

ACORDAREA REGULATOARELOR TIPIZATE ÎN SISTEME DE REGLARE ÎN CASCADĂ LA MODELE DE OBIECTE CU INERTIE ȘI CU FAZĂ NEMINIMĂ

Irina Cojuhari, Bartolomeu Izvoreanu
Universitatea Tehnică a Moldovei
irina.cojuhari @ati.utm.md, izvor@mail.utm.md

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 models with inertia (second order) with nonminimal phase. 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 of the optimal tuning parameters of controllers P , PI , PID . The tuning algorithm of controllers represents an algebraic method, which consists of two stages. The procedure is used to solve a particular example of tuning controllers P , PI , PID in multiple-loop feedback control systems.

Cuvinte cheie: model de obiect, contur interior și exterior, regulator, reglare în cascadă.

I. 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].

Pentru depășirea acestor dificultăți se utilizează structuri de sisteme de reglare în cascadă [1,2]. Pentru acordarea reglatoarelor tipizate de tipul P , PI , PID în structurile de reglare în cascadă se practică aplicarea metodelor frecvențiale, metoda modulului etc.

În lucrare se propune de a utiliza metoda gradului maximal de stabilitate (GMS) [3,4] la acordarea reglatoarelor tipizate la modelul de obiect cu inerție de ordinul trei caracterizat cu un pol pozitiv care duce sistemul automat la instabilitate.

II. Algoritm de acordare a reglatoarelor

Admitem că procesul condus este prezentat prin două subprocesse și structura sistemului de reglare în cascadă cu două contururi se prezintă în fig.1. În figură sunt utilizate însemnările: $H_{R1}(s)$, $H_{R2}(s)$ sunt funcții de transfer (f.d.t.) ale regulatorului principal și auxiliar respectiv, $H_{F1}(s)$, $H_{F2}(s)$ - prezintă f.d.t. ale subprocesselor procesului condus, I - conturul interior.

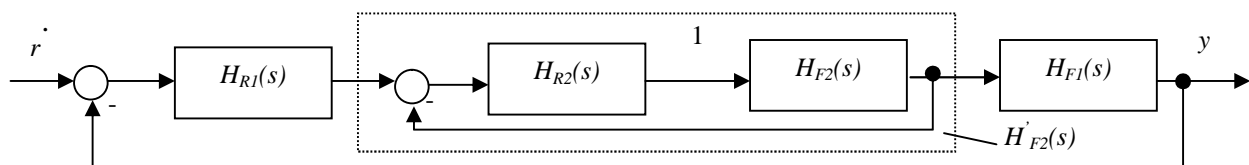


Fig. 1. Schema structurală a sistemului de reglare în cascadă.

Vom studia prezentarea subprocesselor pentru cazul cînd subprocessele sunt elemente cu iner-

ție de ordinul unu și doi cu f.d.t. de forma

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

$$H_{F2}(s) = \frac{k_2}{(T_2s-1)(T_3s+1)} = \frac{k_2}{l_0s^2 + l_1s - l_2}, \quad \text{cu } T_2, T_3 < T_1. \quad (2)$$

În expresiile (1), (2) avem însemnările: k_1, k_2 sunt coeficienții de transfer ai subproceselor, T_1, T_2, T_3 - constantele de timp ale subproceselor, iar $l_0 = T_2T_3; l_1 = T_2 - T_3; l_2 = 1$.

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 [3,4]

$$k_{p2} = \frac{1}{k_2} (-l_0J^2 + l_1J + l_2). \quad (3)$$

În relația (3) J este gradul maximal de stabilitate și care se alege (este o mărime $J > 0$). Alegînd valoarea lui J se va obține o valoare necesară a lui k_{p2} ca bucla de reglare să aibă performanțele dorite (în acest caz se alege durata impusă procesului tranzitoriu). Se determină f.d.t. a conturului interior închis cu regulatorul P

$$H'_{F2}(s) = \frac{H_{R2}(s)H_{F2}(s)}{1 + H_{R2}(s)H_{F2}(s)} = \frac{n_0}{h_0s^2 + h_1s + h_2}, \quad (4)$$

unde $n_0 = k_{p2}k_2; h_0 = T_2T_3; h_1 = T_2 - T_3; h_2 = k_{p2}k_2 - 1$.

- **Regulatorul PI** se acordează la obiectul cu f. d. t. (2) după metoda GMS și parametrii de acord se determină din relațiile [3,4]

$$k_{p2} = \frac{1}{k_2} (-3l_0J^2 + 2l_1J + l_2), \quad (5)$$

$$k_{i2} = \frac{1}{k_2} (l_0J^3 - l_1J^2 - l_2J) + k_pJ. \quad (6)$$

Variind valoarea $J > 0$ se pot obține valori ale parametrilor k_{p2}, k_{i2} pentru care performanțele conturului interior al SA sunt cele dorite.

F. d. t. a conturului interior închis cu regulatorul PI este

$$H'_{F2}(s) = \frac{H_{R2}(s)H_{F2}(s)}{1 + H_{R2}(s)H_{F2}(s)} = \frac{k_2k_{p2}s + k_2k_{i2}}{T_2T_3s^3 + T_2s^2 - T_3s^2 + k_2k_{p2}s - s + k_2k_{i2}} = \frac{n_0s + n_1}{h_0s^3 + h_1s^2 + h_2s + h_3}, \quad (7)$$

unde $n_0 = k_2k_{p2}; n_1 = k_2k_{i2}; h_0 = T_2T_3; h_1 = T_2 - T_3; h_2 = k_{p2}k_2 - 1; h_3 = k_{i2}k_2$.

Acordarea reguletoarelor în conturul exterior

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

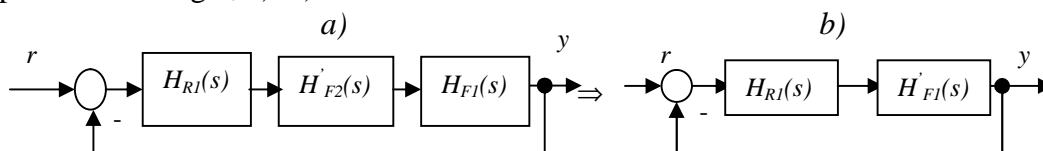


Fig. 2. Schema bloc structurală a buclei exterioare.

Pentru acordarea regulatorului P, PI, PID respectiv în conturul exterior se determină f.d.t. echivalentă a obiectului (4) cu conturul interior cu regulatorul P și subprocesul cu f.d.t. $H_{F1}(s)$ (1)

$$H'_{F1}(s) = H'_{F2}(s)H_{F1}(s) = \frac{k}{a_0s^3 + a_1s^2 + a_2s + a_3}, \quad (8)$$

unde $k = \frac{k_{p2}k_2k_1}{k_{p2}k_2 - 1}$; $a_0 = \frac{T_1T_2T_3}{k_{p2}k_2 - 1}$; $a_1 = \frac{(T_2 - T_3)T_1}{k_{p2}k_2 - 1} + \frac{T_2T_3}{k_{p2}k_2 - 1}$; $a_2 = T_1 + \frac{(T_2 - T_3)}{k_{p2}k_2 - 1}$; $a_3 = 1$.

Acordarea reguletoarelor P, PI, PID respectiv pentru obiectul (8) după metoda GMS se efectuează după relațiile [3,4]:

SA cu regulatorul P

$$k_{p1} = \frac{1}{k}(a_0J^3 - a_1J^2 + a_2J - a_3). \quad (9)$$

SA cu regulatorul PI

$$k_{p1} = \frac{1}{k}(4a_0J^3 - 3a_1J^2 + 2a_2J - a_3); \quad (10)$$

$$k_{i1} = \frac{1}{k}(-a_0J^4 + a_1J^3 - a_2J^2 + a_3J) + k_{p1}J. \quad (11)$$

SA cu regulatorul PID

$$k_{p1} = \frac{1}{k}(4a_0J^3 - 3a_1J^2 + 2a_2J - a_3) + 2k_{d1}J, \quad (12)$$

$$k_{i1} = \frac{1}{k}(-a_0J^4 + a_1J^3 - a_2J^2 + a_3J) - k_{d1}J^2 + k_{p1}J, \quad (13)$$

$$k_{d1} = \frac{1}{k}(-6a_0J^2 + 3a_1J - a_2). \quad (14)$$

Variind valoarea lui J se obțin valorile parametrilor k_{p1}, k_{i1}, k_{d1} ai regulatorului P, PI, PID respectiv pentru care performanțele SA sunt cele dorite.

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)

$$H''_{F1} = H'_{F2}(s)H_{F1}(s) = \frac{b_0s + b_1}{a_0s^4 + a_1s^3 + a_2s^2 + a_3s + a_4}, \quad (15)$$

unde $b_0 = \frac{k_1k_{p2}}{k_i}$; $b_1 = k_1$; $a_0 = \frac{T_1T_2T_3}{k_{i2}k_2}$; $a_1 = \frac{T_1(T_2 - T_3)}{k_{i2}k_2} + \frac{T_2T_3}{k_{i2}k_2}$;

$$a_2 = \frac{(k_{p2}k_2 - 1)T_1}{k_{i2}k_2} + \frac{(T_2 - T_3)}{k_{i2}k_2}; \quad a_3 = T_1 + \frac{(k_{p2}k_2 - 1)}{k_{i2}k_2}; \quad a_4 = 1.$$

Acordarea regulatorului P, PI, PID respectiv la obiectul (15) se efectuează după relațiile [3,4].

SA cu regulatorul P

$$k_{p1} = \frac{-a_0J^4 + a_1J^3 - a_2J^2 + a_3J - a_4}{b_1 - b_0J}. \quad (16)$$

SA cu regulatorul PI

$$k_{p1} = \frac{d_0J^5 - d_1J^4 + d_2J^3 - d_3J^2 + d_4J - d_5}{(b_1 - b_0J)^2}, \quad (17)$$

unde $d_0 = 4a_0b_0$, $d_1 = 5a_0b_1 + 3a_1b_0$, $d_2 = 4a_1b_1 + 2a_2b_0$, $d_3 = 3a_2b_1 + a_3b_0$, $d_4 = 2a_3b_1$, $d_5 = a_4b_1$.

$$k_{i1} = \frac{a_0 J^5 - a_1 J^4 + a_2 J^3 - a_3 J^2 + a_4 J}{b_1 - b_0 J} + k_p J. \quad (18)$$

SA cu regulatorul PID

$$k_d = \frac{-d_0 J^6 + d_1 J^5 - d_2 J^4 + d_3 J^3 - d_4 J^2 + d_5 J - d_6}{2(b_1 - b_0 J)^4}; \quad (19)$$

unde $d_0 = 12a_0 b_0^3; d_1 = 42a_0 b_0^2 b_1 + 6a_1 b_0^3; d_2 = 50a_0 b_0 + b_1^2 + 22a_1 b_0^2 b_1 + 2a_2 b_0^3;$
 $d_3 = 20a_0 b_1^3 + 28a_1 b_0 b_1^2 + 8a_2 b_0^2 b_1; d_4 = 12a_1 b_1^3 + 12a_2 b_0 b_1^2; d_5 = 6a_2 b_1^3 + 2a_3 b_0 b_1^2 - 2b_0^2 b_1;$
 $d_6 = 2a_3 b_1^3 - 2b_0 b_1^2;$

$$k_{p1} = \frac{(d_0 J^5 - d_1 J^4 + d_2 J^3 - d_3 J^2 + d_4 J - d_5)}{(b_1 - b_0 J)^2} + 2k_d J, \quad (20)$$

unde $d_0 = 4a_0 b_0^3; d_1 = 5a_0 b_1 + 3a_1 b_0; d_2 = 4a_1 b_1 + 2a_2 b_0; d_3 = 3a_2 b_1 + a_3 b_0; d_4 = 2a_3 b_1; d_5 = b_1;$

$$k_{i1} = \frac{a_0 J^5 - a_1 J^4 + a_2 J^3 - a_3 J^2 + J}{b_1 - b_0 J} - k_d J^2 + k_p J. \quad (21)$$

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 cînd valorile parametrilor reguletoarelor P, PI, PID calculate după relațiile (3), (5), (6), (9) - (14), (16) - (21) nu permit de a obține performanțele dorite ale sistemului automat, atunci se propune de a utiliza proceduri iterative de alegere a valorilor optime ale parametrilor reguletoarelor P, PI, PID după $k_p=f(J)$, $k_i=f(J)$, $k_d=f(J)$ pentru care sistemul automat va avea performanțele dorite.

III. Aplicații și simulare pe calculator

Pentru a analiza eficiența procedurii de acordare a reguletoarelor tipizate în sisteme de reglare în cascadă la modele de obiecte cu inerție conform relațiilor prezentate mai sus s-au efectuat calculele respective pentru acordarea reguletoarelor la subprocese cu parametrii dați: pentru f.d.t. $H_{F2}(s)$: $k_2=2, T_2=3, T_1=2$ și $H_{F1}(s)$: $k_1=3, T_1=5$.

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 (Fig. 3, b).

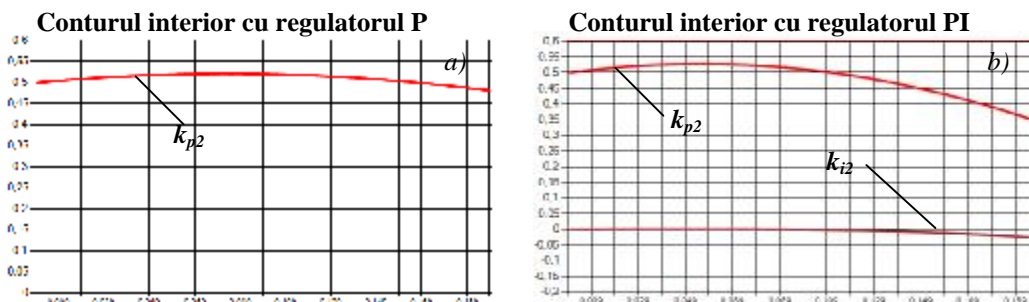


Fig. 3. Dependentele $k_{p2}=f(J), k_{p2}, k_{i2}=f(J)$.

În conturul exterior pentru cazul cînd 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 regula-

torul PI acordat (Fig. 5, a) și $k_{p1} = f(J)$, $k_{i1} = f(J)$, $k_{d1} = f(J)$ pentru regulatorul PID (Fig. 6, a).

Pentru cazul cînd în conturul interior a fost acordat regulatorul PI, în conturul exterior s-au acordat regulatoare P, PI și PID după relații (16) – (21) și pentru determinarea valorilor optime ale reguletoarelor respective în dependență de valoarea gradului maximal de stabilitate J au fost construite dependențele $k_{p1} = f(J)$ pentru regulatorul P acordat (Fig. 4, b), $k_{p1} = f(J)$, $k_{i1} = f(J)$ pentru regulatorul PI (Fig. 5, b) și $k_{p1} = f(J)$, $k_{i1} = f(J)$, $k_{d1} = f(J)$ pentru regulatorul PID (Fig. 6, b).

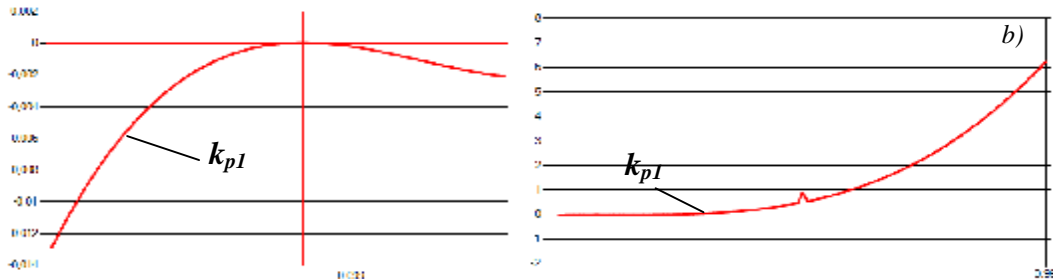


Fig. 4. Dependentele $k_{p1}=f(J)$.

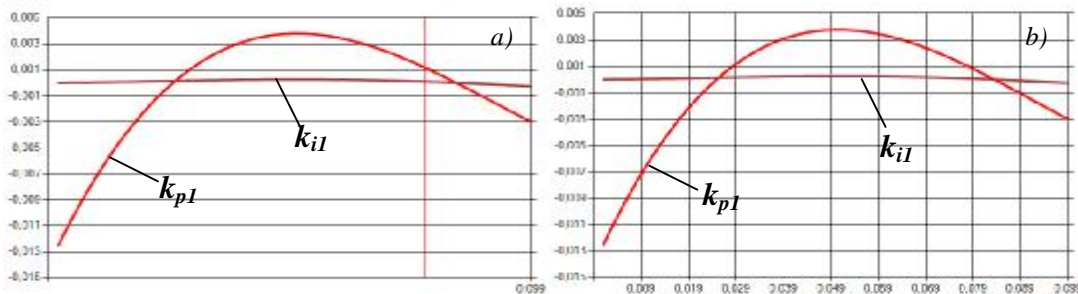


Fig. 5. Dependentele $k_{p1}, k_{i1}=f(J)$.

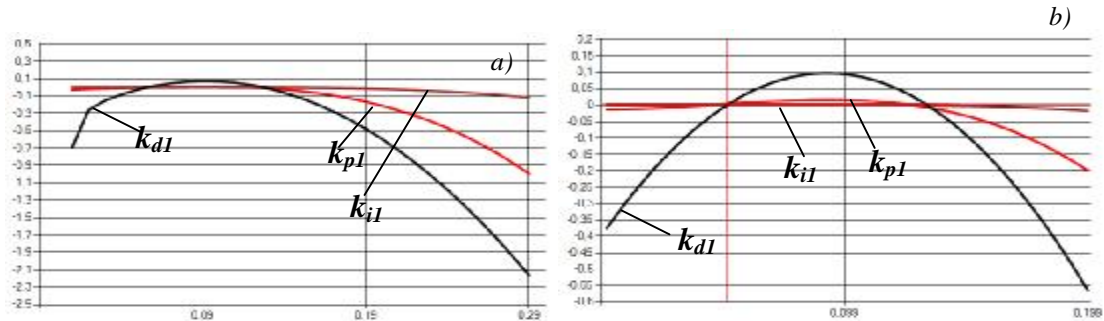


Fig. 6. Dependentele $k_{p1}, k_{i1}, k_{d1}=f(J)$.

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

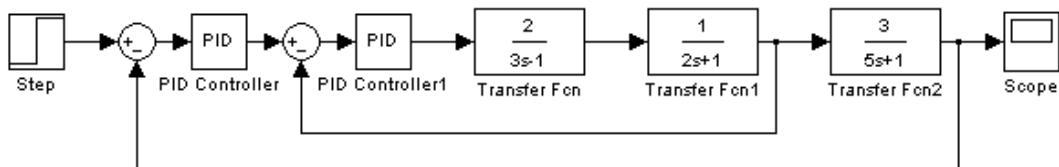


Fig. 7. Schema bloc structurală de simulare a sistemului automat.

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 reglatoare P, PI, PID acordate în conturul exterior. Valorile parametrilor de acord ale reglatoarelor respective sunt prezentate în tabelul 1.

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

Nr. curb.	Reg. con. ext.	Regulatorul P acordat în conturul interior $k_{p2}=0.5207$	Regulatorul PI acordat în conturul interior $k_{p2}=0.5277, k_{i2}=0.000511$
1	P	$k_{p1}=0.0000483$	$k_{p1}=0.018$
2	PI	$J_{opt}=0.05, k_{p1}=0.0037, k_{i1}=0.00026$	$J_{opt}=0.05, k_{p1}=0.00376, k_{i1}=0.000265$
3	PID	$J=0.06, k_{p1}=0.0021, k_{i1}=0.0000647, k_{d1}=0.0179$	$J=0.06, k_{p1}=0.0021, k_{i1}=0.0000647, k_{d1}=0.0179$
4	PID	$J_{opt}=0.09, k_{p1opt}=0.01, k_{i1opt}=0.0035, k_{dopt}=0.075$	$J_{opt}=0.09, k_{p1}=0.01, k_{i1}=0.00035, k_{d1}=0.075$
5	PID	$J=0.11, k_{p1}=0.0061, k_{i1}=0.00014, k_{d1}=0.055$	$J=0.11, k_{p1}=0.0061, k_{i1}=0.00014, k_{d1}=0.055$

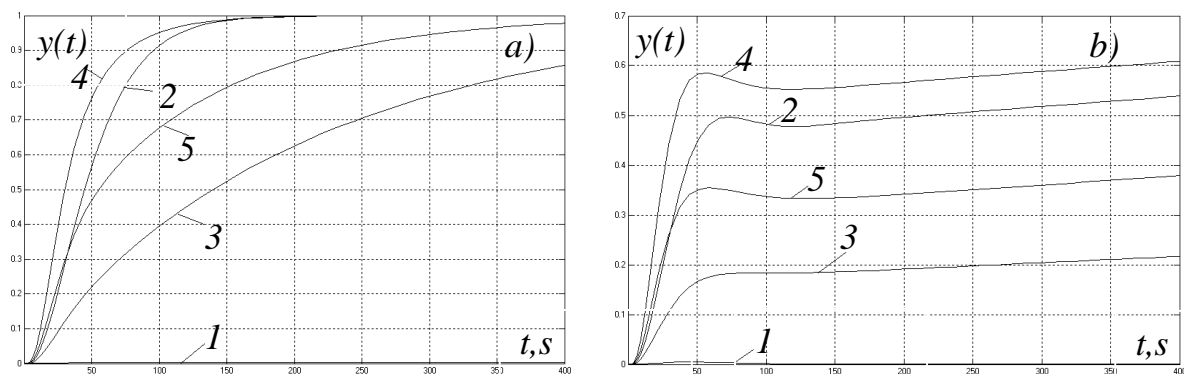


Fig. 8. Procese tranzitorii ale sistemului de reglare în cascadă.

IV. Concluzii

În rezultatul analizei rezultatelor obținute la acordarea reglatoarelor P, PI, PID la sisteme de reglare în cascadă cu obiecte cu inerție de tipul (1), (2) cu parametri cunoscuți putem face următoarele concluzii:

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

2. Cele mai bune performanțe ale sistemului automat au fost obținute pentru cazul acordării regulatorului P în conturul interior și regulatorului PID în conturul exterior.

V. Bibliografie

1. Lukas V. A. Teoria avtomaticheskogo upravlenia. – Moskva: Nedra, 1990.- 416 s.
2. Dumitrache I. și al. Automatizări electronice. - București: EDP, 1993.- 660 p.
3. Izvoreanu B., Fiodorov I., Izvoreanu F. 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, 1997, V.I, pp. 179-184.
4. Cojuhari I., Izvoreanu B. Contributions of Controllers Tuning in the Multiple-Loop Feedback Control System with Two Contours with Inertia / In: Proceedings of the 9 International Conference on Development and Application Systems DAS-2008, Suceava, România, 2008, pp. 50-53.