

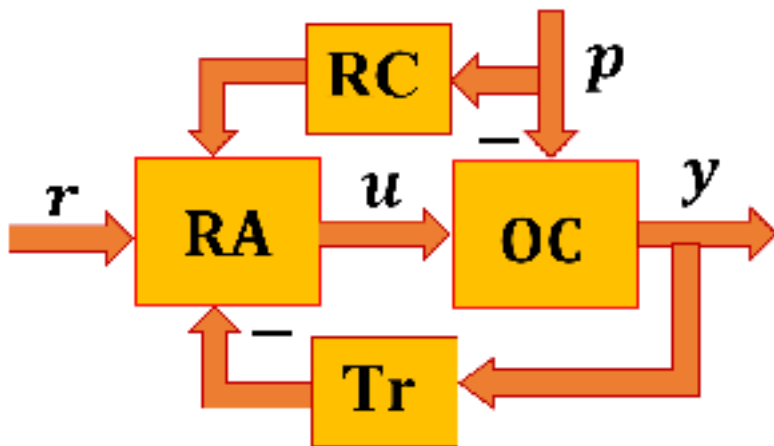


Digitally signed by
Technical Scientific
Library: TUM
Reason: I attest to the
accuracy and integrity of
this document

Bartolomeu IZVOREANU

TEORIA SISTEMELOR AUTOMATE

MANUAL



UNIVERSITATEA TEHNICĂ A MOLDOVEI
FACULTATEA CALCULATOARE, INFORMATICĂ
ȘI MICROELECTRONICĂ
DEPARTAMENTUL INGINERIA SOFTWARE
ȘI AUTOMATICĂ

Bartolomeu IZVOREANU

TEORIA SISTEMELOR AUTOMATE

MANUAL

Chișinău
Editura „Tehnica-UTM”
2022

CZU 681.5(075.8)

I-99

Manualul a fost discutat și aprobat pentru editare la Senatul Universității Tehnice a Moldovei, proces verbal nr. 4 din 25.10.2022.

Manualul *Teoria sistemelor automate* este destinat studenților care studiază Programul de studii *Automatică și informatică*, în care sunt expuse principiile și metodele teoriei sistemelor automate liniare continue cu prezentarea modelelor matematice ale elementelor și sistemului liniar cu parametri concentrați ai transferului intrare-ieșire: ecuații diferențiale, funcții temporale, funcții de transfer, funcții frecvențiale și modele în forma intrare-stare-ieșire prin variabilele de stare, metode de analiză a stabilității și performanțelor sistemului de conducere automată la acțiunea semnalelor deterministe referință și perturbație. Sunt date exemple de calcul, formulate întrebări și propuse probleme de rezolvat.

Manualul include 9 capitole, bibliografie și 3 anexe.

Autor: conf. univ., dr. șt. tehn. Bartolomeu IZVOREANU

Recenzenți: academ., dr. hab. șt. tehn. Anatolii BALABANOV

prof. univ., dr. ing. Gheorghe CĂPĂȚĂNĂ

prof. univ., dr. șt. fiz.-mat. Vasile MORARU

DESCRIEREA CIP A CAMEREI NAȚIONALE A CĂRȚII DIN RM

Izvoreanu, Bartolomeu.

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

– Chișinău: Tehnica-UTM, 2022. – 349 p.: fig., tab.

Bibliogr.: p. 345-346 (23 tit.). – 50 ex.

ISBN 978-9975-45-853-5

© UTM, 2022

CUPRINS

INTRODUCERE	8
1 NOȚIUNILE DE BAZĂ ALE TEORIEI CONDUCERII	12
1.1 Noțiuni de bază ale automaticii.....	12
1.2 Informația și principiile de conducere	17
1.2.1 <i>Principiile de conducere</i>	18
1.2.2 <i>Principiul de conducere cu sistemul deschis</i>	18
1.2.3 <i>Principiul de conducere cu compensarea acțiunii perturbație</i>	19
1.2.4 <i>Principiul de conducere cu sistemul închis</i>	19
1.2.5 <i>Principiul de conducere combinat</i>	22
1.2.6 <i>Principiul de conducere adaptiv</i>	23
1.3 Algoritmii de funcționare ai sistemelor automate	24
1.4 Schema bloc funcțională și elementele funcționale ale sistemului automat	27
1.5 Clasificarea sistemelor automate	30
1.5.1 <i>Clasificarea sistemelor automate după tipul semnalului în timp</i>	30
1.5.2 <i>Clasificarea sistemelor automate după algoritmii de reglare</i>	31
1.5.3 <i>Clasificarea sistemelor automate după principiul energetic</i>	34
1.5.4 <i>Clasificarea sistemelor automate după eroarea de funcționare</i>	35
1.5.5 <i>Clasificarea sistemelor automate după modelele matematice</i>	37
1.6 Problemele teoriei sistemelor automate	38
Chestionar și probleme	41
2 MODELE LINIARE ȘI CARACTERISTICILE SISTEMELOR AUTOMATE	42
2.1 Noțiune de modele matematice	42
2.2 Caracteristici statice ale elementelor și sistemelor automate	43
2.3 Ecuația diferențială	46
2.4 Ecuații diferențiale ale sistemelor fizico-tehnice	53

2.5	Expresii în operatori	61
2.6	Transformata Laplace și funcția de transfer	63
2.7	Semnale tipice și caracteristicile temporale	
	ale sistemului automat	68
2.7.1	<i>Clasificarea semnalelor de intrare</i>	68
2.7.2	<i>Semnal treaptă unitară și răspunsul indicial</i>	69
2.7.3	<i>Semnal rampă unitară și răspunsul tranzitoriu</i>	70
2.7.4	<i>Semnal impuls dreptunghiular și funcția pondere</i>	72
2.8	Răspunsuri indiciale ale elementelor și sistemelor automate	73
2.9	Semnale armonice și funcții frecvențiale ale sistemului automat	74
2.10	Elemente dinamice de transfer	80
2.10.1	<i>Elemente dinamice tipice</i>	80
2.10.2	<i>Element ideal</i>	82
2.10.3	<i>Element cu inerție de ordinul unu</i>	84
2.10.4	<i>Element integrator</i>	87
2.10.5	<i>Element derivator</i>	90
2.10.6	<i>Element oscilant amortizator</i>	95
2.11	Element cu inerție de ordinul doi	100
2.12	Element cu timp mort	103
2.13	Relațiile răspunsului indicial cu funcția pondere și funcția de transfer	107
2.14	Elemente dinamice cu proprietăți specifice	117
	Chestionar și probleme	121
3	SCHEME STRUCTURALE ALE SISTEMULUI AUTOMAT ȘI TRANSFIGURAREA LOR	122
3.1	Schema bloc structurală a sistemului de reglare automată	122
3.2	Transfigurarea schemelor structurale	123
3.3	Funcțiile de transfer ale sistemului de reglare automată	132
	Chestionar și probleme	152
4	STABILITATEA SISTEMELOR AUTOMATE	153

4.1	Introducere	153
4.2	Noțiune de stabilitate și condiții de stabilitate ale sistemului automat	154
4.3	Criterii de stabilitate	159
4.3.1	<i>Criteriul Routh</i>	159
4.3.2	<i>Criteriul Hurwitz</i>	162
4.4	Criteriile frecvențiale	167
4.4.1	<i>Principiul argumentului funcției complexe</i>	167
4.4.2	<i>Criteriul Mihailov</i>	170
4.4.3	<i>Criteriul Nyquist</i>	173
4.5	Analiza stabilității sistemului automat după caracteristicile logaritmice	181
4.6	Rezerva de stabilitate a sistemului automat	182
4.7	Metode de separare în spațiul parametrilor	187
4.7.1	<i>Conceptul de separare</i>	187
4.7.2	<i>Metoda de separare pe un parametru</i>	190
4.8	Stabilitatea structurală a sistemului automat	190
4.9	Sensibilitatea sistemului de reglare automată	195
4.9.1	<i>Preliminarii</i>	195
4.9.2	<i>Sensibilitatea la variația parametrilor canalului direct</i>	198
4.9.3	<i>Sensibilitatea la variația parametrilor canalului perturbației</i>	200
4.9.4	<i>Sensibilitatea la variația parametrilor canalului de reacție</i>	201
	Chestionar și probleme	207
5	PERFORMANȚELE SISTEMELOR AUTOMATE	209
5.1	Preliminarii	209
5.2	Indicii de calitate ai răspunsului indicial al sistemului	210
5.3	Precizia sistemului automat în regim staționar	214
5.4	Estimarea performanțelor sistemului automat după metoda poli-zero-uri	225
5.4.1	<i>Estimarea gradului de stabilitate și a oscilației</i>	225

5.4.2	<i>Estimarea timpului de reglare</i>	225
5.4.3	<i>Estimarea suprareglării și a gradului de amortizare</i>	229
5.4.4	<i>Influența repartiției $p - z$ a funcției de transfer $H_0(s)$ asupra răspunsului indicial</i>	232
5.4.5	<i>Repartiția $p - z$ a funcției de transfer $H_0(s)$ și a imaginii intrării $r(s)$</i>	233
5.5	Criterii integrale de estimare a performanțelor sistemului	233
5.6	Performanțele sistemului automat la acțiunea semnalelor armonice	247
	Chestionar și probleme	248
6	CORECȚIA SISTEMELOR AUTOMATE	250
6.1	Condiții impuse sistemului automat	250
6.2	Conexiune în serie a elementului de corecție	251
6.3	Conexiune în paralel a elementului de corecție	253
6.4	Conexiune în reacție a elementului de corecție	256
6.5	Concluzii	260
	Chestionar și probleme	261
7	SISTEME DE REGLARE AUTOMATĂ CU PROPRIETĂȚI SPECIFICE	262
7.1	Sisteme automate cu timp mort	262
7.2	Sisteme automate cu conducere combinată	263
7.3	Sisteme automate multivariabile	269
7.3.1	<i>Modele matematice ale proceselor multivariabile</i>	269
7.3.2	<i>Reglarea proceselor multivariabile</i>	272
7.3.3	<i>Algoritmi de reglare a proceselor multivariabile</i>	273
	Chestionar și probleme	277
8	MODELE MATEMATICE ÎN FORMA ECUAȚIILOR DE STARE	278
8.1	Ecuatii de stare	278
8.2	Funcția de transfer a sistemului automat	285
8.3	Realizarea sistemică a funcției de transfer a sistemului automat	287

8.3.1 Preliminarii.....	287
8.3.2 Forma de realizare canonică controlabilă.....	288
8.3.3 Forma de realizare canonică observabilă	293
8.3.4 Forma de realizare canonică Jordan	295
8.3.5 Forma de realizare canonică Jordan	297
8.4 Sisteme echivalente	298
8.5 Proprietățile structurale ale sistemelor liniare	300
Chestionar și probleme	316
9 SINTEZA SISTEMULUI DE REGLARE AUTOMATĂ	317
9.1 Structura sistemului de reglare automată	317
9.2 Formularea problemei de proiectare a sistemului de reglare automată	319
9.3 Modele matematice ale obiectelor de conducere	321
9.4 Alegerea și acordarea reguletoarelor	334
9.4.1 Legile de reglare tipice	334
9.4.2 Metode empirice de acordare a reguletoarelor tipice	335
9.4.3 Alegerea și acordarea reguletoarelor pentru procesele lente	336
9.4.4 Alegerea și acordarea reguletoarelor prin metodele experimentale	338
9.4.5 Metoda gradului maximal de stabilitate.....	340
Chestionar și probleme	344
BIBLIOGRAFIE	345
Anexa 1. Funcții de timp continue și imaginea Laplace	347
Anexa 2. Modele matematice ale elementelor tipice	348
Anexa 3. Funcții frecvențiale ale elementelor tipice	349

INTRODUCERE

Automatica reprezintă domeniul științific și aplicativ despre conceptul de conducere cu obiectele materiale și fenomenele fizice în interesul umanității. Domeniul științific este *teoria conducerii automate*, iar cel aplicativ este *automatizarea proceselor* – construirea sistemului de conducere automată a procesului. În calitate de obiecte de studiu servesc procesele de fabricație a bunurilor materiale și serviciilor din toate domeniile de activitate umană, care sunt supuse acțiunilor forțelor naturale [1-4, 8, 11-13, 18, 21].

În etapa actuală de dezvoltare termenii *automat* și *automatizare* sunt larg utilizați atât în limbajul ingineresc, cât, în general, și în limbajul curent sociouman [1, 16, 21].

Adjectivul *automat* desemnează calitatea unui sistem fizico-tehnic de a efectua, pe baza unei comenzi, o operație sau mai multe operații fără participarea directă a operatorului uman. Substantivul *automat* reprezintă un dispozitiv (sistem tehnic), care funcționează în mod automat.

Primele procese automatizate au fost reprezentate prin reglarea automată a nivelului apei cu utilizarea plutitorului (flotorului) în ceasurile cu apă, construite științific în Grecia Antică în secolele IV-III î. H. În secolul I, Heron din Alexandria, Egipt, a scris o carte cu denumirea *Pneumatica*, în care a expus diferite mecanisme cu utilizarea reglării automate a apei cu ajutorul traductorului-regulator – flotorul [3, 21].

În Europa, prima automatizare a fost concepută de olandezul Cornelius Djebel (1572-1633), care prezintă sistemul cu reacție negativă cu reglarea temperaturii în incubator. Tot în Europa, Den Pupe în anul 1681 a inventat primul regulator de presiune pentru cazanele cu vapori, care funcționa ca supapă de siguranță [3, 21].

În Rusia, primul în istorie sistem cu reacție inversă a fost inventat de mecanicul I.I. Polzunov în anul 1765, care prezintă regulatorul de reglare a nivelului apei în cazanul cu vapori [3, 4].

Prima automatizare în Anglia, care a avut o largă utilizare industrială, realizată de mecanicul scoțian James Watt în anul 1769, prezintă celebrul regulator centrifugal aplicat în sistemul de reglare automată a rotațiilor mașinii cu vapori, inventată de însuși James Watt în același an [3, 21].

În perioada ce a urmat de la invenția regulatorului de nivel și a regulatorului centrifugal și utilizarea lor la automatizarea diverselor procese s-a format noțiunea de automatică industrială.

În perioada care a urmat automatizării mașinii cu vapori, echipamentele de automatizare s-au conceput și realizat empiric-intuitiv. În regimurile de funcționare a mașinii cu vapori apăreau regimuri dificile de funcționare ca oscilațiile slab amortizate sau a regimurilor neamortizate – regimuri instabile ale rotațiilor mașinii.

În acest context, a apărut necesitatea dezvoltării teoriei sistemelor automate. Primul studiu matematic de analiză a stabilității sistemului de reglare automată a rotațiilor mașinii cu vapori cu utilizarea ecuațiilor diferențiale ca model al regulatorului centrifugal a fost elaborat și publicat de savantul englez J.C. Maxwell în anul 1868 [3, 21].

Un studiu matematic mai amplu ca model al sistemului de reglare automată a rotațiilor mașinii cu vapori a fost realizat de profesorul rus din Sankt-Petersburg I.A. Vyshnegradski în anii 1876-1878, care a pus bazele analizei sistemice a sistemelor de reglare automată [3, 21].

Aceste lucrări științifice au condiționat apariția disciplinei *teoria reglării automate* care s-a dezvoltat în continuare în cadrul mecanicii.

În anul 1877, matematicianul englez E. Routh a elaborat primul criteriu de analiză a stabilității sistemului automat [3, 8, 12, 13]. În anul 1895, matematicianul elvețian A. Hurwitz a elaborat al doilea tip de criteriu de analiză a stabilității sistemului automat [3, 8, 11, 13].

În anul 1892, matematicianul rus A.M. Leapunov a dezvoltat bazele matematice ale teoriei stabilității, care a avut un rol crucial în dezvoltarea teoriei sistemelor automate, elaborând metoda întâia și a doua de analiză a stabilității sistemelor dinamice [1, 3, 4, 8, 11-13].

Până la al II-lea război mondial teoria și practica sistemelor de reglare automată s-au dezvoltat în mod diferit. În fosta URSS, pentru teoria sistemelor automate s-a dezvoltat metoda în domeniul timpului cu utilizarea ecuațiilor diferențiale, care descriu dinamica sistemelor.

În SUA, în anii '30 ai secolului XX, cu dezvoltarea vertiginoasă a telecomunicațiilor, în baza dezvoltării amplificatoarelor electronice cu reacție inversă negativă, cercetătorii Bode, Nyquist și Black au elaborat metoda frecvențială în baza transformatei Fourier de analiză și sinteză a sistemelor automat liniare [3, 4, 8, 11, 13, 18, 21].

Un rol important în analiza stabilității sistemelor automate a avut elaborarea în 1932 de H. Nyquist a criteriului frecvențial de stabilitate.

Practica utilizării funcțiilor frecvențiale logaritmice a avut un rol important în dezvoltarea și implementarea sistemelor de reglare automată cu diverse procese industriale și tehnologice.

Pe parcursul celui de al II-lea război mondial, teoria și practica sistemelor de reglare automată s-a dezvoltat vertiginos, construindu-se diferite sisteme automate în domeniile militar și civil (piloți automați pentru avioane, sisteme de urmărire automată pentru radare etc.).

În anul 1940, teoria reglării automate devine un domeniu separat de dezvoltare științifică. Pe parcursul anilor 1940-1960 au fost elaborate metodele de studiu și construire a sistemelor automate neliniare, optime și adaptive. În anii 1960-1970 s-au dezvoltat noi metode de studiu al sistemelor automate în domeniul timpului bazate pe variabilele de stare, care au abordat o nouă viziune a problemelor controlabilității, observabilității, stabilității și optimalității sistemelor automate [1, 3-5, 10, 13-15, 18, 20].

În baza metodelor ecuațiilor de stare s-au dezvoltat metode și practici de construire a sistemelor automate cu structură variabilă, care au fost larg utilizate la automatizarea diverselor procese industriale.

În perioada de după anii 1990, o deosebită importanță s-a acordat dezvoltării sistemelor automate robuste ca prioritate practică.

În etapa actuală, teoria conducerii automate dispune de un aparat fundamental de metode și tehnici de analiză și sinteză a sistemelor automate cu structură complexă, în care algoritmi de conducere se realizează în formă numerică pe microprocesoare, care conduc la ridicarea performanțelor, robusteții și fiabilității sistemelor de conducere automată [1, 4, 8, 9, 11, 13, 14, 18].

Prin concepte și echipamente și produse program avansate, automatica este aplicată practic în toate domeniile socio-economice.

În tabelul I.1 sunt date etapele de bază de dezvoltare a teoriei și practicii sistemelor cu conducere automată [3].

Tabelul I.1. Etapele de dezvoltare a teoriei sistemelor automate

Nr. crt.	Anul	Denumirea etapei
1	1765	I.I. Polzunov a elaborat sistemul de reglare cu reacție negativă cu regulatorul de nivel al apei în cazanul cu vapori.
2	1769	J. Watt a construit mașina cu vapori cu regulatorul de reglare a turațiilor arborelui mașinii. Acest moment este începutul Revoluției industriale în Marea Britanie, când s-au obținut considerabile succese în mecanizarea proceselor, care au fost rezultatele premergătoare automatizării.
3	1800	Ele White a propus conceptul de interschimbabilitate a pieselor în procesul de fabricație a mușchetelor. Acest moment este începutul etapei fabricării în masă.
4	1868	J. Maxwell a elaborat modelul matematic al regulatorului mașinii cu vapori.
5	1913	Henry Ford la fabricile sale a implementat asamblarea mecanizată a automobilelor.
6	1927	H. Bode analizează amplificatoarele cu reacție negativă
7	1932	H. Nyquist a elaborat metoda frecvențială de analiză a stabilității sistemului automat.
8	1952	La Institutul Tehnologic din Massachusetts au fost elaborate strungurile cu conducere numerică cu program.
9	1954	J. Devon a elaborat echipamentul pentru transportarea obiectelor, care este prototipul robotului industrial.
10	1960	În baza ideilor lui J. Devon s-a elaborat primul robot Unimăt. În 1961, acești roboți au fost utilizați pentru deservirea strungurilor de presare.
11	1970	S-au propus modele de sisteme în variabilele de stare și s-a elaborat teoria conducerii optimale (L.S. Unimăt, R. Bellman).
12	1980	Se efectuează cercetări ample ale sistemelor de conducere robustă.
13	1990	Industria care fabrica producție pentru export a implementat pe scară largă automatizarea.
14	1994	În automobile se implementează sisteme de conducere cu reacție negativă. În industrie apare necesitatea de aplicare a sistemelor de conducere robuste.

BIBLIOGRAFIE

1. *Automatica* / I. DUMITRACHE. București: Ed. Academiei Române, 2009. V.1, 961 p. ISBN 978-973-1883-4.
2. CĂLIN, S.; BELEA, C. *Sisteme automate complexe*. București, Editura tehnică, 1973, 567 p.
3. DORF, R.; BISHOP, R. *Sovremennyye sistemy upravleniya (Modern Control Systems)*. Moskva: Laboratoria Bazovyh Znanii, 2004, 832 s. ISBN 5-93208-119-8.
4. GAIDUK, A. R. *Teoria avtomaticheskogo upravleniya*. Uchebnik. M.: Vysshaya shkola, 2010, 415 s. ISBN 978-5-06-006055-3.
5. ILAȘ, C. *Teoria sistemelor de reglare automată*. București: MATRIX ROM, 2001, 175 p. ISBN 973-685-225-3.
6. ILAȘ, C. *Teoria sistemelor de reglare automată. Îndrumar de laborator*. București: MATRIXROM, 2004, 104 p. ISBN 973-685-831-6.
7. IZVOREANU, B. *Ingineria sistemelor automate. Ghid pentru proiectarea de curs*. Chișinău: Tehnica-UTM, 2021, 122 p. ISBN 978-9975-45-737-8.
8. KIM, D. P. *Teoria avtomaticheskogo upravleniya. T. 1. Lineinye sistemy*. M.: FIZMATLIT, 2003, 288 s. ISBN 5-9221-0379-2.
9. KIM, D. P. *Teoria avtomaticheskogo upravleniya. T. 2. Mnogomernyye, nelineinye, optimalinye i adaptivnyye sistemy*. M.: FIZMATLIT, 2004, 464 s. ISBN 5-9221-0534-5.
10. KIM, D. P.; DMITRIEVA, N. D. *Sbornik zadach po teorii avtomaticheskogo upravleniya. Lineinye sistemy*. M.: FIZMATLIT, 2007, 167 s. ISBN 978-5-9221-0873-7.
11. LUKAS, V. A. *Teoria avtomaticheskogo upravleniya*. Uchebnik dlea vuzov. M.: Nedra, 1990. 416 s. ISBN 5-247-01027-2.
12. MAKAROV, I. M.; MENSKII, B. M. *Lineinye avtomaticheskii sistemy (elementy teorii, metody rascheta i spravochnyy material)*. M.: Mashinostroenie, 1982, 504 s.
13. *Metody klassicheskoi i sovremennoi teorii avtomaticheskogo upravleniya. T. 1. Matematicheskie modeli, dinamicheskie karakteristiki i analiz sistem avtomaticheskogo upravleniya*. Uchebnik/ Pod red. K.A.

PUPKOVA, N.D. EGUPOVA. M.: Izd-stvo MGTU im. N.E. Baumana, 2004, 654 s. ISBN 5-7038-2189-4.

14. PANTELEEV, A. V.; BORTAKOVSKII, A. S. *Teoria upravlenia v primerah i zadachah*. Uchebnoe posobie. M.: Vysshiaia shkola, 2003, 583 s. ISBN 5-06-004136-0.

15. POZNA, C. *Teoria sistemelor automate*. București: MATRIX ROM, 2005, 329 p. ISBN 973-685-733-6.

16. PREITL, Ș., PREITL, Zsuzsa. *Introducere în automatică: suport de curs*. București: Conspres, 2013, 219 p. ISBN 978-973-100-266-8.

17. *Sbornik zadach po teorii avtomaticheskogo regulirovania i upravlenia*/ Pod red. V.A. BESEKERSKOGO. M.: Nauka, 1978, 512 s.

18. *Teoria avtomaticheskogo upravlenia*. Uchebnik dlea vuzov / Pod red. V. B. IAKOVLEVA. M.: Vysshiaia shkola, 2005, 567 s. ISBN 5-06-004096-8.

19. TOPCHEEV, Iu. I.; TZYPLEAKOV, A. P. *Zadachnik po teorii avtomaticheskogo regulirovania*. Uchebnoe posobie dlea vuzov. M.: Mashinostroenie, 1977, 592 s.

20. TUDOROIU, N.; CURIAC, D. *Teoria sistemelor de reglare automată continue. Abordare aplicativă*. Timișoara: Ed. MIRTON, 1993, 151 p.

21. VOICU, M. *Introducere în automatică*. Iași: Editura Dosoftei, 1998, 238 p. ISBN 973-9135-60-9.

22. VOICU, M. și al. *Introducere în automatică. Culegere de probleme*. București: MATRIX ROM, 1999, 213 p. ISBN 973-685-135-4.

23. VOICU, M. *Sisteme automate multivariabile*, Iași: Ed. Gh. Asachi, 1993, 264 p.