

SINTEZA REGULATOARELOR TIPIZATE LA OBIECTE CU INERȚIE PENTRU SISTEME DE REGLARE AUTOMATĂ CU GRAD MAXIMAL DE STABILITATE

Nadejda PALAMARCIUC

Departamentul Ingineria Software și Automatică, Facultatea Calculatoare, Informatică și Microelectronică,
Universitatea Tehnică a Moldovei, Chișinău, Republica Moldova

Autorul corespondent: Nadejda Palamarciuc, e-mail: nadejda.popovici@ati.utm.md

Îndrumătorul/coordonatorul științific: **Ion FIODOROV**, doctor, Universitatea Tehnică a Moldovei

Rezumat. S-a propus de realizat o metodă de sinteză pentru regulatoarele tipizate a sisteme de reglare automată (SRA) folosind metoda grad maximal de stabilitate. Metoda elaborată reprezintă proceduri analitice simple, care se reduc la utilizarea ecuațiilor algebrice, fiind necesar un volum redus de calcule, aceasta exclude de a impune unele restricții asupra obiectelor reglate și se poate aplica pentru modele de obiecte cu inerție de ordin arbitrar, astatism și timp mort. În cadrul studiului de caz, în urma aplicării metodei gradului maximal de stabilitate, au fost elaborați algoritmi analitici de sinteză pentru regulatorul P, PI și PID pentru modelul de obiect cu inerție de ordinul patru. S-au apreciat performanțele sistemului proiectat după metoda gradului maximal de stabilitate și s-au comparat cu performanțele obținute în rezultatul sintezei după alte metode cunoscute. Astfel, în comparație cu alte metode de sinteză a regulatoarelor, metoda și algoritmi propuși oferă sistemelor proiectate un grad maximal de stabilitate și performanțe ridicate, rezultând procese tranzitorii aperiodice. Algoritmi elaborați pot fi utilizați atât pentru sinteza sistemelor automate convenționale, cât și pentru sinteza sistemelor automate cu auto-acordare și sistemelor adaptive.

Cuvinte cheie: sistem de reglare automată, obiect de reglare, regulatoare tipizate, sinteza regulatoarelor, criteriul gradului maximal de stabilitate.

Introducere

Una din problemele conducerii automate este sinteza regulatorului, care presupune proiectarea sau alegerea unui algoritm de reglare (structura regulatorului) și determinarea parametrilor optimali, astfel să obținem și să menținem obiectivul conducerii și să fie satisfăcute cerințele de performanță impuse sistemului automat [1-3].

Un interes sporit îl prezintă metodele și algoritmi analitici de sinteză a regulatoarelor, bazați pe expresii algebrice, care ar stabili legătura directă dintre performanțele sistemului de reglare automată proiectat și parametrii sintetizați ai regulatorului, iar unul din criteriile de perspectivă, în acest sens, poate fi criteriul gradului maximal de stabilitate. În raport cu acest criteriu, introducem noțiunea de grad maximal de stabilitate J și ecuația caracteristică se transcrie prin împărțirea ei în n factori liniari. Valoarea optimală a parametrilor de acord, în sensul asigurării gradului maximal de stabilitate J , se determină în urma egalării coeficienților cu aceiași indici a acestor ecuații. După unele transformări se determină valoarea gradului maximal de stabilitate și expresiile analitice de calcul a parametrilor de acord ai regulatorului sintetizat [4-6].

În lucrare se propune elaborarea algoritmilor analitici, bazați pe expresii algebrice, pentru sinteza regulatoarelor tipizate PID și variațiile lui pentru modele de obiecte cu inerție de ordinul patru folosind criteriul gradului maximal de stabilitate.

1. Algoritm de sinteză a reguletoarelor tipizate pentru sisteme de reglare automată cu grad maximal de stabilitate

Problema sintezei sistemelor de reglare automată (SRA) cu grad maximal de stabilitate se formulează în felul următor [4-6]. Se consideră o structură convențională de sistem de reglare automată (SRA) (Fig. 1), care include obiectul reglat cu inerție, cu parametri cunoscuți

$$H_F(s) = \frac{k}{a_0 s^r + a_1 s^{r-1} + \dots + a_{r-1} s + a_r} \quad (1)$$

și regulatorul tipizat PID, care se definește folosind următoarele funcții de transfer

$$H_R(s) = k_p + \frac{k_i}{s} + k_d s = \frac{k_i + k_p s + k_d s^2}{s} = \frac{b_1 + b_2 s + b_3 s^2}{s}, \quad (2)$$

unde k_p, k_i, k_d și $b_j, (j = 1, \dots, m)$ sunt parametrii dinamici de acord ai regulatorului.

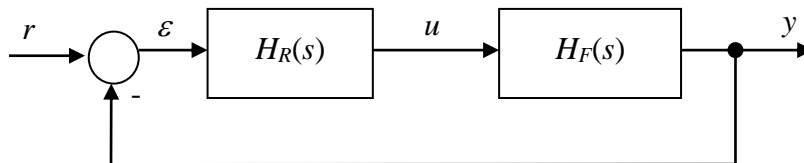


Figura 1. Schema bloc structurală a sistemului automat

Este necesar să se determine vectorul parametrilor dinamici de acord b_j ai regulatorului, astfel să asigurăm parametrii cunoscuți ai obiectului valoarea maximală a gradului de stabilitate al sistemului

$$\eta_m = \max \eta(b_j) \quad j = 1, \dots, m,$$

unde η_m este gradul maximal de stabilitate (GMS); η - gradul de stabilitate al SRA.

Numărul parametrilor de acord m ai regulatorului au fost aleși din considerentele satisfacerii condițiilor de stabilitate Hurwitz și trebuie să îndeplinească condiția $m \leq n - 1$, unde n - gradul ecuației caracteristice a sistemului proiectat.

Pentru aplicații practice s-a elaborat următorul algoritm de sinteză pentru reguletoarele tipizate la obiecte cu inerție și timp mort pentru SRA cu grad maximal de stabilitate [7-9]:

1. Se dă modelul matematic al obiectului reglat cu parametri cunoscuți.
2. Se alege algoritmul de reglare $u(t)$.
3. Se determină funcția de transfer a SRA în circuit închis.
4. Se obține ecuația caracteristică a sistemului în buclă închisă

$$A_n(p, b_j) = \sum_{i=0}^n a_i p^{n-i} + k \sum_{j=1}^m b_j p^{j-1} =$$

$$= d_0 p^n + d_1 p^{n-1} + \dots + d_{n-m} p^m + \dots + d_{n-1} p + d_n = 0,$$

unde b_j sunt parametrii dinamici de acord ai regulatorului; m - numărul parametrilor de acord, n - gradul ecuației caracteristice.

5. Se verifică condiția $m \leq (n - 1)$:

dacă condiția se îndeplinește, atunci se trece la pasul următor,

dacă condiția nu se îndeplinește, atunci procedura de sinteză se reia de la început cu un alt algoritm de reglare.

6. Se introduce noțiunea de grad maximal de stabilitate J și, utilizând substituția $p_i = -J \pm j\omega_k$, ecuația caracteristică a sistemului de reglare automată se descompune în n factori liniari

$$A_n(p) = d_0 \prod_{k=1}^l (p - j\omega_k + J)(p + j\omega_k + J) \prod_{i=1}^z (p + J) =$$

$$= q_0 p^n + q_1 p^{n-1} + \dots + q_{n-1} p + q_n = 0,$$

unde l - numărul perechilor de rădăcini complexe conjugate; z - numărul de rădăcini reale; $n = 2l + z$ - gradul ecuației caracteristice a SRA proiectat.

7. Din egalitatea $d_{n-m}(a_i) = q_{n-m}(a_0, J, \omega_k), \omega_k = 0$, se obține expresia pentru determinarea gradului maximal de stabilitate J al SRA proiectat

$$J = \sqrt[n-m]{\frac{d_{n-m}}{c_{n-m}d_0}},$$

$$\text{unde } c_{n-m} = c_n^m = \frac{n(n-1)(n-2)\dots(n-m+1)}{m!}.$$

8. Utilizând egalitățile $d_i(k, a_i, b_j) = q_i(a_0, J, \omega_k), i = (n - (m - 1), \dots, n)$, se determină expresiile pentru calculul parametrilor de acord ai regulatorului tipizat ales $b_j = f_j(k, a_0, a_i, J, \omega_k), j = (1, \dots, m)$, unde parametrii liberi ω_k reprezintă părțile imaginare ale perechilor de rădăcini complexe ale ecuației caracteristice a sistemului sintetizat cu regulatorul respectiv.

9. Verificarea prin simulare pe calculator a performanțelor SRA proiectat. Dacă performanțele impuse sistemului sunt satisfăcute, atunci procedura de acordare s-a încheiat, iar dacă performanțele impuse nu sunt satisfăcute, atunci procedura se reia de la început cu alt tip de algoritm de reglare.

2. Sinteza reguletoarelor tipizate la obiecte cu inerție de ordinul patru pentru sisteme de reglare automată cu grad maximal de stabilitate

Presupunem că obiectul reglat se descrie cu funcția de transfer a elementului cu inerție de ordinul patru

$$H_F(s) = \frac{k}{(T_1s+1)(T_2s+1)(T_3s+1)(T_4s+1)} = \frac{k}{a_0s^4+a_1s^3+a_2s^2+a_3s+a_4}, \quad (3)$$

unde k este coeficientul de transfer al obiectului; T_1, T_2, T_3, T_4 - constantele de timp; $a_0 = T_1T_2T_3T_4$; $a_1 = T_1T_2T_3 + T_1T_2T_4 + T_1T_3T_4 + T_2T_3T_4$; $a_2 = T_1T_2 + T_1T_3 + T_2T_3 + T_1T_4 + T_2T_4 + T_3T_4$; $a_3 = T_1 + T_2 + T_3 + T_4$; $a_4 = 1$.

Este necesar de a sintetiza reguletoarele liniare tipizate P, PI și PID la obiectul reglat (3) pentru SRA cu grad maximal de stabilitate.

Funcțiile de transfer ale sistemului în buclă închisă, alcătuit din obiectul reglat și reguletoarele respective, se prezintă după cum urmează

pentru SRA cu regulatorul P

$$H_1(s) = \frac{kk_p}{a_0s^4+a_1s^3+a_2s^2+a_3s+a_4+kk_p}, \quad (4)$$

pentru SRA cu regulatorul PI

$$H_2(s) = \frac{kk_p s + kk_i}{a_0s^5+a_1s^4+a_2s^3+a_3s^2+(a_4+kk_p)s+kk_i}, \quad (5)$$

pentru SRA cu regulatorul PID

$$H_3(s) = \frac{kk_d s^2 + kk_p s + kk_i}{a_0s^5+a_1s^4+a_2s^3+(a_3+kk_d)s^2+(a_4+kk_p)s+kk_i}, \quad (6)$$

unde k_p, k_i și k_d sunt parametrii dinamici de acord ai reguletoarelor tipizate P, PI, PID.

Din expresiile (4)-(6) se obțin ecuațiile caracteristice ale SRA cu reguletoarele respective

Pentru SRA cu regulatorul P

$$\begin{aligned} A_1(p) &= a_0p^4 + a_1p^3 + a_2p^2 + a_3p + a_4 + kk_p = \\ &= d_0p^4 + d_1p^3 + d_2p^2 + d_3p + d_4 = 0, \end{aligned} \quad (7)$$

unde $d_0 = a_0$; $d_1 = a_1$; $d_2 = a_2$; $d_3 = a_3$; $d_4 = a_4 + kk_p$.

Pentru SRA cu regulatorul PI

$$\begin{aligned} A_2(p) &= a_0p^5 + a_1p^4 + a_2p^3 + a_3p^2 + (a_4 + kk_p)p + kk_i = \\ &= d_0p^5 + d_1p^4 + d_2p^3 + d_3p^2 + d_4p + d_5 = 0, \end{aligned} \quad (8)$$

unde $d_0 = a_0$; $d_1 = a_1$; $d_2 = a_2$; $d_3 = a_3$; $d_4 = a_4 + kk_p$; $d_5 = kk_i$.

Pentru SRA cu regulatorul PID

$$\begin{aligned} A_3(p) &= a_0p^5 + a_1p^4 + a_2p^3 + (a_3 + kk_d)p^2 + (a_4 + kk_p)p + kk_i = \\ &= d_0p^5 + d_1p^4 + d_2p^3 + d_3p^2 + d_4p + d_5 = 0, \end{aligned} \quad (9)$$

unde $d_0 = a_0$; $d_1 = a_1$; $d_2 = a_2$; $d_3 = a_3 + kk_d$; $d_4 = a_4 + kk_p$; $d_5 = kk_i$.

A fost introdusă noțiunea de grad maximal de stabilitate J și, subștiind $p_i = -J \pm j\omega_k$, astfel ecuația caracteristică a SRA se devide în n factori liniari

Pentru SRA cu regulatorul P

$$\begin{aligned} A_1(p) &= a_0[(p+J)^2 + \omega_1^2][(p+J)^2 + \omega_2^2] = a_0[p^4 + 4Jp^3 + (6J^2 + \omega_1^2 + \omega_2^2)p^2 + \\ &\quad + 2J(2J^2 + \omega_1^2 + \omega_2^2)p + J^4 + J^2(\omega_1^2 + \omega_2^2) + \omega_1^2\omega_2^2] = \\ &= q_0p^4 + q_1p^3 + q_2p^2 + q_3p + q_4 = 0, \end{aligned} \quad (10)$$

unde $q_0 = a_0$; $q_1 = 4a_0J$; $q_2 = a_0(6J^2 + \omega_1^2 + \omega_2^2)$;
 $q_3 = 2a_0J(2J^2 + \omega_1^2 + \omega_2^2)$; $q_4 = a_0(J^4 + J^2(\omega_1^2 + \omega_2^2) + \omega_1^2\omega_2^2)$.

Pentru SRA cu regulatorul PI și PID

$$\begin{aligned} A_2(p) &= A_3(p) = a_0[(p+J)^2 + \omega_1^2][(p+J)^2 + \omega_2^2][p+J] = \\ &= a_0[p^5 + 5J_0p^4 + (10J_0^2 + \omega_1^2 + \omega_2^2)p^3 + (10J_0^3 + 3J_0(\omega_1^2 + \omega_2^2))p^2 + \\ &\quad + (5J_0^4 + 3J_0^2(\omega_1^2 + \omega_2^2) + \omega_1^2\omega_2^2)p + J_0^5 + J_0^3(\omega_1^2 + \omega_2^2) + \omega_1^2\omega_2^2] = \\ &= q_0p^5 + q_1p^4 + q_2p^3 + q_3p^2 + q_4p + q_5 = 0, \end{aligned} \quad (11)$$

unde $q_0 = a_0$; $q_1 = 5a_0J_0$; $q_2 = a_0(10J_0^2 + \omega_1^2 + \omega_2^2)$; $q_3 = a_0(10J_0^3 + 3J_0(\omega_1^2 + \omega_2^2))$;
 $q_4 = a_0(5J_0^4 + 3J_0^2(\omega_1^2 + \omega_2^2) + \omega_1^2\omega_2^2)$; $q_5 = a_0(J_0^5 + J_0^3(\omega_1^2 + \omega_2^2) + \omega_1^2\omega_2^2)$.

Folosind egalitatea $d_{n-m}(a_i) = q_{n-m}(a_0, J, \omega_k)$, pentru $\omega_k = 0$, se obțin expresiile pentru determinarea gradului maximal de stabilitate J al sistemului de reglare automată proiectat cu regulatorul respectiv

pentru SRA cu regulatorul P din (7) și (10)

$$J = \sqrt[3]{\frac{a_3}{4a_0}}, \quad (12)$$

pentru SRA cu regulatorul PI din (8) și (11)

$$J = \sqrt[3]{\frac{a_3}{10a_0}}, \quad (13)$$

pentru SRA cu regulatorul PID din (9) și (11)

$$J = \sqrt[3]{\frac{a_2}{10a_0}}. \quad (14)$$

Utilizând egalitățile $d_i(k, a_i, b_j) = q_i(a_0, J, \omega_k)$, $i = ((n - (m - 1)), \dots, n)$, $j = 1, \dots, m$, s-a determinat expresiile pentru calculul parametrilor de acord pentru regulatorului tipizat respectiv

Pentru regulatorul P din (7) și (10)

$$k_p = (1/k)[a_0J^4 + a_0J^2(\omega_1^2 + \omega_2^2) + a_0\omega_1^2\omega_2^2 - a_4], \quad (15)$$

unde parametrii liberi ω_1 și ω_2 reprezintă părțile imaginare ale perechilor de rădăcini complexe ale ecuației caracteristice a sistemului sintetizat cu regulatorul P $p_{1,2} = -J \pm \omega_1$, $p_{3,4} = -J \pm \omega_2$.

Pentru regulatorul PI din (8) și (11)

$$k_p = (1/k)[5a_0J^4 + 3a_0J^2(\omega_1^2 + \omega_2^2) + a_0\omega_1^2\omega_2^2 - a_4]; \quad (16)$$

$$k_i = (1/k)[a_0J^5 + a_0J^3(\omega_1^2 + \omega_2^2) + a_0J\omega_1^2\omega_2^2],$$

unde parametrii liberi ω_1 și ω_2 reprezintă părțile imaginare ale perechilor de rădăcini complexe conjugate ale ecuației caracteristice a sistemului sintetizat cu regulatorul PI $p_{1,2} = -J \pm \omega_1$, $p_{3,4} = -J \pm \omega_2$, $p_5 = -J$.

Pentru regulatorul PID din (9) și (11)

$$k_p = (1/k)[5a_0J^4 + 3a_0J^2(\omega_1^2 + \omega_2^2) + a_0\omega_1^2\omega_2^2 - a_4];$$

$$k_i = (1/k)[a_0J^5 + a_0J^3(\omega_1^2 + \omega_2^2) + a_0J\omega_1^2\omega_2^2]; \quad (17)$$

$$k_d = (1/k)[10a_0J^3 + 3a_0J(\omega_1^2 + \omega_2^2) - a_3],$$

unde parametrii liberi ω_1 și ω_2 reprezintă părțile imaginare ale perechilor de rădăcini complexe conjugate ale ecuației caracteristice a sistemului sintetizat cu regulatorul PID $p_{1,2} = -J \pm \omega_1$, $p_{3,4} = -J \pm \omega_2$, $p_5 = -J$.

3. Studiu de caz și simulare pe calculator

Cu scopul argumentării aplicabilității, eficacității și calității metodei propuse de sinteză folosind regulatoarele tipizate pentru proiectarea sistemelor de reglare automată folosind metoda grad maximal de stabilitate, se prezintă un studiu de caz, în cadrul căruia se apreciază performanțele sistemului de reglare automată proiectat în conformitate cu metoda gradului maximal de stabilitate și se compară cu performanțele obținute în rezultatul sintezei după alte metode cunoscute: Ziegler Nichols și Optimizării Parametrice [3].

Considerăm că procesul tehnologic este caracterizat de un model al unui obiect cu inerție de ordinul al patrulea cu parametri cunoscuți.

$$H_F(s) = \frac{k}{(T_1s+1)(T_2s+1)(T_3s+1)(T_4s+1)} = \frac{4}{(2s+1)(4s+1)(5s+1)(7s+1)}, \quad (18)$$

unde k - este coeficientul de transfer, T_1, T_2, T_3, T_4 - constantele temporale ale obiectului.

Se formulează problema sintezei regulatoarelor de tip P, PI și PID la obiectul reglat (18). Sinteza regulatoarelor folosind metoda gradului maximal de stabilitate se efectuează în baza algoritmilor analitici elaborați (12)-(17). Rezultatele sintezei sunt expuse în Tab. 1.

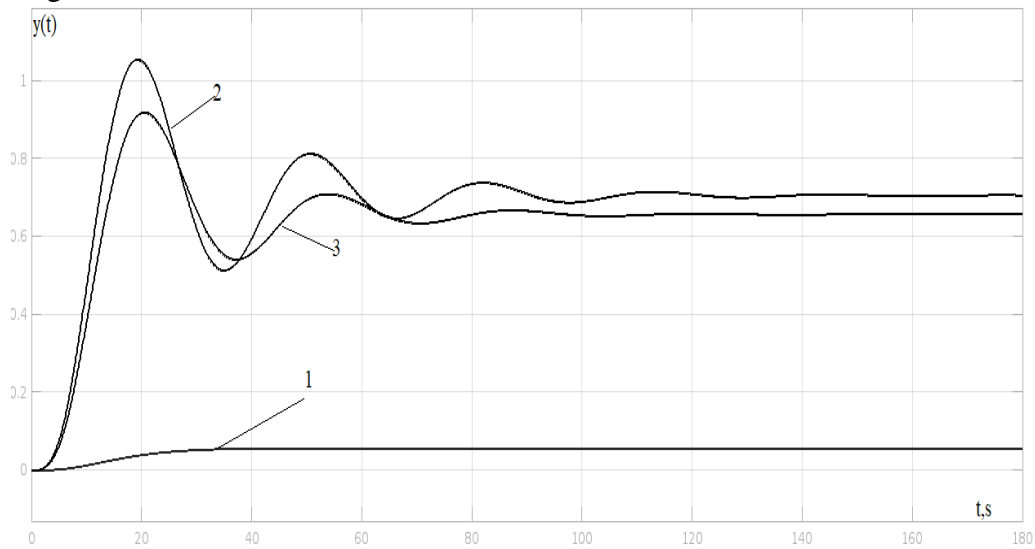
Tabelul 1

Rezultatele sintezei regulatoarelor la obiectul (18)

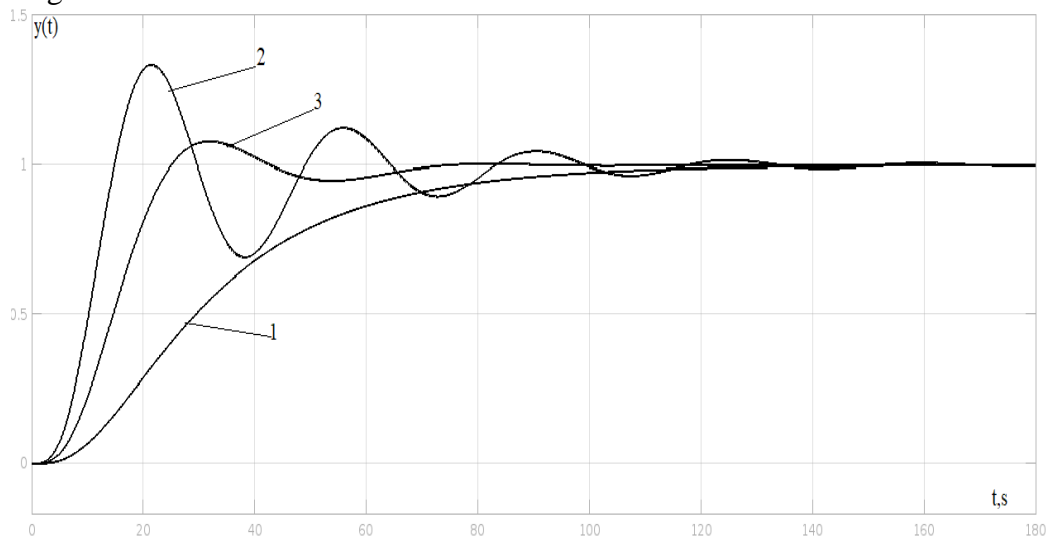
Nr. crt.	Metoda de sinteză	Tipul regulatorului					
		P	PI		PID		
		k_p	k_p	k_i	k_p	k_i	k_d
		$J=0.016$	$J=0.087$		$J=0.13$		
1.	Metoda gradului maximal de stabilitate	0,0015	0,061	0,007	0,16	0,013	0,5
2.	Metoda Ziegler Nichols	0,60	0,54	0,024	0,72	0,056	2,30
3.	Optimizarea parametrică	0,48	0,233	0,017	0,50	0,032	1,95

Procesele tranzitorii ale sistemului proiectat sunt prezentate în Fig. 2. Curbele au fost numerotate corespunzător metodelor din Tab. 1.

Regulator P



Regulator PI



Regulator PID

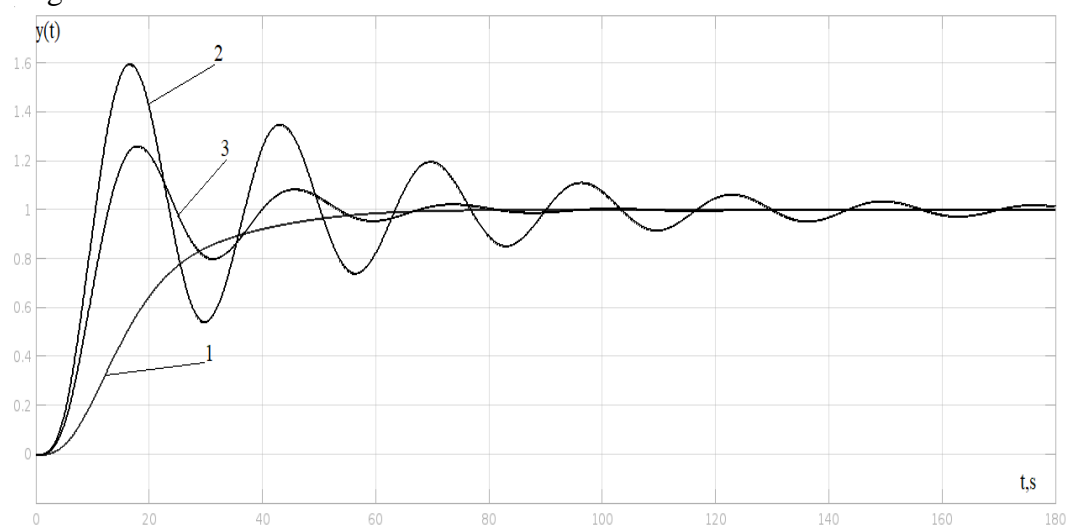


Figura 2. Procesele tranzitorii ale sistemului automat

Pe baza rezultatelor simulării au fost estimate performanțele sistemului pentru $\varepsilon_{st} = \pm 5\%$ din y_{st} , prezentate în tabelul 2.

Tabelul 2

Performanțele SRA cu obiectul (18), obținute în rezultatul simulării

Nr. ctr.	Metoda de sinteză	Tipul regulatorului	Performanțele sistemului		
			t_c, s	t_r, s	$\sigma, \%$
1.	Gradul maximal de stabilitate	P	28	28	0
		PI	84	84	0
		PID	55	55	0
2.	Ziegler-Nichols	P	16	82	62
		PI	22	93	35
		PID	12	126	60
3.	Optimizarea parametrică	P	17	58	38
		PI	23	58	8
		PID	14	52	23

Concluzii

1. A fost propusă o metodă de sinteză a sistemelor de reglare automată folosind criteriul gradului maximal de stabilitate, care oferă sistemelor proiectate o rapiditate înaltă, un suprareglaj redus și robustețe la variația parametrilor obiectului reglat.

2. Metoda elaborată reprezintă proceduri analitice simple, care se reduc la utilizarea ecuațiilor algebrice, solicită un volum mai mic de calcule, nu sunt impuse restricții indifereente de complexitate a obiectelor reglate și este fi aplicată pentru modele de obiecte cu inerție de ordin arbitrar, astatism și timp mort.

3. Algoritmii analitici elaborați pentru sinteza reglatoarelor tipizate P, PI și PID la modele de obiecte cu inerție de ordinul patru elimină cea mai mare parte din etapele prevăzute de algoritmul de bază al metodei Gradului Maximal de Stabilitate. Astfel, se simplifică esențial procedura de sinteză a reglatoarelor, iar volumul și respectiv durata de procesare se reduc aproximativ cu 80-90%. În rezultat, se eliberează resursele sistemului de calcul, făcând sistemul automat mai receptiv la influența negativă a perturbațiilor, fapt ce asigură condițiile necesare pentru sinteza și implementarea reglatoarelor cu autoacordare și a sistemelor automate adaptive.

4. În rezultatul analizei performanțelor sistemelor automate proiectate, în comparație cu alte metode de sinteză a reglatoarelor, rezultă că metoda și algoritmii propuși asigură ca sistemelor proiectate să aibă performanțe cu 20% mai înalte, iar gradul de stabilitate al sistemului este cel mai mare.

Bibliografie

- [1] R. Dorf, R. Bishop, *Modern Control System*. 8rd ed., Addison-Wesley, 2002.
- [2] К.А. Пупков, Н.Д. Егупов, *Методы классической и современной теории автоматического управления (том 1) (Methods of classical and modern automatic control theory (volume 1))*, М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004.
- [3] I. DUMITRACHE. *Ingineria reglării automate*. București: Politehnica Press, 2016. V. 1. 407 p. ISBN 978-606-515-686-9.
- [4] Д. П. Ким, *Теория автоматического управления. Т. 1. Линейные системы (Automatic control theory. T. 1. Linear systems)*. Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2003.
- [5] Д. П. Ким, Н. Д. Дмитриева, *Теория автоматического управления. Линейные системы. Задачник: учебное пособие для академического бакалавриата (Automatic control theory. Linear systems. Problem Book: Study Guide for Academic Bachelor's Degree)*, 2-е изд., испр. и доп., Москва: Издательство Юрайт, 2019.

- [6] Г.И. Загарий, А.М. Шубладзе, *Синтез систем управления на основе критерия максимальной степени устойчивости (The Synthesis of the Control System According to the Maximal Stability Degree)*. Moskva: Energoatomizdat, 1998.
- [7] I. Fiodorov, B. Izvoreanu, I. Cojuhari, Synthesis of Robust PID Controller by the Maximum Stability Degree Criterion. In *Proceedings of 2015 20th International Conference on Control Systems and Computer Science - CSCS-2015*, 27-29 May 2015. București, UPB, România. Volume 1, CSCS20 Main Track, pp. 57-64. ISBN 978-1-4799-1779-2. DOI: [10.1109/CSCS.2015.68](https://doi.org/10.1109/CSCS.2015.68)
- [8] I. Fiodorov, I. Cojuhari, B. Izvoreanu, D. Moraru, Synthesis of the Typical Controllers to the Model of Objects with Advance-Delay and Time Delay for the Control System with Maximum Stability Degree. In: *Proceedings of the 2018 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering*, Iași, România, October 18-19, 2018. Pp. 967-971, ©2018 IEEE Catalog Number: CFP1847S-USB; ISBN: 978-1-5386-5061-5. DOI: [10.1109/ICEPE.2018.8559883](https://doi.org/10.1109/ICEPE.2018.8559883)
- [9] I. Fiodorov, I. Cojuhari, B. Izvoreanu, D. Moraru, Analytical Algorithms for Synthesis of PID Controllers to the Complex Objects. In: *Proceedings of the 22nd International Conference on Control Systems and Computer Science, CSCS-2019*, 28-30 mai, 2019, București, România, pp. 107-111, DOI: 10.1109/CSCS.2019.00026.