

Algoritm de Acordare a Regulatorilor în Sisteme de Reglare în Cascadă cu Trei Contururi cu Inerție și Timp Mort

Irina COJUHARI, Bartolomeu IZVOREANU

Universitatea Tehnică a Moldovei

cojuhari_irina@yahoo.com, izvor@mai.utm.md

Abstract — A tuning algorithm of linear controllers P , PI , PID in multiple-loop feedback control systems with three contours is proposed in this paper. The control objects consists from three subprocesses, which are described by dynamical models with inertia (fourth order) and time delay. The controllers P , PI , PID in the inertial contours 1 and 2 and in the external contour are tuning using the maximal stability degree method. The tuning process of linear controllers P , PI , PID consists from fourth stage: in the first stage it was made the tuning of P , PI controllers in the first internal contour, in the second stage it was made the tuning of P , PI controllers in the second internal contour, at the third stage it was made the identification of the transfer process of the first and second internal contour, after identification it was obtained the equivalent transfer function, in the fourth stage for this equivalent transfer function it was tuning the P , PI and PID controllers using the maximal stability method in the external contour. The obtained results were compared with the results obtained for the case of tuning P , PI , PID controllers using Ziegler Nichols method.

Index Terms — maximal stability degree method, multiple-loop feedback control system, tuning of controllers.

I. INTRODUCERE

Pentru acordarea regulatorilor tipizate de tipul P , PI , PID în structurile de reglare în cascadă (SRC) 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 [1,2].

Pornind de la dezavantajele metodelor indicate, în lucrare se propune de a utiliza metoda gradului maximal de stabilitate (GMS) [3] la acordarea regulatorilor tipizate în buclele de reglare interioare 1 și 2 și exterioare independente. Procedura de acordare a regulatorilor pornește de la conturul interior unu, doi și apoi se acordează regulatorul în conturul exterior.

Admitem că structura SRC se reprezintă prin trei contururi, fig. 1: primul contur intern constă din funcția de transfer (f.d.t.) a regulatorului $H_{R3}(s)$ și subprocessul $H_{F3}(s)$, al doilea contur interior constă din f.d.t. a regulatorului $H_{R2}(s)$ și f.d.t. a subprocessului echivalent $H'_{F2}(s)$ și conturul exterior constă din f.d.t. a regulatorului $H_{R1}(s)$ și subprocessul echivalent $H'_{F1}(s)$.

Acordarea regulatorilor se recomandă de a efectua mai întâi în conturul interior unu, pe urmă în conturul interior doi și conturul exterior.

Vom studia prezentarea subprocesselor pentru cazul când subprocessele sunt elemente cu inerție de ordinul doi, unu și timp mort cu f.d.t. de forma

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

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

$$H_{F3}(s) = \frac{k_3 e^{-\tau s}}{(T_3s + 1)(T_4s + 1)}, \quad \text{cu } T_1, T_2 > T_3, T_4. \quad (3)$$

În expresiile (1), (2) și (3) avem însemnările: k_1, k_2, k_3 sunt coeficienții de transfer ai subprocesselor, T_1, T_2, T_3, T_4 - constantele de timp ale subprocesselor, τ - timpul mort al subprocessului respectiv.

II. ALGORITMUL DE ACORDARE A REGULATORILOR

Procedura de acordare a regulatorilor constă din patru etape: în prima etapă se acordează regulatorile P și PI în conturul interior unu; în a doua etapă se acordează regulatorile P și PI în conturul interior doi;

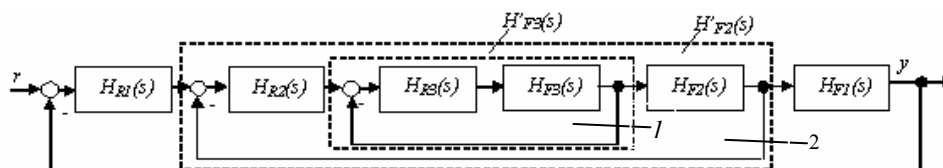


Fig.1. Schema bloc structurală a sistemului automat cu trei bucle de reglare.

la a treia etapă s-a ridicat procesul tranzitoriu al obiectului echivalent (conturul interior unu, doi și subprocesul $H'_{F1}(s)$) și s-a identificat f.d.t. echivalentă; la etapa a patra s-a făcut acordarea reguletoarelor P , PI și PID în conturul exterior la f.d.t. echivalentă a sistemului automat (SA).

Etapa I. Acordarea reguletoarelor P , PI în primul contur interior. Se efectuează acordarea reguletorului cu f.d.t. $H_{R3}(s)$ din conturul interior unu la subprocesul cu f.d.t. $H_{F3}(s)$. Admitem că se utilizează reguletor de tipul P sau PI .

Pentru a determina f.d.t. echivalentă a conturului interior cu reguletorul P sau PI acordate, termenul $e^{-\tau s}$ se aproximează cu aproximatul Pade

$$e^{-\tau s} = \frac{1}{\tau s + 1}. \quad (4)$$

Reguletorul P se acordează la obiectul cu f.d.t. (3) după metoda GMS și parametrul de acord al reguletorului se determină din relația [3]

$$k_p = (1/k) \exp(-\tau J) (-a_0 J^2 + a_1 J - 1). \quad (5)$$

În relația (5) J este gradul maximal de stabilitate (GMS) și care se alege (este o mărime $J > 0$). Alegând valoarea lui J se va obține o valoare necesară a lui k_{p3} ca bucla de reglare să aibă performanțele dorite (în acest caz se alege durata impusă procesului tranzitoriu).

În continuare se determină f.d.t. a conturului interior închis cu reguletorul P

$$H'_{F3}(s) = \frac{H_{R3}(s)H_{F3}(s)}{1 + H_{R3}(s)H_{F3}(s)} = \frac{n_0}{h_0 s^3 + h_1 s^2 + h_2 s + h_3}, \quad (6)$$

$$\text{unde } n_0 = \frac{k_{p3}k_3}{1 + k_{p3}k_3}; h_0 = \frac{\tau T_3 T_4}{1 + k_{p3}k_3}; h_1 = \frac{\tau(T_3 + T_4) + T_3 T_4}{1 + k_{p3}k_3};$$

$$h_2 = \frac{\tau + T_3 + T_4}{1 + k_{p3}k_3}; h_3 = 1.$$

Reguletorul PI se acordează la obiectul cu f. d. t. (3) după metoda GMS și parametrii de acord se determină din relațiile [3]

$$k_p = (1/k) \exp(-\tau J) (a_0 \tau J^3 - J^2(\tau a_1 + 3a_0) + J(\tau + 2a_1) - 1); \quad (7)$$

$$k_i = (1/k) \exp(-\tau J) J^2 (a_0 \tau J^2 - J(\tau a_1 + 2a_0) + \tau + a_1). \quad (8)$$

Variind valoarea $J > 0$ se pot obține valori ale parametrilor k_{p3} , k_{i3} pentru care performanțele SA sunt cele dorite.

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

$$H'_{F3}(s) = \frac{H_{R3}(s)H_{F3}(s)}{1 + H_{R3}(s)H_{F3}(s)} = \frac{d_0 s + d_1}{c_0 s^4 + c_1 s^3 + c_2 s^2 + c_3 s + c_4}, \quad (9)$$

$$\text{unde } d_0 = \frac{k_{p3}}{k_{i3}}; d_1 = 1; c_0 = \frac{\tau T_3 T_4}{k_{i3} k_3}; c_1 = \frac{\tau(T_3 + T_4) + T_3 T_4}{k_{i3} k_3};$$

$$c_2 = \frac{\tau + T_3 + T_4}{k_{i3} k_3}; c_3 = \frac{1 + k_{p3} k_3}{k_{i3} k_3}; c_4 = 1.$$

Etapa II. Acordarea reguletoarelor P , PI în al doilea contur interior. Schema bloc structurală a buclei a doua interioare se prezintă în fig.2.

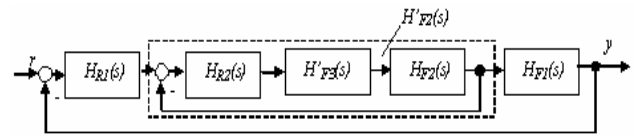


Fig. 2. Schema bloc structurală a buclei a doua interioare.

Pentru acordarea reguletoarelor P , PI respective în conturul interior doi se determină f.d.t. echivalentă a obiectului (6) obținută pentru cazul acordării reguletorului P în conturul interior unu și subprocesul cu f.d.t. $H_{F2}(s)$ (2)

$$H_{\Sigma F2}(s) = H'_{F3}(s)H_{F2}(s) = \frac{k}{a_0 s^4 + a_1 s^3 + a_2 s^2 + a_3 s + a_4}, \quad (10)$$

$$\text{unde } k = \frac{k_{p3}k_3k_2}{1 + k_{p3}k_3}; a_0 = \frac{\tau T_3 T_4 T_2}{1 + k_{p3}k_3};$$

$$a_1 = \frac{\tau(T_3 + T_4)T_2 + T_3 T_4 T_2 + \tau T_3 T_4}{1 + k_{p3}k_3};$$

$$a_2 = \frac{(\tau + T_3 + T_4)T_2 + \tau(T_3 + T_4) + T_3 T_4}{1 + k_{p3}k_3};$$

$$a_3 = T_2 + \frac{\tau + T_3 + T_4}{1 + k_{p3}k_3}; a_4 = 1.$$

Reguletorul P se acordează la obiectul cu f.d.t. (10) după metoda GMS și parametrul de acord al reguletorului se determină din relația [3]

$$k_{p2} = \frac{1}{k} (-a_0 J^4 + a_1 J^3 - a_2 J^2 + a_3 J - a_4). \quad (11)$$

Reguletorul PI se acordează la obiectul cu f. d. t. (10) după metoda GMS și parametrii de acord se determină din relațiile [3]

$$k_{p2} = \frac{1}{k} (-5a_0 J^4 + 4a_1 J^3 - 3a_2 J^2 + 2a_3 J - a_4); \quad (12)$$

$$k_{i2} = \frac{J^2}{b_0} (-4a_0 J^3 + 3a_1 J^2 - 2a_2 J + a_3). \quad (13)$$

Pentru cazul acordării reguletoarelor P , PI în conturul interior doi când în conturul interior unu a fost acordat reguletorul PI cu f.d.t. echivalentă (9) și subprocesul cu f.d.t. $H_{F2}(s)$ (2) s-a obținut f.d.t. echivalentă (14)

$$H_{\Sigma F2}(s) = H'_{F3}(s)H_{F2}(s) = \frac{b_0 s + b_1}{a_0 s^5 + a_1 s^4 + a_2 s^3 + a_3 s^2 + a_4 s + a_5}, \quad (14)$$

$$\text{unde } b_0 = \frac{k_2 k_{p3}}{k_{i3}}; b_1 = k_2; a_0 = \frac{\tau T_3 T_4 T_2}{k_{i3} k_3};$$

$$a_1 = \frac{T_2[\tau(T_3 + T_4) + T_3 T_4]}{k_{i3} k_3} + \frac{\tau T_3 T_4}{k_{i3} k_3};$$

$$a_2 = \frac{T_2(\tau + T_3 + T_4)}{k_{i3} k_3} + \frac{\tau(T_3 + T_4) + T_3 T_4}{k_{i3} k_3};$$

$$a_3 = \frac{T_2(1 + k_{p3} k_3)}{k_{i3} k_3} + \frac{\tau + T_3 + T_4}{k_{i3} k_3}; a_4 = T_2 + \frac{1 + k_{p3} k_3}{k_{i3} k_3}; a_5 = 1.$$

Reguletorul P se acordează la obiectul cu f.d.t. (14) după metoda GMS și parametrul de acord al reguletorului se determină din relația [3]

$$k_{p2} = \frac{a_0 J^5 - a_1 J^4 + a_2 J^3 - a_3 J^2 + a_4 J - a_5}{b_1 - b_0 J}. \quad (15)$$

Reguletorul PI se acordează la obiectul cu f. d. t. (14) după metoda GMS și parametrii de acord se determină din relațiile [3]

$$k_{p2} = \frac{-d_0J^6 + d_1J^5 - d_2J^4 + d_3J^3 - d_4J^2 + d_5J - d_6}{(b_1 - b_0J)^2}, \quad (16)$$

unde $d_0 = 5a_0b_0$, $d_1 = 6a_0b_1 + 4a_1b_0$, $d_2 = 5a_1b_1 + 3a_2b_0$,
 $d_3 = 4a_2b_1 + 2a_3b_0$, $d_4 = 3a_3b_1 + a_4b_0$, $d_5 = 2a_4b_1$, $d_6 = a_5b_1$.

$$k_{i2} = \frac{-a_0J^6 + a_1J^5 - a_2J^4 + a_3J^3 - a_4J^2 + a_5J}{b_1 - b_0J} + k_pJ. \quad (17)$$

Etapa III. Identificarea modelului. Obiectul de conducere constă din f.d.t. echivalente a conturului interior unu, doi și subprocesul $H_{F1}(s)$ în conexiune serie și este un model de obiect complex și procedura de acordare a reguletoarelor în conturul exterior devine dificilă. Pentru a depăși această dificultate se procedează: s-a ridicat procesul tranzitoriu pentru obiectul echivalent în conturul exterior și în MATLAB s-a identificat f.d.t. echivalentă a obiectului

$$H'_{F2}(s) = \frac{b_0s + b_1}{a_0s^5 + a_1s^4 + a_2s^3 + a_3s^2 + a_4s + a_5}. \quad (18)$$

Etapa IV. Acordarea reguletoarelor P , PI , PID în conturul exterior. Se acordează reguletorul P , PI și PID respectiv în conturul exterior.

Schema bloc structurală a buclei exterioare este prezentată în fig.3.

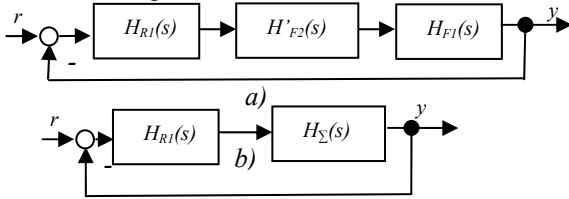


Fig. 3. Schema bloc structurală a buclei exterioare.

La modelul obiectului (18) se acordează reguletorul P , PI , PID , utilizînd relații din [4,5,6]:

Reguletorul P

$$k_{p2} = \frac{a_0J^5 - a_1J^4 + a_2J^3 - a_3J^2 + a_4J - a_5}{b_1 - b_0J}. \quad (19)$$

Reguletorul PI

$$k_{p2} = \frac{-d_0J^6 + d_1J^5 - d_2J^4 + d_3J^3 - d_4J^2 + d_5J - d_6}{(b_1 - b_0J)^2}, \quad (20)$$

unde $d_0 = 5a_0b_0$, $d_1 = 6a_0b_1 + 4a_1b_0$, $d_2 = 5a_1b_1 + 3a_2b_0$,
 $d_3 = 4a_2b_1 + 2a_3b_0$, $d_4 = 3a_3b_1 + a_4b_0$, $d_5 = 2a_4b_1$, $d_6 = a_5b_1$.

$$k_{i2} = \frac{-a_0J^6 + a_1J^5 - a_2J^4 + a_3J^3 - a_4J^2 + a_5J}{b_1 - b_0J} + k_pJ. \quad (21)$$

Reguletorul PID

$$k_d = \frac{d_0J^7 - d_1J^6 + d_2J^5 - d_3J^4 + d_4J^3 - d_5J^2 + d_6J - d_7}{2(b_1 - b_0J)^4}. \quad (22)$$

unde $d_0 = 5a_0b_0^3$; $d_1 = 68a_0b_0^2b_1 + 12a_1$;
 $d_2 = 78a_0b_0b_1^2 + 42a_1b_0^2b_1 + 6a_2b_0^3$; $d_3 = 100a_0b_0b_1b_2 + 20a_0b_1^3 +$
 $+ 28a_1b_0b_1^2 + 24a_1b_0^2b_2 + 8a_2b_0^2b_1$;
 $d_4 = 60a_0b_1^3 + 50a_1b_0b_1^2 + 64a_1b_0b_1b_2 + 12a_1b_1^3 + 8a_2b_0^2b_2 + 12a_2b_0b_1^2$;
 $d_5 = 78a_0b_1b_2^2 + 48a_0b_0b_2^2 + 52a_1b_1^2b_2 +$
 $+ 32a_1b_0b_1b_2 + 16a_2b_0b_2(b_1 + b_0) + 12a_2b_1^3 + 4a_3b_0b_1^2 -$
 $- 12a_3b_0b_2^2 - 6a_3b_1^2b_2 - 6a_3b_1b_2^2 - 4a_4b_0b_1b_2 -$
 $- 2a_4b_0^2b_1 - 2a_4b_1^3 + 4a_5b_0^2b_2 + 2a_5b_0^3 + 2a_5b_0b_1^2$;

$$d_6 = 30a_0b_2^2 + 50a_1b_1b_2^2 + 18a_2b_2(b_0b_2 + b_1^2) +$$

$$+ 2a_3b_1(2b_0b_2 + b_1^2) - 2a_4b_0(b_1^2 + 2b_0b_2) + 2a_5b_0^2b_1$$
;
 $d_7 = 20a_1b_2^3 + 28a_2b_1b_2^2 + 4a_3b_0b_2^2 + 8a_3b_1^2b_2 - 8a_4b_0b_1b_2 - 4a_5b_0^2b_2$;
 $k_{p1} = \frac{-d_0J^6 + d_1J^5 - d_2J^4 + d_3J^3 - d_4J^2 + d_5J - d_6}{(b_0 - b_1J)^2} + 2k_{d1}J, \quad (23)$

unde $d_0 = 5a_0b_0$, $d_1 = 6a_0b_1 + 4a_1b_0$, $d_2 = 5a_1b_1 + 3a_2b_0$,

$d_3 = 4a_2b_1 + 2a_3b_0$, $d_4 = 3a_3b_1 + a_4b_0$,

$d_5 = 2a_4b_1$, $d_6 = a_5b_1$.

$$k_{i1} = \frac{-a_0J^6 + a_1J^5 - a_2J^4 + a_3J^3 - a_4J^2 + a_5J}{b_1 - b_0J} - k_{d1}J^2 + k_{p1}J. \quad (24)$$

III. APLICAȚII ȘI SIMULARE PE CALCULATOR

Pentru a analiza eficiența metodei de acordare a reguletoarelor tipizate la sisteme de reglare în cascadă cu trei bucle de reglare la obiecte cu inerție de ordinul unu și doi și timp mort, conform relațiilor prezentate mai sus s-au efectuat calculele respective la subprocese cu parametrii dați: pentru f.d.t. $H_{F3}(s)$: $k_3=1$, $T_3=2$, $T_4=1$, $\tau = 0.5$; $H_{F2}(s)$: $k_2=2$, $T_2=3$; $H_{F1}(s)$: $k_1=4$, $T_1=5$.

Procedura de acordare a reguletoarelor se începe cu acordarea reguletorului P în conturul interior unu și PI în conturul interior doi. Se ridică procesul tranzitoriu a obiectului echivalent (contur interior unu, doi și f.d.t. $H_{F1}(s)$) în MATLAB prezentat în fig. 4 și se identifică f.d.t.

$$H'_{F2}(s) = \frac{12.084s + 4}{235.73s^5 + 479.25s^4 + 336.77s^3 + 109.37s^2 + 16.86s + 1}. \quad (25)$$

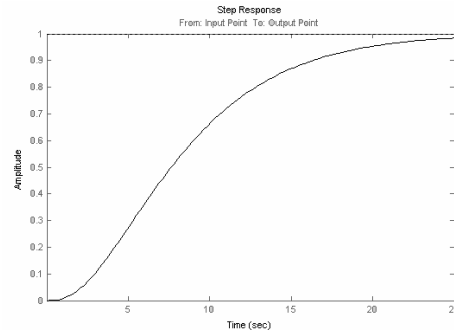


Fig. 4. Procesul tranzitoriu al obiectului echivalent.

Schema de simulare pe calculator este prezentată în figura 5.

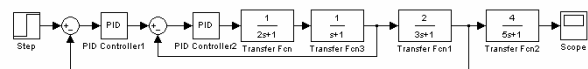


Fig. 5. Schema a SA de simulare pe calculator.

Efectuînd calculele respective s-au obținut următoarele rezultate pentru cazul acordării reguletoarelor P , PI și PID în conturul exterior: pentru cazul acordării reguletorului P : $J_{opt}=0.21$, $k_p=0.00028$; pentru cazul acordării reguletorului PI : $J_{opt}=0.11$, $k_p=0.06$, $k_i=0.0102$; pentru cazul acordării reguletorului PID : $J_{opt}=0.17$, $k_p=0.1609$, $k_i=0.0169$, $k_d=0.38221$.

Pentru verificarea și compararea rezultatelor obținute a fost efectuată acordarea reguletoarelor P , PI și PID în

conturul exterior după metoda Ziegler-Nichols (ZN). În conformitate cu această metodă au fost obţinuţi parametrii critici ai SA: $k_{cr}=1.3$, $T_{cr}=19.8$ s. Utilizând aceste valori au fost determinate valorile optime pentru P regulator: $k_{popi}=0.65$, pentru PI regulator: $k_{popi}=0.585$ şi $k_i=0.0631$ ($T_{iopi}=15.84$ s) şi pentru PID regulator: $k_{popi}=0.975$; $k_i=0.0842$ ($T_{iopi}=11.88$ s); $k_{dopi}=1.98$.

Pentru verificarea rezultatelor obţinute a fost făcută simularea pe calculator în MATLAB (fig.6).

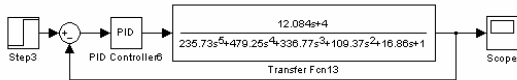


Fig. 6. Schema a SA de simulare pe calculator.

Procesele tranzitorii obţinute sunt prezentate în figurile 7 şi 8: în figura 7 sunt prezentate procesele tranzitorii la acordarea reguletoarelor după metoda GMS, în figura 8 sunt prezentate procesele tranzitorii la acordarea reguletoarelor după metoda ZN. În fig.7, 8 avem următoarele notații: curbele 1 – pentru cazul acordării regulatorului P ; curbele 2 – pentru cazul acordării regulatorului PI ; curbele 3 – pentru cazul acordării regulatorului PID .

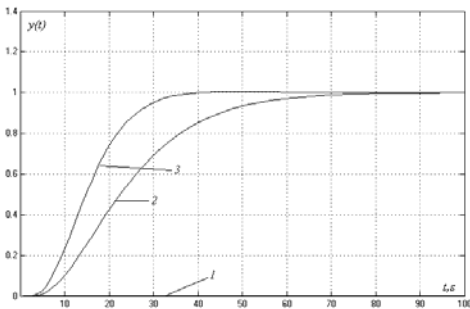


Fig. 7. Procese tranzitorii ale SRC cu reguletoare acordate după metoda GMS.

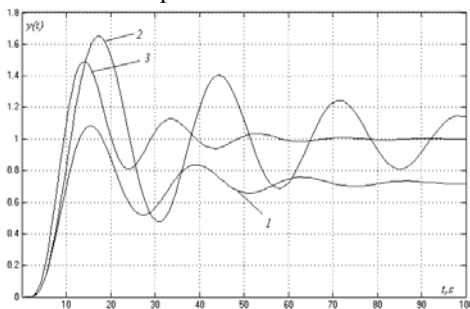


Fig. 8. Procese tranzitorii ale SRC cu reguletoare acordate după metoda ZN.

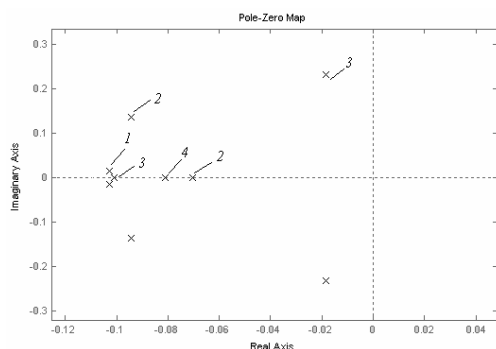


Fig. 9. Distribuirea polilor în planul complex.

În fig. 9 este prezentat distribuirea polilor în planul complex, unde avem următoarele notații: 1 – în cazul acordării regulatorului PI după metoda GMS, 2 – în cazul acordării regulatorului PID după metoda GMS, 3 – în cazul acordării regulatorului PI după metoda ZN, 4 – în cazul acordării regulatorului PID după metoda ZN.

IV. CONCLUZII

În rezultatul analizei rezultatelor obţinute la acordarea reguletoarelor P , PI , PID în sisteme de reglare în cascadă la modele de obiecte cu inerție de tipul (1), (2) și (3) cu parametrii cunoscuți pot fi făcute următoarele concluzii:

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

BIBLIOGRAFIE

- [1] V. Ia. Rotach, Teoria avtomaticheskogo upravlenia termoenergheticheskimi protzessami. – Moskva: Energoatomizdat, 1985.-292 s.
- [2] V. A. Lukas, Teoria avtomaticheskogo upravlenia. – Moskva, Nedra, 1990.- 416 s.
- [3] I. Dumitrache și al., Automatizări electronice. - București: EDP, 1993.- 660 p.
- [4] B. Izvoreanu, 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, 1997, V.I. – pp. 179-184.
- [5] Izvoreanu B., Cojuhari I., “Contribuții la acordarea reguletoarelor tipizate În sisteme de reglare în cascadă cu două contururi cu inerție” / În: Materialele Conferinței Tenico - Științifice a Colaboratorilor, Doctoranzilor și Studenților UTM, Chişinău, 2007, V.I.
- [6] Izvoreanu B., Fiodorov I., Cojuhari I., “Tuning of Controllers to the Third Order Advance Delay Objects” / In: Proceedings of the 5th International Conference on Microelectronics and Computer Science (ICMCS-2007), Chişinău, 2007, V.I. – pp. 250-253.