

REGLAREA TEMPERATURII ÎNTR-UN CUPTOR TUBULAR. STUDIU DE CAZ.

ing. Florina Ungureanu

Universitatea Tehnică "Gh. Asachi", Iași

fungurea@omicron.ch.tuiasi.ro

Rezumat: În această lucrare, se studiază reglarea robustă a temperaturii într-un cupor tubular, caracterizat prin comportare dinamică lentă, inerții apreciabile și incertitudinea modelului, proces specific industriei chimice. Ca modalități de reglare sunt utilizate reglarea cu model intern (IMC) și reglarea cu un regulator PID, acordat prin metoda AB (A. Barabilla). Se analizează robustețea sistemului de reglare la variația în treaptă a referinței și a perturbației, utilizând analiza de sensibilitate globală.

Cuvinte cheie: reglarea temperaturii, reglarea cu model intern, robustețe, acordare, sensibilitate globală, criterii de calitate.

Introducere

Se consideră un sistem de reglare automată (SRA) a temperaturii (figura 1) într-un cupor tubular (figura 2), reprezentativ pentru procesele termice întâlnite în industria chimică [1].

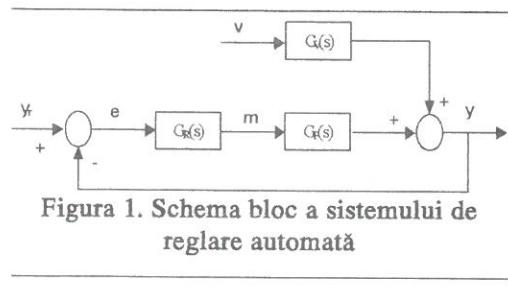


Figura 1. Schema bloc a sistemului de reglare automată

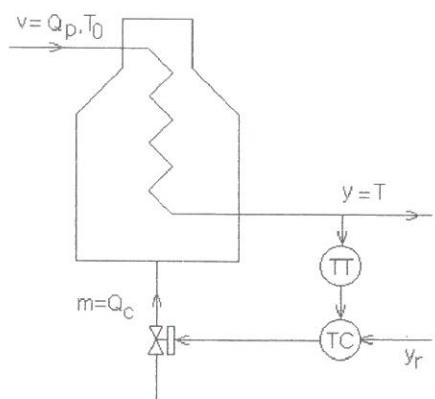


Figura 2. Reglarea temperaturii într-un cupor tubular

Procesul prezentat în figura 2, se caracterizează printr-o comportare dinamică lentă și inerții apreciabile. Reglarea unui astfel de proces este cu atât mai dificilă cu cât timpul mort este mai mare și cu cât imprecizia modelului este mai mare. De obicei, un regulator convențional PID, acordat ZN,

conduce la o robustețe scăzută și la performanțe inferioare ale buclei de reglare. Din aceste motive se caută fie alte metode de acordare, fie algoritmi de reglare evoluți, care să asigure robustețea și performanțele impuse SRA. Notațiile din figura 2, au următoarele semnificații:

- T (y)- temperatura produsului încălzit (parametrul reglat);
- Q_c (m)- debitul de combustibil (variabila manipulată);
- Q_p, T_0 -debitul de produs, ce trebuie încălzit, și temperatura acestuia (perturbații).

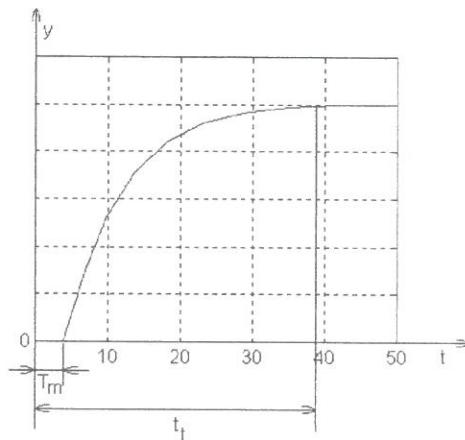


Figura 3. Răspunsul în timp a unui proces termic

În figura 3, este reprezentat răspunsul în timp al unui astfel de cupor, la variația în treaptă a variabilei manipulate. Procesul este un element de ordinul I, cu timp mort, durata regimului tranzitoriu (t_l) este mare și depinde de dimensiunile cupotorului și de debitele produsului și ale combustibilului.

Se consideră funcțiile de transfer ale acestui proces, în raport cu variabila manipulată, $G_p(s)$ și în raport cu perturbația $G_v(s)$ [1].

$$G_p(s) = \frac{k_p \cdot e^{-s \cdot T_{mp}}}{T_p \cdot s + 1} \quad (1)$$

$$G_v(s) = \frac{k_v \cdot e^{-s \cdot T_{mv}}}{T_v \cdot s + 1} .$$

Parametrii procesului sunt cunoscuți cu incertitudine și pot varia în timp, în limite precizabile, dar se consideră următoarele valori numerice nominale, ale acestora: $k_p = k_v = 0.08$, $T_{mp} = T_m = 2.5$ min și $T_p = T_v = 9$ min. În cele ce urmează, se va studia comparativ calitatea reglării și robustețea sistemului de reglare [1], la variația în treaptă a referinței și a perturbației, pentru reglarea PID, utilizând metodele de acordare Ziegler-Nichols (ZN) și Alessandro Brambilla (AB) și pentru reglarea cu model intern (IMC). Metoda utilizată pentru evaluarea robusteții, în raport cu referința și cu perturbația, este analiza de sensibilitate globală.

1. Robustetea la variația referinței

Metoda de acordare ZN a unui regulator PID conduce la următoarele valori optime ale parametrilor regulatorului: $k_R = 60.24$, $T_I = 5.7$ și $T_D = 0.95$.

Dacă se utilizează metoda de acordare AB [2] a unui regulator PID, formulele de calcul ale parametrilor regulatorului, în cazul unui proces de ordin I cu timp mort, sunt:

$$k_R = \frac{1}{k_p} \cdot \frac{T_p + T_m / 2}{T_m(c+1)} \quad (2)$$

$$T_I = T_p + T_m / 2$$

$$T_D = \frac{T_p \cdot T_m}{2T_p + T_m},$$

conform cărora se obțin următoarele valori optime: $k_R = 38.825$, $T_I = 10.25$ și $T_D = 0.56$.

Pentru acordarea regulatorului PID, în urma aproximării acestuia cu un regulator cu model intern (IMC), se exprimă partea de nonminimă fază cu un polinom Padé de ordin 1 [3] și, în acest caz, funcția de transfer pentru procesul nominal este:

$$\tilde{G}_p(s) = \frac{-0.1s + 0.08}{11.25s^2 + 10.25s + 1}, \quad (3)$$

Pentru acest proces nominal, de forma generală

$$k_p \frac{-\beta s + 1}{T_p^2 s^2 + 2\zeta T_p s + 1},$$

regulatorul cu model intern se reduce la un regulator PID, ai cărui parametri dinamici se calculează cu expresiile

$$k_R = \frac{2\zeta T_p}{2\beta + \lambda} \cdot \frac{1}{k_p} \quad T_I = 2\zeta T_p \quad T_D = \frac{T_p}{2\zeta} \quad (4)$$

înseriat cu un filtru de ordinul I, cu constanta de timp T_F

$$T_F = \frac{\beta\lambda}{2\beta + \lambda}, \quad (5)$$

în care λ este parametrul de acordare.

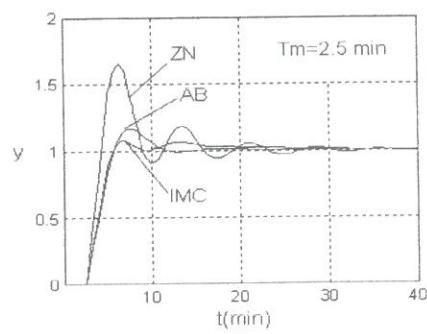
Se alege parametrul de acordare $\lambda = 0.7$, rezultă un filtru cu funcția de transfer,

$$G_f(s) = \frac{1}{0.25s + 1}, \quad (6)$$

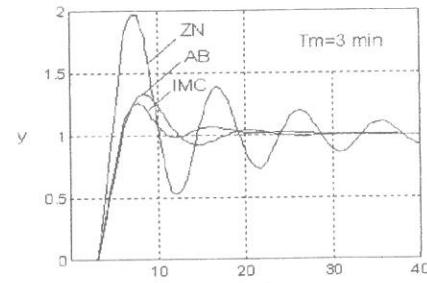
iar parametrii regulatorului au următoarele valori: $k_R = 41$, $T_I = 10.25$ și $T_D = 1.09$.

Variatia sau incertitudinea parametrilor procesului influențează răspunsul SRA, dar timpul mort afectează în cea mai mare măsură robustețea și calitatea reglării. În figura 4, sunt prezentate evoluțiile în timp ale parametrului reglat, pentru cele trei regulatoare considerate, și pentru valori diferite ale timpului mort. Pentru cazul în care timpul mort are valoarea nominală (a), se remarcă performanțe mai bune ale SRA pentru reglarea IMC și acordarea AB a unui regulator PID în comparație cu acordarea ZN.

Pentru o variație de +20% a timpului mort (b), reglarea IMC și acordarea AB conduc la



(a)



(b)

Figura 4. Evoluția parametrului reglat pentru $T_m = 2.5$ min (a) și $T_m = 3$ min (b), la variația în treaptă a referinței

performanțe asemănătoare cazului în care timpul mort are valoarea considerată nominală (a). În cazul acordării ZN, regimul tranzitoriu este lung și oscilant, aproape de limita de instabilitate, o dată cu creșterea timpului mort. Aceste reprezentări evidențiază invarianța performanțelor SRA pentru reglarea IMC și acordarea AB a unui regulator PID. Pentru aceste două metode de reglare se studiază, în continuare, robustețea buclei de reglare, utilizând analiza de sensibilitate globală, care permite evaluarea efectului modificărilor simultane și în domeniile largi ale mărimilor independente asupra mărimilor dependente [4], [5]. Descrierea matematică a modului de variație a parametrilor procesului (variabilelor independente) trebuie să corespundă atât variațiilor în timp ale acestora, cât și incertitudinii cu care se cunoaște modelul procesului. Astfel, fiecărui parametru i se atașează o funcție periodică, aceasta eșantionează spațiul parametrilor, corespunzător descrierii statistice a posibilelor valori ale respectivului parametru. Modul de alegere a frecvențelor și a expresiilor funcțiilor periodice este descris detaliat în [4], [5]. Pe baza setului de frecvențe ales, se stabilește numărul de puncte de eșantionare, N_s , a spațiului parametrilor. N_s reprezintă numărul de combinații de valori ale parametrilor procesului pentru care se soluționează modelul matematic rezultând, în final, o familie de N_s curbe, care determină domeniul de variație a mărimilor depințente în condițiile variației simultane și în domenii largi ale variabilelor independente. Robustețea SRA poate fi apreciată după forma și dimensiunile domeniilor de variație ale parametrului reglat și ale criteriilor de calitate, obținute în condițiile variației simultane a parametrilor procesului.

Datorită faptului că funcția de transfer a regulatorului cu model intern este formată prin înscrierea funcției de transfer a regulatorului PID și a filtrului cu funcția de transfer (6), modelul matematic al SRA este diferit în cazul reglării cu model intern, față de reglarea convențională PID. În cazul reglării procesului cu un regulator PID, modelul matematic al SRA în raport cu referința este

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = x_2(t) \\ \dot{x}_2(t) = -a_1 x_2(t) - b_0 x_1(t - T_{mp}) - b_1 x_2(t - T_{mp}) - b_2 \dot{x}_2(t - T_{mp}) + y_r(t) \\ y(t) = b_0 x_1(t - T_{mp}) + b_1 x_2(t - T_{mp}) + b_2 \dot{x}_2(t - T_{mp}) \end{cases} \quad (7)$$

cu

$$a_1 = 1/T_p, \quad b_0 = \frac{k_R k_p}{T_p T_I}, \\ b_1 = \frac{k_R k_p}{T_p}, \quad b_2 = \frac{k_R k_p T_D}{T_p}.$$

În cazul reglării procesului cu un regulator cu model intern, modelul matematic al SRA în raport cu referința este

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = x_2(t) \\ \dot{x}_2(t) = x_3(t) \\ \dot{x}_3(t) = -a_2 x_3(t) - a_1 x_2(t) \\ y(t) = b_0 x_1(t - T_{mp}) + b_1 \end{cases} \quad (8)$$

cu

$$a_1 = \frac{1}{T_p T_f}, \quad a_2 = 1, \\ b_0 = \frac{k_R k_p}{T_p T_I T_f}, \quad b_1 = \frac{k_R k_I}{T_p T_f}$$

În ambele cazuri, la modelele (7) și (8) se adaugă criteriile integrale de calitate. Pentru analiza de sensibilitate globală a buclei de reglare se consideră variația simultană, de tip aditiv, cu $\pm 10\%$ a parametrilor procesului, în jurul valorilor lor nominale, cu frecvențele de mai jos:

$$p_1 = T_{mp} = T_{mv} \quad p_1^- = 2.25 \quad p_1^+ = 2.75 \quad \omega_1 = 1 \\ p_2 = T_p = T_v \quad p_2^- = 8.1 \quad p_2^+ = 9.9 \quad \omega_2 = 9 \\ p_3 = k_p = k_v \quad p_3^- = 0.088 \quad p_3^+ = 0.072 \quad \omega_3 = 11.$$

Cu p_i^- și p_i^+ s-a notat valoarea minimă, respectiv maximă, a parametrului "i". Numărul de combinații de valori obținute pentru parametrii procesului este $N_s = 23$. Pentru fiecare metodă de reglare luată în considerare, se rezolvă modelul matematic corespunzător (7 sau 8) de N_s ori pe un anumit interval de timp. Rezultă câte o familie de curbe pentru parametrul reglat și pentru cele patru criterii de calitate. Cu cât familiile de curbe aferente unei metode de reglare, se încadrează într-un domeniu mai restrâns, atât ca timp cât și ca amplitudine, cu atât metoda respectivă este mai robustă. De asemenea, se calculează și se trasează curbele pentru sensibilitatea globală a

parametrului reglat și a criteriilor de calitate în raport cu parametrii procesului. Prin indicele "n", care apare în reprezentările grafice se va înțelege "nominal".

În figurile 5 și 6, sunt reprezentate limitele de variație ale parametrului reglat pentru acordarea AB și IMC prin metoda AB, respectiv

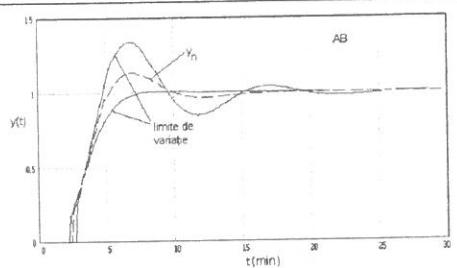


Figura 5. Limitele de variație ale parametrului reglat pentru acordarea AB a unui regulator PID

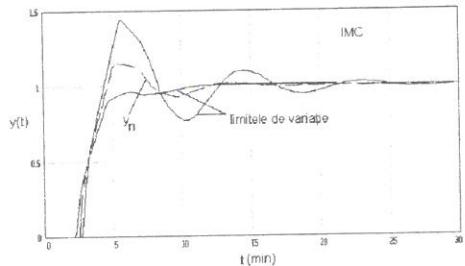


Figura 6. Limitele de variație ale parametrului reglat în cazul reglării IMC

reglarea IMC. Performanțele și domeniile de variație sunt foarte apropiate, cu un ușor avantaj al

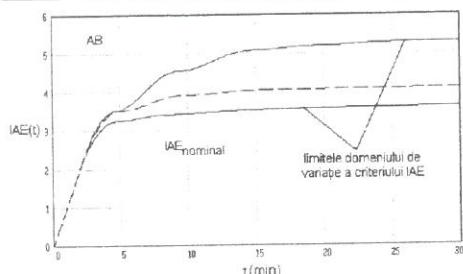


Figura 7. Limitele de variație ale criteriului IAE în cazul acordării AB a unui regulator PID

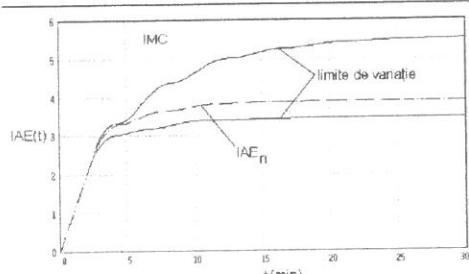


Figura 8. Limitele de variație ale criteriului IAE în cazul reglării IMC

metodei AB în ceea ce privește durata regimului tranzitoriu și suprareglarea.

Aceleași concluzii rezultă și din compararea

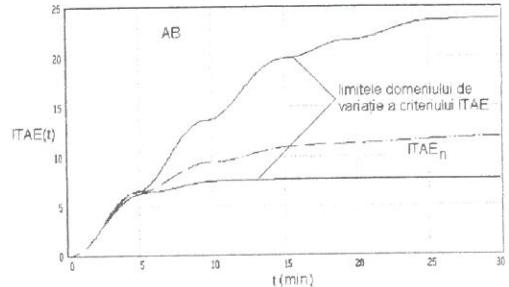


Figura 9. Limitele de variație ale criteriului ITAE în cazul acordării AB a unui regulator PID

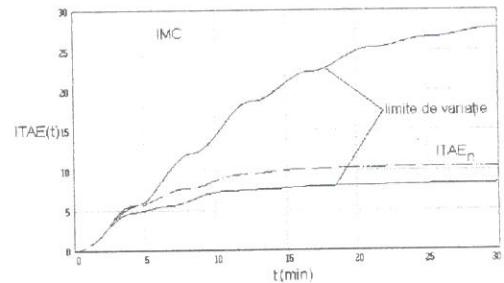


Figura 10. Limitele de variație ale criteriului ITAE în cazul reglării IMC

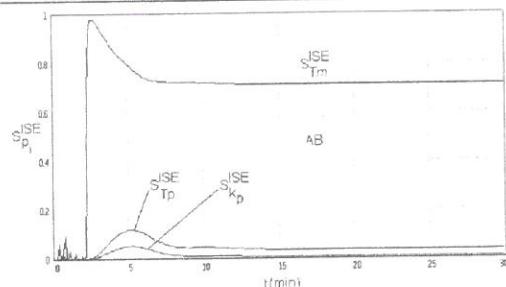


Figura 11. Sensibilitatea globală a criteriului ISE în cazul acordării AB a unui regulator PID

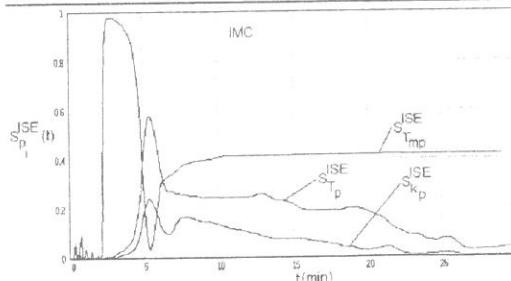


Figura 12. Sensibilitatea globală a criteriului ISE în cazul reglării IMC

imaginilor grafice din figurile 7 ÷ 10, în care sunt reprezentate limitele de variație ale criteriilor de calitate IAE și ITAE. Deși criteriile IAE și ITAE au valori nominale cu puțin mai mici, în cazul reglării cu model intern, limitele de variație ale

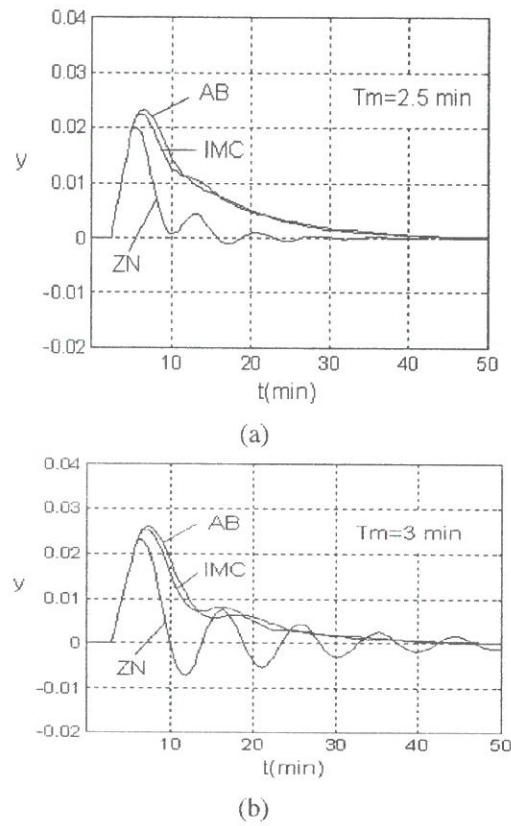


Figura 13. Evoluția parametrului reglat pentru $T_m=2.5$ min (a) și $T_m=3$ min (b), la variația în treaptă a perturbației

acestora sunt totuși mai restrânsă în cazul acordării

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = x_2(t) \\ \dot{x}_2(t) = x_3(t) \\ \dot{x}_3(t) = -c_2 x_3(t) - a_1 x_2(t) - g_0 x_1(t - T_{mv}) - g_1 x_2(t - T_{mv}) - g_2 x_3(t - T_{mv}) + v(t) \\ y(t) = d_1 x_2(t - T_{mv}) + d_2 x_3(t - T_{mv}) \end{cases} \quad (9)$$

cu

$$c_1 = \frac{1}{T_p T_v}, \quad c_2 = 1/T_p + 1/T_v, \quad d_1 = \frac{k_V}{T_p T_v}, \quad d_2 = \frac{k_V}{T_v}$$

$$g_0 = \frac{k_R k_p}{T_p T_I T_v}, \quad g_1 = \frac{k_R k_p}{T_p} \left(\frac{1}{T_I} + \frac{1}{T_v} \right), \quad g_2 = k_R k_p \left(\frac{1}{T_p} + \frac{T_D}{T_p T_v} \right).$$

AB. Din graficele sensibilităților globale ale criteriului ISE în raport cu parametrii procesului (figurile 11, 12) se remarcă sensibilitatea mai scăzută a acestui criteriu în raport cu T_{mp} pentru reglarea IMC față de metoda AB de acordare a regulatorului PID. Sensibilitățile globale ale criteriului ISE în raport cu T_p și k_p tind spre aproximativ aceleași valori finale.

3. Robustețea la variația perturbației

În figura 13, sunt reprezentate evoluțiile parametrului reglat la variația în treaptă a perturbației pentru regulatoarele considerate și pentru două valori diferite ale timpului mort – valoarea nominală și cea cu 20% mai mare.

Datorită valorii foarte mici a factorului de amplificare a procesului ($k_p=k_v=0.08$) suprareglarea este foarte mică pentru ambele metode considerate (sub 0.03), dar regimul tranzitoriu este mai mare decât în cazul variației în treaptă a referinței. Ca și în cazul variației în treaptă a referinței, cea mai scăzută robustețe a regulatorului PID este impusă de acordarea ZN, ce se caracterizează printr-un regim tranzitoriu mai lung, puternic oscilant.

Pentru analiza de sensibilitate globală a buclei de reglare, la variația în treaptă a perturbației, se procedează ca și în cazul precedent. Modelele matematice ale buclei de reglare sunt:

- pentru acordarea AB
- pentru reglarea procesului cu un regulator cu model intern (IMC)

În figurile 14 și 15, sunt reprezentate limitele de variație ale criteriului ISE, din a căror comparare rezultă că metoda de acordare AB conferă o robustețe ceva mai ridicată, în raport cu perturbația, decât reglarea cu model intern. Se observă că orice modificare simultană a parametrilor procesului conduce la creșterea substanțială a valorii criteriului față de valoarea nominală ISE_n , indiferent de metoda de acordare.

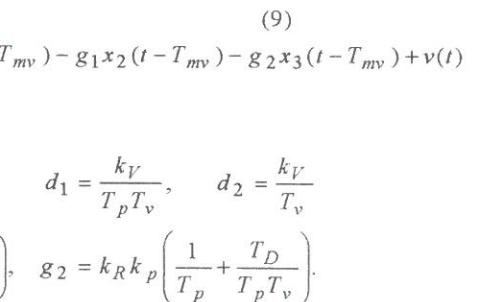


Figura 14. Limitele de variație ale criteriului ISE în cazul acordării AB a unui regulator PID

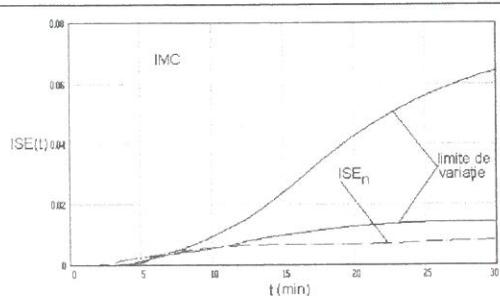


Figura 15. Limitele de variație ale criteriului ISE în cazul reglării IMC

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = x_2(t) \\ \dot{x}_2(t) = x_3(t) \\ \dot{x}_3(t) = x_4(t) \\ \dot{x}_4(t) = -c_3x_4(t) - c_2x_3(t) - c_1x_2(t) - g_0x_1(t - T_{mv}) - g_1x_2(t - T_{mv}) - g_2x_3(t - T_{mv}) - g_3x_4(t) + v(t) \\ y(t) = d_1x_2(t - T_{mv}) + d_2x_3(t - T_{mv}) + d_3x_4(t) \end{cases} \quad (10)$$

cu

$$c_1 = \frac{1}{T_p T_v T_f}, \quad c_2 = \frac{T_v + T_p + T_f}{T_p T_v T_f}, \quad c_3 = 1/T_p + 1/T_v + 1/T_f, \quad d_1 = \frac{k_V}{T_p T_v T_f}, \quad d_1 = \frac{k_V(T_p + T_f)}{T_p T_v T_f}, \quad d_3 = \frac{k_V}{T_v}$$

$$g_0 = \frac{k_R k_p}{T_p T_I T_v T_f}, \quad g_1 = \frac{T_v + T_I}{T_p T_I T_v T_f}, \quad g_2 = \frac{k_R k_p (T_D + T_v)}{T_p T_I T_v T_f}, \quad g_3 = \frac{k_R k_p T_D}{T_p T_I T_v T_f}.$$

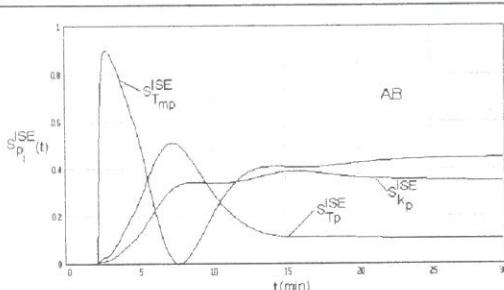


Figura 16. Sensibilitatea globală a criteriului ISE, în cazul acordării AB a unui regulator PID

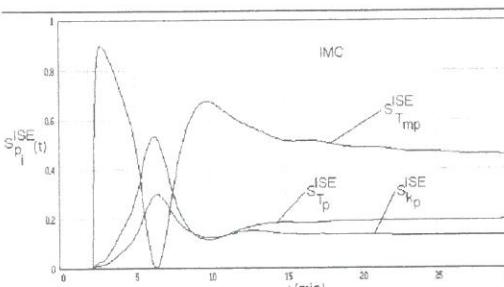


Figura 17. Sensibilitatea globală a criteriului ISE, în cazul reglării IMC

În figurile 16 și 17, sunt reprezentate sensibilitățile globale ale criteriului ISE pentru acordarea AB și, respectiv, pentru reglarea cu model intern. Sensibilitățile globale ale criteriului de calitate ISE, în raport cu parametrii procesului, sunt mici (sub 0.5) pentru ambele metode, ceea ce evidențiază robustețea la variația perturbațiilor a celor două metode de reglare. Din graficele prezentate, rezultă că metoda de acordare AB este mai robustă la variația perturbației decât a referinței.

Din acest studiu al robusteștii buclei de reglare a unui proces termic cu timp mort, se desprind următoarele concluzii:

- Metoda de acordare AB a unui regulator PID precum și metoda de reglare cu model intern conferă o robustețe ridicată buclei de reglare, superioară robusteștii obținute în urma acordării regulatorului prin metoda ZN. Alegerea uneia din aceste două metode este conjuncturală;
- Metoda de acordare AB poate fi utilizată și în cazul regulațoarelor convenționale analogice și este ușor de aplicat în cazul reglării proceselor cu timp mort, dacă se cunoaște modelul acestuia;
- Pentru majoritatea proceselor, metoda de reglare cu model intern conduce la un regulator numeric PID acordat după criterii IMC și inseriat cu un filtru.
- Metoda de reglare cu model intern are un grad mare de generalitate și conferă o robustețe ridicată, în raport cu timpul mort.

Bibliografie

1. MARINOIU V., N. PARASCHIV: Automatizarea proceselor chimice, Editura Tehnică, București, 1992.
2. BRAMBILLA, A., S. CHEN, C. SCALI: Robust Tuning of conventional controllers, Hydrocarbon Processing, 1990, no. 11, p. 53.

3. MORARI, M., E. ZAFIRIOU: Robust Process Control, Prentice Hall, New Jersey, 1989.
4. UNGUREANU, ST., FL. UNGUREANU: Analiza sensibilității globale a sistemelor dinamice. Metode de abordare. În: Revista Română de Informatică și Automatică, vol. 4, nr. 4, 1994.
5. UNGUREANU, ST., FL. UNGUREANU: Analiza sensibilității globale a unui reactor chimic prin metoda FAST (The Fourier Amplitude Sensitivity Test). În: Revista Română de Informatică și Automatică, vol. 5, nr. 3, 1995.

Simboluri

- a_i, b_i – coeficienții modelului matematic al SRA;
- $G_r, G_p, G_v, G_{RIMC}, G_f$ – funcțiile de transfer ale regulatorului, procesului în raport cu variabila manipulată, procesului în raport cu perturbația, regulatorului IMC și a filtrului;
- \tilde{G}_p - funcția de transfer a procesului nominal;
- $k_p, T_p, T_{mp}, k_v, T_v, T_{mv}$ – parametrii dinamici ai procesului;
- k_r, T_d, T_t – parametrii dinamici ai regulatorului;
- p_i - notație a parametrilor procesului;
- $S_{p_i}^{IAE}$ - funcția de sensibilitate globală a criteriului IAE în raport cu parametrii p_i ai procesului;
- $S_{p_i}^{ISE}$ - funcția de sensibilitate globală a criteriului ISE în raport cu parametrii p_i ai procesului;
- t – timpul;
- v – perturbația;
- x_i – variabile de stare;
- y – parametrul reglat;
- y_r – mărimea de referință;
- λ – parametru de acordare pentru metoda AB;
- ω_i – frecvențe ale funcțiilor periodice.

