

ACORDAREA REGULATOARELOR ÎN SISTEME DE REGLARE ÎN CASCADĂ LA MODELE DE OBIECTE CU ELEMENTE IDENTICE

Irina Cojuhari

Student Ph. D la Universitatea Tehnică a Moldovei

Chișinău, Moldova

cojuhari_irina@yahoo.com

Rezumat: În lucrare se propune un algoritm de acordare a reguletoarelor tipizate P, PI, PID în sisteme de reglare în cascadă cu două bucle de reglare. Procesul condus se prezintă prin două subprocese cu inerție. Pentru acordarea reguletoarelor în conturul interior și exterior se utilizează metoda gradului maximal de stabilitate. În conturul interior se utilizează reglatorul P sau PI, iar în conturul exterior se propun reguletoarele P, PI, PID. Pentru fiecare algoritm de reglare P, PI, PID se obține o expresie funcția de parametrii cunoscuți ai obiectului și mărimea necunoscută a gradului maximal de stabilitate al sistemului automat sintetizat. Pentru determinarea valorilor optime ale parametrilor de acord ai reglatorului P, PI, PID respectiv se utilizează proceduri iterative. Se prezintă exemplu de aplicare a algoritmului propus cu calculele respective și simulare pe calculator.

Cuvinte cheie: contur interior și exterior, metoda gradului maximal de stabilitate, model de obiect, reglare în cascadă, reglator.

Abstract: A tuning algorithm of linear controllers P, PI, PID in multiple-loop feedback control systems is proposed in this paper. The control objects consist of two subprocesses, which are described by dynamical model with identical objects with inertia. A tuning algorithm of linear controllers in internal and external contour are tuning in conformity with the maximal stability degree method. In the internal contour are used controllers P and PI, in the external contour are used controllers P, PI, PID. There are using the iterative procedure, for determinate the optimal tuning parameters of controllers P, PI, PID. The procedure is used to solve a particular example of tuning controllers P, PI, PID in multiple-loop feedback control systems.

Keywords: multiple-loop feedback control system, tuning of controllers, internal contour, external contour, non minimal phase, time delay, maximal stability degree method.

1. Introducere

În practica automatizărilor pentru procese lente și cu sau fără timp mort prezentate prin modele matematice cu mai multe constante de timp, utilizarea structurilor convenționale de reglare se realizează cu dificultăți și obținerea performanțelor dorite ale sistemului automat proiectat este o procedură dificilă [1,2,4,5].

Pentru depășirea acestor dificultăți se utilizează structuri de sisteme de reglare în cascadă [1,2,4]. Pentru acordarea reguletoarelor tipizate de tipul P, PI, PID în structurile de reglare în cascadă se practică aplicarea metodelor frecvențiale, metoda modulului etc. Metodele frecvențiale au dezavantajul care se referă la efectuarea calculelor și prezentarea grafică a funcțiilor în domeniul frecvență. Metoda modulului are dezavantajul că se utilizează numai legi de reglare care conțin mai multe binoame de gradul întâi cărora li se impune compensarea constantelor mari de timp din componența obiectului de reglare, ceea ce duce la dificultăți la realizarea acestor legi.

Pornind de la dezavantajele metodelor indicate mai sus, în lucrare se propune utilizarea metodei gradului maximal de stabilitate (GMS) [3] la acordarea reguletoarelor tipizate în buclele de reglare interioare și exterioare ca sisteme de reglare independente la modele de obiecte cu elemente identice. Procedura de acordare a reguletoarelor pornește de la conturul interior, apoi se acordează reguletoarele în conturul exterior.

2. Algoritm de acordare a reguletoarelor în sisteme de reglare în cascadă

Admitem că procesul condus este prezentat prin două subprocese și structura sistemului de reglare în cascadă cu două contururi se prezintă în Figura 1. În figură sunt utilizate însemnările: $H_{R1}(s)$, $H_{R2}(s)$ sunt funcții de transfer (f.d.t.) ale reglatorului principal și auxiliar respectiv, iar

$H_{F1}(s)$, $H_{F2}(s)$ - prezintă f.d.t. ale subproceselor procesului condus, I - conturul interior cu f.d.t. $H'_{F2}(s)$.

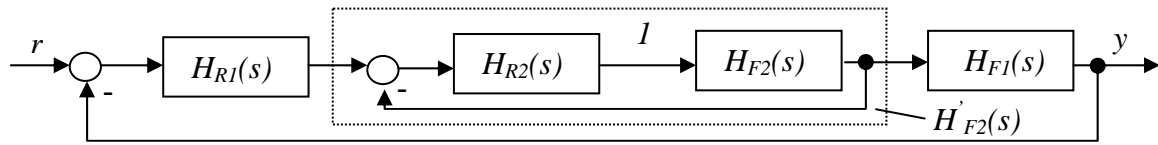


Figura 1. Schema structurală a sistemului de reglare în cascadă.

Vom studia cazul în care subproceesele sunt elemente cu inerție cu f.d.t. de forma

$$H_{F1}(s) = \frac{k_1}{(T_1s + 1)^n}, \quad (1)$$

$$H_{F2}(s) = \frac{k_2}{(T_2s + 1)}, \text{ cu } T_2 < T_1. \quad (2)$$

În expresiile (1), (2) însemnările prezintă: k_1 , k_2 sunt coeficienții de transfer ai subproceselor, T_1, T_2 – constantele de timp ale subproceselor.

2.1 Acordarea regulatorului în conturul interior

Se efectuează acordarea regulatorului cu f.d.t. $H_{R2}(s)$ din conturul interior la subprocesul cu f.d.t. $H_{F2}(s)$. Admitem că se utilizează regulator de tipul P sau PI.

Regulatorul P se acordează la obiectul cu f.d.t. (2) după metoda GMS și parametrul de acord al regulatorului se determină din relația [7,8]

$$k_{p2} = \frac{1}{k_2}(T_2J - 1). \quad (3)$$

Se determină f.d.t. a conturului interior închis cu regulatorul P în forma

$$H'_{F2}(s) = \frac{H_{R2}(s)H_{F2}(s)}{1 + H_{R2}(s)H_{F2}(s)} = \frac{b_0}{a_0s + a_1} \quad (4)$$

unde $b_0 = k_{p2}k_2$; $a_0 = T_2$; $a_1 = 1 + k_{p2}k_2$.

Regulatorul PI se acordează la obiectul cu f. d. t. (2) după metoda GMS și parametrii de acord se determină din relațiile [7,8]

$$k_{p2} = \frac{1}{k_2}(2T_2J - 1), \quad (5)$$

$$k_{i2} = \frac{T_2}{k_2} J^2. \quad (6)$$

Variind valoarea $J > 0$ se pot obține valori ale parametrilor k_{p2} , k_{i2} pentru care performanțele SA sunt cele dorite. F. d. t. a conturului interior închis cu regulatorul PI se obține în forma:

$$H'_{F2}(s) = \frac{H_{R2}(s)H_{F2}(s)}{1 + H_{R2}(s)H_{F2}(s)} = \frac{b_0s + b_1}{a_0s^2 + a_1s + a_2} \quad (7)$$

unde $b_0 = k_2 k_{p2}$; $b_1 = k_2 k_{i2}$; $a_0 = T_2$; $a_1 = 1 + k_p k_2$; $a_2 = k_{i2} k_2$.

2.2 Acordarea reguletoarelor în conturul exterior

După efectuarea transformărilor echivalente schema bloc structurală a conturului exterior este prezentată în figura 2 a), b).

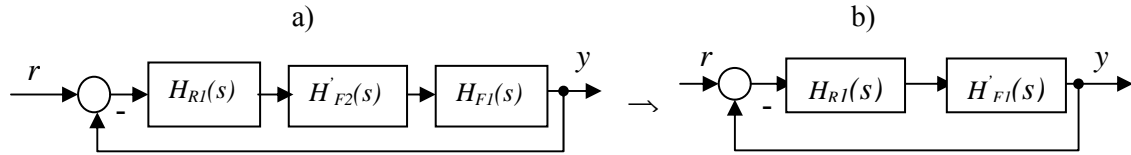


Figura 2. Schema bloc structurală a buclei exterioare.

Pentru acordarea regulatorului P, PI, PID respectiv în conturul exterior se determină f.d.t. echivalentă a obiectului (4) ca conexiune serie conform figurii 2, a de forma

$$H'_{F1}(s) = H'_{F2}(s)H_{F1}(s) = \frac{k_1}{(T_1s+1)^n} \frac{b_0}{a_0s+a_1} = \frac{k}{(a_0s+a_1)(T_1s+1)^n}, \quad (8)$$

unde $k = k_1 b_0 = k_1 k_2 k_{p2}$.

Acordarea regulatorului P, PI, PID respectiv pentru obiectul (8) după metoda GMS se efectuează după relațiile [7, 8]

Sistemul automat cu regulatorul P:

$$k_{p1} = (1/k)(a_0J - a_1)(1 - T_1J)^n. \quad (9)$$

Sistemul automat cu regulatorul PI

$$k_{p1} = (1/k)(1 - T_1J)^{n-1}(-d_0J^2 + d_1J - d_2), \quad (10)$$

unde $d_0 = 2T_1a_0 + nT_1a_0$; $d_1 = 2a_0 + T_1a_1 + nT_1a_1$; $d_2 = a_1$,

$$k_{i1} = (1/k)(1 - T_1J)^n(a_1J - a_0J^2) + k_pJ. \quad (11)$$

Sistemul automat cu regulatorul PID

$$k_{d1} = (1/2k)(1 - T_1J)^{n-2}(-d_0J^2 + d_1J - d_2), \quad (12)$$

unde

$d_0 = 2T_1^2a_0 + 3nT_1^2a_0 + n^2T_1^2a_0$; $d_1 = 4T_1a_0 + 4nT_1a_0 + nT_1^2a_1 + n^2T_1^2a_1$; $d_2 = 2a_0 + 2nT_1a_1$,

$$k_{p1} = (1/k)(1 - T_1J)^{n-1}(-d_0J^2 + d_1J - d_2) + 2k_{d1}J, \quad (13)$$

unde $d_0 = 2T_1a_0 + nT_1a_0$; $d_1 = 2a_0 + T_1a_1 + nT_1a_1$; $d_2 = a_1$,

$$k_{i1} = (1/k)(1 - T_1J)^n(a_1J - a_0J^2) - k_{d1}J^2 + k_pJ. \quad (14)$$

Pentru acordarea regulatorului P, PI, PID respectiv în conturul exterior se determină f.d.t. echivalentă a obiectului (7) cu conturul interior cu regulatorul PI și subprocesul cu f.d.t. $H_{F1}(s)$ (1)

$$H'_{F1}(s) = H'_{F2}(s)H_{F1}(s) = \frac{k_1}{(T_1s+1)^n} \frac{b_0s+b_1}{(a_0s^2+a_1s+a_2)} = \frac{c_0s+c_1}{(a_0s^2+a_1s+a_2)(T_1s+1)^n}, \quad (15)$$

unde $c_0 = k_1 b_0 = k_1 k_2 k_{p2}$; $c_1 = k_1 b_1 = k_1 k_2 k_{i2}$.

Acordarea regulatorului P, PI, PID respectiv la obiectul (15) se efectuează după relațiile [7,8]

Sistemul automat cu regulatorul P

$$k_{p1} = \frac{(1-T_1J)^n (-a_0J^2 + a_1J - a_2)}{c_1 - c_0J}, \quad (16)$$

Sistemul automat cu regulatorul PI

$$k_{p1} = \frac{(1-T_1J)^{n-1} (-d_0J^4 + d_1J^3 - d_2J^2 + d_3J - d_4)}{(c_1 - c_0J)^2}, \quad (17)$$

unde

$$\begin{aligned} d_0 &= 2T_1a_0c_0 + nT_1a_0c_0; \quad d_1 = T_1a_1c_0 + 2a_0c_0 + nT_1a_0c_1 + nT_1a_1c_0 + 3T_1a_0c_1; \\ d_2 &= nT_1a_2c_0 + a_1c_0 + 3a_0c_1 + 2T_1a_1c_1 + nT_1a_1c_1; \\ d_3 &= nT_1a_2c_1 + 2a_1c_1 + T_1a_2c_1; \quad d_4 = a_2c_1, \end{aligned}$$

$$k_{i1} = \frac{(1-T_1J)^n (a_0J^3 - a_1J^2 + a_2J)}{c_1 - c_0J} + k_{p1}J. \quad (18)$$

Sistemul automat cu regulatorul PID

$$k_{d1} = \frac{(1-T_1J)^{n-2} (-d_0J^6 + d_1J^5 - d_2J^4 + d_3J^3 - d_4J^2 + d_5J - d_6)}{2(c_1 - c_0J)^4}, \quad (19)$$

unde

$$\begin{aligned} d_0 &= 3nT_1^2a_0c_0^3 + n^2T_1^2a_0c_0^3 + 2a_0c_0^3T_1^2; \\ d_1 &= T_1^2na_1c_0^3 + 3n^2T_1^2a_0c_1c_0^2 + n^2T_1^2a_1c_0^3 + 8a_0c_1T_1^2c_0^2 + 4T_1a_0c_0^3 + 4T_1na_0c_0^3 + 11nT_1^2a_0c_1c_0^2; \\ d_2 &= -nT_1^2a_2c_0^3 + 13nT_1^2a_0c_1^2c_0 + 3n^2T_1^2a_1c_1c_0^2 + 14T_1na_0c_1c_0^2 + 2a_0c_0^3 + 2T_1na_1c_0^3 + n^2T_1^2a_2c_0^3 + \\ &+ 5nT_1^2a_1c_1c_0^2 + 3n^2T_1^2a_0c_1^2c_0 + 12a_0c_1^2T_1^2c_0 + 16T_1a_0c_1c_0^2; \\ d_3 &= 2a_1c_1^2T_1^2c_0 + 16T_1na_0c_1^2c_0 + n^2T_1^2a_0c_1^3 - nT_1^2a_2c_0^2c_1 + 5nT_1^2a_0c_1^3 + 6a_0c_1^3T_1^2 + \\ &+ 3n^2T_1^2a_1c_1^2c_0 + 8T_1na_1c_1c_0^2 - 2a_2c_1T_1^2c_0^2 + 8a_0c_1c_0^2 + 3n^2T_1^2a_2c_1c_0^2 + 7nT_1^2a_1c_1^2c_0 + 24T_1a_0c_1^2c_0; \\ d_4 &= -4T_1a_2c_1c_0^2 + 12T_1a_0c_1^3 + 2T_1na_2c_1c_0^2 + 2a_1c_1^3T_1^2 + 3nT_1^2a_1c_1^3 + 6T_1na_0c_1^3 + n^2T_1^2a_1c_1^3 + \\ &+ nT_1^2a_2c_0c_1^2 + 10T_1na_1c_1^2c_0 - 2a_2c_1^2T_1^2c_0 + 12a_0c_1^2c_0 + 3n^2T_1^2a_2c_1^2c_0 + 4T_1a_1c_1^2c_0; \\ d_5 &= -4T_1a_2c_1^2c_0 + T_1^2na_2c_1^3 - 2a_2c_1c_0^2 + 4T_1na_1c_1^3 + 6a_0c_1^3 + \\ &+ 4T_1na_2c_1^2c_0 + n^2T_1^2a_2c_1^3 + 4T_1a_1c_1^3 + 2a_1c_1^2c_0; \\ d_6 &= -2c_0a_2c_1^2 + 2a_1c_1^3 + 2T_1na_2c_1^3, \end{aligned}$$

$$k_{p1} = \frac{-d_0J^4 + d_1J^3 - d_2J^2 + d_3J - d_4}{(c_1 - c_0J)^2} + 2k_{d1}J, \quad (20)$$

unde $d_0 = 2T_1a_0c_0 + nT_1a_0c_0$; $d_1 = T_1a_1c_0 + 2a_0c_0 + nT_1a_0c_1 + nT_1a_1c_0 + 3T_1a_0c_1$;

$$d_2 = -nT_1a_2c_0 + a_1c_0 + 3a_0c_1 + 2T_1a_1c_1 + nT_1a_1c_1; \quad d_3 = nT_1a_2c_1 + 2a_1c_1 + T_1a_2c_1; \quad d_4 = a_2c_1,$$

$$k_{i1} = \frac{(1-T_1J)^n (a_0J^3 - a_1J^2 + a_2J)}{c_1 - c_0J} - k_{d1}J^2 + k_{p1}J. \quad (21)$$

După relațiile (3), (5), (6), (9) - (14), (16) - (21) se calculează valoarea optimală a gradului maximal de stabilitate al SA cu regulatorul P, PI, PID respectiv. În cazurile în care valorile

parametrilor reguletoarelor P, PI, PID calculate după relațiile (3), (5), (6), (9) - (14), (16) – (21) nu permit obținerea performanțele dorite ale sistemului automat, atunci se propune utilizarea de proceduri iterative de alegere a valorilor optime ale parametrilor reguletoarelor P, PI, PID pentru care sistemul automat va avea performanțele dorite. Pentru determinarea valorilor optime ale parametrilor k_{p1} , k_{i1} , k_{p2} , k_{i2} , k_{d2} din relațiile (3), (5), (6), (9) - (14), (16) – (21) care sunt funcții de variabila gradului maximal de stabilitate J se variaza variabila $J > 0$ și se construiesc curbele $k_{p1} = f(J)$, $k_{i1} = f(J)$, $k_{d1} = f(J)$, $k_{p2} = f(J)$, $k_{i2} = f(J)$, pentru reguletorul P, PI, PID respectiv și conturul respectiv. În continuare, se iau seturi de valori ale parametrilor k_{p1} , k_{i1} , k_{p2} , k_{i2} , k_{d2} pentru valori optime și cvasioptime ale lui J și pentru fiecare set de valori ale parametrilor k_{p1} , k_{i1} , k_{p2} , k_{i2} , k_{d2} ai reguletorului respectiv se simuleaza pe calculator sistemul automat cu reguletorul P, PI, PID ales cu seturile de valori numite ale parametrilor și se determina procesul tranzitoriu al sistemului automat în conturul respectiv. Se alege procesul tranzitoriu al sistemului automat pentru care performanțele obținute corespund celor impuse.

3. Aplicare și simulare pe calculator

Pentru a analiza eficiența procedurii de acordare a reguletoarelor tipizate în sisteme de reglare în cascada la modele de obiecte identice cu inerție conform relațiilor prezentate mai sus s-au efectuat calculele respective pentru acordarea reguletoarelor la subprocese cu parametrii dați: pentru f.d.t. $H_{F2}(s): k_2=1, T_2=7$ și $H_{F1}(s): k_1=2, T_1=10, n=3$.

În conturul interior s-a acordat reguletorul P după relația (3) și reguletorul PI după relațiile (5), (6). Pentru determinarea valorilor optime ale parametrilor k_{p2}, k_{i2} din relațiile (3), (5), (6) care sunt funcții de variabila gradului maximal de stabilitate J au fost construite curbele $k_{p2} = f(J)$ pentru reguletorul P (Fig. 3, a) și $k_{p2} = f(J), k_{i2} = f(J)$ pentru reguletorul PI (Figura 3, b).

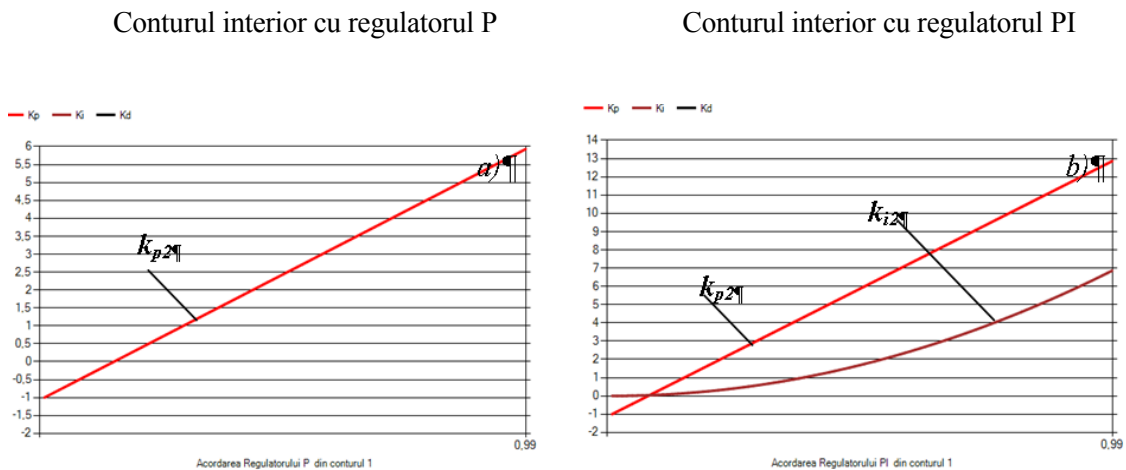


Figura 3. Dependentele $k_{p2}=f(J), k_{p2}, k_{i2}=f(J)$.

În conturul exterior pentru cazul când în conturul interior a fost acordat reguletorul P s-au acordat reguletoarele P, PI și PID după relații (9) – (14) și pentru determinarea valorilor optime ale reguletoarelor respective în dependența de valoarea gradului maximal de stabilitate J au fost construite dependentele $k_{p1} = f(J)$ pentru reguletorul P (Fig. 4, a), $k_{p1} = f(J), k_{i1} = f(J)$ pentru reguletorul PI acordat (Fig. 5, a) și $k_{p1} = f(J), k_{i1} = f(J), k_{d1} = f(J)$ pentru reguletorul PID (Fig. 6, a).

Pentru cazul când în conturul interior a fost acordat reguletorul PI, în conturul exterior s-au

acordat reglatoare P, PI și PID după relații (16) – (21) și pentru determinarea valorilor optime ale reglatoarelor respective în dependența de valoarea gradului maximal de stabilitate J au fost construite dependențele $k_{p1} = f(J)$ pentru regulatorul P acordat (Figura 4, a), $k_{p1} = f(J)$, $k_{i1} = f(J)$ pentru regulatorul PI (Figura 5, a) și $k_{p1} = f(J)$, $k_{i1} = f(J)$, $k_{d1} = f(J)$ pentru regulatorul PID (Figura 6, a).

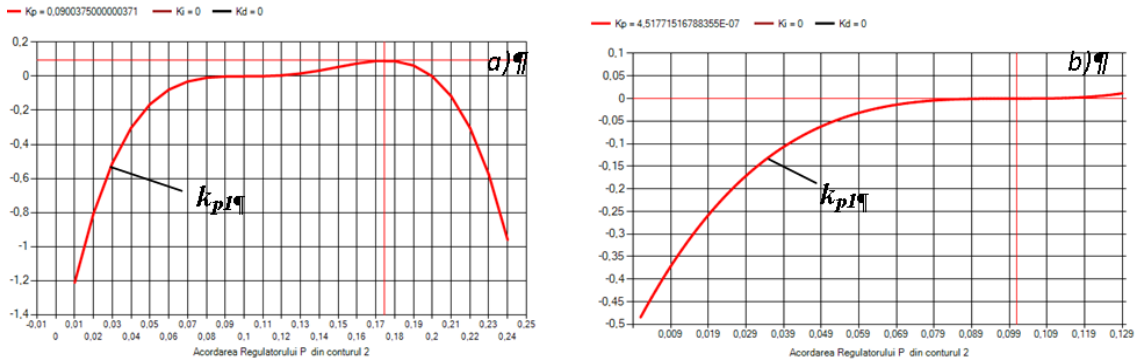


Figura 4. Dependențele $k_{p1}=f(J)$.

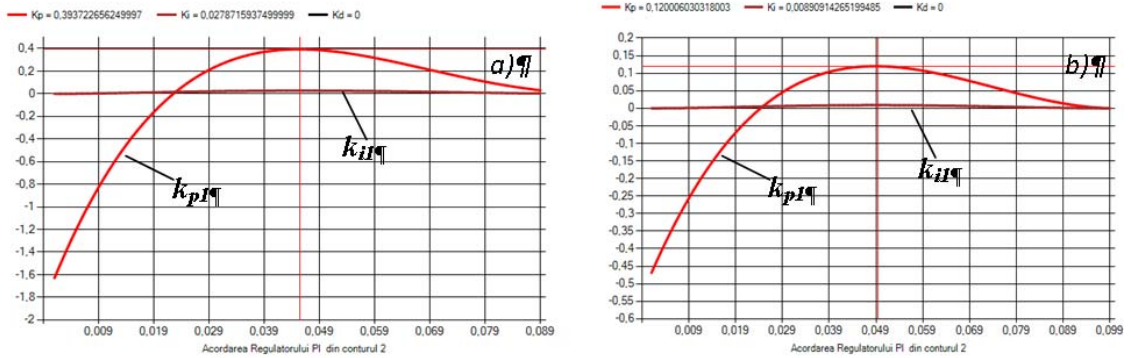


Figura 5. Dependențele $k_{p1}, k_{i1}=f(J)$.

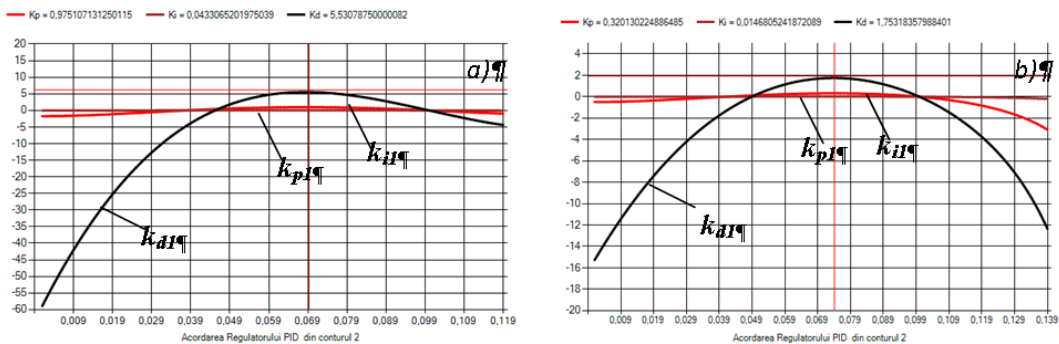


Figura 6. Dependențele $k_{p1}, k_{i1}, k_{d1}=f(J)$.

În figura 7 este prezentată schema de simulare pe calculator a sistemului automat cu reglatoarele acordate după metoda GMS utilizând pachetul MATLAB.

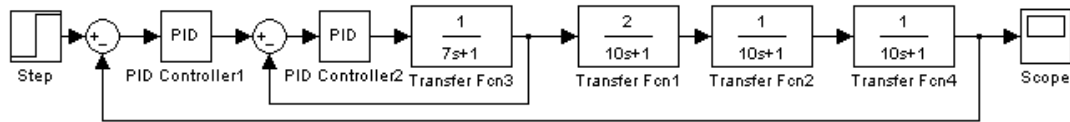


Figura 7. Schema bloc structurală de simulare a sistemului automat.

În figura 8 sunt prezentate procesele tranzitorii ale sistemului automat a conturului exterior, pentru cazul acordării reguletoarelor după metoda GMS: a) – regulatorul P acordat în conturul interior și reguletoare P, PI, PID acordate în conturul exterior; b) regulatorul PI acordat în conturul interior și reguletoare P, PI, PID acordate în conturul exterior. Valorile parametrilor de acord la reguletoarelor respective sunt prezentate în tabelul 1.

Tabelul 1. Parametrii de acord la acordare reguletoarelor după metoda GMS

Nr. curb.	Reg. con. ext.	Regulatorul P acordat în conturul interior $k_{p2}=0.4$	Regulatorul PI acordat în conturul interior $k_{p2}=3.2$ $k_{i2}=0.63$
1	P	$k_{p1}=0.09$	$k_{p1}=0.011$
2	PI	$J_{opt}=0.45, k_{p1}=0.393,$ $k_{i1}=0.0278$	$J_{opt}=0.049, k_{p1}=0.12,$ $k_{i1}=0.0089$
3	PID	$J_{opt}=0.069, k_{p1opt}=0.975,$ $k_{i1opt}=0.043, k_{dopt}=5.53$	$J_{opt}=0.074, k_{p1}=0.3201,$ $k_{i1}=0.014, k_{d1}=1.753$
4	PID	$J=0.057, k_{p1}=0.829$ $k_{i1}=0.038, k_{d1}=4.33$	$J=0.6, k_{p1}=0.252,$ $k_{i1}=0.012, k_{d1}=1.228$
5	PID	$J=0.083, k_{p1}=0.741,$ $k_{i1}=0.034, k_{d1}=4.032$	$J=0.8, k_{p1}=0.305,$ $k_{i1}=0.014, k_{d1}=1.65$

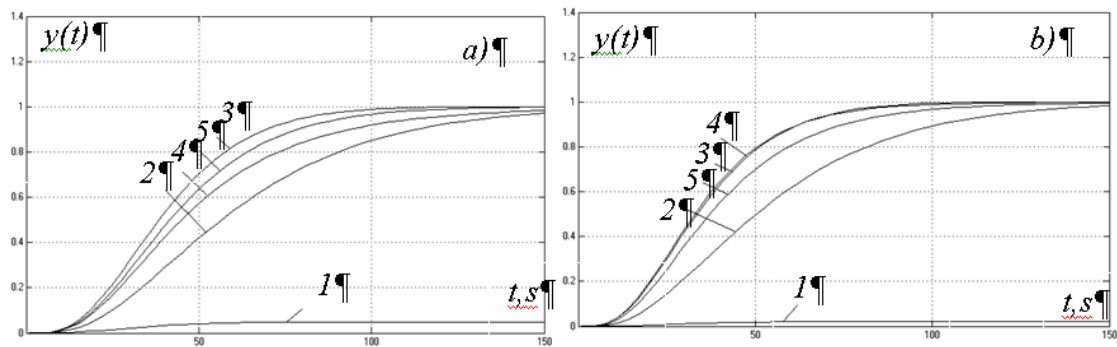


Figura 8. Procese tranzitorii ale sistemului de reglare în cascadă.

4. Concluzii

În rezultatul analizei rezultatelor obținute la acordarea reguletoarelor P, PI, PID în sisteme de reglare în cascadă cu modele de obiecte (1), (2) cu parametrii cunoscuți facem concluziile:

1. Conturul interior cu regulatorul P, PI acordat după metoda GMS permite de a obține performanțe ridicate variind valoarea lui $J > 0$ și alegând valoarea parametrilor regulatorului respectiv pentru a obține performanțele impuse conturului interior.

2. Conturul exterior cu regulatorul P, PI, PID acordat după metoda GMS permite de a obține performanțe ridicate variind valoarea lui $J > 0$ și alegând valoarea parametrilor regulatorului respectiv pentru a obține performanțele impuse conturului exterior.

BIBLIOGRAFIE

1. **ROTACH, V. I. A.** Teoria avtomaticheskogo upravlenia termoenergheticheskimi protsessami, Moskva: Energoatomizdat, 1985, 292 s.
2. **LUKAS, V. A.** Teoria avtomaticheskogo upravlenia, Moskva: Nedra, 1990, 416 s.
3. **ZAGARII, G. I.; A. M SHUBLADZE.** Sintez system upravlenia na osnove kriteria maksimalnoi stepeni ustoychivosti. (The Synthesis of the Control System According to the Maximal Stability Degree), Moskva: Energoatomizdat, 1998, 198 s.
4. **DUMITRACHE, I. și AL.** Automatizări electronice, București: EDP, 1993, 660 p .
5. **PREITL, Ș.; R. E. PRECUP.** Introducere în ingineria reglării automate, Timișoara: Editura Politehnica, 2004, 334 p.
6. **TAN, N.; D. P. ATHERTON.** Design of stabilizing PI and PID controllers. În: International Journal of Systems Science, Vol. 37, Issue 8, 2006, pp. 543-554.
7. **IZVOREANU, B.; I. FIODOROV; F. IZVOREANU.** The Tuning of Regulator for Advance Delay Objects According to the Maximal Stability Degree Method. In: Proceedings of the 11th International Conference on Control Systems and Computer Science (CSCS-11), București, V.I., 1997, pp. 179-184.
8. **COJUHARI, I.; B. IZVOREANU.** Contributions of controllers tuning in the multiple - loop feedback control system with two contours with inertia. În: Proceedings of the 9th International Conference on Development and Application Systems DAS-2008, România, Universitatea „Ștefan cel Mare” din Suceava, 22-24 May 2008, pp. 50-53.