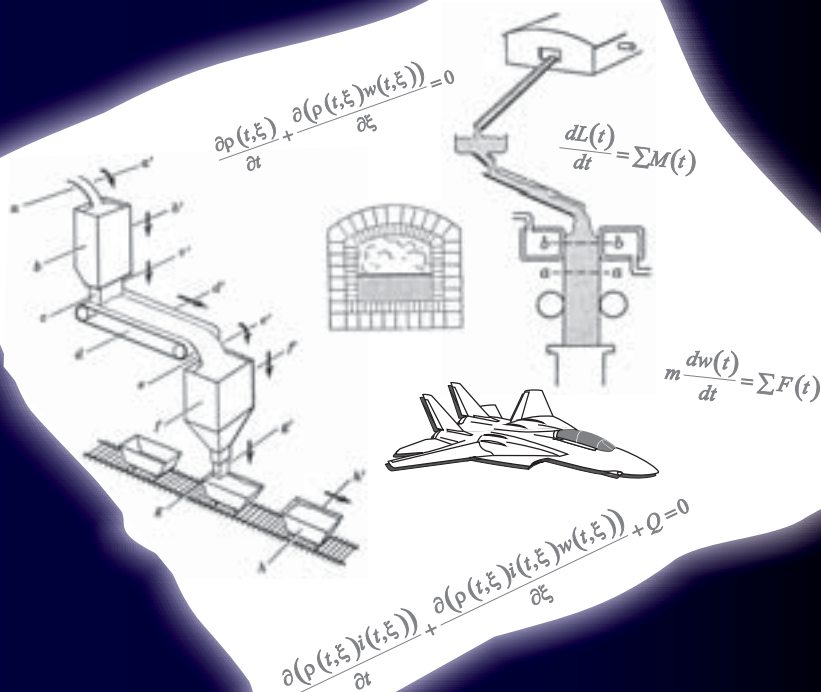


ZBIRKA ZADATAKA IZ DINAMIKE OBJEKATA I PROCESA

Dragutin Lj. Debeljković



Dr Dragutin Lj. Debeljković

**ZBIRKA ZADATAKA
IZ
DINAMIKE
OBJEKATA I PROCESA**

**Mašinski fakultet
Univerziteta u Beogradu
2013**

Dr **Dragutin Lj. Debeljković**, redovni profesor
Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu

**Zbirka zadataka iz
Dinamike
objekata i procesa**

Zbirka zadataka
I izdanje

Recenzenti

Dr Mihailo P. Lazarević, redovni profesor
Mašinskog fakulteta u Beogradu

Dr Srđan N. Ribar, docent
Mašinskog fakulteta u Beogradu

Izdavač

Univerzitet u Beogradu
Mašinski fakultet Beograd
11000 Beograd, Kraljice Marije 16

Za izdavača

Dr Aleksandar Obradović, prof.

Odobreno za štampu
odlukom *Dekana* br. 253/13 od 14.11.2013.

Beograd, 2013
Tiraž: 200 primeraka

Štampa PLANETA print
ISBN 978 – 86 – 7083 – 806 - 2

*Preštampavanje, umnožavanje, fotokopiranje
ili reprodukcija cele knjige ili nekih njenih delova nije dozvoljena*

Dr Dragutin Lj. Debeljković

*ZBIRKA ZADATAKA
IZ
DINAMIKE
OBJEKATA I PROCESA*

*Mašinski fakultet
Univerziteta u Beogradu
2013*

Predgovor

Analiza i projektovanje savremenih sistema automatskog upravljanja, na današnjem stepenu razvoja nauke i tehnike, kao i neophodnost ispunjavanja veoma strogih zahteva koji se nameću kvalitetu dinamičkog ponašanja sistema u celini, traže poznavanje njihovih dovoljno tačnih, u inženjersko-tehničkom smislu, *matematičkih modela*

Za njihovo formiranje od fundamentalnog je značaja je suštinsko poznavanje procesa koji se modelira, korektno definisanje "*kontrolne granice*", potpuno razgraničenje pitanja primarnih i sekundarnih uticaja, kao i adekvatno postavljanje odgovarajućih bilansnih jednačina za neuravnoteženja stanja procesa.

Preostali deo posla oko svođenja matematičkog modela na svoj konačan oblik, obično, predstavlja rutinski zadatak.

Ova monografija sadrži i obuhvata osnovne principe matematičkog modeliranja mašinskih i tehničko-tehnoloških objekata i procesa.

Materija je data u nešto širem obimu nego uobičajeno zahvaljujući dubokoj, svestranoj i sistematskoj analizi usvojenih pretpostavki, njihovoj opravdanosti kao i posledica koje iz tih uprošćenja proističu. Izneta razmatranja, u tom smislu, oslanjaju se na materiju koja se izlaže u okviru fundamentalnih oblasti kao što su *Mehanika, Termodinamika, Mehanika fluida* i u manjoj meri *Teorija upravljanja*.

Na bazi usvojenih modela korišćenjem osnovnih zakona fizike, izraženih u vidu osnovnih zakona konzervacije ispisanih za nestacionarne radne režime, rezultuju prvo nelinearni a zatim linearizovani matematički modeli razmatranih objekata i procesa, dati u vidu sistema diferencijalnih jednačina ponašanja, prenosnih funkcija ili u odgovarajućim matričnim reprezentacijama modela u prostoru stanja.

Konkretizujući dobijene rezultate, kroz numeričke vrednosti aktuelnih parametara modela, pruža se mogućnost da se isti efikasno iskoriste u analizi statičkih i dinamičkih osobina objekata i procesa ili u postupcima sinteze upravljačkih delova sistema, shodno usvojenim konceptima upravljanja.

Imajući u vidu da je formiranje matematičkih modela, prvenstveno, motivisano ciljevima istraživanjima i da se jednom te istom objektu ili procesu može dodeliti više različitih modela, kvalitativna analiza njihove verodostojnosti može se inicijalno sprovesti riguroznom analizom stepena uvedenih idealizacija i detaljnim preispitivanjem evidentnih pojednostavljenja proisteklih iz neminovnih matematičkih aproksimacija, kako bi se u krajnjoj instanci izbegli čisto akademski modeli.

Ova zbirka zadataka nastala je kao plod dvadesetogodišnjeg bavljenja autora problematikom modeliranja objekata i procesa.

Zajedno sa ranije objavljenim udžbenikom i serijom publikovanih monografija, predmetna materija, predstavlja sintetičko objedinjavanje tamo izloženog gradiva u jednu neraskidivu, logičku celinu potrebnu i dovoljnu za školsko, a u krajnoj liniji, i profesionalno bavljenje ovom problematikom.

U tom smislu valja istaći i nespornu činjenicu da je veliku pomoć i razumevanje imao u svojim kolegama, koautorima pomenutih monografija, kao i u brojnim studentima, sada već diplomiranim inženjerima, koji su u svojim završnim diplomskim radovima ili magistarskim tezama samostalno rešili veći broj idejno predočenih problema, čime su dali značajan doprinos kompletiranju do sada postojećih rezultata na ovom polju naučnog istraživanja, a sve sa stanovišta teorije i prakse automatskog upravljanja.

Ova zbirka zadataka koncepirana je u duhu i u potpunosti sledi nedavno objavljen udžbenik identičnog naslova i prvenstveno je namenjen studentima grupe za automatsko upravljanje, koji slušaju predmete *Modelovanje procesa* i *Dinamika objekata i procesa*.

Veliku pomoć u svalađivanju, ovde iznetog gradiva, studenti mogu naći u objavljenim monografijama, a koje su, praktično, citirane uz svako poglavlje.

U njima je ova problematika obrađena daleko detaljnije, sa mogućim primenama kako u analizi tako i u sintezi sistema.

Autor je duboko zahvalan recenzentima Dr *Mihailu P. Lazareviću* i Dr *Srđanu N. Ribaru*, nastavnicima Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu na korisnim i konstruktivnim sugestijama i kritičkim i inspirativnim savetima, kao i trudu oko recenzije.

A u t o r

Beograd, decembar 2013. god.

*Zbirka zadataka
iz Dinamike
objekata i procesa*

SADRŽAJ

I

OPŠTI DEO

I OPŠTE POSTAVKE MATEMATIČKOG MODELIRANJA	1
1. OPŠTA KLASIFIKACIJA SISTEMA, OBJEKATA I PROCESA	1
1.1 Preliminarna razmatranja	1
1.2 Objekti i procesi konačne dimenzije	2
1.2.1 Proces i sa usredsređenim parametrima	2
1.3 Objekti i procesi beskonačne dimenzije	5
1.3.1 Proces i sa čistim vremenskim kašnjenjem	5

II DINAMIKA OBJEKATA I PROCESA

II DINAMIKA MEHANIČKIH SISTEMA	15
2. MATEMATIČKI MODELI LINEARNIH MEHANIČKIH SISTEMA	15
2.1 Dinamika translatornih mehaničkih sistema	19
2.1.1 Matematički model oscilovanja jednog drumskog vozila	19
2.2 Dinamika rotacionih mehaničkih sistema	21
2.2.1 Matematički model klasičnog mehaničkog sistema za podizanje tereta	21
2.2.2 Matematički model klasičnog kotrljajućeg mehaničkog sistema	24
2.3 Dinamika rotacionih mehaničkih sistema sa zupčastim prenosom	26
2.3.1 Uvod	26
2.3.2 Dinamika transportne mašine sa zupčastim prenosom	29
2.3.3 Dinamika hidromotora sa inercionim teretom	35
2.4 Matematički modeli nestacionarnih mehaničkih sistema	41
2.5 Primeri mehaničkih sistema	42
Literatura	48
III DINAMIKA PROCESA TRANSPORTA I USKLADIŠTENJA MATERIJALA	49
3. MATEMATIČKI MODELI DOZIRANJA TRANSPORTA I USKLADIŠTENJA MATERIJALA	49
3.1 Matematički modeli transportnih uređaja sa promenljivim čistim vremenskim kašnjenjem	49
3.2 Matematički model uređaja za separaciju	50
Literatura	53

IV DINAMIKA STRUJNIH PROCESA 55

4. MATEMATIČKI MODELI STRUJNIH PROCESA 55

4.1 Matematički model suda sa regulišućim ventilom u odvodnom vodu 55

4.2 Matematički model isticanja tečnosti iz suda oblika kupe 57

4.3 Osnovne radne karakteristike regulišućih ventila 59

4.4 Osnovne konstruktivne karakteristike regulišućih ventila 64

4.4.1 Opšta razmatranja o prigušnim hidrauličkim ventilima 64

4.5 Opšta razmatranja o leptirastim regulišućim ventilima tipa Keystone 67

4.5.1 Funkcionalna šema, opis rada, strukturni dijagram 67

4.5.2 Statičke karakteristike 68

4.6 Matematički model komore sa konstantnim pritiskom 75

4.7 Matematički model protočnog rezervoara sa vazduhom 76

4.8 Matematički model procesa strujanja izotermnog gasa kroz kruti cevovod 81

4.9 Matematički model protočnog rezervoara sa filterskim uloškom za prečišćavanje vode 89

Literatura 92

V DINAMIKA STRUJNO-TERMIČKIH PROCESA 93

5. MATEMATIČKI MODELI STRUJNO-TERMIČKIH PROCESA 93

5.1 Matematički model temperature zida jedne industrijske peći 93

5.2 Matematički model krutog cevovoda kroz koji struji zagrevani gas 97

5.3 Matematički model protočnog rezervoara sa nestišljivim fluidom na konstantnoj temperaturi	99
5.4 Matematički model zagrevanja tečnosti u otvorenom sudu	102
5.5 Matematički model dinamičkog ponašanja konvektivnog razmenjivača toplote	106
5.6 Matematički model strujanja nestišljivog fluida kroz toplotno izolovanu cev	110
5.7 Matematički model strujanja nestišljivog fluida kroz cev „transportnim prilazom“	113
5.8 Matematički model pločastog razmenjivača toplote	118
5.9 Matematički model višeprlaznog razmenjivača toplote	129
5.9.1 Uvodna razmatranja	129
5.9.2 Matematički model i analitičko rešenje	130
5.9.3 Analitičko rešenje sa numeričkim inverznim algoritmom	135
5.10 Matematički model industrijske peći	138
Literatura	139
VI DINAMIKA PRENOSA MASE I TOPLOTE	141
6. MATEMATIČKI MODELI PROCESA SA PRENOSOM MASE I TOPLOTE	141
6.1 Matematički model kula za hlađenje	141
6.1.1 Uvod	141
6.1.2 Mesto rashladnih kula (tornjeva) u energetskim postrojenjima	142
6.1.3 Teorijske osnove prenosa mase i toplote u rashladnim kulama	155
6.1.4 Osnove procesa difuzije i njegova analogija sa prenosom toplote	156
6.1.5 Analiza procesa prenosa mase i toplote u rashladnim kulama u stacionarnom stanju	159
6.1.6 Analiza rada rashladne kule u nestacionarnom radnom režimu	164
Literatura	177

VII DINAMIKA MAŠINA I MOTORA	179
7. MATEMATIČKI MODELI MAŠINA I MOTORA	179
7.1 Dinamika hidrauličnih turbina	179
7.1.1 Matematički model hidraulične turbine sa kratkim dovodnim kanalom	179
7.1.2 Matematički model hidraulične turbine cevnog tipa	181
7.1.3 Matematički model hidraulične turbine Fransisovog tipa	187
7.2 Dinamika parnih turbina	190
7.2.1 Matematički model parne turbine kondenzacijskog tipa	190
7.2.2 Matematički model kondenzacijske parne turbine tipa KWU – 275 [MW]	192
7.3 Dinamika motora SUS	204
7.3.1 Matematički model traktorskog dizel motora	204
7.3.2 Postupak određivanja momenta inercije obrtnih masa motora SUS	210
Literatura	212

VIII DINAMIKA SAOBRAĆAJNO –TRANSPORTNIH SREDSTAVA	215
8. MATEMATIČKI MODELI SAOBRAĆAJNO–TRANSPORTNIH SREDSTAVA	215
8.1 Dinamika kretanja letelica	215
8.1.1 Matematički model kretanja putničkog aviona	215
8.2 Dinamika kretanja plovila	223
8.2.1 Matematički model kretanja jednog teretnog broda u mirnoj vodi	223
8.2.2 Matematički model kretanja čamca u brznoj reci	227
8.2.3 Matematički model kretanja rakete u vertikalnoj ravni	229
8.3 Dinamika kretanja motornih vozila	231
8.3.1 Matematički model kretanja putničkog automobila	231
8.3.2 Matematički model kretanja putničkog automobila sa vremenski promenljivom željenom brzinom	244
Literatura	247

IX DINAMIKA ENERGETSKIH POSTROJENJA 249**9. MATEMATIČKI MODELI
ENERGETSKIH POSTROJENJA** 249

9.1 Dinamička simulacija parnog doboša AHWR-a sa prirodnom cirkulacijom	249
9.1.1 Uvod	250
9.1.2 Formulacija modela	251
9.1.3 Model doboša	252
9.1.4 Model pojave mehurova vodene pare	253
9.1.5 Matematički model spusne i podizne cevi	254
9.1.6 Matematički model za određivanje nivoa u parnom dobošu	255
9.1.7 Rezultati numeričke analize	255
9.1.8 Rezultati simulacije	256
9.2 Matematički model toka prirodne cirkulacije kod reaktora hlađenih vodom pod pritiskom (PWR)	263
9.2.1 Uvod	263
9.2.2 Model PWR-a	264
9.2.3 Matematički model	265
9.2.4 Bezdimezionalna metoda	268
9.2.5 Numeričko rešenje	270
Literatura	274

X DINAMIKA PROCESA OBRADJE MATERIJALA 275**10. MATEMATIČKI MODELI
PROCESA OBRADJE MATERIJALA** 275

10.1 Dinamika procesa obradje metala hladnim valjanjem	275
10.1.1 Uvodna razmatranja	275
10.1.2 Kratki izvod iz teorije plastičnih deformacija	277
10.1.3 Dinamika procesa obradje metala hladnim valjanjem – prilaz Bryant, Butterfield	281
10.1.3.1 <i>Matematički model</i>	282
10.1.4 Dinamika procesa obradje metala hladnim valjanjem – prilaz Arimura, Kamata	291
10.1.4.1 <i>Matematički opis sistema</i>	291
10.1.4.2 <i>Dinamika valjaoničkog stana</i>	294

10.2 Dinamika procesa oblikovanja materijala istiskivanjem i livenjem	297
10.2.1 Uvodna razmatranja	297
10.2.2 Pužni ekstruder	300
10.2.2.1 <i>Matematičko modeliranje ekstrudera</i>	302
10.3 Dinamika procesa obrade plastičnih i gumenih materijala	306
10.3.1 Određivanje parametara procesa valjanja tankih plastičnih i gumenih traka kao procesa sa usredsređenim parametrima	306
10.3.2 Određivanje parametara procesa valjanja tankih plastičnih i gumenih traka kao procesa sa raspodeljenim parametrima	314
10.4 Dinamika procesa vrućeg valjanja lima	316
10.5 Dinamika nestacionarnog procesa hladnog valjanja lima	327
10.6 Dinamika procesa rezanja	333
10.7 Dinamika procesa obrade drveta. Mašine za obradu drveta struganjem	338
10.7.1 Kružne testere za uzdužno rezanje trupaca kao objekti upravljanja	338
10.7.1.1 <i>Opis procesa</i>	338
10.7.1.2 <i>Teorijske osnove procesa rezanja drveta</i>	341
10.7.2 Matematički model procesa obrade drveta na kružnoj testeri za uzdužno rezanje trupaca	345
10.7.2.1 <i>Usvajanje modela procesa</i>	346
10.7.2.2 <i>Postavljanje osnovnih bilansnih jednačina</i>	348
10.7.2.3 <i>Matematički model procesa rezanja u vremenskom i kompleksnom domenu</i>	350
Literatura	351
XI DINAMIKA FORMIRANJA I OBRADJE TKANINA	353
11. MATEMATIČKO MODELIRANJE I DINAMIKA FORMIRANJA I OBRADJE TKANINA	353
11.1 Modeliranje istežanja pređe	353
11.1.1 Uvod	353

11.2 Struktura vlakana	355
11.2.1 Struktura vunenog vlakna	355
11.2.2 Struktura pamučnog vlakna	360
11.3 Uticaj nekih parametara na krivu $F - \varepsilon$	362
11.3.1 Uticaj koeficijenta varijacije poprečnog preseka pređe na krivu $F - \varepsilon$	362
11.4 Pregled reoloških modela vunenog vlakna	364
11.5 Eksperimentalna ispitivanja	373
11.5.1 Prikaz eksperimentalnih rezultata	373
11.6 Postavljanje reoloških modela istezanja pređe	379
11.6.1 Reološki model istezanja vunene pređe	379
11.6.2 Analogni električni model mehaničkom modelu istezanja vunene pređe	384
11.6.3 Reološki model istezanja pamučne pređe i pređe ispredene od mešavine vuna – PES	389
Literatura	394

XII DINAMIKA POLJOPRIVREDNIH MAŠINA

12. MATEMATIČKI MODELI POLJOPRIVREDNIH MAŠINA	395
12.1 Dinamika procesa u poljoprivrednoj mehanizaciji	399
12.1.1 Dinamika položaja skeleta konstrukcije (šasije) mašina za branje u prostoru	399
12.1.1.1 Postavka zadatka	399
12.1.1.2 Jednačina objekta upravljanja u uzdužnoj i poprečnoj ravni	406
12.1.2 Regulisanje položaja organa za košenje i vađenje	408
12.1.2.1 Mašine za strna žita	408
12.1.2.2 Dinamika procesa visine rezanja	410
12.1.2.3 Kombajn za branje korenastih biljaka	417
12.2 Dinamika procesa kretanja mašina za branje	417
12.2.1 Regulisanje pravca kretanja nosećeg kombajna	417
12.2.1.1 Automatski usmerivač pravca	417
12.2.1.2 Noseći kombajn za repu kao objekt upravljanja	421

12.3 Dinamika mašina za branje kao objekta upravljanja po opterećenju	423
12.3.1 Dinamika samohodnih mašina za branje kao mehanizama (na primeru kombajna za strna žita)	423
12.3.1.1 <i>Jednačine kretanja kombajna kao objekta upravljanja</i>	424
Literatura	431

XIII DINAMIKA PRIKLJUČNIH POLJOPRIVREDNIH ORUĐA

433

13. MATEMATIČKI MODELI PRIKLJUČNIH POLJOPRIVREDNIH ORUĐA

433

13.1 Dinamika polunošenog pluga	433
13.1.1 Uvodna razmatranja – odvajanje kretanja traktora od dinamike polunošenog pluga sa podiznim uređajem	433
13.1.2 Dinamika polunošenog pluga sa podiznim uređajem	435
13.1.3 Dinamika upravljačkog organa – podiznog uređaja (mehanizma)	437
13.1.4 Kinematika podiznog mehanizma i dinamika procesnog dela polunošenog pluga	439
13.1.5 Objedinjena dinamika podiznog mehanizma i polunošenog pluga	443
Literatura	444

III

DODACI

XIV DODACI

445

DODATAK A – Oznake	445
---------------------------------	-----