

Ján Mikleš
Miroslav Fikar

**Modelovanie, identifikácia
a riadenie procesov II**

Identifikácia a optimálne riadenie

STU Bratislava

Publikácia sa zaoberá matematickým modelovaním vzorkovaných spojitých procesov, návrhom jednoduchých PID regulátorov, identifikáciou procesov, optimálnym, prediktívnym a adaptívnym riadením procesov. Určená je graduovaným študentom, môže však poslúžiť aj iným záujemcom, ktorí sa zaujímajú o túto problematiku.

Kniha bola pripravená s podporou Slovenskej spoločnosti pre kybernetiku a informatiku (národnej členskej organizácie IFAC) a Slovenskej spoločnosti priemyselnej chémie – pobočky pri FCHPT STU Bratislava.

Informácie o prvom dieli knihy: Mikleš, J., Fikar, M.: Modelovanie, identifikácia a riadenie procesov I. Modely a dynamické charakteristiky spojitých procesov. STU Press, Bratislava, 192s, 1999 (ISBN 80-227-1289-2) sú dostupné na:

<http://www.kirp.chtf.stuba.sk/~fikar/research/other/kniha.htm>

www K niektorým príkladom označeným touto značkou sú na Internete dostupné zdrojové kódy na adrese:

<http://www.kirp.chtf.stuba.sk/~fikar/research/other/kniha2.htm>

Zdrojové kódy sú pre programový balík MATLAB (<http://www.mathworks.com>) s podporou toolboxov Simulink, Polynomial Toolbox (<http://www.polyx.cz>) a ID-TOOL (dostupný na web stránkach autorov).

© Prof. Ing. Ján Mikleš, DrSc., Doc. Dr.-Ing. Miroslav Fikar

Lektori: Prof. Ing. P. Dostál, CSc.

Prof. Ing. B. Rohál-Ilkiv, CSc.

Publikácia neprešla redakčnou úpravou

ISBN XX

Predslov

Predkladaná publikácia je druhou časťou knihy, ktorá pojednáva o modelovaní, identifikácii a riadení spojitých procesov. V tejto časti sa zaoberá matematickým modelovaním vzorkovaných spojitých procesov, návrhom jednoduchých PID regulátorov, identifikáciou procesov, optimálnym, prediktívnym a adaptívnym riadením procesov.

Cieľom prvej kapitoly je ilustrovať prípravu vzorkovaných spojitých matematických modelov pre identifikáciu a návrhy riadenia procesov.

V ďalšej časti sú opísané niektoré základné postupy pre získavanie matematických modelov procesov pomocou identifikácie, či na základe prechodových charakteristík, alebo odozvy procesov na náhodný signál.

Jadrom knihy sú kapitoly zaoberajúce sa riadením procesov, či už pomocou jednoduchých PID regulátorov, alebo na základe optimalizácie zhodne zvolenej účelovej funkcie. Sú prebrané oblasti z dynamického programovania, LQ, LQG, H2, či prediktívneho riadenia.

Záverečná kapitola pojednáva o adaptívnom riadení procesov a spája poznatky uvedené v predošlých častiach.

Autori ďakujú lektorom Prof. P. Dostálovi. a Prof. B. Rohál-Ilkivovi za ich cenné návrhy a poznámky, ktoré prispeli k zlepšeniu kvality diela.

Autori tiež ďakujú Ing. Ľ. Čirkovi, doc. Bakošovej Ing., T. Hirmajerovi, Ing. K. Calíkovi, Ing. L. Dermíškovi, študentom a diplomantom autorov za pripomienky k rukopisu diela, ktoré pomohli odstrániť niektoré chyby a nedostatky a Ing. A. Širicovej za napísanie časti rukopisu.

Bratislava, október 2004

J. Mikleš
M. Fikar

O autoroch

J. Mikleš získal titul Ing. na Strojníckej fakulte Slovenskej Technickej Univerzity (STU) v roku 1961. STU mu udelila titul PhD. a DrSc. Od roku 1988 je profesorom na Fakulte chemickej a potravinárskej technológie STU. V roku 1968 získal štipendium Alexandra v. Humboldt v Nemecku. Okrem pôsobenia na STU pôsobil aj na Technische Hochschule Darmstadt, Ruhr Universität Bochum, University of Birmingham a iných.

Prof. Mikleš publikoval v časopisoch a zborníkoch viac ako 200 prác. Je autorom a spoluautorom štyroch kníh. 40 rokov pôsobí na vysokej škole pri výchove inžinierov a doktorandov v oblasti riadenia procesov. Vo vedeckovýskumnej oblasti sa zaoberá riadením procesov, identifikáciou a adaptívnym riadením.

Prof. Mikleš aktívne spolupracuje s priemyslom. Bol predsedom Slovenskej spoločnosti pre kybernetiku a informatiku, ktorá je členom IFAC (International Federation of Automatic Control). Pôsobil ako predseda resp. člen programových výborov medzinárodných konferencií.

M. Fikar získal titul Ing. na Chemickotechnologickej fakulte Slovenskej Technickej Univerzity (STU) v roku 1989, titul Dr. v roku 1994 a je docentom od roku 2000. Od skončenia univerzity pôsobí na Katedre informatizácie a riadenia procesov FCHPT STU. V roku 1999 získal štipendium Alexandra v. Humboldt v Nemecku. Pôsobil na Technical University Lyngby, Technische Universität Dortmund, Ruhr Universität Bochum, CRNS-ENSIC Nancy a iných.

Publikačná činnosť doc. Fikara zahŕňa vyše 150 prác a je spoluautorom viacerých kníh. Vo svojej vedeckovýskumnej práci sa zaoberá prediktívnym riadením, prítomnosťou obmedzení v systémoch, identifikáciou, optimalizáciou a riadením chemickotechnologických procesov.

Obsah

1	Diskrétné modely procesov	16
1.1	Počítačové riadenie procesov a problematika vzorkovania	16
1.2	Z – transformácia	22
1.3	Impulzné prenosové funkcie	28
1.4	Vstupno-výstupné modely diskretných systémov v tvare diferencných rovníc	31
1.4.1	Priame číslicové riadenie	32
1.5	Stavové modely diskretných systémov	33
1.6	Vlastnosti diskretných systémov	37
1.6.1	Stabilita	37
1.6.2	Riaditeľnosť	38
1.6.3	Pozorovateľnosť	38
1.6.4	Spätnoväzbový diskretný systém – kvalita riadenia	38
1.7	Príklady diskretných modelov procesov	39
1.7.1	Diskretný model zásobníka kvapaliny	39
1.7.2	Diskretný model dvoch zásobníkov kvapaliny	41
1.7.3	Diskretný model série výmenníkov tepla v ustálenom stave	42
1.8	Literatúra	44
1.9	Úlohy	44
2	Identifikácia systémov	46
2.1	Úvod do identifikácie	46
2.1.1	Modely lineárnych dynamických systémov	48
2.2	Spracovanie prechodových charakteristík	50
2.2.1	Systém 1. rádu	50
2.2.2	Kmitavý systém 2. rádu	52
2.2.3	Systém vyššieho rádu	54
2.3	Metóda najmenších štvorcov	58
2.3.1	Rekurzívna MNŠ	59
2.3.2	Modifikácie základnej rekurzívnej MNŠ	64
2.3.3	Parametre spojitého prenosu	68
2.4	Literatúra	73
2.5	Úlohy	74
3	Úloha riadenia a návrh jednoduchých regulátorov	75
3.1	Uzatvorený regulačný obvod	76
3.1.1	Definícia problému spätnoväzbového riadenia	77
3.2	Stacionárne správanie	78
3.3	Charakterizácia kvality riadenia	79

3.3.1	Časová oblasť	79
3.3.2	Integrálne kritériá	81
3.3.3	Kvalita regulácie a frekvenčné charakteristiky	82
3.3.4	Póly	85
3.4	PID regulátor	87
3.4.1	Opis zložiek	87
3.4.2	Štruktúry PID regulátora	94
3.4.3	Váhovanie žiadanej hodnoty	95
3.4.4	Jednoduché zásady výberu regulátora	96
3.4.5	Praktické aspekty	97
3.4.6	Nastavovanie parametrov regulátora	100
3.5	Literatúra	112
3.6	Úlohy	113
4	Optimálne riadenie procesov	116
4.1	Formulácia úlohy optimálneho riadenia a princíp minima	116
4.2	Spätnoväzbové optimálne riadenie	124
4.3	Optimálne sledovanie, servo problém a odstránenie porúch	135
4.3.1	Problém sledovania	136
4.3.2	Servo problém	138
4.3.3	LQ riadenie s integračnou činnosťou	139
4.4	Dynamické programovanie	139
4.4.1	Dynamické programovanie pre spojité systémy	139
4.4.2	Dynamické programovanie pre diskkrétne systémy	146
4.4.3	Optimálna spätná väzba	147
4.5	Pozorovanie a odhad stavu	150
4.5.1	Pozorovanie stavu	150
4.5.2	Kalmanov filter	152
4.6	Analýza stavového spätnoväzbového riadenia s pozorovaním stavu a polynomicke umiestnenie pólov	155
4.6.1	Vlastnosti stavového spätnoväzbového riadenia s pozorovačom	155
4.6.2	Stavové spätnoväzbové riadenie s pozorovačom interpretované pomocou vstupno-výstupných modelov	159
4.6.3	Diofantické rovnice	166
4.6.4	Polynomicke návrh PA regulátorov	168
4.6.5	Integračná činnosť regulátora	169
4.6.6	Polynomicke návrh PA regulátorov pre MIMO systémy	174
4.7	Youlova-Kučerova parametrizácia	178
4.7.1	Zlomková reprezentácia	178
4.7.2	Parametrizácia všetkých stabilizujúcich regulátorov	180
4.7.3	Parametrizovaný regulátor v stavovom tvare	182
4.7.4	Parametrizácia prenosových funkcií uzavretého obvodu	182
4.7.5	Duálna parametrizácia	185
4.7.6	Parametrizácia stabilizujúcich regulátorov pre mnohorozmerové systémy	187
4.7.7	Parametrizácia stabilizujúcich regulátorov pre diskkrétne systémy	187
4.8	LQ riadenie s pozorovačom, stavová a polynomicke interpretácia	192
4.8.1	Polynomicke návrh LQ regulátorov s pozorovaním stavu pre SISO systémy	192

4.8.2	Polynomický návrh LQ regulátorov s pozorovaním stavu pre MIMO systémy	196
4.9	Lineárne-kvadratické Gaussovo riadenie, stavová a polynomická interpretácia	197
4.9.1	Polynomický návrh LQG regulátorov pre SISO systémy	197
4.9.2	Polynomický návrh LQG regulátorov pre MIMO systémy	201
4.10	H_2 optimálne riadenie	203
4.11	Literatúra	206
4.12	Úlohy	208
5	Prediktívne riadenie procesov	210
5.1	Úvod	210
5.2	Zložky prediktívneho riadenia	211
5.2.1	Modely	211
5.2.2	Účelová funkcia	213
5.3	Odvodenie a implementácia prediktívneho riadenia	213
5.3.1	Odvodenie prediktora	214
5.3.2	Výpočet optimálneho riadenia	215
5.3.3	Uzavretý regulačný obvod	217
5.3.4	Alternatívne odvodenie prediktora	218
5.3.5	Mnohorozmerový vstupno-výstupný prípad	222
5.3.6	Implementácia	222
5.3.7	Vzťah k ostatným riadiacim metódam	223
5.3.8	Prístupy založené na spojitom modeli	224
5.4	Ohraničenia	224
5.5	Stabilita	225
5.5.1	Niektoré závery pre stabilizujúce GPC	225
5.5.2	Koncové ohraničenia	226
5.5.3	Nekonečný horizont	229
5.5.4	Penalizácia koncového stavu	230
5.6	Nastavovanie parametrov	230
5.6.1	Nastavovanie podľa odozvy systému prvého rádu	230
5.6.2	Mnohorozmerové nastavovanie podľa systému prvého rádu	231
5.6.3	Nastavovanie maximálneho horizontu	232
5.6.4	Nastavovanie λ	232
5.6.5	Nastavenie založené na sledovaní modelu	233
5.6.6	Polynóm C	234
5.7	Príklady	234
5.7.1	Lineárny proces	234
5.7.2	GPC s modelom umelej neurónovej siete	234
5.7.3	Riadenie neutralizačného reaktora	236
5.8	Literatúra	239
5.9	Úlohy	240
6	Adaptívne riadenie procesov	242
6.1	Diskrétno adaptívne riadenie procesov	243
6.2	Spojité adaptívne riadenie procesov	243
6.3	Príklady adaptívneho riadenia	244
6.3.1	Adaptívne diskrétno DB riadenie systému druhého rádu	245
6.3.2	Adaptívne spojité LQ riadenie systému druhého rádu	248
6.3.3	Adaptívne spojité PA riadenie MIMO systému	252

6.3.4	Adaptívne riadenie rúrkového reaktora	254
6.4	Literatúra	258
	Literatúra	260
	Register	265

Zoznam obrázkov

1.1.1	Bloková schéma priameho číslicového riadenia	16
1.1.2	Premena spojitého signálu na časovo diskretný signál	17
1.1.3	Rekonštrukcia spojitého signálu z jeho časovo diskretného ekvivalentu	18
1.1.4	Možnosť straty významnej informácie o spojitom signáli	19
1.1.5	Ideálny vzorkovač	20
1.1.6	Amplitúdové frekvenčné spektrum signálu $y(t)$	21
1.1.7	Amplitúdové frekvenčné spektrum vzorkovaného signálu $y^*(t)$	21
1.2.1	Ideálny vzorkovač a impulzne modulovaný signál	23
1.3.1	Sériové zapojenie vzorkovača a spojitého systému	28
1.3.2	V sérii zapojený vzorkovač, tvarovač nultého rádu a spojitý systém s prenosom $G(s)$	29
1.4.1	Zjednodušená blokovaná schéma priameho číslicového riadenia (DDC - direct digital control)	32
1.5.1	Zapojenie tvarovača nultého rádu a spojitého systému v sérii	34
1.6.1	Spätnoväzbový diskretný systém	38
1.7.1	Zásobník kvapaliny	40
1.7.2	Dva zásobníky zapojené za sebou	41
1.7.3	Séria výmenníkov tepla	43
1.9.1	Zásobníky kvapaliny s interakciou	44
2.2.1	PCH systému 1. rádu	51
2.2.2	Nameraná prechodová charakteristika chemického reaktora pri vstupe $\Delta u = 10$ (vľavo), normovaná a aproximovaná prechodová charakteristika (vpravo)	52
2.2.3	PCH periodického systému 2. rádu	53
2.2.4	Nameraná prechodová charakteristika kmitavého systému (vľavo), normovaná a aproximovaná prechodová charakteristika (vpravo)	54
2.2.5	PCH systému vyššieho rádu	55
2.2.6	Nameraná prechodová charakteristika chemického reaktora a odčítanie časov T_u, T_n (vľavo), aproximované prechodové charakteristiky (vpravo)	57
2.3.1	Schéma v Simulinku pre identifikáciu diskretného systému druhého rádu	67
2.3.2	Priebeh identifikácie parametrov diskretného systému druhého rádu	69
2.3.3	Alternatívna schéma v Simulinku pre identifikáciu diskretného systému druhého rádu s použitím blokov IDTOOL	69
2.3.4	Blokovaná schéma identifikácie parametrov spojitého prenosu	71
2.3.5	Schéma v Simulinku pre identifikáciu spojitého systému druhého rádu	72
2.3.6	Priebeh identifikácie parametrov spojitého systému druhého rádu	72

2.3.7	Alternatívna schéma v Simulinku pre identifikáciu spojitého systému druhého rádu s použitím blokov IDTOOL	72
3.1.1	Detailná a zjednodušená bloková schéma URO	76
3.1.2	Otvorený regulačný obvod	77
3.3.1	Typická odozva riadeného systému na skokovú zmenu žiadanej veličiny	79
3.3.2	Typická odozva riadeného systému na skokovú zmenu poruchovej veličiny	81
3.3.3	Bezpečnosť vo fáze a bezpečnosť v amplitúde pre typický spojitý späťnoväzbový systém	83
3.3.4	Šírka pásma, rezonančné maximum a rezonančná frekvencia v amplitúdovej charakteristike	83
3.3.5	Vhodná oblasť pre umiestnenie pólov uzavretého regulačného obvodu .	85
3.3.6	Krivky s konštantnými hodnotami ζ , ω_0 ($\zeta_1 < \zeta_2 < \zeta_3$, $\omega_1 < \omega_2 < \omega_3$) .	86
3.4.1	Odozva výmenníka tepla na skokovú zmenu d s P regulátorom	90
3.4.2	Odozva výmenníka tepla na skokovú zmenu w s P regulátorom	90
3.4.3	Riadenie P regulátorom pre žiadanú hodnotu $w = 1$ a rôzne hodnoty zosilnenia Z_R	91
3.4.4	Odozva výmenníka tepla na skokovú zmenu d s PI regulátorom	92
3.4.5	Odozva výmenníka tepla na skokovú zmenu w s PI regulátorom	92
3.4.6	Riadenie PI regulátorom pre žiadanú hodnotu $w = 1$ a rôzne hodnoty integračnej konštanty T_I	93
3.4.7	Grafické znázornenie účinku D regulátora	94
3.4.8	Riadenie PID regulátorom pre žiadanú hodnotu $w = 1$ a rôzne hodnoty derivačnej konštanty T_D	95
3.4.9	URO s dvoma stupňami voľnosti	96
3.4.10	Simulácia javu saturácie integrátora. (a) pôvodný stav, (b) odstránenie problému spätným výpočtom	98
3.4.11	Regulátor s korekciou saturácie integrálu spätným výpočtom	98
3.4.12	Prechodové charakteristiky jednotlivých štandardných tvarov	102
3.4.13	Riadenie PID regulátorom nastaveného Strejcovou metódou	104
3.4.14	Riadenie výmenníka tepla regulátorom navrhnutým metódou umiestnenia pólov	106
3.4.15	Schéma obvodu s relé	108
3.4.16	Riadenie PID regulátorom nastaveného Ziegler-Nicholsovou metódou . .	109
3.4.17	Riadenie PID regulátorom nastaveného Åström-Hägglundovou metódou	112
4.1.1	Výmenník tepla	121
4.1.2	Optimálne priebehy vstupnej a stavovej veličiny výmenníka tepla	124
4.2.1	Pribeh $P(t)$ pre rôzne hodnoty koeficientu r	128
4.2.2	Optimálne späťnoväzbové riadenie	129
4.2.3	Dva výmenníky tepla zapojené v sérii	130
4.2.4	Simulink program na riešenie odozvy späťnoväzbového systému z príkladu 4.2.2	133
4.2.5	Priebehy x_1 , x_2 , u_1 pri späťnoväzbovom LQ riadení dvoch v sérii zapojených výmenníkov	133
4.2.6	Optimálna LQ regulácia výstupu	135
4.4.1	Optimálna trajektória v n -rozmernom stavovom priestore	140
4.4.2	Optimálna trajektória	141
4.4.3	Označenie miest, resp. časov	146
4.5.1	Systém automatického riadenia s deterministickým odhadom stavu . . .	151

4.5.2	Schéma pozorovača stavu	151
4.6.1	Stavové spätnoväzbové riadenie s pozorovaním stavu	156
4.6.2	Schéma odhadu stavu SISO systému	161
4.6.3	Polynomický odhad stavu	161
4.6.4	Interpretácia pseudostavu	162
4.6.5	Realizácia stavovej spätnej väzby s pozorovačom	163
4.6.6	Stavové spätnoväzbové riadenie	163
4.6.7	Spätnoväzbový obvod s jedným stupňom voľnosti	164
4.6.8	Uzavretý obvod s integrátorom	169
4.6.9	Stavové spätnoväzbové riadenie s pozorovaním stavu a referenčným vstupom	175
4.7.1	Spätnoväzbový regulačný obvod	178
4.7.2	Bloková schéma parametrizovaného regulátora	182
4.7.3	Stavový regulátor s pozorovaním stavu	183
4.7.4	Stavový parametrizovaný regulátor	183
4.7.5	Odozva uzavretého systému na skokovú zmenu poruchy	185
4.7.6	Parametrizovaný riadený systém v uzavretom obvode	186
4.7.7	Diskrétny regulačný obvod	188
4.7.8	Simulačná schéma DB sledovania spojitého systému druhého rádu	191
4.7.9	Sledovanie spojitého systému za konečný (a) a najmenší (b) počet krokov	192
4.9.1	Schéma LQG riadenia	199
4.10.1	Štandardná konfigurácia riadenia	203
5.1.1	Princíp prediktívneho riadenia	211
5.3.1	Výstup a riadenie uzavretého regulačného obvodu	221
5.7.1	Zvyšovanie hodnoty N_2 vedie k úspornejšiemu riadeniu	235
5.7.2	Zvyšovanie hodnoty λ – spomalenie riadenia za najmenší počet krokov	235
5.7.3	Trajektórie koncentrácie kyslíka (výstup z procesu)	237
5.7.4	Trajektória zriedovacej rýchlosti (riadiaca veličina)	237
5.7.5	Neutralizačný reaktor	238
5.7.6	Sledovanie žiadanej veličiny	239
5.7.7	Regulácia	239
6.1.1	Bloková schéma samonastavujúceho sa riadenia s diskretným regulátorom	243
6.2.1	Bloková schéma samonastavujúceho sa riadenia so spojitým regulátorom	244
6.3.1	Schéma <code>ad031s.mdl</code> v Simulinku DB sledovania spojitého systému druhého rádu s diskretným ST regulátorom	245
6.3.2	Priebehy (a) vstupnej, výstupnej a žiadanej veličiny, (b) identifikovaných parametrov diskretného modelu riadeného systému pri ST riadení spojitého systému druhého rádu za najmenší počet krokov	248
6.3.3	Schéma <code>ad033s.mdl</code> v Simulinku LQ sledovania spojitého systému druhého rádu so spojitým ST regulátorom	249
6.3.4	Priebehy (a) vstupnej, výstupnej a žiadanej veličiny, (b) identifikovaných parametrov spojitého modelu riadeného systému pri LQ ST riadení spojitého systému druhého rádu	251
6.3.5	Schéma <code>ad035s.mdl</code> v Simulinku mnohorozmerového sledovania spojitého systému so spojitým ST regulátorom	252
6.3.6	Priebehy (a) výstupnej a žiadanej veličiny, (b) vstupnej veličiny, (c) identifikovaných parametrov dvojrozmerného spojitého riadeného systému pri ST riadení založenom na umiestnení pólov	255

6.3.7	Porovnanie stratégií riadenia za najmenší počet krokov (db) a úsporného riadenia (ml)	257
6.3.8	Vplyv porúch vo vstupnej koncentrácii	258

Zoznam tabuliek

1.2.1	Slovník Laplaceovej transformácie a \mathcal{Z} -transformácie	25
3.4.1	Nastavenie regulátora podľa Strejca	104
3.4.2	Nastavenie regulátora podľa Ziegler-Nicholsa. PID_1 nastavuje regulátor s menším prekmitom, PID_2 bez prekmitu	108
3.4.3	Nastavenie regulátora podľa Ziegler-Nicholsa z prechodovej charakteristiky	109
3.4.4	Výpočet parametrov PI regulátora pre stabilné procesy na základe PCH. Parametre sú dané ako funkcie τ v tvare (3.4.56)	111
3.4.5	Výpočet parametrov PID regulátora pre stabilné procesy na základe PCH. Parametre sú dané ako funkcie τ v tvare (3.4.56)	111
3.4.6	Výpočet parametrov PI regulátora pre procesy s integrátorom na základe PCH. Parametre sú dané ako funkcie τ v tvare (3.4.56)	111
3.4.7	Výpočet parametrov PID regulátora pre procesy s integrátorom na základe PCH. Parametre sú dané ako funkcie τ v tvare (3.4.56)	111
3.4.8	Výpočet parametrov PI regulátora pre stabilné procesy na základe FCH. Parametre sú dané ako funkcie κ v tvare $a_0 \exp(a_1 \kappa + a_2 \kappa^2)$	113
3.4.9	Výpočet parametrov PID regulátora pre stabilné procesy na základe FCH. Parametre sú dané ako funkcie κ v tvare $a_0 \exp(a_1 \tau + a_2 \tau^2)$	113

Literatúra

- K. J. Åström. *Introduction to Stochastic Control Theory*. Academic Press, New York, 1970.
- B. D. O. Anderson a J. B. Moore. *Linear Optimal Control*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1971.
- K. J. Åström. Theory and application of adaptive control – A survey. *Automatica*, 19:471–486, 1983.
- K. J. Åström a T. J. Hägglund. *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*. Instrument Society of America, Research Triangle Park, 2 vydanie, 1995.
- K. J. Åström a B. Wittenmark. On self-tuning regulators. *Automatica*, 9:185–189, 1973.
- K. J. Åström a B. Wittenmark. *Adaptive Control*. Addison-Wesley, Massachusetts, 1989.
- M. Athans a P. L. Falb. *Optimal Control*. McGraw-Hill, New York, 1966.
- R. Bellman. *Dynamic Programming*. Princeton University Press, Princeton, New York, 1957.
- G. J. Bierman. *Factorization Methods for Discrete Sequential Estimation*. Academic Press, New York, 1977.
- R. R. Bitmead, M. Gevers a V. Wertz. *Adaptive Optimal Control*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1990.
- S. Bittanti, P. Bolzern a M. Campi. Exponential convergence of a modified directional forgetting identification algorithm. *Systems & Control Letters*, 14:131–137, 1990.
- V. Bobál, J. Böhm, R. Prokop a J. Fessl. *Praktické aspekty samočinně se nastavujících regulátorů: algoritmy a implementace*. VUT, Brno, 1998.
- E. F. Camacho a C. Bordons. *Model Predictive Control*. Springer-Verlag, London, 1999.
- L. Čirka a M. Fikar. Identification tool for Simulink. Technical report KAMF9803, Department of Process Control, FCT STU, Bratislava, Slovakia, 1998.
- L. Čirka, M. Fikar a J. Mikleš. A deterministic LQ tracking problem: Parametrisation of the controller and the plant. *Journal of Electrical Engineering*, 53(5–6):126 – 131, 2002.
- D. W. Clarke, C. Mohtadi a P. S. Tuffs. Generalized predictive control - part I. The basic algorithm. *Automatica*, 23(2):137 – 148, 1987.

- D. W. Clarke a R. Scattolini. Constrained receding-horizon predictive control. *IEE Proc. D*, 138(4):347 – 354, 1991.
- J.-P. Corriou. *Commande des Procédés*. Lavoisier, Paris, 1996.
- J. Z. Cypkin. *Grundlagen der Theorie automatischer Systeme*. VEB Verlag Technik, Berlin, 1981.
- Y. Z. Cypkin. *Osnovy teorii avtomatičeskich sistem*. Nauka, Moskva, 1977.
- J. C. Doyle, K. Glover, P. P. Khargonekar a B. Francis. State-space solutions to the standard H_2 and H_∞ control problems. *IEEE Trans. Automatic Control*, 34:831–847, 1989.
- P. Eykhoff. *Trends and Progress in System Identification*. Pergamon Press, Oxford, 1981.
- M. Fikar, P. Dostál a J. Mikleš. Adaptive predictive control of tubular chemical reactor. *Petroleum and Coal*, 38(3):51 – 57, 1996.
- M. Fikar a A. Draeger. Adaptive predictive control of a neutralization reactor. V *Preprints of 10th Conf. Process Control'95, June 4 – 7, Tatranské Matliare, Slovakia*, diel 1, 153 – 157. 1995.
- M. Fikar a S. Engell. Receding horizon predictive control based upon Youla-Kučera parametrization. *European Journal of Control*, 3(4):304 – 316, 1997.
- M. Fikar, S. Engell a P. Dostál. Design of predictive LQ controller. *Kybernetika*, 35(4):459–472, 1999.
- M. Fikar a V. Kučera. On minimum finite length control problem. *Int. J. Control*, 73(2):152 – 158, 2000.
- M. Fikar a J. Mikleš. *Identifikácia systémov*. STU Press, 1999.
- M. Fikar a H. Unbehauen. Youla-Kučera design of decoupled control systems. *Int. J. Control*, 75(3):213 – 218, 2002.
- T. R. Fortescue, L. S. Kershenbaum a B. E. Ydsie. Implementation of self tuning regulators with variable forgetting factors. *Automatica*, 17:831–835, 1981.
- K. F. Gauss. *Theoria motus corporum caelestium*. English translation: Theory of the Motion of the Heavenly Bodies, Dover, New York, 1963, 1809.
- G. C. Goodwin a K. S. Sin. *Adaptive Filtering Prediction and Control*. Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1984.
- F. R. Hansen a G. F. Franklin. On a fractional representation approach to closed-loop experiment design. V *Proc. ACC'88*, 1319–1320. Atlanta, GA, 1988.
- B. Hanuš. *Základy teorie lineárního impulzního regulačního obvodu*, diel I. ES VSŠT, Liberec, 1972.
- P. Hudzovič. *Identifikácia a modelovanie*. ES SVŠT, Bratislava, 1986.
- R. Izermann. *Digitale Regelsysteme*. Springer - Verlag, Berlin, 1977.

- E. I. Jury. *Impulznye sistemy avtomatičeskovo regulirovanija*. GIFML, Moskva, 1963.
- R. E. Kalman. Contribution to the theory of optimal control. *Boletín de la Sociedad Matemática Mexicana*, 5:102–119, 1960.
- R. E. Kalman. When is a linear system optimal? *Trans. ASME, Series D, Journal of Basic Engn.*, 51–60, 1964.
- R. E. Kalman a R. S. Bucy. New results in linear filtering and prediction theory. *J. Basic Engr.*, 83:95 – 100, 1961.
- B. Kouvaritakis, J. A. Rossiter a A. O. T. Chang. Stable generalised predictive control: an algorithm with guaranteed stability. *IEE Proc. D*, 139(4):349 – 362, 1992.
- S. Kubík, Z. Kotek, V. Strejc a J. Štecha. *Teorie automatického řízení I*. SNTL/ALFA, Praha, 1982.
- R. Kulhavý a M. Kárný. Tracking of slowly varying parameters by directional forgetting. V *Proc. 9th IFAC World Congr., Budapest*, 79–83. 1984.
- V. Kučera. Stability of discrete linear feedback systems. V *Proc. 6th IFAC World Congress*, díl 1. Boston, 1975. Paper 44.1.
- V. Kučera. New results in state estimation and regulation. *Automatica*, 17:745–748, 1981.
- V. Kučera. Diophantine equations in control – a survey. *Automatica*, 29:1361–1375, 1993.
- V. Kučera. A tutorial on H_2 control theory: The continuous-time case. V M. J. Grimble a V. Kučera, redaktori, *Polynomial Methods for Control System Design*, 1–56. Springer Verlag, London, 1996.
- V. Kučera. A bridge between state-space and transfer-function methods. *Annual Reviews in Control*, 23:177–184, 1999.
- V. Kučera a D. Henrion. H_2 optimal control via pole placement. V *IFAC Symposium Robust Control Design*. Prague, 2000.
- H. Kwakernaak. H_2 -optimization – Theory and applications to robust control design. V *IFAC Symposium Robust Control Design*. Prague, 2000.
- H. Kwakernaak a R. Sivan. *Linear Optimal Control Systems*. Wiley, New York, 1972.
- W. H. Kwon a A. E. Pearson. On feedback stabilization of time-varying discrete linear systems. *IEEE Tr. Aut. Control*, 23(3):479 – 481, 1978.
- J.-W. Lee, W. H. Kwon a J. Choi. On stability of constrained receding horizon control with finite terminal weighting matrix. V *CD-ROM Proceedings of ECC'97, Bruxelles, Paper No. 93*. 1997.
- L. Ljung. *System Identification: Theory for the User*. MIT Press, Cambridge, Mass., 1987.
- L. Ljung a T. Söderström. *Theory and Practice of Recursive Identification*. MIT Press, Cambridge, Mass., 1983.

- D. G. Luenberger. An introduction to observers. *IEEE Trans. AC*, 16:596 – 602, 1971.
- J. Lunze. *Regelungstechnik 2*. Springer, Berlin, 1997.
- J. M. Maciejowski. *Predictive Control with Constraints*. Prentice Hall, London, 2002.
- A. R. McIntosh, S. L. Shah a D. G. Fisher. Analysis and tuning of adaptive generalized predictive control. *Can. J. Chem. Eng.*, 69:97 – 110, 1991.
- G. Meinsma. The standard H_2 problem. V *IFAC Symposium Robust Control Design*. Prague, 2000.
- J. Mikleš. A multivariable self-tuning controller based on pole-placement design. *Automatica*, 26(2):293 – 302, 1990.
- J. Mikleš. *Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)*, kapitola E6-43-34 Automation and Control in Process Industries, redaktor: H. Unbehauen. EOLSS Publishers, Oxford, UK, 2003. [<http://www.eolss.net>].
- J. Mikleš a V. Hutla. *Teória automatického riadenia*. ALFA, SNTL, Bratislava, 1986.
- J. Mikleš, v. Kožka a Čírka L. PID controller and LQ control design. V *IFAC Workshop on Digital Control*, 315–319. Terassa, 2000.
- J. Mikleš, H. Unbehauen a V. Keuchel. Entwurf eines adaptiven kontinuierlichen Reglers für Mehrgrößenregelstrecken. *Automatisierungstechnik*, 40(9):333–342, 1992.
- E. Mosca a J. Zhang. Stable redesign of predictive control. *Automatica*, 28:1229 – 1233, 1992.
- K. Ogata. *Discrete-time control systems*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1987.
- V. Peterka. Adaptive digital regulation of noisy systems. V *Proc. 2nd IFAC Symposium on Identification and Process Parameter Estimation*. Prague, 1970.
- Polyx. *The Polynomial Toolbox for MATLAB*. PolyX, Ltd., Prague, 1999. <http://www.polyx.com>.
- L. S. Pontryagin, V. G. Boltyanskii, R. V. Gamkrelidze a E. F. Mishchenko. *The Mathematical Theory of Optimal Processes*. Wiley, New York, 1962.
- D. M. Prett a C. E. García. *Fundamental Process Control*. Butterworths, 1988.
- J. B. Rawlings a K. R. Muske. The stability of constrained receding horizon control. *IEEE Trans. Automatic Control*, 38(10):1512 – 1516, 1993.
- B. Rohál-Ilkiv. *Identifikácia sústav*. SjF SVŠT, Bratislava, 1987.
- J. A. Rossiter, J. R. Gossner a B. Kouvaritakis. Infinite horizon stable predictive control. *IEEE Trans. Automatic Control*, 41(10):1522 – 1527, 1996.
- A. Rusnák, K. Fikar, M. Najim a A. Mészáros. Generalized predictive control based on neural networks. *Neural Processing Letters*, 4(2):107 – 112, 1996.
- U. Shaked. A general transfer function approach to linear stationary filtering and steady-state optimal control problems. *Int. J. Control*, 24:741–770, 1976.

- R. Shridhar a D. J. Cooper. A tuning strategy for unconstrained SISO model predictive control. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 36(3):729 – 746, 1997.
- R. Shridhar a D. J. Cooper. A tuning strategy for unconstrained multivariable model predictive control. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 37(10):4003 – 4016, 1998.
- T. Söderström a P. Stoica. *System Identification*. Prentice Hall, Inc., 1989.
- V. Strejc. Approximation aperiodischer Übertragungscharakteristiken. *Regelungstechnik*, 7:124 – 128, 1959.
- V. Strejc a kol. *Syntéza regulačních obvodů s číslicovým počítačem*. NČSAV, 1965.
- K. K. Tan, Q.-G. Wang, C. C. Hang a T. J. Häggglund. *Advances in PID Control*. Springer Verlag, London, 1999.
- H. Unbehauen. *Regelungstechnik I.* Vieweg, Braunschweig/Wiesbaden, 1986.
- H. Unbehauen. *Regelungstechnik II.* Vieweg, Braunschweig/Wiesbaden, 1987.
- H. Unbehauen a G. P. Rao. *Identification of Continuous Systems*. North-Holland, Amsterdam, 1987.
- L. N. Volgin. *The Fundamentals of the Theory of Controllers*. Soviet Radio, Moskva, 1962. (po rusky).
- M. Šalamon. *Teória riadenia*. ES SVŠT, Bratislava, 1979.
- W. A. Wolovich. *Linear Multivariable Systems*. Springer Verlag, New York, 1974.
- D. C. Youla, J. J. Bongiorno a H. Jabr. Modern Wiener-Hopf design of optimal controller, Part I: The single-input case. *IEEE Trans. Automatic Control*, 21:3–14, 1976a.
- D. C. Youla, J. J. Bongiorno a H. Jabr. Modern Wiener-Hopf design of optimal controller, Part II: The multivariable case. *IEEE Trans. Automatic Control*, 21:319–338, 1976b.
- C.-C. Yu. *Autotuning of PID Controllers. Relay Feedback Approach*. Springer Verlag, London, 1999.
- P. Zelinka, B. Rohaň-Ilkiv a A. Kuznetsov. Experimental verification of stabilising predictive control. *Control Engineering Practice*, 7(5):601–610, 1999.
- A. Zheng a M. Morari. Stability of model predictive control with mixed constraints. *IEEE Trans. Automatic Control*, 40(10):1818 – 1823, 1995.
- K. Zhou, J. C. Doyle a K. Glover. *Robust and Optimal Control*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1995.
- J. G. Ziegler a N. B. Nichols. Optimum settings for automatic controllers. *Trans. ACME*, 64(8):759–768, 1942.

Register

- adaptívne riadenie, 242
 - diskrétne, 243
 - spojité, 243
- amplitúdové frekvenčné spektrum, 20
- ARMA model, 48
- ARMAX model, 49
- ARX model, 49
- Åström-Hägglundova metóda, 109

- beznárazový prechod, 99
- bezpečnosť vo fáze, 82
- bezpečnosť v amplitúde, 82
- Broidova metóda, 57

- čas nábehu, 80
- čas prieťahu, 80
- čas regulácie, 80
- čas zdvihu, 80

- dead-beat regulátor, 188
- diofantická rovnica, 166
 - riešiteľnosť, 166
- dominantná časová konštanta, 80
- dynamické programovanie, 139
 - diskrétne systémy, 146
 - spojité systémy, 139

- exponenciálne zabúdanie, 65

- Hamiltonova funkcia, 119
- Hamiltonova-Jacobiho-Bellmanova rovnica, 143

- identifikácia
 - diskrétneho prenosu, 58
 - prechodová charakteristika, 50
 - Broidova metóda, 57
 - kmitavý systém 2. rádu, 52
 - Strejcova metóda, 54
 - systém 1. rádu, 50
 - systém vyššieho rádu, 54
 - spojitého prenosu, 68
- identifikácia systémov, 46
- identifikačná výdatnosť, 63
- identifikačné metódy, 47
- identifikovateľnosť modelu, 63

- Kalmanov filter, 152
- kanonický tvar
 - pozorovateľný, 36
 - riaditeľný, 36
- koefficient tlmenia, 80
- kvalita riadenia, 38

- LQ riadenie, 192
- LQG riadenie, 197
- Luenbergerov pozorovač, 150

- maximálne prereregulovanie, 80
- metóda najmenších štvorcov, 58
 - rekurzívna, 59
- model
 - ARMA, 48
 - ARMAX, 49
 - ARX, 49
 - diskrétny, 16
 - pozorovateľnosť, 38
 - príklady, 39
 - riaditeľnosť, 38
 - stabilita, 37
 - stavový, 33
 - vstupno-výstupný, 31, 34
 - OE, 50
 - procesov, 48
 - stochastický, 48

- Naslinova metóda, 101

- odhad stavu, 150
- OE model, 50

- optimálne sledovanie, 135
- parametrizácia
 - diskrétny systémy, 187
 - duálna, 185
 - Youlova-Kučerova, 178
- perióda vzorkovania, 16
- PID regulátor, 87
- polynomický návrh, 164
 - MIMO systémy, 174
- pozorovanie, 150
- prediktívne riadenie, 210
 - implementácia, 222
 - model, 211
 - nastavovanie, 230
 - odvodenie, 213
 - ohraničenia, 224
 - stabilita, 225
 - stavový model, 218
 - účelová funkcia, 213
 - uzavretý regulačný obvod, 217
- prechodová charakteristika
 - identifikácia, 50
- prenosová funkcia
 - diskrétna, 29
 - impulzná, 28
 - matica, 36
 - parametrizácia, 182
- prevodník
 - analogovo digitálny, 16
 - digitálne analogový, 16
- princíp minima, 116
- princíp optimálnosti, 140
- problém sledovania, 136
- regulátor
 - H_2 , 203
 - derivačný, 93
 - integračný, 90, 169
 - LQ, 192
 - stavový, 192
 - LQG, 197
 - MIMO systémy, 201
 - najmenší počet krokov, 188
 - nastavovanie parametrov, 100
 - experimentálne metódy, 107
 - Naslinova metóda, 101
 - Strejcova metóda, 103
 - štandardné tvary, 100
 - umiestnenie pólov, 104
 - Ziegler-Nichols, 108
 - PID, 87
 - digitálna implementácia, 99
 - saturácia integrátora, 97
 - štruktúry, 94
 - polynomický návrh, 164
 - proporcionálny, 87
 - stabilizujúci, 180
 - stavový, 182
- rekurzívna metóda najmenších štvorcov, 59
 - modifikácie, 64
- rezonančná frekvencia, 82
- rezonančné maximum, 82
- riadenie
 - definícia problému, 77
 - integračná činnosť, 139
 - kvalita, 38, 79
 - časová oblasť, 79
 - frekvenčné charakteristiky, 82
 - integrálne kritériá, 81
 - optimálne, 116
 - spätnoväzbové, 124
 - prediktívne, 210
 - priame číslicové, 16, 32
 - štandardná konfigurácia, 203
 - úloha, 75
- Riccatiho rovnica, 127
- rovnica
 - diofantická, 166
 - Hamiltonova-Jacobiho-Bellmanova, 143
 - Riccatiho, 127
- saturácia integrátora, 97
- servo problém, 136, 138
- smerové zabúdanie, 66
- spätná väzba
 - optimálna, 147
- spätná Z transformácia, 24
 - parciálne zlomky, 26
 - rozvoj do radu, 26
- stacionárne správanie, 78
- Strejcova metóda identifikácie, 54
- Strejcova metóda nastavovania PID regulátora, 103
- systém
 - nuly, 33
 - póly, 33, 85
 - dominantné, 85
- šírka pásma, 82

-
- trvalá regulačná odchýlka, 38, 80
 - tvárovací člen, 16

 - umiestnenie pólov, 104, 134, 164
 - polynomické, 165
 - uzatvorený regulačný obvod, 76

 - variačný počet, 118
 - veta
 - existencia optimálneho riadenia, 144
 - LQ riadenie s pozorovačom, 193
 - LQG riadenie, 198
 - o inverzii matice, 60
 - o separácii, 156
 - umiestnenie pólov, 159

 - Youlova-Kučerova parametrizácia, 178

 - zabúdanie
 - exponenciálne, 65
 - smerové, 66
 - Ziegler-Nicholsova metóda, 108
 - zlomková reprezentácia, 178
 - Z transformácia, 22
 - exponenciálna funkcia, 24
 - linearita, 24
 - skoková funkcia, 23
 - spätná, 24
 - tabuľka, 25