

**UNIVERSITATEA TEHNICĂ A MOLDOVEI**

Cu titlu de manuscris

C. Z. U: 004.421:681.51:004.94(043)

**MORARU DUMITRU**

**METODE ȘI ALGORITMI DE ACORDARE A  
REGULATOARELOR LA MODELE DE PROCESE  
CU AVANS-ÎNTÂRZIERE**

**122.03 „MODELARE, METODE MATEMATICE, PRODUSE PROGRAM”**

**REZUMATUL ȘTIINȚIFIC AL TEZEI DE DOCTOR ÎN INFORMATICĂ**

**CHIȘINĂU, 2024**

Teza a fost elaborată în cadrul Departamentului de Inginerie Software și Automatică, Facultatea de Calculatoare, Informatică și Microelectronică, Universitatea Tehnică a Moldovei

**Conducător științific:**

**IZVOREANU Bartolomeu**, dr., conf. univ., Departamentul de Inginerie Software și Automatică

**Componența nominală a Consiliului Științific Specializat:**

1. GUȚULEAC Emilian, **președinte**, doctor habilitat în științe tehnice, profesor universitar, UTM.
2. FIODOROV Ion, **secretar științific**, doctor în informatică, conferențiar universitar, UTM.
3. COSTAȘ Ilie, doctor habilitat în informatică, profesor universitar, ASEM.
4. BEȘLIU Victor, doctor în științe tehnice, profesor universitar, UTM.
5. MORARU Vasile, doctor în științe fizico-matematice, profesor universitar, UTM.
6. CIORBĂ Dumitru, doctor în științe tehnice, conferențiar universitar, UTM.

**Referenți oficiali:**

1. LAZĂR Corneliu, doctor în automatică, profesor universitar emerit, Universitatea Tehnică „Gheorghe ASACHI” din Iași, România.
2. ZAPOROJAN Sergiu, doctor în științe tehnice, conferențiar universitar, Universitatea Tehnică a Moldovei.

Suținerea va avea loc la 24 ianuarie 2025, ora 15<sup>00</sup>, în ședința Consiliului științific specializat **D 122.03-24-26** din cadrul Universității Tehnice a Moldovei, str. Studenților 9/7, blocul de studii nr. 3, Facultatea Calculatoare, Informatică și Microelectronică, aula 3-208, MD-2045, Chișinău, Republica Moldova.

Teza de doctor și rezumatul pot fi consultate la biblioteca Universității Tehnice a Moldovei și pe pagina web a ANACEC. (<https://www.anacec.md> / [www.cnaa.md](http://www.cnaa.md)).

Rezumatul a fost expediat la \_\_\_\_\_

Secretar științific al Consiliului științific specializat,  
FIODOROV Ion, dr. în informatică, conf. univ. \_\_\_\_\_

Conducător,  
IZVOREANU Bartolomeu, dr. șt. tehn., conf. univ., \_\_\_\_\_

Autor,  
MORARU Dumitru, ing., mag. \_\_\_\_\_

## CUPRINS

<b>REPERE CONCEPTUALE ALE CERCETĂRII</b> .....	4
<b>CONȚINUTUL TEZEI</b> .....	6
<b>1 METODE DE SINTEZĂ A SISTEMELOR AUTOMATE</b> .....	7
1.1 Algoritmi și structuri de conducere automată.....	7
1.1.1 Algoritmul proporțional <i>P</i> .....	8
1.1.2 Algoritmul proporțional-derivativ <i>PD</i> .....	8
1.1.3 Algoritmul proporțional-integrativ <i>PI</i> .....	8
1.1.4 Algoritmul proporțional-integro-derivativ <i>PID</i> .....	9
1.2 Formularea problemei și direcțiile de cercetare.....	9
1.3 Concluzii la capitolul 1.....	10
<b>2 SINTEZA ALGORITMILOR DE CONDUCERE PENTRU OBIECTE CU AVANS-ÎNTÂRZIERE CU FAZĂ MINIMĂ ȘI ASTATISM ÎN BAZA METODEI GRADULUI MAXIMAL</b> .....	10
2.1 Algoritmul metodei gradului maximal de stabilitate.....	11
2.2 Concluzii la capitolul 2.....	13
<b>3 SINTEZA ALGORITMILOR DE CONDUCERE PENTRU OBIECTE CU AVANS-ÎNTÂRZIERE CU FAZĂ MINIMĂ, ASTATISM ȘI TIMP MORT ÎN BAZA METODEI GRADULUI MAXIMAL</b> .....	13
3.1 Algoritmul metodei gradului maximal de stabilitate cu iterații.....	13
3.2 Concluzii la capitolul 3.....	15
<b>4 ASPECTE PRACTICE DE SINTEZĂ A ALGORITMILOR DE CONDUCERE CU OBIECTE CU AVANS-ÎNTÂRZIERE, ASTATISM ȘI TIMP MORT</b> .....	15
4.1 Analiza metodelor de acordare a regulatorului la modelul obiectului cu anticipație- întârziere de ordinul doi cu astatism.....	15
4.2 Sinteza algoritmului de reglare la modelul obiectului cu anticipație-întârziere de ordinul trei cu oscilații.....	18
4.3 Sinteza algoritmului de reglare pentru proces termic în cuptor.....	20
4.4 Sinteza algoritmului de reglare al regimului termic în extruderul imprimantei 3D.....	21
4.5 Concluzii la capitolul 4.....	23
<b>CONCLUZII GENERALE</b> .....	24
<b>RECOMANDĂRI</b> .....	26
<b>BIBLIOGRAFIE</b> .....	26
<b>LISTA LUCRĂRILOR PUBLICATE LA TEMA TEZEI</b> .....	27
<b>ADNOTARE</b> .....	28
<b>ABSTRACT</b> .....	29
<b>АННОТАЦИЯ</b> .....	30

## REPERE CONCEPTUALE ALE CERCETĂRII

**Actualitatea și importanța temei de cercetare.** Problema sintezei regulatorului automat, care presupune proiectarea sau alegerea unui algoritm de reglare și determinarea parametrilor lui optimali, este una din problemele de bază a conducerii automate. Obținerea parametrilor optimali ai regulatorului presupune cunoașterea modelului matematic al procesului, astfel încât să fie atins și menținut obiectivul conducerii și să fie satisfăcute cerințele de performanță impuse sistemului automat: stabilitate, sensibilitate, proprietăți statice și dinamice, insensibilitate și robustețe la perturbații [1], [3], [4], [5].

Regulatorul PID este utilizat pentru a conduce și întreține starea proceselor, cum ar fi reglarea temperaturii, presiunii, debitului, nivelului în rezervor etc. Automatica este utilizată pe scară largă în industria de producție de astăzi pentru a conduce și menține evoluția procesului în diferite condiții ale acestuia. Algoritmul PID prezintă modelul matematic care descrie dinamica regulatorului ce se folosește pentru reglarea stării procesului [1], [3], [8].

**Domeniul de cercetare.** Domeniul de cercetare include aspecte teoretice și practice ale sintezei algoritmilor de conducere cu procese complexe, approximate cu modele de obiecte cu avans-întârziere, astatism și timp mort, evaluarea performanțelor și robusteții sistemului automat.

**Scopul lucrării** cercetarea și elaborarea algoritmilor de conducere în sisteme de conducere automată cu modele matematice de obiecte cu avans-întârziere, astatism și timp mort cu performanțe și robustețe ridicate.

**Obiectivele lucrării.** Din scopul propus rezultă următoarele obiective ale cercetării: analiza particularităților principiului de conducere în sistemele de reglare cu modele de obiecte cu avans-întârziere, astatism și timp mort și analiza metodelor existente de acordare a reguletoarelor tipizate în cadrul acestor structuri, analiza eficienței, avantajelor și dezavantajelor acestor metode; sinteza unor noi metode de acordare a reguletoarelor tipizate destinate asigurării performanțelor și robusteții ridicate ale sistemului automat sub influența semnalelor exogene; crearea și realizarea algoritmilor de sinteză a legilor de conducere în sisteme de reglare cu modele de obiecte cu avans-întârziere, astatism și timp mort în baza metodei gradului de stabilitate; sinteza algoritmului iterativ de acordare a parametrilor reguletoarelor tipizate, care să asigure performanțele și robustețea sistemului automat; verificarea și validarea algoritmilor elaborați de sinteză a legilor de conducere în sisteme de reglare cu modele de obiecte cu avans-întârziere, astatism și timp mort în pachetul de programe MATLAB; crearea instrumentarului destinat implementării metodei gradului maximal de stabilitate în forma grafo-analitică cu iterații pentru acordarea reguletoarelor tipizate cu modele de obiecte cu avans-întârziere, astatism și timp mort în sisteme de reglare convenționale prin crearea pachetului de programe respectiv.

**Ipoteza de cercetare.** Problema de acordare a reguletoarelor în sisteme de reglare automată se rezolvă prin sinteza algoritmului de conducere în baza modelului matematic identificat al procesului industrial condus, asigurând performanțele și robustețea sistemului. În teză se

sintetizează regulatorul pentru modele de obiecte cu avans-întârziere cu sau fără astatism, cu sau fără timp mort de ordinul unu, doi, trei și 4.

**Sinteza metodologiei de cercetare și justificarea metodelor de cercetare alese.** Teoria sistemelor, ingineria reglării automate, analiza matematică, teoria algoritmilor, metode de modelare matematică, metode și tehnici de identificare și tehnologii de programare orientate pe obiect.

**Rezultatele cercetării și sintezei algoritmului de conducere** se prezintă prin următoarele componente:

**Componenta 1.** Noutatea științifică a rezultatelor obținute constă în cercetarea și elaborarea unor noi metode, tehnici și algoritmi de sinteză a legilor de conducere în sisteme de reglare cu modele de obiecte cu avans-întârziere, astatism și timp mort, care asigură performanțe și robustețe ridicate ale sistemului automat.

**Componenta 2.** Rezultatele obținute în teză de doctor pot servi drept bază la sinteza sistemelor de conducere automată la automatizarea proceselor industriale complexe, în cazul soluționării problemei de sinteză a algoritmilor de conducere în sisteme de reglare cu modele de obiecte cu avans-întârziere, astatism și timp mort. Prin elaborarea algoritmului analitic și cu iterații se soluționează problema de sinteză a reguletoarelor tipizate, astfel încât să fie satisfăcute performanțele ridicate și asigurată robustețea sistemului. În comparație cu metodele existente, metoda utilizată – metoda gradului maximal de stabilitate în formă analitică și grafo-analitică cu iterații se caracterizează prin faptul că este aplicabilă la modele de obiecte cu avans-întârziere, astatism și timp mort, care permite asigurarea rezervei de stabilitate, performanțelor și robusteții ridicate ale sistemului automat.

**Componenta 3.** Algoritmul analitic și iterativ de acordare a regulatorului în baza metodei gradului maximal de stabilitate în formă grafo-analitică a fost implementat în produsul program *GMS-Calcul-DM*, care permite realizarea procedurii de acordare a reguletoarelor tipizate la modele de obiecte cu avans-întârziere, astatism și timp mort în cadrul structurilor de reglare convenționale. Acest produs program este utilizat în scopul instruirii studenților de la Departamentul Ingineria Software și Automatică, Facultatea Calculatoare, Informatică și Microelectronică a Universității Tehnice a Moldovei în cadrul Programului de studii Automatică și Informatică la disciplinele: Sisteme cu Microprocesoare, Modelare și Identificare, Ingineria Sistemelor Automate, Sisteme Integrate de Conducere. Metodele de sinteză a algoritmilor de reglare elaborate în teza de doctor au fost propuse și utilizate la CȘI InformInstrument S.A. Chișinău la automatizarea procesului de producere a straturilor epitaxiale de *GaAs*, în cadrul stabilizării regimului termic al dopanților și al concentrației de hidrogen, unde s-au calculat parametrii de acord ai reguletoarelor în sistemul automat, și propuse la utilizarea la Termoelectrica S.A. Chișinău la automatizarea cazanelor de preparare a apei calde menajere.

Postulatele științifice înaintate spre susținere:

1. Metoda de sinteză a algoritmilor de conducere în sisteme de reglare cu modele de obiecte cu avans-întârziere, astaticism și timp mort.

2. Instrumentarul matematic pentru acordarea reguletoarelor tipizate la modele de obiecte cu avans-întârziere, astaticism și timp mort pe baza metodei gradului maximal de stabilitate.

3. Algoritmul iterativ de acordare a reguletoarelor tipizate la modele de obiecte cu avans-întârziere, astaticism și timp mort în baza metodei gradului maximal de stabilitate în formă grafo-analitică în sisteme de reglare automată, care asigură obținerea performanțelor și robusteții ridicate ale sistemului automat.

4. Pachetul de programe *GMS-Calcul-DM* (3 module) de sinteză a algoritmilor de reglare P, PI, PD și PID pentru modele de obiecte cu avans-întârziere, astaticism și timp mort.

**Aprobarea rezultatelor științifice.** Rezultatele științifice de bază obținute și reflectate în lucrare, au fost prezentate la conferințe științifice naționale, internaționale și publicate în reviste științifice din țară și de peste hotare:

– *Proceedings of the 2018 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE-2018)*, Iași, România, October 18-19, 2018.

– *Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE-2022)*, Iași, Romania, 19-21 octombrie, 2022.

– *Conferința Tehnico-Științifică a Colaboratorilor, Doctoranzilor și Studenților UTM*, 5-7 aprilie 2023, Chișinău.

– *Analele Universității din Craiova, seria: Ingineria Electrică*. 2017, No. 41, Vol. 41, Issue 1.

– *Meridian Ingineresc, UTM*. 2016, Nr. 2.

– „*Intellectus*”, *Revista de proprietate intelectuală, știință și educație*, 2023, No. 2.

**Publicații științifice.** La tema tezei au fost publicate 8 articole științifice (dintre care 3 fără coautori) cu un volum total de 3.87 coli de tipar, inclusiv 3 articole recenzate publicate în reviste.

**Structura și volumul lucrării.** Teza este compusă din introducere, patru capitole, concluzii finale, bibliografie (123 titluri) și 3 anexe. Conținutul de bază al tezei este expus pe 120 pagini și inserează 59 figuri și 15 tabele.

## CONȚINUTUL TEZEI

În introducere, se argumentează actualitatea temei de cercetare, se formulează scopul și sarcinile cercetării, se prezintă domeniul și obiectul cercetării. De asemenea, se evidențiază elementele de noutate științifică ale rezultatelor obținute și se redă semnificația teoretică și valoarea aplicativă a domeniului de studiu. În continuare, se face o scurtă prezentare a conținutului tezei pe capitole.

## 1 METODE DE SINTEZĂ A SISTEMELOR AUTOMATE

În capitolul dat se descrie noțiunea de proces industrial, au fost reprezentate caracteristicile unui proces industrial și modelele matematice care descriu procesele industriale. S-au prezentat exemple de obiecte cu avans-întârziere, astatism și timp mort și procedura de identificare. Au fost reprezentate sub formă de tabel modele matematice ale obiectelor care sunt puse în discuție în următoarele capitole ale tezei de doctor. S-a formulat problema sintezei algoritmului de reglare și au fost prezentați algoritmi tipizați de reglare.

În tabelele 1.1 și 1.2 se prezintă modele de obiecte cu avans de ordinul unu și întârziere de ordinul 1, 2, 3 și 4 cu sau fără astatism și cu sau fără timp mort care vor fi analizate în teză [1], [4].

**Tabelul 1.1. Modele de obiecte cu avans-întârziere**

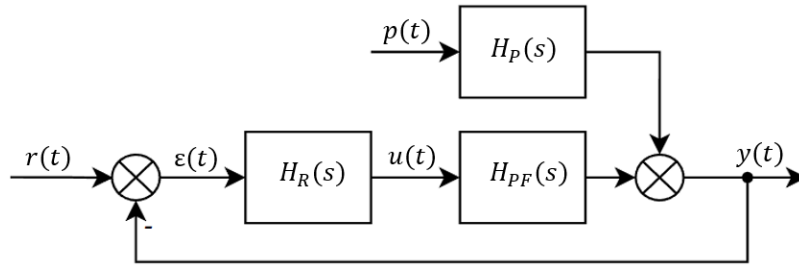
Nr. crt.	Fază minimă	Fază minimă și astatism
1	$H(s) = \frac{b_0s + b_1}{a_0s + a_1}$	$H(s) = \frac{b_0s + b_1}{s(a_0s + a_1)}$
2	$H(s) = \frac{b_0s + b_1}{a_0s^2 + a_1s + a_2}$	$H(s) = \frac{b_0s + b_1}{s(a_0s^2 + a_1s + a_2)}$
3	$H(s) = \frac{b_0s + b_1}{a_0s^3 + a_1s^2 + a_2s + a_3}$	$H(s) = \frac{b_0s + b_1}{s(a_0s^3 + a_1s^2 + a_2s + a_3)}$
4	$H(s) = \frac{b_0s + b_1}{a_0s^4 + a_1s^3 + a_2s^2 + a_3s + a_4}$	$H(s) = \frac{b_0s + b_1}{s(a_0s^4 + a_1s^3 + a_2s^2 + a_3s + a_4)}$

**Tabelul 1.2. Modele de obiecte cu avans-întârziere și timp mort**

Nr. crt.	Fază minimă	Fază minimă și astatism
1	$H(s) = \frac{e^{-\tau s}(b_0s + b_1)}{a_0s + a_1}$	$H(s) = \frac{e^{-\tau s}(b_0s + b_1)}{s(a_0s + a_1)}$
2	$H(s) = \frac{e^{-\tau s}(b_0s + b_1)}{a_0s^2 + a_1s + a_2}$	$H(s) = \frac{e^{-\tau s}(b_0s + b_1)}{s(a_0s^2 + a_1s + a_2)}$
3	$H(s) = \frac{e^{-\tau s}(b_0s + b_1)}{a_0s^3 + a_1s^2 + a_2s + a_3}$	$H(s) = \frac{e^{-\tau s}(b_0s + b_1)}{s(a_0s^3 + a_1s^2 + a_2s + a_3)}$
4	$H(s) = \frac{e^{-\tau s}(b_0s + b_1)}{a_0s^4 + a_1s^3 + a_2s^2 + a_3s + a_4}$	$H(s) = \frac{e^{-\tau s}(b_0s + b_1)}{s(a_0s^4 + a_1s^3 + a_2s^2 + a_3s + a_4)}$

### 1.1 Algoritmi și structuri de conducere automată

Se consideră o structură de sistem automat convențională (figura 1.2), unde prin  $H_R(s)$  s-a notat funcția de transfer a regulatorului, iar prin  $H_{PF}(s)$  – funcția de transfer a părții fixate,  $H_P(s)$  – funcția de transfer cu care acționează perturbația. Dependența mărimii de ieșire a regulatorului în raport cu eroarea sistemului  $u(t) = f(\varepsilon(t))$  se numește lege sau algoritm de reglare [1].



**Figura 1.2. Schema bloc structurală a sistemului automat închis**

Structura regulatorului se sintetizează sau se alege în dependență de modelul obiectului, obiectivele reglării și cerințele de calitate impuse. După structură, regulatoarele pot fi de două tipuri: cu structură fixă, când funcția de transfer a regulatorului este cunoscută și cu structură variabilă, când funcția de transfer a regulatorului se determină separat pentru fiecare problemă de automatizare.

Algoritmul PID implică trei componente separate: componenta proporțională P, componenta integrativă I și componenta derivativă D (anticipație) [1].

### 1.1.1 Algoritmul proporțional P

Este determinat de următoarea lege de reglare descrisă prin ecuația diferențială și funcția de transfer sub forma:

$$u(t) = u_p(t) = k_p \varepsilon(t), \quad (1.1)$$

$$H_p(s) = k_p, \quad (1.2)$$

unde  $k_p$  este parametrul de acord al algoritmului proporțional.

### 1.1.2 Algoritmul proporțional-derivativ PD

Funcționarea regulatorului PD ideal (cu anticipație) în regim dinamic poate fi prezentată prin intermediul următoarei ecuații diferențiale și funcției de transfer:

$$u(t) = k_p \varepsilon(t) + T_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt} = k_p \varepsilon(t) + k_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt} = u_p(t) + u_D(t), \quad (1.3)$$

$$H_{PD}(s) = k_d s + k_p, \quad (1.4)$$

unde  $k_p, k_d$  sunt parametrii de acord ai algoritmului proporțional-derivativ,  $T_d = k_d$  este constanta de timp de derivare.

În algoritmul PD real (cu filtrare) se descrie cu următoarea funcție de transfer:

$$H_{PD}(s) = \frac{k_d s}{T_p s + 1} + k_p, \quad (1.5)$$

unde  $T_p = (0.1 \dots 0.125)T_d$  este constanta de timp parazitară sau de filtrare.

### 1.1.3 Algoritmul proporțional-integrativ PI

Dinamica funcționării regulatorului tipizat PI se descrie cu următoarea ecuație diferențială și funcția de transfer:



$$u(t) = k_p \varepsilon(t) + (1/T_i) \int_0^t \varepsilon(t) dt = k_p \varepsilon(t) + k_i \int_0^t \varepsilon(t) dt = u_p(t) + u_i(t), \quad (1.6)$$

$$H_{PI}(s) = k_p + \frac{1}{T_i s} = k_p + \frac{k_i}{s} = \frac{k_p s + k_i}{s}, \quad (1.7)$$

unde  $k_p$ ,  $k_i$  sunt parametrii de acord ai algoritmului proporțional-integrator ,  $T_i$  – constanta de timp de integrare, iar  $k_i = \frac{1}{T_i}$ .

#### 1.1.4 Algoritmul proporțional-integro-derivativ PID

Adăugând în algoritmul de funcționare a regulatorului PI a unei componente de tip D, proporțională cu viteza de variație a erorii, se obține algoritmul de reglare PID ideal, ecuația diferențială și funcția de transfer de forma:

$$\begin{aligned} u(t) &= k_p \varepsilon(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t \varepsilon(t) dt + T_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt} = k_p \varepsilon(t) + k_i \int_0^t \varepsilon(t) dt + k_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt} = \\ &= u_p(t) + u_i(t) + u_d(t), \end{aligned} \quad (1.8)$$

$$H_{PID}(s) = k_p + \frac{1}{T_i s} + T_d s = k_p + \frac{k_i}{s} + k_d s = \frac{k_d s^2 + k_p s + k_i}{s}, \quad (1.9)$$

unde  $k_p$ ,  $k_i$ ,  $k_d$  sunt parametrii de acord ai algoritmului proporțional-integro-derivativ.

Funcția de transfer a regulatorului PID real are forma:

$$H_{PID}(s) = k_p + \frac{k_i}{s} + \frac{k_d s}{T_p s + 1}, \quad (1.10)$$

unde  $T_p = (0.1 \dots 0.125) T_d$ .

## 1.2 Formularea problemei și direcțiile de cercetare

După examinarea resurselor bibliografice și a informației actuale din domeniu, s-a constatat absența unor metode eficiente de sinteză a algoritmilor de conducere cu obiecte cu avans-întârziere, astatism și timp mort. În același timp, este mult mai practic de a obține expresii algebrice pentru coeficienții de acordare ai algoritmului de reglare și parametrii cunoscuți ai obiectului de reglare. Expresiile analitice de acordare, pe de o parte, au avantajul simplificării calculului parametrilor regulatorului în comparație cu metodele și algoritmi de sinteză care includ proceduri dificile, iar pe de altă parte, utilizarea expresiilor analitice este o bună alternativă în cazul reglatoarelor automate cu autoacordare și a sistemelor automate adaptive, unde re acordarea regulatorului se efectuează în funcție de variația parametrilor obiectului reglat în timpul funcționării sistemului [3].

Unul din criteriile utilizate la proiectarea sistemelor de reglare automată este criteriul gradului maximal de stabilitate. Sistemele sintetizate în baza acestui criteriu se caracterizează prin rapiditate, un suprareglaj redus și robustețe la variația parametrilor obiectului reglat. Criteriul gradului maximal de stabilitate presupune deplasarea față de axa imaginară a domeniului de localizare a rădăcinilor dominante în planul complex al rădăcinilor, astfel ca performanțele sistemului să fie satisfăcute. În acest caz gradul de stabilitate este maximal. Acest fapt implică

reducerea duratei regimului tranzitoriu și un grad ridicat de stabilitate al sistemului, ceea ce, la rândul său, conduce la păstrarea performanțelor satisfăcătoare și asigurându-se o robustețe ridicată a sistemului.

În majoritatea cazurilor se utilizează abordarea propusă în [12]. În conformitate cu această abordare, se introduce noțiunea de grad maximal de stabilitate  $J$  și ecuația caracteristică a sistemului, prin substituția variabilei  $p = -J$ , care se transformă într-o ecuație ce satisface condițiile limitei de stabilitate, din care, după unele transformări și derivări pe variabila gradului de stabilitate  $J$  se obține un sistem de ecuații algebrice pe necunoscutele parametrii de acord ai algoritmului de reglare și gradul maximal de stabilitate care se soluționează și se determină gradul maximal de stabilitate și valorile numerice ale parametrilor.

Problema și direcțiile de cercetare, constau în elaborarea în baza criteriului gradului maximal de stabilitate, a metodelor și algoritmilor noi de sinteză a reguletoarelor de tip PID și variațiile lui, pentru diverse obiecte cu avans-întârziere, astatism și timp mort cu parametrii constanți, care ar satisface cerințele: să fie simpli în aplicare și să necesite un volum redus de calcule, să ofere sistemului performanțe și robustețe ridicate, să poată fi utilizate atât pentru sinteza sistemelor de reglare automată convenționale, cât și pentru sinteza sistemelor automate cu autoacordare și adaptive.

### **1.3 Concluzii la capitolul 1**

S-a definit noțiunea de model matematic de tipul modele de obiecte cu avans-întârziere cu fază minimă de ordinul unu, doi, trei și patru, cu sau fără astatism și timp mort a procesului industrial.

S-au prezentat modelele algoritmilor de reglare tipici P, PI, PD și PID și metode cunoscute de acordare a acestora: metoda Ziegler-Nichols, metoda Coon, metoda optimizării parametrice.

S-a formulat problema și direcția de cercetare.

Domeniul de cercetare include aspecte teoretice și practice ale sintezei algoritmilor de conducere cu procese complexe, approximate cu modele de obiecte cu avans-întârziere, astatism și timp mort, evaluarea performanțelor și robusteții sistemelor automate.

## **2 SINTEZA ALGORITMILOR DE CONDUCERE PENTRU OBIECTE CU AVANS-ÎNTÂRZIERE CU FAZĂ MINIMĂ ȘI ASTATISM ÎN BAZA METODEI GRADULUI MAXIMAL**

A fost descrisă metoda gradului maximal de stabilitate și elaborați algoritmi de sinteză a reguletoarelor tipizate P, PI, PD și PID pentru modele de obiecte cu avans-întârziere de ordinul unu, doi, trei și patru, fără și cu astatism. Pentru fiecare tip de model al obiectului sunt prezentate algoritmul și exemplu de calcul a reguletoarelor tipizate cu verificarea rezultatelor în pachetul de programe MATLAB [10], [11].

## 2.1 Algoritmul metodei gradului maximal de stabilitate

Se consideră structura convențională a unui sistem cu conducere automată prezentată în figura 2.1 cu reacție unitară, alcătuită din partea fixată (PF) descrisă cu funcția de transfer  $H_{PF}(s)$  și regulatorul automat descris cu funcția de transfer  $H_R(s)$ . Semnalul de intrare  $r(t) = 1(t)$  este treaptă unitară,  $\varepsilon(t) = r(t) - y(t)$  este eroarea sistemului,  $u(t)$  – mărimea de conducere,  $y(t)$  – ieșirea sistemului,  $p(t)$  – perturbația sistemului.

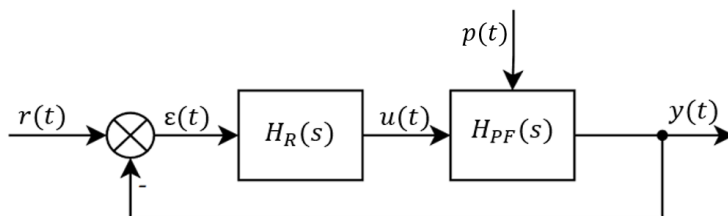


Figura 2.1. Schema bloc structurală a sistemului cu conducere automată

Funcția de transfer a părții fixate cu astatism are forma generalizată:

$$H_{PF}(s) = \frac{y(s)}{r(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + b_{m-2} s^{m-2} + \dots + b_0}{s(a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + a_{n-2} s^{n-2} + \dots + a_0)} = \frac{B(s)}{sA(s)}, \quad m \leq n, \quad (2.1)$$

unde  $B(s)$  este polinomul de ordinul  $m$  cu coeficienții  $\overline{b_0}, \overline{b_m}$ , care exprimă proprietățile de anticipație a procesului,  $A(s)$  – polinomul de ordinul  $n$  cu coeficienții  $\overline{a_0}, \overline{a_n}$ , care exprimă proprietățile interne ale procesului (inerția),  $s$  – astatism de gradul unu. Relația  $m \leq n$  exprimă condițiile de realizabilitate fizică a procesului.

Se formulează problema de a sintetiza algoritmul de conducere cu obiectul de reglare (2.1). Algoritmul de conducere se descrie cu funcția de transfer [6]:

$$H_R(s) = \sum_{i=0}^r k_i s^{(i-1)}, \quad (2.2)$$

unde  $k_i$  reprezintă parametrii de acord ai legii de reglare utilizată,  $r$  – numărul parametrilor de acord.

Problema de acordare a parametrilor regulatorului constă în asigurarea gradului maximal de stabilitate al sistemului proiectat pentru legea de reglare aleasă.

Ecuția caracteristică a sistemului automat închis, utilizând relațiile (2.1) și (2.2) se prezintă în forma:

$$D(p, k_i) = \frac{A(p)}{B(p)} + \sum_{i=0}^r k_i p^{(i-1)} = 0, \quad (2.3)$$

unde  $p$  este operatorul de derivare,  $k = (k_0, k_1, \dots, k_r)$  – parametrii de acord ai legii de reglare alese.

Conform metodei gradului maximal de stabilitate se aplică substituția  $p = -J$ , unde  $J$  este gradul maximal de stabilitate al sistemului sintetizat și ecuația caracteristică (2.3) este:

$$D(-J, k_z) = \frac{A(-J)}{B(-J)} + \sum_{z=0}^r k_z (-J)^{(z-1)} = 0. \quad (2.4)$$

Efectuând operații de derivare pe variabila  $J$  a expresiei (2.4), se obține sistemul de ecuații algebrice care permite de a calcula parametrii de acord ai regulatorului și gradul optimal de stabilitate  $J$  prezentat în forma:

$$\begin{cases} k_z = f(a_i, b_j, J), i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}, \\ J = g(a_i, b_j, J), i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}, \end{cases} \quad (2.5)$$

unde  $k_z$  reprezintă parametrii regulatorului ( $z = \overline{0, r}$ ),  $a_i, b_j$  sunt coeficienții obiectului,  $f(a_i, b_j, J)$  este funcție neliniară de gradul de stabilitate,  $g(a_i, b_j, J)$  – funcție neliniară de gradul de stabilitate [2].

Din expresia a doua din (2.5) ca ecuație algebrică se determină valoarea gradului optimal de stabilitate  $J_{opt}$ , care este cea mai mică parte reală pozitivă a rădăcinii reale sau complexe [2]:

$$J = J_{opt} = \min Rep_i, \quad (2.6)$$

unde  $Rep_i < 0$  reprezintă rădăcinile ecuației caracteristice situate în semiplanul stâng  $C^-$  al planului complex al rădăcinilor.

În rezultatul determinării lui  $J_{opt}$ , din (2.5) se calculează parametrii regulatorului  $k_i$ , în baza sistemului de ecuații algebrice (2.5).

Conform cu descrierea metodei gradului maximal de stabilitate, algoritmul de acordare a reguletoarelor automate include o serie de pași:

1. Se stabilește legea de reglare dorită și se calculează funcția de transfer a sistemului automat închis cu algoritmul ales.
2. Se obține ecuația caracteristică a sistemului automat închis în care se substituie  $p = -J$ .
3. Se derivă pe variabila  $J$  ecuația caracteristică de la pasul 2 de un număr de ori egal cu numărul parametrilor regulatorului ales.
4. Din ecuația obținută la pasul 4 se determină rădăcinile acesteia, care reprezintă gradele de stabilitate ale sistemului automat proiectat, iar valoarea gradului optimal  $J_{opt}$  este rădăcina cu cea mai mică valoare absolută a părții reale sau partea reală a rădăcinii complexe.
5. Utilizând  $J_{opt}$  și ecuațiile algebrice obținute la pasul 4, se efectuează calculul valorilor parametrilor legilor de reglare alese (P, PI, PD, PID) și se verifică performanțele sistemului cu reglare automată proiectat prin simulare pe calculator.

Dacă performanțele sistemului sunt satisfăcute, atunci procedura de sinteză s-a încheiat, iar dacă performanțele sistemului nu sunt satisfăcute, atunci procedura se reia de la început cu alt tip de lege de reglare sau altă metodă.

În scopul reducerii timpului necesar pentru efectuarea calculelor parametrilor regulatorului a fost elaborat un pachet de programe cu cod deschis *GMS-Calcul-DM*, utilizând limbajul *Python*. Codul sursă a programul este prezentat în Anexa 2.

## 2.2 Concluzii la capitolul 2

S-a creat algoritmul metodei de acordare a reguletoarelor tipizate P, PI, PD și PID la modele de obiecte cu avans-întârziere cu fază minimă de ordinul unu, doi, trei și patru fără și cu astatism.

Pentru fiecare tip de model de obiect s-a calculat exemplul de acordare a reguletoarelor P, PI, PD și PID și s-au prezentat rezultatele simulării pe calculator în pachetul de programe MATLAB în forma răspunsului indicial al sistemului automat. S-au analizat performanțele sistemului automat cu regulatorul acordat după metoda elaborată la modelul obiectului dat și s-a stabilit că cele mai ridicate performanțe s-au obținut pentru sistemul cu regulatorul PD și PID.

La modelele de obiecte cu astatism nu se recomandă de utilizat regulatorul în structura căruia este componenta integratoare (I), care conduce la instabilitatea sistemului, deoarece astatism se conține și în modelul obiectului. Reguletoarele P și PD nu se recomandă de utilizat pentru modele fără astatism, sistemul având eroarea staționară ridicată.

## 3 SINTEZA ALGORITMILOR DE CONDUCERE PENTRU OBIECTE CU AVANS-ÎNTÂRZIERE CU FAZĂ MINIMĂ, ASTATISM ȘI TIMP MORT ÎN BAZA METODEI GRADULUI MAXIMAL

S-a elaborat algoritmul analitic și cu iterații de sinteză a legilor de reglare P, PI, PD și PID la modele de obiecte cu avans-întârziere de ordinul unu, doi, trei și patru cu fază minimă astatism și timp mort, care asigură satisfacerea performanțelor ridicate ale sistemului automat. Pentru fiecare tip de model de obiect s-a calculat un exemplu cu verificarea rezultatelor în pachetul de programe MATLAB [10], [11].

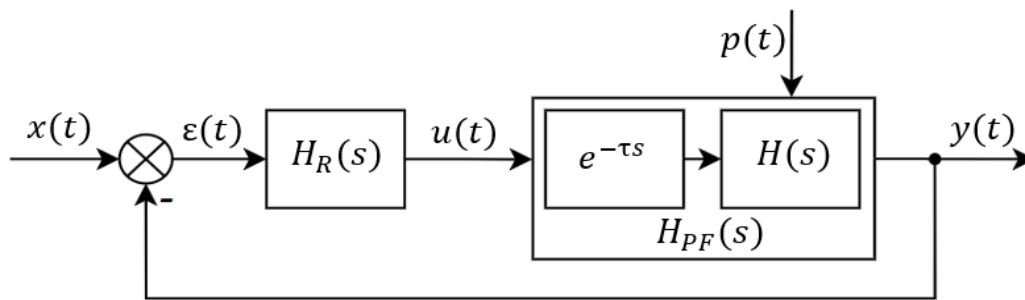
### 3.1 Algoritmul metodei gradului maximal de stabilitate cu iterații

Se consideră structura sistemului automat cu timp mort și reacție unitară din figura 3.1 alcătuită din partea fixată (PF) descrisă cu funcția de transfer  $H_{PF}(s)$ , prezentată din componenta timpului mort  $e^{-\tau s}$  și funcția de transfer  $H(s)$  a obiectului de reglare și regulatorul automat descris cu funcția de transfer  $H_R(s)$ . Semnalul de intrare  $r(t) = 1(t)$  este treaptă unitară,  $\varepsilon(t) = r(t) - y(t)$  este eroarea sistemului,  $u(t)$  – mărimea de conducere,  $y(t)$  – ieșirea sistemului,  $p(t)$  – perturbația sistemului.

Funcția de transfer a părții fixate cu timp mort și astatism are forma generalizată:

$$H_{PF}(s) = \frac{y(s)}{r(s)} = \frac{e^{-\tau s}(b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + b_{m-2} s^{m-2} + \dots + b_0)}{s(a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + a_{n-2} s^{n-2} + \dots + a_0)} = \frac{e^{-\tau s} B(s)}{s A(s)}, m \leq n, \quad (3.1)$$

unde  $B(s)$  este polinomul de gradul  $m$  cu coeficienții  $\overline{b_0}, \overline{b_m}$ , care exprimă proprietățile de anticipație și timp mort a procesului,  $A(s)$  – polinomul de gradul  $n$  cu coeficienții  $\overline{a_0}, \overline{a_n}$ , care exprimă proprietățile interne ale procesului (inerția) și este astatismul obiectului. Relația  $m \leq n$  exprimă condițiile de realizabilitate fizică a procesului.



**Figura 3.1. Schema bloc structurală a sistemului cu conducere automată**

Problema de sinteză a algoritmul de conducere cu obiectul de reglare constă în asigurarea gradului maximal de stabilitate al sistemului proiectat pentru lege de reglare aleasă.

Procedura de acordare a reglatoarelor tipizate P, PI, PD, PID, descrisă în capitolul 3 al tezei, care se reduce la aceleași etape reprezentate în p. 2.1.

În cazul în care rădăcinile ecuației caracteristice ale sistemului automat nu pot fi identificate sau necesită resurse mari de calcul, atunci se propune de a utiliza metoda gradului maximal de stabilitate cu iterații (GMSI). Metoda GMSI se reduce la determinarea funcțiilor de calcul ale parametrilor de acord ai regulatorului selectat funcție de parametrii constanți ai modelului obiectului și variabila necunoscută a gradului de stabilitate al sistemului automat sintetizat și pentru algoritmi P, PD, PI și PID se obțin dependențele  $k_p = f_p(J)$ ,  $k_i = f_i(J)$ ,  $k_d = f_d(J)$ .

La variația gradului de stabilitate a lui  $J$  de la  $0 \dots \infty$ , se calculează și se construiesc curbele  $k_p = f_p(J)$ ,  $k_i = f_i(J)$ ,  $k_d = f_d(J)$  pentru algoritmi P, PD, PI, PID și pe aceste curbe se aleg seturi de valori ai parametrilor regulatorului P, PD, PI, PID  $J_i - k_{pi}, k_{ii}, k_{di}$  și se simulează pe calculator sistemul automat cu regulatorul ales, se ridică răspunsurile indiciale, după care se determină performanțele posibile cele mai ridicate ale sistemului, care ar satisface condițiile de performanță impuse sistemului automat.

Dacă performanțele sistemului sunt satisfăcute, procedura de sinteză se finalizează, iar în caz contrar, procedura se reia de la început cu alt tip de lege de reglare sau altă metodă de calcul a regulatorului automat.

Funcția de transfer generalizată a sistemului închis este prezentată sub forma:

$$H_0(s) = \frac{H_d(s)}{1+H_d(s)} = \frac{H_R(s)H_{PF}(s)}{1+H_R(s)H_{PF}(s)} = \frac{C(s)}{D(s)}, \quad (3.2)$$

unde  $H_d(s) = H_R(s)H_{PF}(s)$  este funcția de transfer a sistemului deschis, iar  $C(s), D(s)$  – polinoamele sistemului deschis.

În continuare, se prezintă procedurile de acordare a reglatoarelor P, PI, PD, PID la modele de obiecte de ordinul unu, doi, trei și patru, fără astatism, cu astatism și timp mort.

### 3.2 Concluzii la capitolul 3

S-a elaborat algoritmul metodei de acordare cu iterații a reguletoarelor tipizate P, PI, PD și PID la modele de obiecte cu avans-întârziere cu fază minimă de ordinul unu, doi, trei și patru fără și cu astatism și timp mort. Pentru fiecare tip de model de obiect s-a analizat câte un exemplu de acordare a reguletoarelor P, PI, PD, PID și s-au reprezentat rezultatele simulării pe calculator în pachetul de programe MATLAB SIMULINK în forma răspunsului indicial al sistemului automat.

Analizând performanțele sistemului automat cu regulatorul acordat după metoda elaborată la modelul obiectului dat, s-au obținut cele mai bune rezultate pentru sistemul cu regulatorul PI și PID. Reguletoarele P și PD nu se recomandă de utilizat în sistemele automate fără astatism, deoarece sistemul are eroarea staționară ridicată.

## 4 ASPECTE PRACTICE DE SINTEZĂ A ALGORITMILOR DE CONDUCERECU OBIECTE CU AVANS-ÎNTÂRZIERE, ASTATISM ȘI TIMP MORT

În vederea susținerii argumentării aplicabilității, eficacității și calității metodelor și algoritmilor elaborați pentru sinteza algoritmilor de reglare, se prezintă câteva studii de caz și aplicații practice pentru diferite obiecte cu proprietăți cu avans-întârziere, astatism și timp mort. Sistemul automat cu modelul obiectului respectiv și algoritmul sintetizat se simulează și se analizează performanțele în regim tranzitoriu și staționar, rejecția perturbațiilor și robustețea sistemului la variația parametrilor modelului obiectului de reglare. Pentru fiecare caz de sinteză, se evaluează performanțele sistemului de reglare automată proiectat folosind metodele și algoritmii dezvoltați în lucrare și se compară cu performanțele obținute prin alte metode cunoscute. Se analizează două tipuri de obiecte tehnice automobilul și avionul și două procese termice: în cuptor industrial și în extruderul imprimantei 3D, pentru care se determină modelele matematice și se sintetizează algoritmul de conducere.

### 4.1 Analiza metodelor de acordare a regulatorului la modelul obiectului cu anticipație-întârziere de ordinul doi cu astatism

Modelul matematic al părții fixate a obiectului tehnic - automobilul, ca obiect de reglare cu avans-întârziere cu oscilații amortizate și astatism de ordinul unu cu funcția de transfer  $H_{PF}(s)$  se prezintă în forma [5], [13]:

$$H_{PF}(s) = \frac{k(T_1s+1)}{s(T_2^2s^2+2T_2\xi s+1)} = \frac{b_0s+b_1}{a_0s^3+a_1s^2+a_2s}, \quad (4.1)$$

unde  $k$  este coeficientul de transfer,  $T_1$ ,  $T_2$  – constante de timp,  $\xi$  - gradul de amortizare al obiectului tehnic-automobilul, iar coeficienții generici se prezintă  $b_0 = kT_1$ ,  $b_1 = k$ ,  $a_0 = T_2^2$ ,  $a_1 = 2\xi\omega T_2$ ,  $a_2 = 1$ .

Conform metodei GMSI prin operații de derivare a ecuației caracteristice a sistemului automat închis, se obțin relațiile  $k_p = f_p(J)$ ,  $k_i = f_i(J)$ ,  $k_d = f_d(J)$ , care prezintă parametrii

algoritmului de tipul PID ca funcții neliniare de variabila  $J$  și de parametrii cunoscuți ai modelului obiectului de reglare (4.1).

În continuare se prezintă sistemul de funcții ale parametrilor  $k_p = f_p(J)$ ,  $k_i = f_i(J)$ ,  $k_d = f_d(J)$  ai algoritmului P, PD, PI și PID respectiv de forma:

$$k_p = \frac{a_0J^3 - a_1J^2 + a_2J}{b_1 - b_0J} = f_p(J), \quad (4.2)$$

$$k_d = \frac{d_0J^3 - d_1J^2 + d_2J - d_3}{(b_1 - b_0J)^2} = f_d(J), \quad k_p = \frac{a_0J^3 - a_1J^2 + a_2J}{b_1 - b_0J} + k_dJ = f_p(J), \quad (4.3)$$

$$k_p = \frac{-d_0J^4 + d_1J^3 - d_2J^2 + d_3J}{(b_1 - b_0J)^2} = f_p(J), \quad k_i = k_pJ - \frac{a_0J^4 - a_1J^3 + a_2J^2}{b_1 - b_0J} = f_i(J), \quad (4.4)$$

$$k_d = \frac{d_0J^5 - d_1J^4 + d_2J^3 - d_3J^2 + d_4J - d_5}{2(b_1 - b_0J)^4} = f_d(J), \quad k_p = \frac{-d_0J^4 + d_1J^3 - d_2J^2 + d_3J}{(b_1 - b_0J)^2} + 2k_dJ = f_p(J),$$

$$k_i = \frac{-a_0J^4 + a_1J^3 - a_2J^2}{b_1 - b_0J} - k_dJ^2 + k_pJ = f_i(J). \quad (4.5)$$

La variația lui  $J$  ca variabilă independentă, se calculează și se construiesc curbele (4.2)–(4.5)  $k_p = f_p(J)$ ,  $k_i = f_i(J)$ ,  $k_d = f_d(J)$  pentru algoritmi P, PD, PI și PID și pe aceste curbe se aleg seturi de valori ai parametrilor regulatorului P, PD, PI și PID  $J_i - k_{pi}, k_{ii}, k_{di}$  și se simulează pe calculator sistemul automat, se ridică răspunsurile indiciale, după care se determină performanțele cele mai ridicate ale sistemului, care ar satisface condițiile de performanță impuse sistemului.

Pentru un exemplu al modelului obiectului (4.1) se analizează procedurile de acordare a algoritmilor de reglare după metoda GMS, metoda poli-zerouri și metoda polinomială și se analizează performanțele sistemului.

*Exemplu 4.1.* Se consideră automobilul ca obiect de reglare, descris ca modelul obiectului de reglare cu anticipație-întârziere cu oscilații și astatism de ordinul unu, cu parametrii determinați din nomograma reprezentată în fig. 1.4 din [13] la viteza de 20 m/s: coeficientul de transfer  $k = 1.9$ , constantele de timp  $T_1 = 0.04$  s,  $T_2 = 0.44$  s<sup>2</sup>, gradul de amortizare  $\xi = 0.5$  și prezentat cu funcția de transfer:

$$H(s) = \frac{k(T_1s+1)}{s(T_2^2s^2+2T_2\xi s+1)} = \frac{b_0s+b_1}{a_0s^3+a_1s^2+a_2s} = \frac{0.076s+1.9}{0.1936s^3+0.44s^2+s}, \quad (4.6)$$

Pentru performanțele impuse sistemului automat timpul de reglare  $t_r \leq 2$  s și suprareglarea  $\sigma \leq 10$  % să se sintetizeze algoritmul de reglare pentru modelul (4.6) prin metoda GMSI.

*Soluționare.* S-au efectuat calculele de acordare a parametrilor de acord ai regulatorului P, PD, PI, PID după metoda GMSI după relațiile (4.2)–(4.5) (figura 4.1), *a*) - curba pentru P, *b*) - curba pentru PI. Pentru algoritmul PD și PID se constată că metoda GMSI nu este aplicabilă pentru modelul (4.6).

S-a simulat sistemul automat cu regulatorul P, PI (figura 4.2) și răspunsurile indiciale (curbele 1 și 2) sunt prezentate în figura 4.3, iar performanțele sistemului sunt date în tabelul 4.1, rândurile 1 și 2.



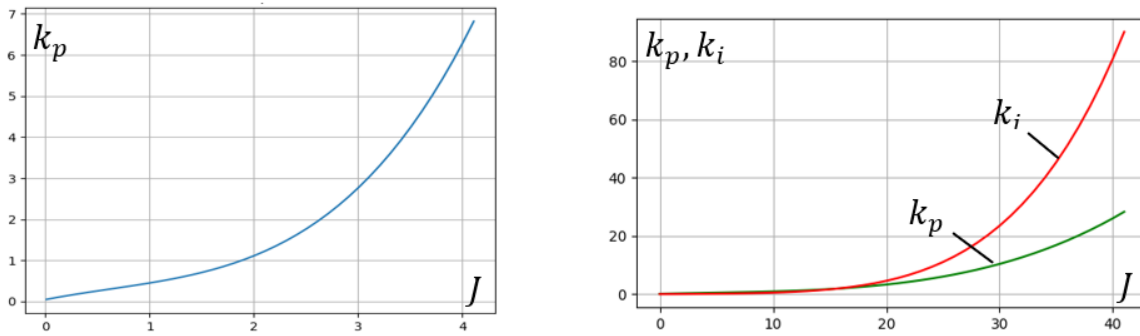


Figura 4.1. Funcțiile: a)  $k_p = f(J)$ , b)  $k_p = f(J)$ ,  $k_i = f(J)$

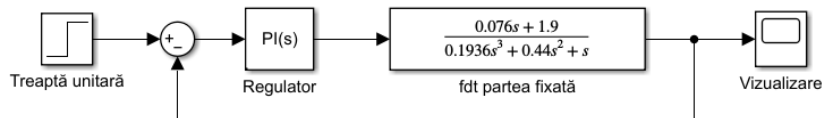


Figura 4.2. Schema de simulare a sistemului automat

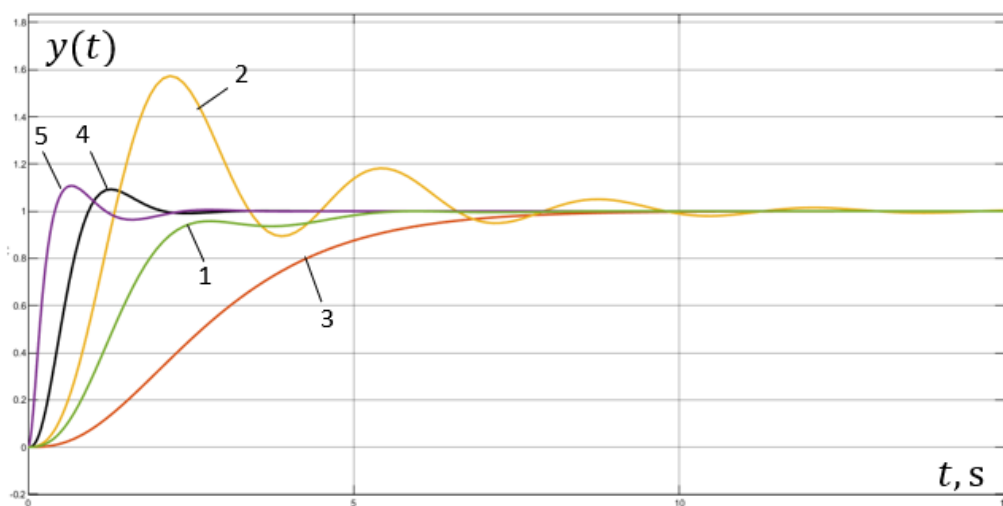


Figura 4.3. Răspunsurile indiciale ale sistemului automat ex. 4.1

Tabelul 4.1 Parametrii și performanțele sistemului automat la ex. 4.1

Nr. crt.	Metoda de acordare	Tip reg.	Parametrii regulatorului				Performanțele sistemului			
			$J$	$k_p$	$k_i$	$T_i, s$	$t_c, s$	$\sigma, \%$	$t_r, s$	$n$
1	GMS	P	0.7412	0.355	-	-	4.27	-	4.27	-
2	GMS	PI	0.5916	0.824	0.217	4.61	1.62	31.92	7.81	2
3	MP1						6.27	-	6.27	-
4	MP2						0.85	9.69	1.68	1
5	MPZ						0.36	11.22	0.97	1

Pentru verificare s-a sintetizat algoritmul de reglare după metodele polinomiale MP1, MP2 și poli-zero-uri, care sunt prezentați:

$$H_R(s) = \frac{m_0 (a_0 s^2 + a_1 s + a_2)}{(b_0 s + b_1)(n_0 s^2 + n_1 s + n_2)} = \frac{0.1936s^2 + 0.44s + 1}{(0.076s + 1.9)(s^2 + 3s + 3)} = \frac{0.1936s^2 + 0.44s + 1}{0.076s^3 + 2.128s^2 + 5.928s + 5.7}, \quad (4.7)$$

$$H_R(s) = \frac{Q(s)}{P(s)} = \frac{m_0 (a_0 s^3 + a_1 s^2 + a_2 s + a_3)}{(b_0 s + b_1)(n_0 s^2 + n_1 s + n_2)} = \frac{22.1461s^2 + 50.332s + 114.391}{0.076s^3 + 2.9641s^2 + 30.512s + 97.7531}, \quad (4.8)$$

$$H_R(s) = \frac{Q(s)}{P(s)} = \frac{m_0 (a_0 s^3 + a_1 s^2 + a_2 s + a_3)}{(b_0 s + b_1)(n_0 s + n_1)} = \frac{792.5127s^2 + 2708.2368s + 6020.5789}{5.1653s^2 + 163.8858s + 1829.516}. \quad (4.9)$$

S-a simulat sistemul cu algoritmi sintetizați și răspunsurile sunt prezentate în figura 4.3 (curbele 3, 4, 5), iar performanțele sunt date în tabelul 4.1, rândurile 4, 5 și 6.

## 4.2 Sinteza algoritmului de reglare la modelul obiectului cu anticipație-întârziere de ordinul trei cu oscilații

Se analizează modelul matematic al obiectului de reglare cu anticipație-întârziere de ordinul trei cu oscilații:

$$H(s) = \frac{k_1}{T_2s+1} \frac{k_2(T_1s+1)}{s^2+2\xi\omega s+\omega^2} = \frac{b_0s+b_1}{a_0s^3+a_1s^2+a_2s+a_3}, \quad (4.10)$$

unde  $k_1, k_2$  sunt coeficienții de transfer,  $T_1, T_2$  – constantele de timp,  $\xi$  -gradul de amortizare și  $\omega$  - pulsația naturală ale obiectului tehnic, iar  $b_0 = k_1k_2T_1$ ,  $b_1 = k_1k_2$ ,  $a_0 = T_2$ ,  $a_1 = 2\xi\omega T_2 + 1$ ,  $a_2 = 2\xi\omega + T_2\omega^2$ ,  $a_3 = \omega^2$ .

La sinteza algoritmului de reglare s-a utilizat metoda gradului maximal de stabilitate cu iterații de acordare a regulatorului PID la modelul obiectului de reglare (4.10).

În studiu se utilizează schema structurală a sistemului automat, alcătuită din modelul obiectului cu f.d.t.  $H_p(s)$  și regulatorul cu f.d.t.  $H_R(s)$ , supus acțiunii intrării treaptă unitară.

Procedura de acordare a algoritmului PID după metoda GMSI se reduce la alcătuirea ecuației caracteristice a sistemului închis, se introduce noțiunea de grad de stabilitate în ecuația caracteristică ca o nouă variabilă necunoscută și prin operații de derivare a acesteia se obțin relații care prezintă parametrii PID ca funcții  $k_p = f_p(J)$ ,  $k_i = f_i(J)$ ,  $k_d = f_d(J)$  analitice neliniare de parametrii cunoscuți ai modelului obiectului și de variabila necunoscută - gradul de stabilitate al sistemului.

Pentru sistemul automat cu algoritmul PID se obțin trei expresii de calcul ai parametrilor:

$$k_d = \frac{d_0J^5 - d_1J^4 + d_2J^3 - d_3J^2 + d_4J - d_5}{2(b_1 - b_0J)^4} = f_d(b_0, b_1, a_0, a_1, a_2, a_3, J) = f_d(J), \quad (4.12)$$

$$k_p = \frac{-d_0J^4 + d_1J^3 - d_2J^2 + d_3J}{(b_1 - b_0J)^2} + 2k_dJ = f_p(b_0, b_1, a_0, a_1, a_2, a_3, J) = f_p(J), \quad (4.13)$$

$$k_i = \frac{-a_0J^4 + a_1J^3 - a_2J^2}{b_1 - b_0J} - 2k_dJ^2 + k_pJ = f_i(b_0, b_1, a_0, a_1, a_2, a_3, J) = f_i(J), \quad (4.14)$$

unde coeficienții din expresiile (4.12)–(4.14) se exprimă prin parametrii obiectului.

Se variază  $J = 0 \dots \infty$ , se calculează și se construiesc curbele (4.12)–(4.14)  $k_p = f_p(J)$ ,  $k_i = f_i(J)$ ,  $k_d = f_d(J)$  pentru algoritmul PID. Pe aceste curbe se aleg seturi de valori ai parametrilor regulatorului PID  $J_i - k_{pi}, k_{ii}, k_{di}$  și se simulează sistemul automat, se înregistrează răspunsurile la semnal treaptă unitară după care se determină performanțele cele mai ridicate ale sistemului, care ar satisface condițiile de performanță impuse sistemului.

Pentru un exemplu al modelului obiectului de reglare (4.10) se analizează procedurile de acordare a algoritmului PID după metoda GMSI și metoda polinomială, se simulează sistemul și se analizează performanțele sistemului proiectat.

*Exemplul 4.2.* Se consideră obiectul tehnic (avion) descris ca modelul obiectului de reglare stabil cu inerție de ordinul  $n = 3$  cu parametrii cunoscuți: coeficienții de transfer  $k_1 = 1$ ,  $k_2 = 0.2$ , constantele de timp  $T_1 = 0.1$  s,  $T_2 = 0.1$  s, *gradul de amortizare*  $\xi = 0.3$  și pulsația naturală  $\omega = 2.5$  s<sup>-1</sup> prezentat de funcția de transfer de forma [9]:

$$H(s) = \frac{k_1}{T_2 s + 1} \frac{k_2(T_1 s + 1)}{s^2 + 2\xi\omega s + \omega^2} = \frac{10}{s + 10} \frac{k_2(T_1 s + 1)}{s^2 + 2\xi\omega s + \omega^2} = \frac{b_0 s + b_1}{a_0 s^3 + a_1 s^2 + a_2 s + a_3}, \quad (4.15)$$

unde  $b_0 = 10k_2T_1 = 0.2$ ,  $b_1 = 10k_2 = 2$ ,  $a_0 = 1$ ,  $a_1 = 2\xi\omega + 10 = 11.5$ ,  $a_2 = 20\xi\omega + \omega^2 = 21.25$ ,  $a_3 = 10\omega^2 = 62.5$ .

Pentru performanțele impuse sistemului timpul de reglare  $t_r \leq 2$  s și suprareglarea  $\sigma \leq 10$  % să se sintetizeze algoritmul de reglare PID la modelul obiectului (4.15) prin metoda GMS cu iterații. Pentru verificare și comparare se aplica metoda polinomială.

S-au efectuat calculele de acordare a parametrilor regulatorului PID după metoda GMSI după relațiile (4.12)–(4.14) pentru modelul (4.15) și curbele sunt date în figura 4.5, a. S-a simulat sistemul automat cu regulatorul PID în pachetul de programe MATLAB (figura 4.4) și răspunsul optimal se prezintă în figura 4.5, b (curba 1, iterația 3 din tabelul 4.2), iar performanțele sistemului sunt date în tabelul 4.2.

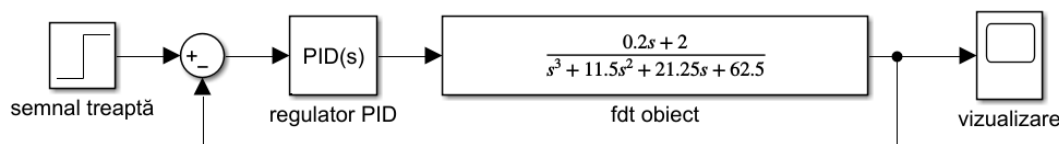


Figura 4.4. Schema de simulare a sistemului automat

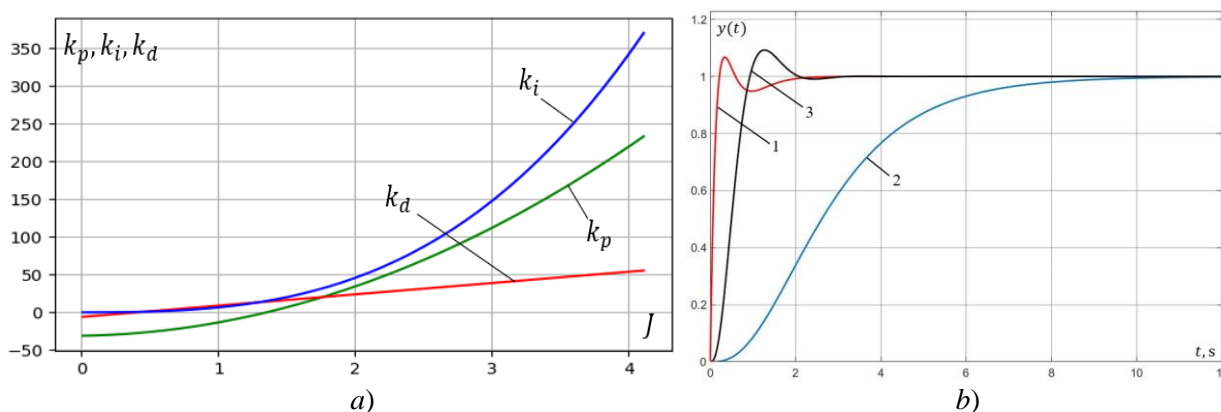


Figura 4.5. Funcțiile  $k_p = f(J)$ ,  $k_i = f(J)$ ,  $k_d = f(J)$  și răspunsurile indiciale ale sistemului automat

Tabelul 4.2 Parametrii și performanțele sistemului automat la ex. 4.2

Nr. iter.	Metoda acordare	Tip reg.	Parametrii regulatorului					Performanțele sistemului			
			$J$	$k_p$	$k_i$	$T_i, s$	$k_d, s$	$t_c, s$	$\sigma, \%$	$t_r, s$	$n$
1	GMS	PID	3.2	122.35	163.48	0.006	40.5	0.25	-	1.56	-
2	GMS	PID	3.5	152.5	214.4	0.0047	45	0.21	3.68	1.32	1
3	<b>GMS</b>	<b>PID</b>	<b>3.9</b>	<b>196.9</b>	<b>296.6</b>	<b>0.0034</b>	<b>51</b>	<b>0.17</b>	<b>6.57</b>	<b>0.42</b>	<b>1</b>
4	MP1							7.6	-	7.6	-
5	MP2							0.85	9.69	1.68	1

**Metoda polinomială.** După această metodă se construiesc două modele a algoritmului de reglare. În prima procedură (MP1) se adoptă cazul când rădăcinile polinomului caracteristic sunt multiple și care asigură eroarea staționară  $\varepsilon = 0$  la semnal de referință de tip treaptă unitară și se construiește funcția de transfer a algoritmul de reglare de forma:

$$H_R(s) = \frac{Q(s)}{P(s)} = \frac{m_0 (a_0 s^3 + a_1 s^2 + a_2 s + a_3)}{(b_0 s + b_1)(n_0 s^2 + n_1 s + n_2)s} = \frac{q_0 s^3 + q_1 s^2 + q_2 s + q_3}{p_0 s^4 + p_1 s^3 + p_2 s^2 + p_3 s} = \frac{s^3 + 11.5s^2 + 21.25s + 62.5}{0.2s^4 + 2.6s^3 + 6.6s^2 + 6s}. \quad (4.16)$$

În a doua procedură (MP2) se construiește polinomul caracteristic dorit al sistemului după performanțele impuse timpul de reglare  $t_r \leq 2$  s și suprareglarea  $\sigma \leq 10$  % și se obțin poli dominanți  $s_{1,2} = -2.0005 \pm j2.7271$  și se mai impune un pol suplimentar  $p_3 = -10$ , după care se construiește funcția de transfer a algoritmului de reglare, în care se include și astatism de gradul unu pentru a asigura eroarea staționară  $\varepsilon = 0$  la semnalele de referință și perturbație de tip treaptă unitară:

$$H_R(s) = \frac{Q(s)}{P(s)} = \frac{m_0 (a_0 s^3 + a_1 s^2 + a_2 s + a_3)}{(b_0 s + b_1)(n_0 s^2 + n_1 s + n_2)s} = \frac{q_0 s^3 + q_1 s^2 + q_2 s + q_3}{p_0 s^4 + p_1 s^3 + p_2 s^2 + p_3 s} = \frac{114.391s^3 + 1315.542s^2 + 2430.8937s + 7149.6875}{0.2s^4 + 4.8002s^3 + 38.2927s^2 + 102.903s}. \quad (4.17)$$

S-a simulat sistemul automat cu algoritmul de reglare sintetizat după metoda polinomială MP1 și MP2 și răspunsurile sunt prezentate în figura 4.5, b (curbele 2 și 3), iar performanțele sunt date în tabelul 4.2, rândurile 4 și 5.

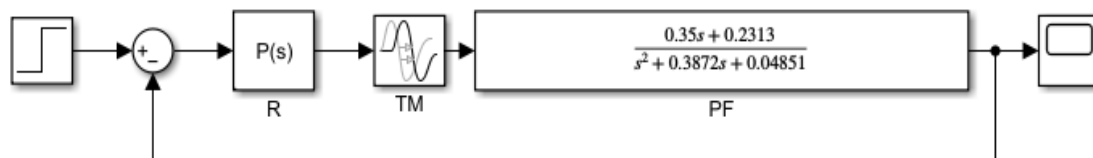
### 4.3 Sinteza algoritmului de reglare pentru proces termic în cuptor

Se prezintă sinteza algoritmului de reglare pentru un proces termic creat cu ajutorul unui emulator al cuptorului ЭП10 care este destinat efectuării de experimente în procesul de punere în funcțiune cu utilizarea reguletoarelor de temperatură. Emulatorul ЭП10 acționează ca un obiect de conducere și este un cuptor în miniatură.

Modelul matematic al obiectului de reglare cu avans-întârziere de ordinul doi și timp mort de ordinul unu este identificat cu ajutorul pachetului de programe MATLAB:

$$H_P(s) = e^{-\tau s} \frac{b_0 s + b_1}{a_0 s^2 + a_1 s + a_2} = e^{-2s} \frac{0.35s + 0.2313}{s^2 + 0.3872s + 0.04851}. \quad (4.18)$$

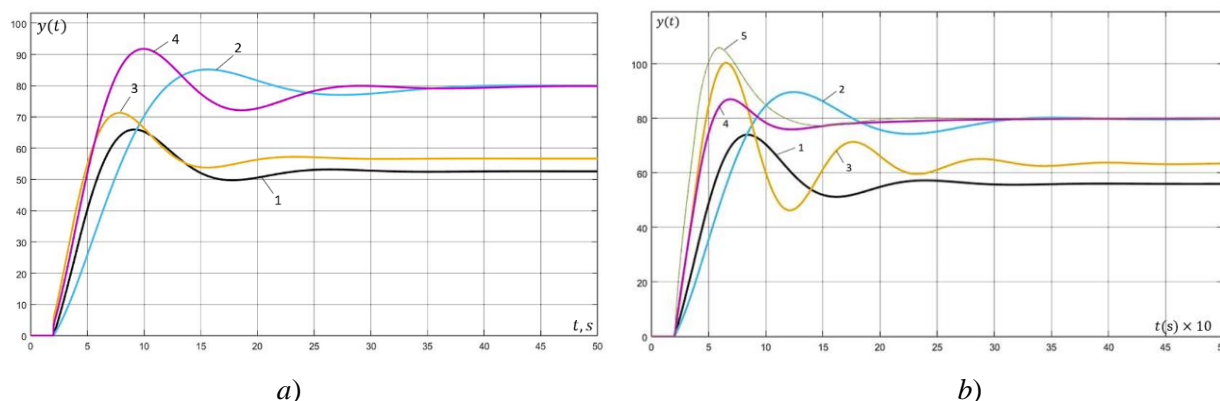
Sistemul automat de reglare a temperaturii în cuptor a fost simulat în pachetul de programe MATLAB SIMULINK conform schemei bloc structurale din figura 4.6.



**Figura 4.6. Schema structurală de simulare a sistemului automat**

În figura 4.7, a sunt prezentate răspunsurile sistemului cu reguletoarele P, PI, PD și PID cu valorile parametrilor respectivi cu cele mai bune rezultate, pentru o mai bună percepție a

rezultatului acordării regulatorului, iar în figura 4.7 *b* răspunsurile indiciale ale sistemului cu aceleași regulatoare la standul de laborator.



**Figura 4.7. Răspunsurile indiciale ale sistemului cu diferite tipuri de regulator: curba 1 este cu regulator P, 2 – PI, 3 – PD și 4 – PID după GMS, curba 5 - după metoda Ziegler-Nichols**

În tabelul 4.3 sunt prezentate performanțele sistemului automat de reglare a temperaturii în emulatorul cuptorului cu regulator tipizat P, PI, PD, PID acordat după metoda gradului maximal de stabilitate și metoda Ziegler-Nichols.

**Tabelul 4.3. Parametrii regulatorului și performanțele sistemului cu emulator**

Nr. iter.	Metoda acordare	Tip reg.	Parametrii regulatorului					Performanțele sistemului			
			$J$	$k_p$	$k_i$	$T_i, s$	$k_d$	$t_c, s$	$\sigma, \%$	$t_r, s$	$n$
1	GMS	P	1.38	0.35	-	-	-	29.3	31.97	187.2	2
2	GMS	PI	1.35	0.209	0.032	31.25	-	57.5	12.02	263.4	2
3	GMS	PD	1.80	0.701	-	-	0.29	18.7	57.49	245.3	4
4	<b>GMS</b>	<b>PID</b>	<b>0.22</b>	<b>0.424</b>	<b>0.046</b>	<b>21.73</b>	<b>0.119</b>	<b>28.1</b>	<b>8.75</b>	<b>82.8</b>	<b>1</b>
5	ZN	PID	-	0.8922	0.1965	5.08	1.029	181.3	32.12	102.2	1

Cele mai bune performanțe ale sistemului de reglare automată a temperaturii în cuptor au fost obținute pentru sistemul cu regulator PID acordat după metoda gradului maximal de stabilitate (figura 4.7, curba 4, iterația 4, tabelul 4.3), având cel mai mic timp de reglare, suprareglaj și o oscilație. Nu se recomandă de utilizat regulatoarele P și PD pentru sistemul cu modelul obiectului dat, deoarece au o eroare staționară mare (tabelul 4.3, iterația 1 și 3).

#### 4.4 Sinteza algoritmului de reglare al regimului termic în extruderul imprimantei 3D

Se analizează procedura de acordare a regulatorului tipizat PID la modele de obiecte cu avans de ordinul unu, întârziere de ordinul trei și timp mort după metoda gradului maximal de stabilitate cu iterații. Modelul matematic al obiectului de conducere pus în discuție se prezintă:

$$H(s) = \frac{e^{-\tau s} k (T_1 s + 1)}{(T_2 s + 1)(T_3 s + 1)(T_4 s + 1)} = \frac{e^{-\tau s} (b_0 s + b_1)}{a_0 s^3 + a_1 s^2 + a_2 s + a_3}, \quad (4.19)$$

unde  $k$  este coeficientul de transfer,  $T_1, T_2, T_3$  și  $T_4$  – constantele de timp ale procesului,  $\tau$  – timp mort, iar  $b_0 = kT_1$ ,  $b_1 = k$ ,  $a_0 = T_2 T_3 T_4$ ,  $a_1 = T_2 T_3 + T_2 T_4 + T_3 T_4$ ,  $a_2 = T_2 + T_3 + T_4$  și  $a_3 = 1$  – coeficienții generici.

În figura 4.8, *a* este prezentat aspectul exterior al extruderului imprimantei 3D: 1 este blocul de încălzire a filamentului din plastic în extruder, 2 – elemente de răcire a piesei imprimate din plastic, 3 – elementul de răcire a părții superioare a extruderului pentru a împiedica topirea filamentului înafara procesului termic, iar în fig. 4.10, *b* curba experimentală în scopul identificării modelului matematic.

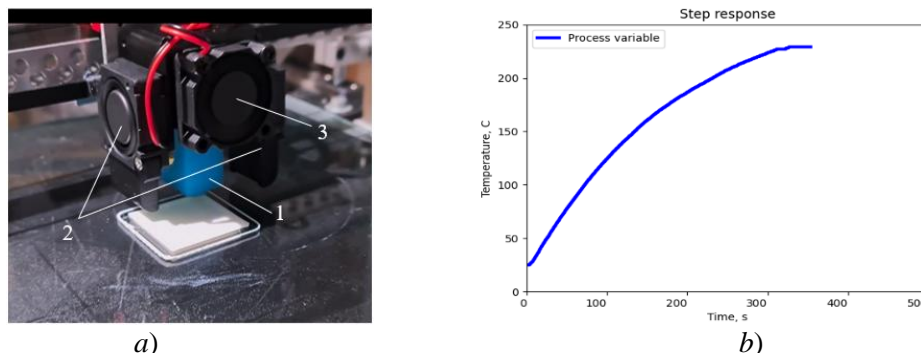


Figura 4.8. Aspectul și curba experimentală a extruderului imprimantei 3D

Modelul matematic obținut la identificarea lui în pachetul de programe MATLAB cu utilizarea System Identification Toolbox este:

$$H_{FP}(s) = \frac{e^{-s}0.72653(163.4092s+1)}{(634.1044s+1)(61.5524s+1)(0.50895s+1)} = \frac{e^{-s}(118.72s+0.72)}{19864.64s^3+39384.7s^2+696.16s+1}, \quad (4.20)$$

unde coeficientul de transfer  $k = 0.72653$ , constantele de timp  $T_1 = 163.4092$ ,  $T_2 = 634.1044$ ,  $T_3 = 61.5524$ ,  $T_4 = 0.50895$ ,  $\tau = 1$  s, iar coeficienții generici au următoarele valori:  $b_0 = 118.72$ ,  $b_1 = 0.72$ ,  $a_0 = 19864.64$ ,  $a_1 = 39384.7$ ,  $a_2 = 696.16$  și  $a_3 = 1$ .

Pentru calculul parametrilor regulatorului PID, au fost utilizate expresiile:

$$k_p = \frac{e^{-J}(167.205J^5-834.15J^4+675J^3-11.99J^2+0.071J-5.1 \cdot 10^{-5})}{(-118.72J+0.72)^2} + 2k_dJ = f_p(J), \quad (4.53)$$

$$k_i = \frac{e^{-J}(19864.64J^4-39384.7J^3+696.16J^2-J)}{0.72-118.72J} - k_dJ^2 + k_pJ = f_i(J), \quad (4.54)$$

$$k_d = \frac{e^{-\tau J}(-83.68J^6+669.018J^5-1177.859J^4+356.103J^3-6.274J^2+0.037J-1.68 \cdot 10^4)}{2(-118.72J+0.72)^4} = f_d(J). \quad (4.55)$$

Se variază variabila gradul de stabilitate  $J$ , de la 0.01 la 1.5 și se trasează curbele dependentelor  $k_p = f_p(J)$ ,  $k_i = f_i(J)$  și  $k_d = f_d(J)$  funcții de  $J$  (figura 4.9). Conform metodei GMSI originale, valoarea optimă a gradului de stabilite  $J$  a sistemului automat proiectat corespunde primului maxim a dependențelor parametrilor regulatorului obținute prin variația  $J = 0 \dots \infty$ .

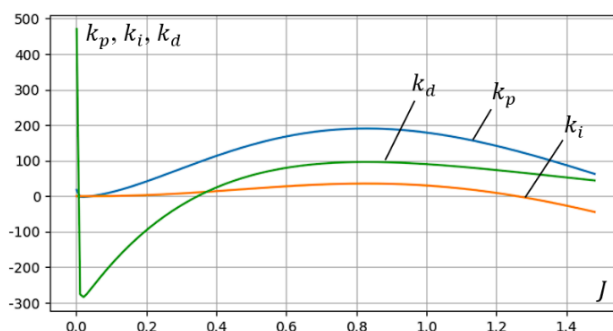
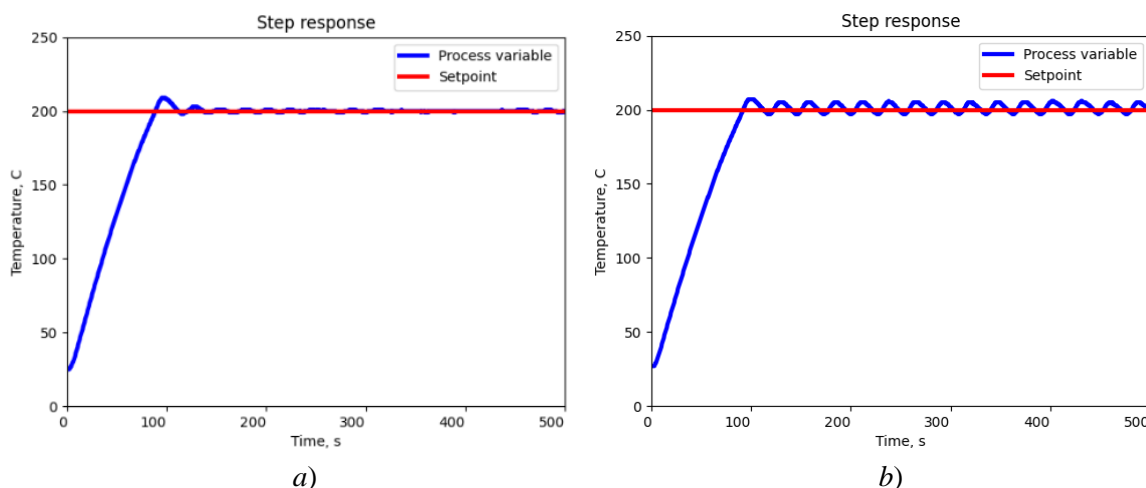


Figura 4.9. Dependențele  $k_p = f(J)$ ,  $k_i = f(J)$  și  $k_d = f(J)$

În continuare, din dependențele  $k_p = f_p(J)$ ,  $k_i = f_i(J)$  și  $k_d = f_d(J)$  din figura 4.9, au fost alese mai multe seturi de valori (tabelul 4.4) pentru regulatorul PID al sistemului automat de conducere a regimului termic în extruderul imprimantei 3D. Rezultatele obținute în urma sintezei regulatorului PID folosind metoda GMSI au fost comparate cu metoda Ziegler-Nichols. Validarea experimentală a datelor a fost realizată pe procesul termic din extruderul unei imprimante 3D (figura 4.10).



**Figura 4.10. Răspunsurile indiciale ale extruderului imprimantei 3D:**  
**a) metoda GMSI, b) metoda Ziegler-Nichols**

În tabelul 4.4 se reprezintă performanțele sistemului automat de reglare a regimului termic în extruderul imprimantei 3D cu parametrii regulatorului PID pentru modelul de obiect identificat.

**Tabelul 4.4. Parametrii regulatorului și performanțele sistemului cu extruder**

Nr. iter.	Metoda acordare	Parametrii regulatorului					Performanțele sistemului			
		$J$	$k_p$	$k_i$	$T_i, s$	$k_d$	$t_c, s$	$\sigma, \%$	$t_r, s$	$n$
1	MSDI	0.36	96.13	10.848	0.092	2.16	82	5.5	103	1
2	MSDI	0.78	189.15	35.02	0.028	95.42	82	5.0	102	1
<b>3</b>	<b>MSDI</b>	<b>1.24</b>	<b>134.2</b>	<b>4.6</b>	<b>0.21</b>	<b>70.47</b>	<b>74</b>	<b>4.5</b>	<b>82</b>	<b>0</b>
4	ZN	-	336.6	34.22	0.029	841.5	80	4.0	92	0

Cele mai bune performanțe ale sistemului automat de reglare a regimului termic în extruderul imprimantei 3D au fost obținute folosind metoda GMSI (figura 4.10, a), iterația nr. 3 din tabelul 4.4, având cel mai mic timp de reglare, cel mai mic suprareglaj și fără oscilații.

Pentru cazul metodei Ziegler-Nichols (figura 4.10, b), oscilațiile sunt prezente datorită esenței metodei, procesul se obține oscilant amortizat.

#### 4.5 Concluzii la capitolul 4

S-au analizat două tipuri de obiecte tehnice, automobilul cu avionul, și două procese termice, cuptor industrial și extruderul imprimantei 3D, pentru care s-au determinat modelele matematice și s-au sintetizat algoritmi de conducere.

Metoda gradului maximal de stabilitate cu iterații de acordare este cea mai redusă în calcule și are performanțe satisfăcătoare în comparație cu metodele MP1, MP2 și PZ, care au calculele

mai dificile. Sistemul cu regulatorul acordat la modelul obiectului (4.1) după metoda GMSI are gradul optimal de stabilitate  $J = -0.4175$ , iar MP1  $J = -0.6239$ , MP2  $J = -1.1364$ , PZ  $J = -1.5669$ . La variația parametrilor modelului obiectului cu  $\pm 50\%$  de la valorile inițiale sistemul cu regulatorul acordat după metoda GMSI este mai robust decât sistemul cu regulatorul acordat după metodele MP1, MP2, PZ.

Sistemul cu modelul obiectului (4.10) cu regulatorul acordat după metoda GMSI are performanțe mai ridicate în comparație cu sistemul cu regulatorul acordat după metoda polinomială MP1 și MP2. Sistemul cu regulatorul acordat după metoda GMSI este mai robust de 5.19 ori în raport cu sistemul cu regulatorul acordat după metoda polinomială MP2 (gradul de stabilitate  $J = -3.8899$ , iar a sistemului cu regulatorul acordat după metodele MP1  $J = -1.2457$ , MP2  $J = -0.75$ ). La variația parametrilor modelului obiectului cu  $\pm 50\%$  de la valorile inițiale sistemul cu regulatorul acordat după metoda GMSI este mai robust decât sistemul cu regulatorul acordat după metodele polinomiale.

S-au elaborat algoritmi de reglare P, PI, PD și PID după GMSI și Ziegler-Nichols dintre care algoritmul PID (GMSI) prezintă performanțe ridicate (tabelul 4.9, iterația 4), timpul de creștere este de până la 82.8 s, o oscilație și un suprareglaj de 8.75 %.

Sistemul de reglare a regimului termic în extruderul imprimantei 3D prezintă performanțe ridicate (tabelul 4.10, iterația 3). S-a sintetizat algoritmul de reglare PID utilizând metodele GMSI și Ziegler-Nichols dintre care acordarea regulatorului după GMSI a dat rezultate bune cu un timp de reglare de 82 s, un suprareglaj de 4.5 % și fără oscilații (figura 4.10, a).

## CONCLUZII GENERALE

Lucrarea conține contribuții ce includ metode, algoritmi, proceduri și produse program, destinate acordării algoritmilor de reglare la modele de obiecte cu avans-întârziere, astatism și timp mort, utilizate pentru automatizarea proceselor tehnologice moderne.

1. Prin extinderea metodei gradului maximal de stabilitate într-o formă analitică și grafo-analitică cu iterații, s-au obținut noi algoritmi de acordare a reguletoarelor P, PI, PD și PID pentru modele de obiecte cu avans-întârziere de ordinul unu, doi, trei, patru și cinci fără și cu astatism și fără și cu timp mort.

2. În rezultatul simulărilor pe calculator în pachetul MATLAB a sistemului cu regulatorul P, PD, PI, PID acordat după metoda gradului maximal de stabilitate cu iterații și a sistemului cu regulatorul acordat după metodele poli-zero-uri și metoda polinomială și, din analiza rezultatelor obținute se constată, că sistemul cu regulatorul acordat după metoda gradului de stabilitate cu iterații are performanțe mai ridicate, decât sistemul cu regulatorul acordat după metodele poli-zero-uri și metoda polinomială.

3. Metoda gradului maximal de stabilitate cu iterații conduce la obținerea răspunsurilor indiciale ale sistemului de tip aperiodic și oscilant amortizat, ceea ce, în dependență de cerințele



de calitate ale sistemului și procedura de iterații, se poate optimiza și da prioritate unui anumit tip de răspuns al sistemului (suprareglarea optimală sau timpul de reglare optimal) pentru a obține performanțele posibile dorite ale sistemului. La utilizarea metodei poli-zerouri și metodei polinomiale de sinteză a algoritmului se obține un singur răspuns.

4. Prin analiza alocării rădăcinilor ecuațiilor caracteristice ale sistemului cu regulatorul acordat după metodele gradului de stabilitate cu iterații, poli-zerouri și polinomială, sistemul cu regulatorul acordat după metoda gradului de stabilitate cu iterații are o margine de stabilitate mai ridicată în comparație cu sistemul cu regulatorul acordat după metodele poli-zerouri și polinomială.

5. S-a confirmat faptul că procedura iterativă elaborată a metodei gradului maximal de stabilitate asigură performanțe și robustețe ridicate ale sistemului automat.

6. Prin analiza stabilității și performanțelor sistemelor de reglare, se constată că utilizarea metodei gradului maximal de stabilitate cu iterații, permite menținerea unui nivel mai ridicat de stabilitate în comparație cu metodele tradiționale și îmbunătățirea performanțelor, chiar și în cazul variațiilor parametrilor într-un interval de  $\pm 20 \dots \pm 50$  % de la valorile nominale ale modelului obiectului de reglare.

7. S-a elaborat setul de pachete de programe *GMS-Calcul-DM* în limbajul *Python*, care automatizează procedura de calculul și construire în formă grafică a funcțiilor  $k_p = f_p(J)$ ,  $k_i = f_i(J)$ ,  $k_d = f_d(J)$  parametrilor algoritmilor de reglare pentru modelele de obiecte de ordin arbitrar. Rezultatul calculelor este prezentat în format *.docx* pentru a eficientiza procedura de sinteză a sistemului automat. Totodată pachetul *GMS-Calcul-DM* poate fi utilizat și pentru cercetători științifici în procesul de efectuare a cercetărilor. Timpul de calcul în pachetul de programe *GMS-Calcul-DM* pentru diferite modele este de ordinul 10-30 s.

## RECOMANDĂRI

În baza rezultatelor cercetării obținute se recomandă:

1. De aplicat metoda elaborată de acordare a reguletoarelor tipizate la clasa de modele matematice de obiecte cu avans de ordinul doi și trei cu întârziere de ordinul 1-4 cu sau fără astatism și cu sau fără timp mort.

2. De continuat cercetările elaborării metodei gradul maximal de stabilitate cu iterații pentru clase de modele matematice de obiecte cu avans-întârziere de ordin arbitrar cu diverse proprietăți (fază neminimă, cu sau fără astatism, cu sau fără timp mort etc.) cu aplicarea pachetului de programe elaborat *GMS-Calcul-DM*.

## BIBLIOGRAFIE

1. CĂLIN, S. *Sisteme automate complexe*. București: Editura Tehnică, 1973. 567 p.
2. COJUHARI I., IZVOREANU I., FIODOROV I., **MORARU, D.** Sinteza algoritmului de conducere cu procesul termic în cuptor. În: *Meridian Ingineresc*, UTM. 2016, Nr. 2, pp. 83-88. C category journal. ISSN1683-853X.
3. DUMITRACHE, I. *Ingineria reglării automate*. București: Politehnica Press, 2010. 394 p. ISBN 978-606-515-686-9.
4. IZVOREANU, B. *Ingineria sistemelor automate. Ghid pentru proiectarea de curs*. Chișinău: Tehnica-UTM, 2021, 122 p. ISBN 978-9975-45737-8.
5. IZVOREANU, B. *Teoria sistemelor automate. Manual*. Chișinău: Tehnica-UTM, 2022, 343 p. ISBN 978-9975-45-853-5.
6. IZVOREANU, B. The Iterative Algorithm of Tuning Controllers to the Model Object with Advance Delay and Inertia Second Order. In: *Proceedings of the 10-th International Conference on Development and Application Systems DAS-2010*, România, Universitatea Ștefan cel Mare Suceava, 2010, pp. 111–115, ISBN 978-606-13-0078-5.
7. LAZĂR, C., VRABIE, D., CARARI, S. *Sisteme automate cu reglatoare PID*. București: Ed. MATRIX ROM, 2004. 225 p. ISBN 973-685-867-7.
8. POZNA, C. *Teoria sistemelor automate*. București: MATRIX ROM, 2004. 329 p. ISBN 973-685-733-6.
9. SHATALOV, A. S., TOPCHEEV, Iu. I., KONDRATIEV, B. S. *Letatelinye apparaty kak obiekty upravleniia*. M.: Mashinostroenie, 1972. 240 s.
10. SHUBLADZE, A. M. Sposoby sinteza sistem upravleniia maksimalnoi stepeni ustoichivosti. V: *Avtomatika i telemekhanika*, 1980, №1, ss. 28-37.
11. SHUBLADZE, A. M., POPADIKO, V. E., BOBRIKOV, N. M., EAKUSHEVA, A. A. Issledovanie optimalnykh po stepeni ustoichivosti reshenii pri PID-upravlenii. V: *Jurnal – Avtomatizatsia, telemekanizatsia i sveazi v neftianoi promyshlennosti*, 2008, № 2, ss. 6–9, ISSN 0132-2222.
12. SMIRNOV, N.I., SHAROVIN, I.M. O vybore kriteriia optimalnosti v chislennykh metodah raschiota SAR s PID-reguleatorom. V: *Promyshlennye ASU i kontroliery, OOO Izdatelstvo Nauchitehizdat*, 2010, №2, ss. 12–17, ISSN 1561-1531.
13. VETLINSKII, V.N., OSIPOV, A.V. *Avtomaticheskie sistemy upravleniia dvizheniem avtotransporta*. L.: Mashinostroenie, Leningr. otdelenie, 1986, 240 s.

## LISTA LUCRĂRILOR PUBLICATE LA TEMA TEZEI

### I. Lucrări științifice

**Articole în reviste științifice** (în reviste din alte baze de date acceptate de către ANACEC):

1. COJUHARI, I., IZVOREANU, B., FIODOROV, I., **MORARU, D.**, BOTNARU S. Synthesis of the PID Algorithm for Control the Thermal Regime in the 3D Printer. In: *Analele Universității din Craiova, seria: Ingineria Electrică*. 2017, No. 41, Vol. 41, Issue 1, pp. 115-121. ISSN: 1842-4805 Disponibil: [https://ibn.idsi.md/ro/vizualizare\\_numar\\_revista/844/7986](https://ibn.idsi.md/ro/vizualizare_numar_revista/844/7986).

**Articole în reviste științifice** (în reviste din Registrul Național al revistelor de profil):

2. COJUHARI I., IZVOREANU I., FIODOROV I., **MORARU D.** Sinteza algoritmului de conducere cu procesul termic în cuptor. In: *Meridian Ingineresc*, UTM. 2016, Nr. 2, pp. 83-88. **Revistă de categoria B+**. ISSN 1683-853X. Disponibil: [https://ibn.idsi.md/ru/vizualizare\\_articol/48300/crossref](https://ibn.idsi.md/ru/vizualizare_articol/48300/crossref).

3. **MORARU, D.**, IZVOREANU, B. Synthesis of the Control Algorithm for Third-Order Object Models with Additional Zero and Time Delay. In: „*Intellectus*”, *Revistă de proprietate intelectuală, știință și educație*, 2023, No. 2. pp. 116-122, ISSN-1810-7087. DOI: 10.56329/1810-7087.23.2.12, Disponibil: <https://agepi.gov.md/en/intellectus/intellectus-2-2023/synthesis-control-algorithm-third-order-object-models-additional-zero>.

4. **MORARU, D.** Tuning method of automatic controllers to object models with second order advance-delay and dead time. In: *Acta et Commentationes Exact and Natural Sciences*. 2023, Volume 2(16), pp. 78–88. **B category journal**. ISSN: 2537-6284. E-ISSN: 2587-3644 <https://doi.org/10.36120/2587-3644.v2i16.78-88>, Disponibil: [https://revistaust.upsc.md/index.php/acta\\_exacte/article/view/960/939](https://revistaust.upsc.md/index.php/acta_exacte/article/view/960/939).

### II. Articole în culegeri științifice

**Articole în lucrările conferințelor științifice internaționale (din străinătate):**

5. FIODOROV, I., COJUHARI, I., IZVOREANU, B., **MORARU, D.** 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 (EPE-2018)*, 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), <https://ieeexplore.ieee.org/document/8559883>.

6. IZVOREANU, B., SECRIERU, A., COJUHARI, I., FIODOROV, I., **MORARU, D.**, POTLOG, M. Modified Polynomial Method to Synthesize a Control Algorithm for a System with Second-Order Inertia and Time Delay. In: *Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE-2022)*, Iași, Romania, 19-21 octombrie, 2022. ISBN:978-1-6654-8994-2. Disponibil: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9959867>

**III. Articole în lucrările conferințelor științifice naționale cu participare națională:**

7. **MORARU, D.** Analiza metodelor de acordare a regulatorului la modelul obiectului cu anticipație-întârziere de ordinul doi cu astatism. În: *Conferința Tehnico-Științifică a Colaboratorilor, Doctoranzilor și Studenților UTM, 5-7 aprilie 2023*, Chișinău, pp. 184-187, vol. I. ISBN 978-9975-45-957-0. Disponibil: <https://cercetari.utm.md/wp-content/uploads/sites/31/2023/09/Book-Works-Conference-TUM-2023-vol-I.pdf>

8. **MORARU, D.** Sinteza algoritmului de reglare la modelul obiectului cu anticipație-întârziere de ordinul trei cu oscilații. În: *Conferința Tehnico-Științifică a Colaboratorilor, Doctoranzilor și Studenților UTM, 5-7 aprilie 2023*, Chișinău, pp. 134-137, vol. I. ISBN 978-9975-45-957-0. Disponibil: <https://cercetari.utm.md/wp-content/uploads/sites/31/2023/09/Book-Works-Conference-TUM-2023-vol-I.pdf>

## ADNOTARE

### la teza „Metode și algoritmi de acordare a reguletoarelor la modele de procese cu avans-întârziere” prezentată de către MORARU Dumitru pentru conferirea titlului științific de doctor în informatică, Chișinău, 2023

**Structura tezei:** introducere, 4 capitole, concluzii, bibliografie – 123 titluri, 3 anexe, 120 de pagini text de bază, inclusiv 59 figuri și 15 tabele. Rezultatele sunt publicate în 8 lucrări.

**Cuvinte-cheie:** model de obiect de reglare cu avans-întârziere, funcție de transfer, regulator PID, parametrii de acord, sistem automat, metode de acordare, acordarea regulatorului, răspunsul sistemului, performanțele, robustețea sistemului.

**Domeniul de studiu:** aspecte teoretice și practice ale sintezei algoritmilor de conducere cu procese complexe, approximate cu modele de obiecte cu avans-întârziere, astatism și timp mort, evaluarea performanțelor și robusteții sistemului automat și produs program.

**Scopul tezei:** cercetarea și elaborarea algoritmilor de conducere în sisteme de conducere automată cu modele matematice de obiecte cu avans-întârziere, astatism și timp mort cu performanțe și robustețe ridicate.

**Obiective:** analiza particularităților principiului de conducere în sistemele de reglare cu modele de obiecte cu avans-întârziere, astatism și timp mort și analiza metodelor existente de acordare a reguletoarelor tipizate în cadrul acestor structuri; sinteza unor noi metode de acordare a reguletoarelor tipizate destinate asigurării performanțelor și robusteții ridicate ale sistemului automat sub influența semnalelor exogene; crearea și realizarea algoritmilor de sinteză a legilor de conducere în sisteme de reglare cu modele de obiecte cu avans-întârziere, astatism și timp mort în baza metodei gradului de stabilitate; sinteza algoritmului iterativ de acordare a parametrilor reguletoarelor tipizate, care să asigure performanțele și robustețea sistemului automat; verificarea și validarea algoritmilor elaborați de sinteză a legilor de conducere în sisteme de reglare cu modele de obiecte cu avans-întârziere, astatism și timp mort în pachetul de programe MATLAB; crearea instrumentarului destinat implementării metodei gradului maximal de stabilitate în forma grafo-analitică cu iterații pentru acordarea reguletoarelor tipizate cu modele de obiecte cu avans-întârziere, astatism și timp mort în sisteme de reglare convenționale prin crearea pachetului de programe respectiv.

**Noutatea și originalitatea științifică** constă în elaborarea unui algoritm și a unui pachet de programe care implementează metoda gradului maximal de stabilitate în formă grafo-analitică cu iterații pentru acordarea reguletoarelor tipizate la modele de obiecte cu avans-întârziere, astatism și timp mort.

**Problema științifică soluționată** constă în elaborarea unor metode, tehnici și algoritmi de sinteză a legilor de conducere în sisteme de reglare cu modele de obiecte cu avans-întârziere, astatism și timp mort, care asigură performanțe și robustețe ridicate ale sistemului automat.

**Semnificația teoretică** constă în elaborarea metodei de sinteză a algoritmilor de conducere în sisteme de reglare la modele de obiecte cu avans-întârziere, astatism și timp mort, elaborarea algoritmului iterativ de acordare a reguletoarelor la aceste modele de obiecte, simularea sistemelor de reglare automată în pachetul de programe MATLAB, analiza și compararea rezultatelor obținute, evaluarea performanțelor și robusteții sistemului automat.

**Valoarea aplicativă:** Rezultatele obținute în teză de doctor pot servi drept bază la automatizarea proceselor industriale complexe lente sau rapide în cazul soluționării problemei de sinteză a algoritmilor de conducere în sisteme de reglare cu modele de obiecte cu avans-întârziere, astatism și timp mort. În comparație cu metodele existente, metoda propusă – metoda gradului maximal de stabilitate în formă analitică și grafo-analitică cu iterații se caracterizează prin faptul că este aplicabilă la modele de obiecte cu avans-întârziere, astatism și timp mort, care permite obținerea rezervei de stabilitate, performanțelor și robusteții ridicate ale sistemului automat.

**Implementarea rezultatelor științifice** a avut loc în cadrul companiei „INFORMINSTRUMENT” S.A., Chișinău, precum și în diverse proiecte individuale.

## ABSTRACT

**to thesis “Methods and Algorithms for Tuning Controllers for Advance-Delay Process Models”, presented by MORARU Dumitru for the conferral of the scientific title of doctor in Informatics, Chişinău, 2023**

**The thesis Structure:** introduction, 4 chapters, conclusions, bibliography with 123 titles, 3 appendices, 120 pages of main text, including 59 figures and 15 tables. The results are published in 8 papers.

**Keywords:** inertia control object model, transfer function, PID controller, tuning parameters, automatic system, tuning methods, controller tuning, system response, system performance.

**Field of study:** theoretical and practical aspects of algorithm synthesis for complex processes approximated by advance-delay object models, static and dead-time systems, performance evaluation and robustness of automatic systems and product programs.

**Thesis aim:** research and development of automatic control algorithms with mathematical models of objects with advance-delay, astatism and dead time with high performance and robustness.

**Objectives:** analysis of the particularities of the control principle in automatic control systems with advance-delay, astatism and dead time object models and analysis of existing methods of tuning typified controllers within these structures; the synthesis of new methods of tuning the typical controllers intended to ensure the high performance and robustness of the automatic system under the influence of exogenous signals; creation and realization of algorithms for the synthesis of driving laws in control systems with advance-delay, astatism and dead time object models based on the degree of stability method; the synthesis of the iterative algorithm for setting the parameters of the typical controllers, which ensures the performance and robustness of the automatic system; verification and validation of developed algorithms for the synthesis of driving laws in control systems with advance-delay, astatism and dead-time object models in the MATLAB software package; the creation of the tools for the implementation of the method of the maximum degree of stability in grapho-analytical form with iterations for tuning the typical controllers with advance-delay, astatism and dead time object models in conventional control systems by creating the respective software package.

**Scientific novelty and originality** consist in developing a software package for calculating the maximal stability degree method in graphical-analytical form with iterations for tuning standardized controllers for advance-delay object models, static and dead-time.

**The solved scientific problem** consists of developing methods, techniques, and algorithms for synthesizing control laws in control systems with advance-delay object models, static and dead-time, ensuring high performance and robustness of the automatic system.

**The theoretical importance** consists in developing a method for synthesizing control algorithms in control systems with advance-delay object models, static and dead-time, developing an iterative algorithm for tuning controllers for these object models, simulating automatic control systems using the MATLAB software package, analyzing and comparing the obtained results, evaluating the performance and robustness of the automatic system.

**Applicative value:** The results obtained in the doctoral thesis can serve as a basis for automating complex industrial processes, whether slow or fast, in the case of synthesizing control algorithms for control systems with advance-delay object models, static and dead-time. Compared to existing methods, the proposed method – the maximal stability degree method in analytical and graphical-analytical form with iterations – is characterized by its applicability to advance-delay object models, static and dead-time, allowing for the attainment of stability reserves, high performance, and robustness of the automatic system.

**The implementation of scientific results** took place within the company ‘INFORMINSTRUMENT’ S.A., Chisinau, as well as in various individual projects.

## АННОТАЦИЯ

**к диссертации «Методы и алгоритмы настройки регуляторов для моделей процессов с упреждением и инерцией», представленной МОРАРУ Думитру на соискание ученой степени доктора в информатике, Кишинэу, 2023**

**Структура диссертации:** введение, 4 главы, заключение, библиография – 123 наименований, 3 приложений, 120 страниц основного текста, включая 59 рисунков и 15 таблиц. Результаты опубликованы в 8 работах.

**Ключевые слова:** модель объекта управления с упреждением и инерцией, автоматическая система, передаточная функция, регулятор PID, методы настройки, настройка регулятора, настройка параметров, переходный процесс системы, показатели качества системы, робастность системы.

**Область исследования:** теоретические и практические аспекты синтеза алгоритмов управления сложными процессами, аппроксимированными моделями объектов с упреждением и инерцией, астатизмом и запаздыванием, оценка показателей качества системы и программных продуктов.

**Цель диссертации:** исследование и разработка алгоритмов управления в системах автоматического регулирования с математическими моделями объектов с инерцией и упреждением, астатизмом и запаздыванием, обладающих высокой производительностью и надежностью.

**Задачи:** анализ особенностей принципа управления в системах регулирования с моделями объектов с инерцией и упреждением, астатизмом и запаздыванием и анализ существующих методов настройки регуляторов; создание и реализация алгоритмов синтеза законов регулирования в системах с моделями объектов с инерцией и упреждением, астатизмом и запаздыванием на основе метода степени устойчивости; синтез алгоритма с итерациями для расчета параметров типовых регуляторов, обеспечивающего качество и надежность системы; проверка и валидация разработанных алгоритмов синтеза законов регулирования в системах управления с инерцией и упреждением, астатизмом и запаздыванием в программном комплексе MATLAB; создание средств реализации метода максимальной степени устойчивости в графоаналитической форме с итерациями для настройки типизированных регуляторов путем создания соответствующего программного пакета.

**Научная новизна и оригинальность** заключается в разработке алгоритма в графоаналитической форме на основе метода максимальной степени устойчивости и программного пакета для расчета параметров типовых регуляторов для моделей объектов с упреждением и инерцией, астатизмом и запаздыванием.

**Решенная научная проблема** заключается в разработке методов, методик и алгоритмов синтеза управляющих законов в системах управления с моделями объектов с упреждением и инерцией, астатизмом и запаздыванием, обеспечивающих высокие показатели качества и робастностью системы.

**Теоретическая значимость** состоит в разработке метода синтеза алгоритмов управления в системах управления с моделями объектов с упреждением и инерцией, астатизмом и запаздыванием, разработке итеративного алгоритма настройки регуляторов для этих моделей объектов, моделировании автоматических систем управления с использованием пакета программ MATLAB, анализе и сравнении полученных результатов, оценке показателей качества и робастностью автоматической системы.

**Практическая ценность:** Полученные результаты в докторской диссертации могут служить основой для автоматизации сложных промышленных процессов, независимо от их скорости, в случае решения проблемы синтеза алгоритмов управления в системах управления с моделями объектов с упреждением и инерцией, астатизмом и запаздыванием.

**Внедрение научных результатов** было осуществлено в компании "INFORMINSTRUMENT" S.A., Кишинэу, а также в различных индивидуальных проектах.

**MORARU DUMITRU**

**METODE ȘI ALGORITMI DE ACORDARE A  
REGULATORILOR LA MODELE DE PROCESE  
CU AVANS-ÎNTÂRZIERE**

**122.03 „MODELARE, METODE MATEMATICE, PRODUSE PROGRAM”**

**REZUMATUL ȘTIINȚIFIC AL TEZEI DE DOCTOR ÎN INFORMATICĂ**

---

Aprobat spre tipar 06.12.2024

Formatul hârtiei 60x84 1/16

Hârtie offset. Tipar RISO

Tirajul 50 ex.

Coli de tipar 2,0

Comanda nr. 134

---

MD 2004, Chișinău, bd. Stefan cel Mare și Sfânt, 168,  
UTM MD 2045, Chișinău, str. Studenților, 9/9, Editura „Tehnica-UTM”