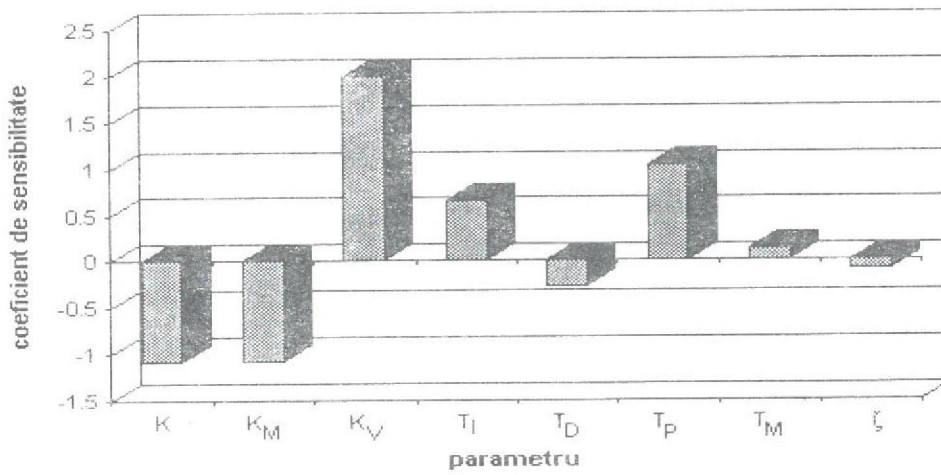


Figura 8. Sensibilități adimensionale ale criteriului ISE

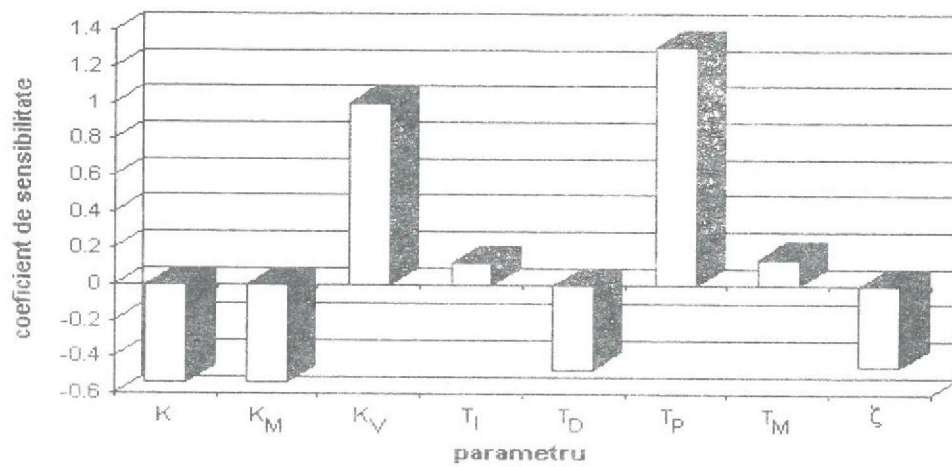


Figura 9. Sensibilități adimensionale ale criteriului IAE

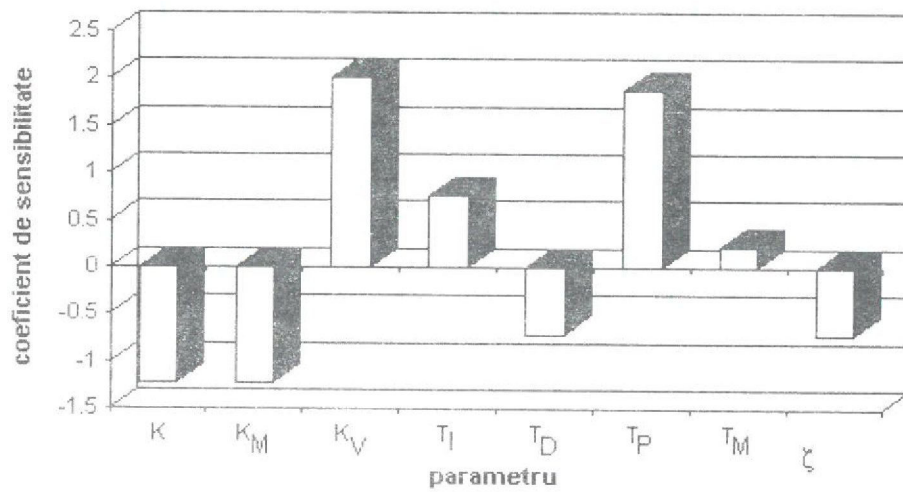


Figura 10. Sensibilități adimensionale ale criteriului ITSE

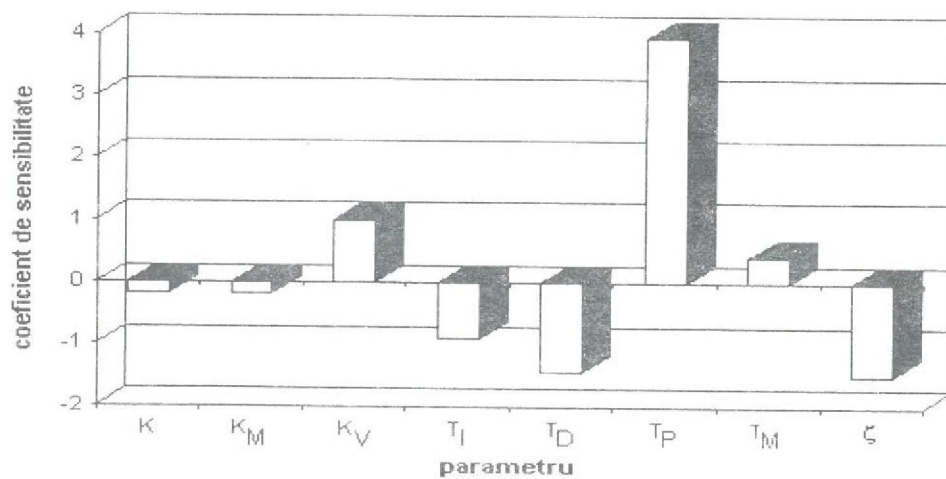


Figura 11. Sensibilități adimensionale ale criteriului ITAE