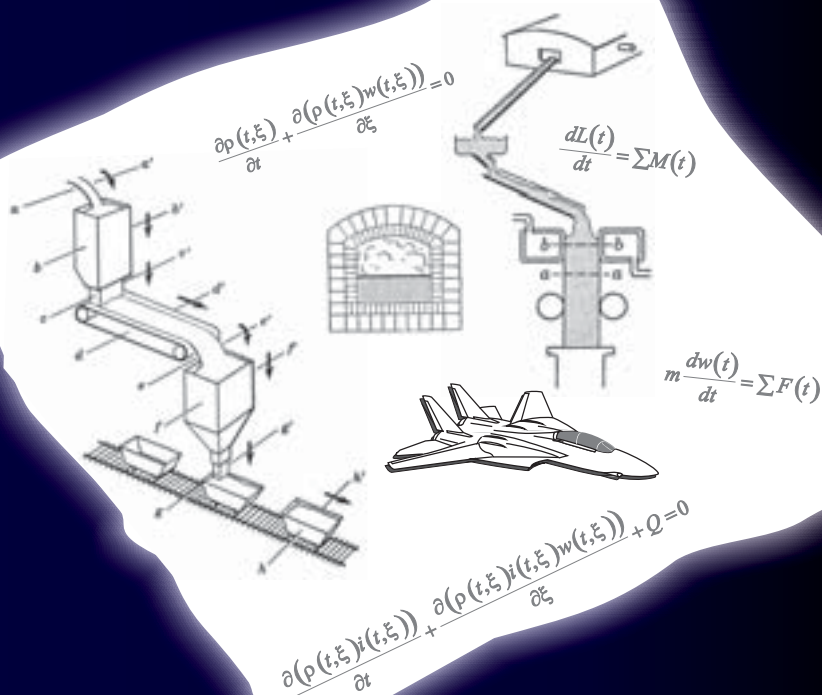


DINAMIKA OBJEKATA I PROCESA

Dragutin Lj. Debeljković



Dr Dragutin Lj. Debeljković

DINAMIKA OBJEKATA I PROCESA

**Mašinski fakultet
Univerziteta u Beogradu
2013**

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

**Dinamika
objekata i procesa**

Udžbenik
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. 252/13 od 14.11.2013.

Beograd, 2013
Tiraž: 200 primeraka

Štampa PLANETA print

ISBN 978 – 86 – 7083 – 805 - 5

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

Dr Dragutin Lj. Debeljković

*DINAMIKA
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 neuravnotežena 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, svestranjoj 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.

Ovaj udžbenik je nastao 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.

Ovaj udžbenik 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 pomenutim 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.

U nekim od tih monografija izneta je problematika modeliranja objekata i procesa, pa i postrojenja, koja nisu zastupljena u ovim izlaganjima, ovde, pa se na njih upućuje zainteresovani čitalac.

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, novembar 2013. god.

*Dinamika
objekata i procesa*

SADRŽAJ

I OPŠTI DEO

1. OPŠTE POSTAVKE MODELIRANJA	1
1. UVOD	1
1.1 Preliminarna razmatranja	1
1.2 Opšta problematika	
matematičkog modeliranja objekata i procesa	2
1.2.1 Modeliranje, modeli sistema, objekata i procesa	7
1.2.2 Matematičko modeliranje	11
1.3 Objekti i procesi upravljanja	20
1.4 Neke specifične osobine	
linearnih objekata i procesa	
upravljanja sa usredsređenim parametrima	24
1.4.1 Kategorizacija radnih režima objekata i procesa	24
1.4.2 Neke bitne osobine linearnih objekata i procesa	25
1.5 Neke specifične osobine linearnih	
višestruko prenosnih objekata i procesa	
upravljanja sa raspodeljenim parametrima	29
1.6 Opšta forma matematičkih modela	37
Literatura	42

II

DINAMIKA

OBJEKATA I PROCESA

2. DINAMIKA	
MEHANIČKIH SISTEMA	45
2. DINAMIKA MEHANIČKIH SISTEMA	45
2.1 Dinamika translatornih mehaničkih sistema	50
2.2 Dinamika rotacionih mehaničkih sistema	52
2.3 Rotacioni mehanički sistemi sa zupčastim prenosom	53
2.4 Rotacioni mehanički sistemi sa kaišnim prenosom	55
Literatura	58
3. DINAMIKA	
PROCESA KRETANJA, DOZIRANJA,	
TRANSPORTA I USKLADIŠTENJA MATERIJALA	59
3.1 Kretanje materijala	59
3.2 Dinamika procesa doziranja	61
3.3 Dinamika procesa transporta	64
3.4 Dinamika procesa uskladištenja	70
Literatura	73
4. DINAMIKA STRUJNIH PROCESA	75
4.1 Uvodna razmatranja	75
4.2 Matematički modeli	
strujnih procesa sa usredsređenim parametrima	81
4.2.1 Matematički model	
procesa strujanja nestišljivog fluida kroz cevovod	81
4.2.2 Matematički model	
procesa strujanja stišljivog fluida kroz rezervoar	86
4.2.3 Dinamika nivo sistema	91
4.2.4 Matematički model krutog hidrauličnog udara	109

4.3 Matematički modeli	
strujnih procesa sa raspodeljenim parametrima	111
4.3.1 Matematički model	
procesa strujanja fluida u dugačkom cevovodu	111
4.3.2 Matematički model elastičnog hidrauličnog udara	116
Literatura	123
5. DINAMIKA	
STRUJNO – TERMIČKIH PROCESA	125
5.1 Matematički modeli strujno – termičkih	
procesa sa usredsređenim parametrima	127
5.1.1 Matematički model	
dvostrukog konvektivnog razmenjivača toplote	127
5.1.2 Matematički model	
zmijolikog jednocevnog razmenjivača toplote	134
5.1.3 Matematički model procesa strujanja zagrevanog,	
stišljivog fluida kroz rezervoar konstantne zapremine	138
5.1.4 Matematički model industrijske peći	146
5.2 Matematički modeli strujno – termičkih	
procesa sa raspodeljenim parametrima	153
5.2.1 Matematički model provođenja toplote kroz ravan zid	153
5.2.2 Matematički model rekuperativnog razmenjivača toplote	157
5.2.3 Matematički model rashladne komore	163
5.2.4 Diferencijalno – diskretni matematički	
model rekuperativnog razmenjivača toplote	
sa unakrsnim strujanjem radnih medijuma	169
5.2.5 Diferencijalno – diskretni matematički	
model grafitnog suprotnosmernog	
rekuperativnog razmenjivača toplote	
sa unakrsnim strujanjem radnih medijuma	175
5.2.6 Diskretni matematički model	
temperaturskog polja prostorije bez strujanja vazduha	178
5.2.7 Dinamika razmenjivača toplote	186
5.2.8 Razmenjivača toplote kao objekti i procesi upravljanja	191
5.2.9 Neke specifičnosti razmenjivača toplote	
u uslovima njihovog rada u stacionarnim	
i nestacionarnim radnim režimima	192
Literatura	194

6. DINAMIKA PROCESA SA PRENOSOM MASE I TOPLOTE	197
6.1 Dinamika procesa sušenja	199
6.1.1 Matematički model trakaste sušare za sušenje krompira	200
Literatura	221
7. DINAMIKA MAŠINA I MOTORA	223
7.1 Opšteni matematički model obtanja rotora mašina i motora	224
7.2 Matematički model hidraulične turbine	226
7.3 Matematički model parne turbine	233
7.4 Matematički model motora SUS	239
7.5 Matematički model centrifugalne pumpe	242
Literatura	247
8. DINAMIKA SAOBRAĆAJNO – TRANSPORTNIH SREDSTAVA	251
8.1 Matematički model kretanja letelice	253
8.2 Matematički model kretanja broda	273
8.3 Matematički model kretanja motornog vozila	286
8.4 Matematički model rudarske mašine	297
Literatura	300
9. DINAMIKA ENERGETSKIH POSTROJENJA	303
9.1 Matematički model kotlovskeg postrojenja	304
9.2 Matematički model mlina	306
9.2.2 Matematički model ložišta	309
9.2.3 Matematički modeli razmenjivača toplote parnog kotla u kojima se odvija proces strujanja radnog fluida bez promene faze	313
9.2.4 Matematički model isparivača	317
9.2.5 Uticaj promena pritiska na dinamičko ponašanje parnog kotla	323
9.2.6 Matematički model hladnjaka pare	327
9.2.7 Dinamika kotlovskeg postrojenja	329

9.3 Matematički model gasnog bloka	333
9.3.1 Dinamika turbo – agregata	334
9.3.2 Dinamika grejne komore	335
9.3.3 Dinamika gasnog bloka	335
9.4 Matematički model hidropostrojenja	339
9.4.1 Jednačina ponašanja dovodnog tunela	340
9.4.2 Jednačina ponašanja vodostana	340
9.4.3 Jednačina ponašanja cevovoda visokog pritiska	341
9.4.4 Jednačina ponašanja hidroagregata	343
9.4.5 Jednačina neto pada hidraulične turbine	343
9.5 Matematički model nuklearnog postrojenja	348
9.5.1 Opis procesa	348
9.5.2 Kinetika nuklearnog reaktora	350
9.5.3 Dinamika procesa razmene toplote u nuklearnom reaktoru	353
9.5.4 Dinamika procesa razmene toplote u generatoru pare	356
9.5.5 Dinamika procesa prenosa toplote kroz cevovod primarnog cirkulacionog kola	357
9.5.6 Dinamika primarnog cirkulacionog kola	357
9.6 Matematički model parnog bloka	359
9.6.1 Matematički model dobošnog parnog kotla	359
9.6.2 Matematički model parne turbine	367
9.6.3 Matematički model parnog bloka	369
9.7 Matematički model nuklearnog reaktora	371
9.8 Matematički model solarnog postrojenja	375
9.9 Matematički model rashladnog postrojenja	379
9.9.1 Matematički model isparivača	380
9.9.2 Zona isparavanja	381
9.9.3 Zona pregrevanja	383
9.9.4 Matematički model kompresora	384
9.9.5 Matematički model kondenzatora	386
9.9.6 Zona pregrejane pare	386
9.9.7 Zona vlažne pare	387
9.9.8 Matematički model regulacionog ventila	389
9.9.9 Matematički model rashladne komore	390

9.10 Matematički model	
postrojenja za grejanje i provetravanje	392
9.10.1 Matematički model	
komore za mešanje svežeg i recirkulacionog vazduha	393
9.10.2 Matematički model predgrejača sa filterom	394
9.10.3 Matematički model hladnjaka i ovlaživača	395
9.10.4 Matematički model komore za mešanje	
recirkulacionog vazduha sa vazduhom iz otočnog voda	397
9.10.5 Matematički model dogrejača	398
Literatura	400
10. DINAMIKA	
PROCESA OBRADJE MATERIJALA	403
10.1 Dinamika procesa obrade metala	403
10.1.1 Matematički model	
procesa hladnog valjanja lima – prilaz po Družininu	403
Literatura	413
III DODACI	415
DODATAK A – Oznake	415
DODATAK B – Primena Laplasove transformacije na rešavanje	
linearnih parcijalnih diferencijalnih jednačina	423
Literatura	429
DODATAK C – Tablica Laplace – ovih transformacija	430
Literatura	435
DODATAK D – Neki izvodi iz Mehanike 1	436
D.1 Ojlerovi uglovi,	
veze između ortova nepokretnog	
i pokretnog koorinatnog sistema	436
D.2. Određivanje projekcije izvoda	
vektora brzine središta inercije letelice	
i izvoda vektora momenta količine kretanja	
po vremenu na ose pokretnog koordinatnog sistema	439
Literatura	442

DODATAK E – Neki izvodi iz Mehanike 2	443
E.1 Određivanje projekcija izvoda vektora količine kretanja na ose pokretnog koordinatnog sistema	443
E.2. Određivanje projekcija izvoda vektora momenta količine kretanja na ose pokretnog koordinatnog sistema	444
Literatura	446