



Digitally signed by
Technical Scientific Library,
TUM
Reason: I attest to the
accuracy and integrity of
this document

UNIVERSITATEA TEHNICĂ A MOLDOVEI

**FACULTATEA CALCULATOARE, INFORMATICĂ
ȘI MICROELECTRONICĂ**

**DEPARTAMENTUL INGINERIA SOFTWARE
ȘI AUTOMATICĂ**

Bartolomeu IZVOREANU

**INGINERIA
SISTEMELOR AUTOMATE**

Suport de curs



2024

CZU 681.51/.53(075.8)
I-99

Lucrarea a fost discutată și aprobată pentru editare la ședința Consiliului Facultății Calculatoare, Microelectronică și Informatică, proces-verbal nr. 2 din 01.11.2024.

Suportul de curs *Ingineria sistemelor automate* este destinat studenților specialității *0714.6 Automatică și informatică*, dar poate fi utilizat și de studenții altor specialități pentru aprofundarea cunoștințelor în domeniul ingineriei sistemelor automate.

În lucrare sunt expuse principiile și metodele de proiectare a algoritmilor continui și numerici când asupra sistemului acționează semnale de intrare de referință și perturbație în baza transferului intrare-ieșire și intrare-stare-ieșire.

Sunt expuse modele de algoritmi în structurile convenționale de reglare, structurile de sisteme de reglare pentru procesele lente, modelarea sistemelor numerice și algoritmi de reglare numerică în forma intrare-ieșire și intrare-stare-ieșire, proiectarea algoritmilor numerici în domeniul timpului, algoritmi de acordare a regloatoarelor în sistemele multivariabile și implementarea algoritmilor numerici. Sunt analizate exemple de proiectare a algoritmilor continui și numerici. Suportul de curs include introducerea, 10 capitole, bibliografie și 2 anexe.

Autor: conf. univ., dr. Bartolomeu IZVOREANU

Recenzent: acad., conf. univ., dr. hab. Anatolii BALABANOV

DESCRIEREA CIP A CAMEREI NAȚIONALE A CĂRȚII DIN RM

Izvoreanu, Bartolomeu.

Ingineria sistemelor automate: Suport de curs / Bartolomeu Izvoreanu;
Universitatea Tehnică a Moldovei, Facultatea Calculatoare, Informatică și
Microelectronică, Departamentul Ingineria Software și Automatică.

– Chișinău: Tehnica-UTM, 2024. – 337 p.: fig., tab.

Bibliogr.: p. 332-333 (21 tit.). – 50 ex.

ISBN 978-9975-64-482-2.

© UTM, 2024

CUPRINS

INTRODECERE	9
1 NOȚIUNILE DE BAZĂ ALE INGINERIEI SISTEMELOR AUTOMATE	11
1.1 Structuri de sisteme de reglare automată	11
1.2 Formularea problemei de proiectare a sistemului de reglare automată	14
1.3 Modelul matematic al procesului condus și proprietățile lui	16
1.4 Elemente tehnice ale automaticii	27
1.4.1 <i>Tranșductoare</i>	27
1.4.2 <i>Elemente de execuție</i>	27
1.4.3 <i>Amplificatoare</i>	33
1.5 Performanțele sistemului de reglare automată	34
1.6 Eroarea staționară a sistemului automat	37
1.7 Criteriile integrale de apreciere a performanțelor sistemului automat	40
1.8 Metode de proiectare a sistemelor de reglare automată	42
Chestionar și probleme	43
2 ALGORITMI ȘI STRUCTURI CONVENȚIONALE DE REGLARE AUTOMATĂ	44
2.1 Principii de sinteză a structurii sistemului automat	44
2.2 Legile de reglare tipice	48
2.3 Algoritmul de reglare proporțional-derivativ cu temporizare de ordinul unu	52
2.4 Analiza influenței componentelor PID asupra stabilității și calității sistemului automat	53
2.5 Algoritmi PID modificați cu două grade de libertate	57
2.6 Structura regulatorului real	59
2.7 Relațiile modelului matematic al sistemului de ordinul doi și performanțele lui	62
2.8 Repartizarea poli-zerourilor funcției de transfer $H_0(s)$ și a imaginii semnalului $r(s)$	65

2.9 Problemele proiectării sistemelor automate liniare monovariabile.....	66
2.10 Proiectarea sistemului automat monovariabil pe baza funcțiilor de transfer $H_0(s)$ și $H_d(s)$	74
2.11 Proiectarea sistemului automat prin metoda alocării poli-zerourilor	81
2.12 Proiectarea sistemului automat folosind metoda polinomială.....	90
2.13 Proiectarea sistemului automat în raport cu perturbația.....	101
2.14 Alegerea și acordarea reguletoarelor pentru procesele rapide.....	104
2.14.1 <i>Introducere</i>	104
2.14.2 <i>Criteriul modulului</i>	105
2.14.3 <i>Criteriul simetriei</i>	108
2.15 Alegerea și acordarea reguletoarelor pentru procesele lente	109
2.16 Alegerea și acordarea reguletoarelor prin metode experimentale	111
2.16.1 <i>Metode empirice</i>	111
2.16.2 <i>Criteriile experimentale de acordare a reguletoarelor</i>	113
2.16.3 <i>Metoda Ziegler–Nichols</i>	114
2.17 Acordarea reguletoarelor folosind metoda criteriilor integrale	117
2.18 Proiectarea sistemului folosind metoda gradului maximal de stabilitate	126
Chestionar și probleme	136

3 STRUCTURI DE SISTEME AUTOMATE

PENTRU PROCESELE LENTE	138
3.1 <i>Introducere</i>	138
3.2 Structura sistemului automat cu două grade de libertate	138

3.3	Structura sistemului automat de reglare combinată ..	139
3.4	Structura sistemului automat de reglare în cascadă	143
3.5	Structura sistemului cu predictor Smith	146
	Chestionar și probleme	150
4	MODELAREA MATEMATICĂ A SISTEMELOR NUMERICE DE REGLARE AUTOMATĂ	151
4.1	Modelarea blocurilor din structura sistemului numeric monovariabil	151
4.2	Modelarea sistemului numeric ca sistem continuu cu eșantionare	154
4.3	Modelarea sistemului numeric ca sistem discret	156
4.4	Modele discrete ale sistemelor multivariabile	159
4.5	Discretizarea aproximativă a modelelor intrare-ieșire	161
4.6	Discretizarea aproximativă a modelelor intrare-stare-ieșire	167
4.7	Criteria de performanță utilizate în reglarea numerică	169
	4.7.1 <i>Criteriale locale de performanță</i>	169
	4.7.2 <i>Criteriale globale de performanță</i>	171
	Chestionar și probleme	173
5	ALGORITMI DE REGLARE NUMERICĂ DERIVAȚI DIN LEGILE DE REGLARE CONTINUE ..	174
5.1	Introducere	174
5.2	Filtrarea numerică de întârziere de ordinul unu	174
5.3	Algoritmul de avans-întârziere numeric	175
5.4	Algoritmii bipoziționali și tripoziționali	176
	5.4.1 <i>Algoritmul bipozițional</i>	176
	5.4.2 <i>Algoritmul tripozițional</i>	178
5.5	Algoritmi numerici de reglare	179
	5.5.1 <i>Algoritmul PID numeric de poziție și incremental</i>	179
	5.5.2 <i>Algoritmul PID numeric cu filtrare</i>	187

5.5.3 Algoritmul PID numeric modificat	190
5.6 Optimizarea parametrilor de acord ai regulatorului ..	192
5.6.1 Optimizarea parametrilor regulatorului utilizând un model al procesului	192
5.6.2 Optimizarea pe baza ecuației caracteristice a sistemului închis	193
5.6.3 Optimizarea parametrilor regulatorului pe baza unor reguli de acordare	197
5.7 Alegerea optimă a perioadei de eșantionare	199
5.8 Funcții suplimentare ale regulatorului PID numeric..	201
5.8.1 Metode antisaturație	201
5.8.2 Comutarea manual–automată.....	203
5.9 Autoacordarea reguletoarelor PID	206
5.9.1 Preliminarii	206
5.9.2 Metode bazate pe răspunsul indicial	207
5.9.3 Metode bazate pe caracteristicile oscilațiilor la limita de stabilitate	208
5.9.4 Acordarea folosind metoda Ziegler-Nichols....	211
5.9.5 Acordarea folosind metoda rezervei de stabilitate	211
Chestionar și probleme	214
6. PROIECTAREA SISTEMULUI NUMERIC FOLOSIND METODA INTRARE-IEȘIRE	215
6.1 Preliminarii	215
6.2 Proiectarea SNRA monovariabile prin metoda alocării	215
6.3 Proiectarea sistemului automat Folosind metoda polinomială	224
Chestionar și probleme	231
7 PROIECTAREA ALGORITMILOR NUMERICI DE REGLARE ÎN DOMENIUL TIMPULUI	232
7.1 Introducere	232
7.2 Metoda timpului finit	232
7.2.1 Metoda răspunsului impus-algoritm normal ...	232

7.2.2 Metoda răspunsului impus-algoritmul extins ..	242
7.2.3 Alegerea perioadei de eșantionare	248
7.2.4 Metoda timpului minim	249
Chestionar și probleme.....	258
8 PROIECTAREA ALGORITMILOR NUMERICI DE REGLARE A PROCESELOR MULTIVARIABILE	259
8.1 Modele matematice ale proceselor multivariabile ..	259
8.2 Algoritmi de reglare a proceselor multivariabile	261
8.3 Acordarea optimă a regulatorului monovariabil În procesele multivariabile	264
8.4 Conducerea noninteractivă a proceselor multivariabile	270
8.4.1 Structuri noninteractive de sisteme multivariabile	270
8.4.2 Decuplarea sistemului multivariabil deschis	271
8.4.3 Structura de reglare noninteractivă a proceselor în forma canonică P cu regulatoare de decuplare în forma canonică V	273
8.4.4 Structura de reglare noninteractivă a proceselor în forma canonică V cu regulatoare de decuplare în forma canonică P	276
8.4.5 Decuplarea sistemului multivariabil închis	277
8.4.6 Decuplarea sistemului multivariabil cu regulator pe cale directă	277
8.4.7 Decuplarea sistemului multivariabil cu regulator pe cale de reacție	278
Chestionar și probleme.....	286
9 SINTEZA LEGII DE REGLARE DUPĂ STARE	287
9.1 Introducere	287
9.2 Reglarea prin reacție după stare	287
9.3 Estimarea stării	296
9.3.1 Calculul direct al variabilelor de stare	296
9.3.2 Reconstrucția stării folosind un sistem dinamic	298

9.4	Proiectarea regulatorului cu estimator de stare	303
9.5	Proiectarea regulatorului în prezența perturbațiilor .	309
9.6	Proiectarea regulatorului pentru urmărirea referinței	313
9.7	Proiectarea regulatorului cu două grade de libertate	315
	Chestionar și probleme.....	319
10	IMPLEMENTAREA ALGORITMILOR NUMERICI	320
10.1	Implementarea unui algoritm recurent de ordinul doi.....	320
10.2	Implementarea algoritmului recurent de ordinul n	322
10.3	Implementarea algoritmului structurat pe module	324
10.4	Modele de comandă generală	325
10.5	Regulatorul PID de tip RST	328
	Chestionar și probleme.....	331
	BIBLIOGRAFIE	332
	ANEXE	334
	Anexa 1. Funcții de timp continuu și discret, imaginea Laplace s și transformata z	334
	Anexa 2. Funcții de transfer ale elementelor dinamice în imaginea Laplace s și transformata z	335

INTRODUCERE

Problema de sinteză a sistemului de reglare automată este una din principalele probleme complexe ale teoriei sistemelor de conducere, care constă în determinarea modelului matematic al procesului condus la acțiunea semnalelor exogene, alegerea și dimensionarea elementelor componente, a structurii și configurației sistemului, parametrilor elementelor și cerințelor de funcționare ce ar satisface performanțele impuse sistemului de reglare automată [1, 3-6, 13, 17-19].

Proiectarea și funcționarea proceselor industriale și tehnologice automatizate trebuie să satisfacă atât cerințele de performanță și robustețe impuse sistemului automat, cât și unor specificații dorite cum ar fi eficiența, calitatea, profitabilitatea, siguranța în funcționare, optimizarea consumurilor energetice, impactul asupra mediului etc.

Rezultatul realizării proiectului de automatizare a proceselor industriale și tehnologice depinde de doi factori [1, 4, 5, 6, 17]:

1) gradul de înțelegere și de cunoaștere a regimurilor de funcționare ale procesului condus ca obiect de conducere;

2) capacitatea de înțelegere și utilizare a conceptelor teoriei sistemelor automate, a formalismului de reprezentare a semnalelor și a principiilor de conducere.

Complexitatea proceselor industriale și tehnologice, corelată cu cerințele ridicate de performanță și robustețe, automatizarea devin o necesitate obiectivă în conjunctura globalizării economiei și a piețelor de procese și produse [4, 17].

Evoluția ingineriei sistemelor automate este strâns corelată cu cea a tehnologiei proceselor și a științei calculatoarelor ca urmare a dezvoltării avansate a microelectronicii, care a condus la realizarea interfețelor de proces, a traductoarelor cu un nivel ridicat de inteligență, a elementelor de execuție performante, a procesoarelor de semnal și a microcontrolerelor. Ținând cont de aceste rezultate și având la bază modelele matematice ale proceselor, este posibilă implementarea celor mai avansate strategii de conducere a instalațiilor automatizate.

Dacă se consideră evoluția strategiilor de conducere a proceselor industriale și tehnologice, atunci se evidențiază mai multe categorii

căroră le corespund generații de sisteme de conducere cum ar fi [5, 17]:

1) sisteme convenționale de reglare care se bazează pe strategii convenționale de reglare (reglare PID, reglare directă și reglare cascadă);

2) sisteme avansate de conducere având la bază tehnici clasice de conducere (ajustarea amplificării, compensarea timpului mort, reglarea prin decuplare, reglarea selectivă etc.);

3) sisteme avansate de conducere având la bază tehnici noi (reglarea predictivă, reglarea cu model intern, reglarea adaptivă, controlul statistic al calității etc.);

4) sisteme avansate de conducere având la bază modele matematice complexe (conducere neliniară, optimală și robustă);

5) sisteme avansate de conducere având la bază tehnici inteligente (sisteme bazate pe cunoștințe, tehnici fuzzy, tehnici neurale);

6) sisteme inteligente hibride de conducere având la bază tehnici avansate de procesare a informațiilor și a cunoștințelor, care integrează tehnicile neurale, tehnicile fuzzy, tehnicile inteligenței artificiale și programarea evoluționistă.

Dezvoltarea diferitelor etape în ingineria sistemelor automate și a sistemelor cu conducere automată, care încorporează atât strategiile de conducere, cât și suportul hardware și software pentru implementarea acestora, evidențiază trecerea de la structurile simple de reglare, cu unul sau două grade de libertate cu reacție negativă, și reglarea directă după mărimile exogene măsurabile, la structuri cu multiple interacțiuni și cu un nivel înalt de inteligență etc.

Sistemele automate sunt larg utilizate la conducerea proceselor biologice, chimice, economice și a interacțiunilor umane.

Ingineria conducerii automate este una dintre cele mai provocatoare și interesante domenii ale ingineriei moderne [1, 3, 5], care încorporează concepte, modele, metode, tehnici și tehnologii din diverse discipline, având ca domeniu interdisciplinar diverse aplicații.

În lucrare sunt expuse strategii de conducere a proceselor industriale și tehnologice ca sisteme convenționale cu strategii convenționale de reglare (reglare PID, reglare în cascadă și reglare directă), ca sisteme liniare continue și sisteme numerice monovariabile și multivariabile.

BIBLIOGRAFIE

1. *Automatica*. Coord. I. DUMITRACHE. București: Editura Academiei Române, 2009. V. 1. 961 p. ISBN 978-973-27-1883-4.
2. DYNNIKOV, A.I. *Tzifrovye sistemy upravleniya*. M.: MFTI, 2006. 196 s. ISBN 5-7417-0151-5.
3. DORF, R. K.; BISHOP, R. X. *Sovremennyye sistemy upravleniya (Modern Control Systems)*. Moskva: Laboratoria Bazovyh Znanii, 2004. 832 s. ISBN 5-93208-119-8.
4. DUMITRACHE, I. *Ingineria reglării automate*. București: Ed. Politehnica Press, 2016. V. 1. 407 p. ISBN 978-606-515-686-9. V. 2. 395 p. ISBN 978-606-515-687-6.
5. DUMITRACHE, I. *Ingineria reglării automate*. București: Ed. Politehnica Press, 2005. 725 p. ISBN 973-8449-72-3.
6. GAIDUK, A.P. *Teoria avtomaticheskogo upravleniya*. Uchebnik. M.: Vyssh. shkola, 2010. 415 s. ISBN 5-06-006055-3.
7. IZVOREANU, B. *Sisteme automate neliniare, discrete și stocastice*. Manual. Chișinău: Tehnica-UTM, 2023. 360 p. ISBN 978-9975-45-977-8.
8. IZVOREANU, B. *Teoria sistemelor automate*. Manual. Chișinău: Tehnica-UTM, 2022. 349 p. ISBN 978-9975-45-853-5.
9. IZVOREANU, B. *Ingineria sistemelor automate. Ghid pentru proiectarea de curs*. Chișinău: Tehnica-UTM, 2021. 122 p. ISBN 978-9975-45-737-8.
10. IZVOREANU, B.; SECRIERU, A.; COJUHARI, Irina; FIODOROV, I.; MORARU, D.; POTLOG, M. Comparative Analysis of Controller Tuning Methods for Second-Order Time Delayed Object Model with Astatism. In: *Proceedings the 14th International Conference on Electromechanical and Energy Systems (SIELMEN) -2023*, Chișinău, 12-13 October 2023. Pp.1-5. DOI: 10.1109/SIELMEN59038.2023.10290837. ISBN 979-8-3503-1524-0.
11. IZVOREANU, B.; COJUHARI, Irina; FIODOROV, I.; MORARU, D.; SECRIERU, A. Tuning the PID Controller to the Model of Object with Inertia Second Order According to the Maximum Stability Degree Method with Iteration. *Annals of the University of Craiova*.

Electrical Engineering series, No. 43, Issue 1, 2019. Pp. 79-85. ISSN-4805.

12. IZVOREANU, B.; FIODOROV, I. The Synthesis of Linear Regulators for Aperiodic Objects with Time Delay According to the Maximal Stability Degree Method. In: *Preprints the Fourth IFAC Conference on System Structure and Control*. București: Editura Tehnică, 1997. Pp. 449 - 454.

13. KIM, D. P. *Teoria avtomaticheskogo upravleniia*. T. 1. *Lineinye sistemy*. M.: FIZMATLIT, 2003. 288 s. ISBN 5-9221-0379-2.

14. KIM, D.P.; DIMITRIEVA, N.D. *Sbornik zadach po teorii avtomaticheskogo upravleniia*. *Lineinye sistemy*. M.: FIZMATLIT, 2007. 168 s. ISBN 978-5-9221-0873-7.

15. LAZĂR, C.; VRABIE, D.; CARARI, S. *Sisteme cu regulatoare PID*. București: MATRIX ROM, 2004. 225 p. ISBN 973-685-867-7.

16. LAZĂR, C.; PĂSTRĂVANU, O.; POLI, Elena; SCHONBERGER, F. *Conducerea asistată de calculator a proceselor tehnice. Proiectarea și implementarea algoritmilor de reglare numerică*. București: MATRIX ROM, 1996. 226 p. ISBN 973-97494-6-1.

17. *Metody klassicheskoi i sovremennoi teorii avtomaticheskogo upravleniia*. T. 3. *Sintez reguliatorov sistem avtomaticheskogo upravleniia*. Pod. red. K.A. PUPKOVA; N.D. EGUPOVA. M.: Izd-vo MGTU im. N. E. BAUMANA, 2004. 616 s. ISBN 5-7038-2191-6.

18. PREITL, Ș.; PREITL, Zsuzsa. *Introducere în automatică*. Suport de curs. București: Conspress, 2013. 219 p. ISBN 978-973-100-266-8.

19. *Teoria avtomaticheskogo upravleniia*. Uchebnik dlea vuzov. Pod red. V.B. IAKOVLEVA. M.: Vyssh. shkola, 2005. 567 s. ISBN 5-06-004096-8.

20. VOICU, M. *Introducere în automatică*. Iași: Ed. Dosoftei, 1998. 237 p. 973-9135-60-9.

21. ZAGARII, G. I.; SHUBLADZE, A. M. *Sintez sistem upravleniia na osnove criteria maksimalnoi stepeni ustoichivosti*. Moskva: Ergoatomizdat, 1998. 198 s.