

AUTOMATICKÉ ŘÍZENÍ

Jaroslav Balátě

AUTOMATICKÉ ŘÍZENÍ

Praha 2003



Jaroslav Balátě

AUTOMATICKÉ ŘÍZENÍ

Lektoři

Prof. Dr.h.c. Ing. Antonín Víteček, CSc.
Doc. Ing. Petr Vysoký, CSc.

Bez předchozího písemného svolení nakladatelství nesmí být kterákoli část kopírována nebo rozmnožována jakoukoli formou (tisk, fotokopie, mikrofilm nebo jiný postup), zadána do informačního systému nebo přenášena v jiné formě či jinými prostředky.

Autor a nakladatelství nepřijímají záruku za správnost tištěných materiálů. Předkládaná zapojení a informace jsou zveřejněny bez ohledu na případné patenty třetích osob. Nároky na odškodnění na základě změn, chyb nebo vynechání jsou zásadně vyloučeny.

Veškerá práva vyhrazena.

© Prof., Ing. Jaroslav Balátě, DrSc., 2003

© Nakladatelství BEN – technická literatura, Věšínova 5, Praha 10

Jaroslav Balátě: Automatické řízení

BEN – technická literatura, Praha 2003

1. vydání

ISBN 80-7300-020-2

AUTOMATICKÉ ŘÍZENÍ

1.	SYSTÉMOVÝ ÚVOD PRO TEORII AUTOMATICKÉHO ŘÍZENÍ	25
2.	TEORIE LINEÁRNÍ REGULACE	47
3.	TEORIE NELINEÁRNÍ REGULACE	345
4.	DISKRÉTNÍ SYSTÉMY ŘÍZENÍ	403
5.	POPIS SYSTÉMU VE STAVOVÉM PROSTORU	533
6.	DOPLŇKY	623

OBSAH

	ZÁKLADNÍ OZNAČENÍ A SYMBOLY	13
	O KNIZE	24
1	SYSTÉMOVÝ ÚVOD PRO TEORII AUTOMATICKÉHO ŘÍZENÍ	26
1.1	VYMEZENÍ POJMU – SYSTÉM	26
1.2	DEFINICE SYSTÉMU	28
1.3	CHOVÁNÍ SYSTÉMU	29
1.4	STRUKTURA SYSTÉMU	34
1.5	ZMĚNY CHOVÁNÍ SYSTÉMŮ	36
1.6	TŘÍDĚNÍ SYSTÉMŮ	36
1.7	KYBERNETICKÝ SYSTÉM	38
1.8	MODELOVÁNÍ, IDENTIFIKACE A SIMULACE	41
2	TEORIE LINEÁRNÍ REGULACE	48
2.1	ANALÝZA	48
2.1.1	Linearizace	48
2.1.1.1	Linearizace tečnou rovinou	49
2.1.1.2	Linearizace metodou minimálních kvadratických odchylek	54
2.1.2	Laplaceova transformace	56
2.1.2.1	Definiční vztahy	56
2.1.2.2	Základní vlastnosti Laplaceovy transformace	60
2.1.2.3	Heavisideův rozvoj	61
2.1.2.4	Způsob použití L transformace	64
2.1.3	Popis statických a dynamických vlastností systémů	70
2.1.3.1	Popis systému lineární diferenciální rovnicí	72
2.1.3.2	Přenos systému	73
2.1.3.3	Přechodová funkce a přechodová charakteristika systému	77
2.1.3.4	Impulzová funkce a impulzová charakteristika systému	78
2.1.3.5	Kmitočtový přenos	81
2.1.3.6	Amlitudo-fázová kmitočtová charakteristika v komplexní rovině	84

2.1.3.7	Kmitočtové charakteristiky v logaritmických souřadnicích	85
2.1.3.8	Vnitřní popis dynamických vlastností systémů	94
2.1.3.9	Poloha pólů a nul přenosu	96
2.1.4	Typové dynamické členy regulačních obvodů	97
2.1.4.1	Základní dynamické členy	98
2.1.4.2	Fyzikální realizovatelnost členů regulačních obvodů	101
2.1.4.3	Dynamické členy s minimální fází	102
2.1.5	Bloková algebra	104
2.1.6	Regulované soustavy	112
2.1.6.1	Proporcionální regulované soustavy	113
2.1.6.2	Integrační regulované soustavy	115
2.1.6.3	Regulované soustavy s neminimální fází	119
2.1.6.4	Regulované soustavy s dopravním zpožděním	120
2.1.6.5	Jednoduché metody identifikace regulovaných soustav	128
2.1.6.6	Úprava přenosů regulovaných soustav	138
2.1.7	Regulátory	144
2.1.7.1	Dynamické vlastnosti spojitých regulátorů	146
2.1.7.2	Stavitelné parametry regulátorů	151
2.1.7.3	Význam zpětné vazby u spojitých regulátorů	154
2.1.7.4	Charakteristika činnosti spojitých regulátorů	155
2.1.7.5	Interakce konstant regulátorů	156
2.1.7.6	Nespojité regulátory	158
2.1.8	Regulační obvod	164
2.1.9	Stabilita regulačního obvodu	169
2.1.10	Kritéria stability	173
2.1.10.1	Algebraická kritéria stability	173
2.1.10.2	Kmitočtová kritéria stability	179
2.1.11	Oblast stability regulačních obvodů	204
2.1.11.1	Oblast stability jednoho nastavitelného parametru	204
2.1.11.2	Oblast stability v rovině dvou nastavitelných parametrů	207
2.1.12	Přesnost regulace	210
2.1.13	Citlivostní analýza struktury řízení	215
2.1.13.1	Otevřená struktura – systém ovládní	215
2.1.13.2	Uzavřená struktura – systém regulace	216

2.2	SYNTÉZA	218
2.2.1	Charakteristika syntézy	218
2.2.2	Volba struktury regulátoru k dané regulované soustavě	221
2.2.3	Jakost regulačního pochodu	222
2.2.3.1	Posouzení jakosti regulačního pochodu ze stupně stability ...	222
2.2.3.2	Metoda kritického zesílení regulátoru (metoda Ziegler-Nicholsova)	229
2.2.3.3	Seřízení regulátoru na základě znalosti přechodové charakteristiky regulované soustavy	234
2.2.3.4	Seřízení regulátoru podle funkcí standardního tvaru	236
2.2.3.5	Kritérium jakosti regulace podle funkcionálu odchylky (integrální kritéria)	244
2.2.3.6	Seřízení regulátoru podle optimálního modulu	259
2.2.3.7	Kmitočtové metody syntézy	265
2.2.3.8	Seřizování analogových regulátorů metodou požadovaného modelu (metodou inverze dynamiky)	275
2.2.4	Rozvětvené jednorozměrové regulační obvody	281
2.2.4.1	Regulační obvod s pomocnou regulovanou veličinou	283
2.2.4.2	Regulační obvod s přiřazením poruchové veličiny	286
2.2.4.3	Regulační obvod s pomocnou akční veličinou	290
2.2.4.4	Regulační obvod s modelem regulované soustavy	292
2.2.4.5	Sdružené rozvětvené jednorozměrové regulační obvody	294
2.2.4.6	Shrnutí	295
2.2.5	Servomechanizmy	296
2.2.5.1	Úvod	296
2.2.5.2	Typy servomechanizmů	301
2.2.5.3	Vlastnosti servomechanizmů	301
2.2.5.4	Korekce servomechanizmů	310
2.2.5.5	Shrnutí	319
2.2.6	Mnohorozměrové regulační obvody	320
2.2.6.1	Popis mnohorozměrových regulovaných soustav	322
2.2.6.2	Autonomnost a invariantnost	326
2.2.6.3	Stabilita mnohorozměrových regulačních obvodů	328
2.2.6.4	Dvourozměrový regulační obvod; popis, syntéza	329
2.2.6.5	Syntéza vazebních a korekčních členů mnohorozměrových obvodů	334

2.2.6.6	Náhrada vícerozměrového regulačního obvodu jednorozměrovými rozvětvenými regulačními obvody	339
3	TEORIE NELINEÁRNÍ REGULACE	346
3.1	ÚVOD	346
3.2	TYPY NELINEARIT	348
3.3	PŘEHLED METOD ŘEŠENÍ NELINEÁRNÍCH REGULAČNÍCH OBVODŮ	351
3.4	METODA STAVOVÉ ROVINY (PROSTORU)	353
3.4.1	Matematický model	353
3.4.2	Odvození diferenciální rovnice stavové trajektorie	355
3.4.3	Souvislost stavové trajektorie systému s průběhem výstupní veličiny $y(t)$	357
3.4.4	Grafické konstrukce stavové trajektorie	358
3.4.4.1	Metoda izoklín	358
3.4.4.2	Metoda použitím pomocných křivek $x_1 = -g(x_2)$ a $x_2 = f(x_1)$	364
3.4.5	Stavový prostor	367
3.4.6	Vyjádření času ve stavové rovině	368
3.4.7	Ustálené stavy nelineárních systémů	372
3.4.8	Základní tvary stavových trajektorií pro různé typy singulárních bodů	376
3.5	STABILITA NELINEÁRNÍCH REGULAČNÍCH OBVODŮ ...	380
3.5.1	Základní pojmy	380
3.5.2	Metoda ekvivalentního přenosu	384
3.5.3	Popovovo kritérium stability	396
4	DISKRÉTNÍ SYSTÉMY ŘÍZENÍ	404
4.1	POPIS DISKRÉTNÍHO REGULAČNÍHO OBVODU	404
4.2	VZORKOVÁNÍ	410
4.3	TVAROVÁNÍ VZORKOVANÝCH SIGNÁLŮ	415
4.4	Z TRANSFORMACE	419

4.4.1	Definiční vztahy a základní vlastnosti	419
4.4.2	Příklady výpočtu přímé a zpětné Z transformace	422
4.4.2.1	Přímá Z transformace	422
4.4.2.2	Zpětná Z transformace	427
4.4.3	Modifikovaná Z transformace – Z_c	438
4.5	LINEÁRNÍ DIFERENČNÍ ROVNICE A JEJICH ŘEŠENÍ	440
4.6	DISKRÉTNÍ LINEÁRNÍ DYNAMICKÉ SYSTÉMY	445
4.6.1	Diferenční rovnice systému	446
4.6.2	Diskrétní přenos (Z-přenos)	446
4.6.3	Diskrétní impulzní funkce a charakteristika	448
4.6.4	Diskrétní přechodová funkce a charakteristika	449
4.6.5	Souvislost mezi diskretními přechodovými a impulzními funkcemi	449
4.6.6	Podmínky fyzikální realizovatelnosti	452
4.7	BLOKOVÁ ALGEBRA V DISKRÉTNÍCH OBVODECH	453
4.7.1	Příklady ilustrující zapojení bloků diskretních obvodů	453
4.7.2	Z-přenos spojitě pracující části diskretního regulačního obvodu	458
4.7.3	Výpočet Z-přenosu řízení diskretního regulačního obvodu	460
4.8	STABILITA DISKRÉTNÍCH SYSTÉMŮ	461
4.9	ALGORITMY ŘÍZENÍ	469
4.9.1	Regulátory s pevně danou strukturou	469
4.9.1.1	Číslicové PID \Rightarrow PSD regulátory	469
4.9.1.2	Potlačení šumu v signálech diskretního regulačního obvodu	483
4.9.1.3	Doplňující funkce praktických realizací regulátorů	487
4.9.1.4	Výpočtové postupy při analýze a syntéze diskretních regulačních obvodů s číslicovým regulátorem	491
4.9.1.5	Seřizování číslicových regulátorů z kritických hodnot regulátoru a z průběhu přechodových charakteristik regulované soustavy	500

4.9.1.6	Seřizování číslicových regulátorů metodou požadovaného modelu (inverze dynamiky)	506
4.9.2	Obecný lineární regulátor	512
4.9.3	Algebraické metody řízení	517
4.9.3.1	Vybrané operace s polynomy	518
4.9.3.1.1	Dělení polynomů	518
4.9.3.1.2	Faktorizace polynomu	521
4.9.3.2	Diofantická rovnice a její řešení	521
4.9.3.2.1	Řešení diofantické rovnice na základě největšího společného dělitele dvou polynomů	522
4.9.3.2.2	Řešení diofantické rovnice metodou neurčitých koeficientů	523
4.9.3.2.3	Speciální řešení x , y minimalizující stupeň polynomu y	524
4.9.3.3	Zpětnovazební obvod a jeho stabilita	526
5	POPIS SYSTÉMU VE STAVOVÉM PROSTORU	534
5.1	STAVOVÝ MODEL SYSTÉMU	534
5.2	URČENÍ STAVOVÉHO MODELU JEDNOROZMĚROVÉHO SYSTÉMU Z DIFERENCIÁLNÍ ROVNICE RESP. Z PŘENOSU NEBO Z ROVNICE DIFERENČNÍ	538
5.2.1	Diferenciální rovnice neobsahuje derivace vstupní funkce	539
5.2.2	Diferenciální rovnice obsahuje derivace vstupní funkce	544
5.3	MNOHOROZMĚROVÉ SYSTÉMY	547
5.3.1	Soustava diferenciálních rovnic spojitého lineárního mnohorozměrového dynamického systému	548
5.3.2	Určení stavového modelu ze soustavy diferenciálních rovnic spojitého lineárního dynamického systému	550
5.4	URČENÍ PŘENOSOVÉ MATICE SYSTÉMU ZE STAVOVÉHO MODELU	561
5.4.2	Pro jednorozměrový systém	564
5.5	ŘEŠENÍ ROVNIC STAVOVÉHO MODELU	567
5.5.1	Řešení autonomních (volných) systémů	567

5.5.2	Řešení neautonomních systémů	571
5.6	ŘEŠENÍ STABILITY SYSTÉMŮ	572
5.7	STAVOVÉ REGULÁTORY	574
5.8	NĚKTERÉ VLASTNOSTI SYSTÉMŮ	580
5.8.1	Dosažitelnost a říditelnost	580
5.8.2	Pozorovatelnost a rekonstruovatelnost	581
5.8.3	Kanonický rozklad	583
5.8.4	Vzájemná spojení stavových modelů dílčích systémů	587
5.8.4.1	Paralelní zapojení	588
5.8.4.2	Sériové zapojení	589
5.8.4.3	Antiparalelní zapojení	590
5.9	ŘÍZENÍ NELINEÁRNÍHO PODSYSTÉMU METODOU AGREGACE STAVOVÝCH PROMĚNNÝCH	591
5.9.1	Modely standardních nelineárních podsystemů	592
5.9.2	Návrh nerobustního řízení	600
5.9.3	Návrh robustního řízení	610
6	DOPLŇKY	623
6.1	DEFINIČNÍ VZTAHY A ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI LAPLACEOVY A Z TRANSFORMACE	624
6.2	ZÁKLADNÍ SLOVNÍK LAPLACEOVY A Z TRANSFORMACE	626
6.3	ZÁKLADNÍ SLOVNÍK MODIFIKOVANÉ Z TRANSFORMACE	629
6.4	POTŘEBNÉ POZNATKY Z Maticového počtu	630
	DOSLOV	641
	LITERATURA	643
	REJSTŘÍK	649

ZÁKLADNÍ OZNAČENÍ A SYMBOLY

a, a_1, b, b_1	konstanty, vstupní veličiny u logických obvodů
a_i	koefficienty levé strany lineární diferenciální (diferenční) rovnice, koefficienty mnohočlenu ve jmenovateli přenosu
$A(\omega) = \text{mod}G(j\omega) = G(j\omega) $	modul (amplituda) kmitočtového přenosu, grafické vyjádření $A(\omega) =$ amplitudová (modulová) kmitočtová charakteristika
$A_{KČ}$	modul korekčního členu
A_o	modul otevřeného (rozpojeného) regulačního obvodu
A_R	(amplitudové) rezonanční převýšení, modul regulátoru
A_S	modul regulované soustavy
A_w	modul (uzavřeného) regulačního obvodu
A	stavová matice systému (matice u vektoru x v lineární stavové rovnici) řádu n [typu (n, n)]
A_P	matice pozorovatele dimenze n
b_i	koefficienty pravé strany lineární diferenciální (diferenční) rovnice, koefficienty mnohočlenu v čitateli přenosu
B	vstupní matice systému, stavová matice řízení (matice u vektoru u v lineární stavové rovnici) typu (n, r)
C	výstupní matice systému (matice u vektoru x v lineární výstupní rovnici) typu (m, n)
C	propustnost (kapacita) kanálu, kapacita kondenzátoru
c_s	koefficient přenosu integrační regulované soustavy
d	dopravní zpoždění u diskrétních systémů (členů), operátor zpoždění
$d = \frac{z-1}{T}$	komplexní proměnná u obrazu v D transformaci (delta transformaci) [s^{-1}]
d_i	kořeny mnohočlenu s komplexní proměnnou d
D, D	operátor přímé D transformace (delta transformace)
D^{-1}, D^{-1}	operátor zpětné (inverzní) D transformace (delta transformace)
D	výstupní matice řízení (matice u vektoru u v lineární výstupní rovnici) typu (m, r)
D	determinant stupně n , operátor rozptylu, relace zpoždění
D_i	determinanty, subdeterminanty
e	regulační odchylka, základ přirozených logaritmů
$e_v(\infty)$	trvalá (ustálená) regulační odchylka způsobená poruchovou veličinou
$e_w(\infty)$	trvalá (ustálená) regulační odchylka způsobená žádanou veličinou
E	operátor střední hodnoty, obraz regulační odchylky
f	obecná funkce, hustota (rozdělení) pravděpodobnosti, speciální zobrazení
f	obecná pravá strana vektorové stavové rovnice dimenze n

$f = \frac{\omega}{2\pi}$	kmitočet [Hz]
F (s)	obraz definovaný v komplexní proměnné s
F	distribuční funkce
F, F	operátor přímé F transformace (Fourierovy transformace), obecný operátor
F^{-1}, F^{-1}	operátor zpětné (inverzní) F transformace (Fourierovy transformace), obecný inverzní operátor
g	obecná funkce, impulzní (váhová) funkce, speciální zobrazení
g	obecná pravá strana vektorové výstupní rovnice dimenze m
g(t)	(spojitá) impulzní (váhová) funkce, grafické vyjádření $g(t) =$ (spojitá) impulzní (váhová) charakteristika
g(kT)	diskrétní impulzní (váhová) funkce, grafické vyjádření $g(kT) =$ $=$ diskrétní impulzní (váhová) charakteristika
G	přenosová funkce
G	přenosová matice
G(d)	(obrazový) D-přenos (delta přenos)
G(s)	(obrazový) L-přenos (Laplaceův přenos), L-obraz (spojité) impulzní (váhové) funkce
G(z)	diskrétní (obrazový) Z-přenos, Z-obraz diskrétní impulzní (váhové) funkce
G(z, ε), G(z, m)	modifikovaný diskrétní (obrazový) Z-přenos
$G(j\omega) = P(\omega) + jQ(\omega) = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)}$	kmitočtový přenos (F-přenos), grafické vyjádření $G(j\omega) =$ amplitudo-fázová kmitočtová charakteristika
$G_m(j\omega)$	modifikovaný kmitočtový přenos (modifikovaný F-přenos), grafické vyjádření $G_m(j\omega) =$ modifikovaná kmitočtová charakteristika
G_{AC}	přenos akčního členu
G_{ve}	odchylový přenos poruchy
G_{we}	odchylový přenos řízení
G_K	přenos kompenzátoru (kompenzačního členu)
$G_{K\check{C}}$	přenos korekčního členu
G_M	přenos modelu
$G_{M\check{C}}$	přenos měřicího členu
G_N	ekvivalentní přenos nelineárního členu
G_o	přenos otevřeného (rozpojeného) regulačního obvodu
G_P	přenos, přes který působí na regulační obvod poruchová veličina
G_{RP}	přenos pomocného regulátoru
G_R	přenos regulátoru
G_{RC}	celkový přenos regulátoru
G_S	přenos regulované soustavy
G_{SC}	celkový přenos regulované soustavy
G_{SP}	dílčí část přenosu regulované soustavy
G_T	přenos tvarovače (tvarovacího členu)
G_v	přenos poruchy

G_w	přenos řízení
G_v	přenos vzorkovače (vzorkovacího členu)
h	přechodová funkce
h_v	přechodová funkce vyvolaná poruchovou veličinou
h_w	přechodová funkce vyvolaná žádanou veličinou
$h(t)$	(spojitá) přechodová funkce, grafické vyjádření $h(t)$ = (spojitá) přechodová charakteristika
$h(kT)$	diskrétní přechodová funkce, grafické vyjádření $h(kT)$ = diskrétní přechodová charakteristika
H	entropie, Hamiltonova funkce
H_i	Hurtwitzovy determinanty (subdeterminanty), hlavní rohové minory Hessovy matice
H	Hurwitzova matice, Hessova matice
$H(s)$	L-obraz (spojité) přechodové funkce
$H(z)$	Z-obraz diskrétní přechodové funkce
$H(d)$	D-obraz diskrétní přechodové funkce
i	činitel interakce, proud
I	jednotková matice typu (n, n)
I	informační objem (obsah), informační tok, relace integrace
I_i	integrální kritéria kvality regulace
$j = \sqrt{-1}$	imaginární jednotka
J	účelový funkcionál, moment setrvačnosti
J	Jacobiova matice, matice v Jordanově tvaru
k	relativní diskrétní čas
k_i	koeficient přenosu (zisk), zesílení ($ k_i > 1$), tlumení ($ k_i < 1$)
kT	diskrétní čas
k_p, k_R, r_o	zesílení analogového regulátoru
k_{pk}, k_{Rk}, r_{ok}	kritické zesílení analogového regulátoru
k_s	koeficient přenosu (zesílení) proporcionální regulované soustavy
K	kovarianční funkce
K_D	diferenční konstanta (váha diferenční složky) číslicového regulátoru
K_P	proporcionální konstanta (váha proporcionální složky) číslicového regulátoru
K_S	sumační konstanta (váha sumační složky) číslicového regulátoru
K	zpětnovazební matice typu (r, n)
l	dimenze vektoru poruchových veličin \mathbf{v}
L	Lagrangeova funkce, indukčnost cívky
L, L	operátor přímé L transformace (Laplaceovy transformace)
L^{-1}, L^{-1}	operátor zpětné (inverzní) L transformace (Laplaceovy transformace)
$L(\omega) = 20\log A(\omega)$	logaritmický modul (amplituda) kmitočtového přenosu [dB], grafické vyjádření $L(\omega)$ = logaritmická amplitudová (modulová) kmitočtová charakteristika

$L_{K\check{C}}$	logaritmický modul korekčního členu [dB]
L_o	logaritmický modul otevřeného (rozpojeného) regulačního obvodu [dB]
L_R	logaritmické (amplitudové) rezonanční převýšení [dB] logaritmický modul regulátoru [dB]
L_S	logaritmický modul regulované soustavy [dB]
L_w	logaritmický modul (uzavřeného) regulačního obvodu [dB]
m	stupeň mnohočlenu v čitateli přenosu, dimenze vektoru výstupních proměnných y , posunutí u modifikované Z transformace, hmotnost
m_A	amplitudová bezpečnost
$m_L = 20 \log m_A$	logaritmická amplitudová bezpečnost [dB]
M	mnohočlen v čitateli přenosu (kořeny = nuly)
\mathbf{M}	stavová matice diskrétního systému řádu n
\mathbf{M}_R	matice řiditelnosti typu $(n, n \cdot r)$
\mathbf{M}_P	matice pozorovatelnosti typu $(n \cdot m, n)$
n	stupeň charakteristického mnohočlenu, stupeň mnohočlenu ve jmenovateli přenosu, řád diferenciální (diferenční) rovnice, dimenze vektoru stavových proměnných x
N	charakteristický mnohočlen, mnohočlen ve jmenovateli přenosu (kořeny = póly)
$N(j\omega)$	Michajlovova funkce, grafické vyjádření $N(j\omega)$ = Michajlovova charakteristika (Michajlovův hodograf)
$N_p(\omega) = \text{Re}N(j\omega)$	reálná část Michajlovovy funkce, grafické vyjádření $N_p(\omega)$ = reálná část Michajlovovy charakteristiky
$N_q(\omega) = \text{Im}N(j\omega)$	imaginární část Michajlovovy funkce, grafické vyjádření $N_q(\omega)$ = imaginární část Michajlovovy charakteristiky
\mathbf{N}	stavová matice řízení diskrétního systému typu (n, r)
\mathbf{p}	vektor sdružených proměnných dimenze n , vektor Lagrangeových multiplikátorů dimenze n
p	pravděpodobnost
P	výkon
$P(\omega) = \text{Re}G(j\omega)$	reálná část kmitočtového přenosu, grafické vyjádření $P(\omega)$ = reálná část kmitočtové charakteristiky
$P_m(\omega) = \text{Re}G_m(j\omega)$	reálná část modifikovaného kmitočtového přenosu, grafické vyjádření $P_m(\omega)$ = reálná část modifikované kmitočtové charakteristiky
pp	pásmo proporcionality
\mathbf{P}	matice řiditelnosti typu $(n, n \cdot r)$
q	řád integračního členu, řád astatismu (typ) regulačního obvodu, operátor předstihu
q^{-1}, d	operátor zpoždění
Q	kritérium kvality (obecně)
$Q(\omega) = \text{Im}G(j\omega)$	imaginární část kmitočtového přenosu, grafické vyjádření $Q(\omega)$ = imaginární část kmitočtové charakteristiky

$Q_m(\omega) = \text{Im}G_m(j\omega)$	imaginární část modifikovaného kmitočtového přenosu, grafické vyjádření $Q_m(\omega) = \text{imaginární část modifikované kmitočtové charakteristiky}$
Q	matice pozorovatelnosti typu $(n \cdot m, n)$ váhová matice řádu n v kvadratickém účelovém funkcionálu
r	dimenze vektoru řídicích (vstupních) proměnných u , korelační koeficient
r_0, k_p	proporcionální konstanta (váha proporcionální složky, zesílení) analogového regulátoru
r_{-1}, k_i	integrační konstanta (váha integrační složky) analogového regulátoru
r_1, k_D	derivační konstanta (váha derivační složky) analogového regulátoru
R	redundance, odpor rezistoru, korelační funkce
R	váhová matice řádu r v kvadratickém účelovém funkcionálu
$R(j\omega)$	dynamický činitel regulace
$s = \alpha + j\omega, p$	komplexní proměnná, nezávisle proměnná u obrazu v L transformaci (Laplaceově transformaci) $[s^{-1}]$
s_i	kořeny mnohočlenu s komplexní proměnnou s
S	výkonová spektrální hustota
S	váhová matice řádu n v kvadratickém účelovém funkcionálu (spojitý) čas
t_m	doba dosažení maximální hodnoty y_m (maximálního překmitu)
t_o, t_0	doba odezvy, čas v počátku $t = t_0$
t_r	doba regulace
$t_\varphi = \frac{\omega}{\varphi}$	čas odpovídající fázi φ
T	symbol transpozice
$T = \frac{2\pi}{\omega}$	perioda (doba kmitu)
$T, T_v, \Delta t$	vzorkovací perioda
T_d	dopravní zpoždění u spojitých systémů (členů)
T_D	derivační časová konstanta
T_I	integrační časová konstanta
T_{Ik}	kritická integrační časová konstanta
T_i	časová konstanta
$T_k = \frac{2\pi}{\omega_k}$	kritická perioda
T_n	doba náběhu
T_p	doba přechodu, perioda
T_s, T_Σ	náhradní součtová časová konstanta
T_u	doba průtahu
u	akční veličina, řídicí veličina (řízení), vstupní veličina (vstup), výstupní veličina u logických obvodů, napětí

u	vektor řídicích veličin (řízení) dimenze r , vektor vstupních veličin (vstup) dimenze r
u_T	tvorovaná akční veličina
v	poruchová veličina (porucha)
v	vektor poruchových veličin dimenze l
V	Ljapunovova funkce, Bellmanova funkce
w	žádaná veličina, nezávisle proměnná u bilineární transformace
w	vektor žádaných veličin dimenze n
W_k, E_k	kinetická energie
W_p, E_p	potenciální energie
x	stavová veličina (stav), vstupní veličina u logických obvodů
x	vektor stavových veličin (stav) dimenze n
x_r	rovnovážný (klidový) stav dimenze n
y	regulovaná veličina, výstupní veličina (výstup)
y	vektor výstupních veličin (výstup) dimenze m
$y_m = y(t_m)$	maximální hodnota regulované veličiny při překmitu
$z = e^{Ts}$	nezávisle proměnná u obrazu v Z transformaci [-]
Z_1	kořeny mnohočlenu s komplexní proměnnou z
Z, Z	operátor přímé Z transformace
Z^{-1}, Z^{-1}	operátor zpětné (inverzní) Z transformace
Z_e, Z_m, Z_e, Z_m	operátor přímé modifikované Z transformace
$Z_e^{-1}, Z_m^{-1}, Z_e^{-1}, Z_m^{-1}$	operátor zpětné (inverzní) modifikované Z transformace
$\alpha = \text{Re } s$	reálná část komplexní proměnné s
γ	fázová bezpečnost
∂	stupeň mnohočlenu
δ	stupeň stability, operátor δ <i>diference</i> (dopředné relativní <i>diference</i>), variace
$\delta(t)$	(spojitý) Diracův jednotkový impuls
$\delta(kT), \delta(kT_v)$	diskrétní Diracův jednotkový impuls
Δ	přírůstek, operátor dopředné <i>diference</i> , přesnost regulačního pochodu
∇	operátor nabla, operátor zpětné <i>diference</i>
$\eta(t)$	(spojitý) Heavisideův jednotkový skok
$\eta(kT)$	diskrétní Heavisideův jednotkový skok
ε, m	posunutí u modifikované Z transformace
$\varepsilon = \frac{d\omega}{d\varphi}$	úhlové zrychlení [$\text{rad} \cdot \text{s}^{-2}$]
λ_i	vlastní (charakteristická) čísla, kořeny mnohočlenu (obecně), Lagrangeovy multiplikátory
Λ	matice vlastních (charakteristických) čísel řádu n
μ	střední hodnota, funkce příslušnosti
$\omega = \frac{d\varphi}{dt}$	úhlová rychlost [$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$]

$\omega = 2\pi f$	úhlový kmitočet [s^{-1}]
$\omega = \text{Im } s$	imaginární část komplexní proměnné s
ω_m	mezí úhlový kmitočet
$\omega_k = \frac{2\pi}{T_k}$	kritický úhlový kmitočet
ω_0, ω_n	úhlový kmitočet netlumených kmitů, přirozený úhlový kmitočet
ω_R	rezonanční kmitočet
ω_f	úhlový kmitočet řezu
ω_v	vzorkovací kmitočet
$\varphi(\omega) = \arg G(j\omega)$	argument (fáze) kmitočtového přenosu, grafické vyjádření
	$\varphi(\omega)$ = fázová (argumentová) kmitočtová charakteristika
$\varphi_{K\check{C}}$	fáze korekčního členu
φ_o	fáze otevřeného (rozpojeného) regulačního obvodu
φ_R	fáze regulátoru
φ_S	fáze regulované soustavy
φ_w	fáze (uzavřeného) regulačního obvodu
Φ	matice přechodových funkcí
Φ	fundamentální matice (stavová matice přechodu)
σ	směrodatná (střední kvadratická) odchylka
σ^2	rozptyl (variance)
ξ_i	koeficient poměrného tlumení (poměrné tlumení)
κ	překmit
τ_i	časové konstanty

Poznámka: Vektory a matice jsou v textu značeny tučným písmem. Výjimku tvoří matice Φ a ϕ , jejich symboly z technických důvodů jsou označeny podtržením.

HORNÍ INDEXY

*	optimální, vzorkovaný, označení adjungované matice
\times	suboptimální, adaptivní
'	derivace 1. řádu
"	derivace 2. řádu
w	žádaný
+	pseudoinverzní
-1	inverzní

SYMBOLY NAD PÍSMENY

.	(totální) derivace podle času
-	střední hodnota
°	centrovaný
\sim, \wedge	odhad (estimace), kvantovaný

RELAČNÍ ZNAMÉNKA

\approx	přibližně rovno
\doteq	po zaokrouhlení rovno
\cong	korespondence mezi originálem a obrazem
$\stackrel{!}{=}$	musí být rovno
\Rightarrow	implikace
\Leftrightarrow	ekvivalence

GRAFICKÉ ZNAČKY

\bigcirc	(jednonásobná) nula
\odot	dvojnásobná nula
\times	(jednonásobný) pól
\otimes	dvojnásobný pól
	nelineární systém (člen)
	lineární systém (člen)
\rightarrow	jednorozměrný (jednorozměrový) signál
\Rightarrow	mnohorozměrový (vícerozměrný, mnohorozměrný) signál
	součtový člen

ZKRATKY

adj	adjungovaný
arg	argument
dek	dekáda
deg	stupeň
det	determinant
df	definitní, definitnost
dim	dimenze (rozměr)
exp	exponenciální funkce
extr	extremální, extrém
grad	gradient
Im	imaginární, imaginární část
konst	konstantní, konstanta
lim	limita
max	maximální, maximum
min	minimální, minimum
mod	modul
okt	oktáva
rand	náhodný

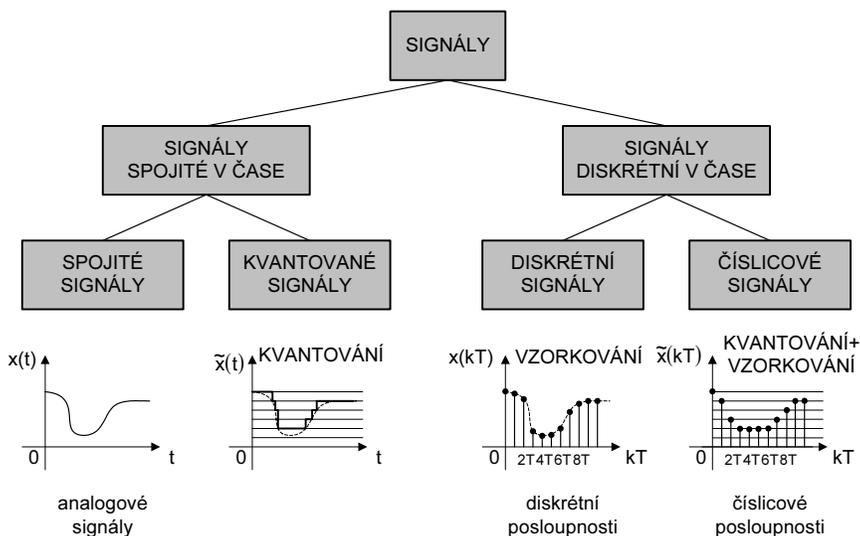
rank	hodnost
Re	reálný, reálná část
sat	nasycení
sign	znaménko, znaménková akce
var	rozptyl

DOPORUČOVANÉ ČESKÉ ZKRATKY A OZNAČENÍ

AČ	akční člen
A/Č, A-Č	analogově číslicový převodník
ADR	adaptivní regulátor
ADRO	adaptivní regulační obvod
AFKCH	amplitudo-fázová kmitočtová charakteristika
AKCH	amplitudová kmitočtová charakteristika
AM	amplitudová modulace
AP	analogový počítač
AR	analogový regulátor
ARO	analogový regulační obvod
AŘ	automatické řízení
ASŘ	automatizovaný systém řízení
BKO	bistabilní klopný obvod
Č/A, Č-A	číslicově analogový převodník
ČP	číslicový počítač
ČR	číslicový regulátor
ČRO	číslicový regulační obvod
DČ	derivační člen
DM	dálkové měření
DO	dálkové ovládání
DP	dynamické programování
DR	dálková regulace, diferenciální (diferenční) rovnice, diskretní regulátor
DRO	diskretní regulační obvod
DŘ	dálkové řízení
DS	dálková signalizace
ER	extremální regulátor
ERO	extremální regulační obvod
ES	extremální soustava
F	filtr
FKCH	fázová kmitočtová charakteristika
KM	kmitočtová modulace
GMK	geometrické místo kořenů
GP	geometrické programování
HDO	hromadné dálkové ovládání

HP	hybridní počítač
HR	hlavní regulátor
CHM	charakteristický mnohočlen
CHR	charakteristická rovnice
I	integrační složka analogového regulátoru, integrační analogový regulátor
IČ	integrační člen
IMS	informační měřicí systém
IO	integrováný obvod
J	jednotka
K	kompensátor (kompenzační člen), kybernetika
KCH	kmitočtová charakteristika
KČ	korekční člen
KLO	kombinační logický obvod
KS	kybernetický systém
LAKCH	logaritmická amplitudová kmitočtová charakteristika
LFKCH	logaritmická fázová kmitočtová charakteristika
LKCH	logaritmická kmitočtová charakteristika
LO	logický obvod
LP	lineární programování
LRO	lineární regulační obvod
M	model
MČ	měřicí člen
MKO	monostabilní klopný obvod
NP	nelineární programování
NRO	nelineární regulační obvod
OM	optimální modul
OZ	operační zesilovač
P	proporcionální složka u regulátoru, proporcionální regulátor
PA	programovatelný automat
PČ	porovnávací člen, počítací člen
PD	proporcionálně derivační analogový regulátor, proporcionálně diferenční číslicový regulátor
PI	proporcionálně integrační analogový regulátor
PID	proporcionálně integračně derivační analogový regulátor
PO	pohon
PR	pomocný regulátor
PRG	program
PS	proporcionálně sumační číslicový regulátor, číslicový PI regulátor
PSD	proporcionálně sumačně diferenční číslicový regulátor, číslicový PID regulátor
R	regulátor
RO	regulační obvod

ROG	regulační orgán
ŘP	řídící počítač
S	regulovaná soustava, sumační složka u číslicového regulátoru, sumační číslicový regulátor, číslicový regulátor I, snímač
SLO	sekvenční logický obvod
SO	symetrické optimum
ST	standardní tvar
T, TČ	tvarovač (tvarovací člen)
TAŘ	teorie automatického řízení
TK	technická kybernetika
TP	technologický proces
TŘ	teorie řízení
ÚČR	ústřední člen regulátoru
V	výroba
V, VČ	vzorkovač (vzorkovací člen), vysílací člen
VTEI	vědeckotechnická informace
V/V	vstup/výstup
Z	zesilovač
ZA	základy automatizace
ZN	Ziegler-Nichols
ZTK	základy technické kybernetiky



O KNIZE

Kniha poskytuje čtenářům, v návaznosti na systémový úvod pro teorii automatického řízení, přehled o analýze a syntéze lineárních regulačních obvodů, nelineárních regulačních obvodů, o diskrétním řízení, o metodách řešení regulačních obvodů ve stavovém prostoru. V doplňcích jsou uvedeny definiční vztahy a základní vlastnosti Laplaceovy transformace a Z transformace včetně Z transformace modifikované. Dále jsou i shrnuty potřebné poznatky z maticového počtu.

Obsah knihy je určen technické veřejnosti zajímavící se o automatické řízení.

Chci vyjádřit poděkování všem, kteří mi byli nápomocni konzultacemi, výměnou názorů při objasňování skutečností i souvislostí předmětného téma, jakož i pomocí při přípravě knihy.

Děkuji za konzultace Doc. RNDr. Jiřímu Karáskovi, CSc., se kterým jsem si ujasňoval i upřesňoval některé skutečnosti z oblasti použitého matematického aparátu.

Děkuji za spolupráci Doc. Ing. Miluši Vítečkové, CSc., která zpracovala odstavce 2.1.6.5, 2.1.6.6, 2.2.3.8, 4.9.1.6. Vyjadřuji jí i poděkování za konzultace při zpracování odstavce 2.1.10.2.

Rovněž děkuji za spolupráci Prof. Ing. Vladimíru Vaškovi, CSc., který zpracoval odstavce 4.9.2 a 4.9.3 i za konzultace při zpracování kapitoly 4.

Oceňuji pomoc svého doktoranda Ing. Pavla Navrátila při dokončovacích pracích na textu.

Významnou pomocí mi byly časté vyjasňování skutečností a výstižné připomínky k obsahu knihy, které vplynuly z recenzní činnosti Prof. Dr.h.c. Ing. Antonína Vítečka, CSc včetně pečlivého pročtení textu. Současně mu děkuji i za příspěvek obsažený v odst. 5.9.

Doc. Ing. Petrovi Vysokému, CSc. děkuji za pozorné přečtení textu a podnětné připomínky.

Konečně děkuji své rodině za podporu a pochopení.

Brno – Zlín,
Prof. Ing. Jaroslav Balátě, DrSc.