

OBSAH

1	ZÁKLADNÍ POJMY POČÍTAČOVÉHO MODELOVÁNÍ	11
1.1	Úvod	11
1.2	Pojem dynamického systému a jeho stavu	13
1.2.1	Pojem stavu v analýze pohybu	14
1.3	Interpretace zkoumaného objektu	16
1.3.1	Objekt a okolí — jejich separabilita	16
1.3.2	Rozlišovací úroveň	17
1.4	Princip kauzality	17
1.4.1	Statická relace	19
1.5	Různé typy definice stavu na objektech	21
1.6	Náhodnost a determinovanost	26
1.7	Dynamický systém	27
1.8	Konvoluční model jednoduché dynamické relace	28
1.9	Dynamická relace spojitá a diskrétní vzhledem k času	29
1.10	Problém neomezenosti intervalu ovlivňujících vstupů	30
1.10.1	Relaxace relace vstup–výstup	31
1.11	Úloha stavu ve vyjádření dynamické relace	31
1.12	Induktivní a deduktivní přístup k formulaci modelu	33
1.12.1	Identifikace modelu objektu	33
1.12.2	Kombinace deduktivního a induktivního přístupu	35
1.12.3	Idealizace objektu	36
2	STAVOVÁ FORMULACE DYNAMICKÉHO SYSTÉMU	37
2.1	Akumulace v objektu a volba stavových proměnných, simultánní integrace	37
2.1.1	Časová integrační konstanta	40
2.1.2	Linearita relace I	40
2.1.3	Přechodové a frekvenční vlastnosti relace I	41
2.2	Struktura změny stavu dané simultánními integracemi, stavová rovnice	43
2.2.1	Výstupní rovnice	45
2.3	Izochronní stavová formulace dynamického systému	46
2.3.1	Stavový prostor a jeho vlastnosti	46
2.4	Soustředění parametrů akumulace	54
2.5	Zpoždění ve vnitřních interakcích objektu	56
2.6	Úloha výstupní rovnice	57
2.7	Dynamická podobnost systémů	60
2.7.1	Normy a vyrovnání rozsahů proměnných	62
2.7.2	Dynamické přizpůsobení	62
2.7.3	Jacobiho matice dynamického systému	62
2.7.4	Normalizace v Jacobiho maticích	64
2.7.5	Dynamická podobnost objektů	66

2.8	Lineární dynamické systémy se soustředěnými parametry	68
2.8.1	Princip superpozice v lineárním dynamickém systému	70
2.9	Diskrétní stavová formulace dynamického systému	78
2.9.1	Stavová rovnice diskrétního dynamického systému	80
2.9.2	Algoritmus rekurentního výpočtu diskrétní změny stavu	82
2.9.3	Výstupní rovnice diskrétního dynamického systému	83
2.9.4	Princip superpozice v lineárním diskrétním systému	83
2.9.5	Příčinková diskrétní formulace lineárního systému	84
2.10	Algebraické smyčky ve struktuře modelu	89
2.11	Soustředěné dopravní zpoždění v dynamickém systému	92
2.11.1	Relace zpoždění D a její vlastnosti	92
2.11.2	Linearita relace D	94
2.11.3	Přechodové a frekvenční vlastnosti relace D	95
2.11.4	Sériové spojení bloků zpoždění	96
2.11.5	Dopravní zpoždění ve struktuře dynamického systému	97
2.12	Stav dynamického systému se zpožděním	99
2.12.1	Spojité a nízochronní stavová formulace dynamického systému se zpožděním	100
2.13	Lineární dynamický systém se zpožděním, superpozice	103
2.14	Diskrétní realizace zpoždění	106
2.14.1	Algoritmus diskrétního zpoždění	107
2.15	Diskrétní stavová formulace dynamického systému se zpožděním	109
2.15.1	Lineární diskrétní dynamický systém se zpožděním	109
3	POHYB DYNAMICKÉHO SYSTÉMU	111
3.1	Existence a jednoznačnost pohybu daného diferenciální stavovou rovnicí	111
3.2	Technická funkce	114
3.3	Zpoždění D – řešení v postupných intervalech	115
3.4	Rovnovážný stav dynamického systému	118
3.4.1	Rovnovážný stav spojitého dynamického systému	119
3.4.2	Rovnovážný stav dynamického systému se zpožděním	122
3.4.3	Singulární bod a jeho typ	123
3.4.4	Rovnovážné stavy nelineárního dynamického systému	126
3.4.5	Statická charakteristika	127
3.4.6	Singulární bod s mezním cyklem	131
3.4.7	Singulární bod na ploše nespojitosti modelu	133
3.4.8	Astatický systém, nevlastní singulární bod	136
3.4.9	Míra podmíněnosti matice dynamiky	139
3.5	Rovnovážný stav diskrétního dynamického systému	141
3.5.1	Řešení rovnice statiky metodou iterací a pohyb diskrétního dynamického systému	143
3.6	Stabilita spojitého pohybu dynamického systému	145
3.6.1	Stabilita rovnovážného stavu	146
3.7	Charakteristická funkce spojitého lineárního dynamického systému	148
3.7.1	Charakteristická rovnice a její kořeny	149
3.7.2	Charakteristická funkce lineárního systému bez zpoždění	151
3.7.3	Michajlovovo–Leonhardovo kritérium stability	153
3.7.4	Vlastní kmity systému a jejich útlum	155
3.7.5	Zpoždění v charakteristické funkci	158
3.8	Kontrola stability pohybu nelineárního systému podle linearizace	161
3.8.1	Nepřímá Ljapunovova metoda	161
3.8.2	Stabilita lokální a globální	162
3.9	Stabilita pohybu diskrétního dynamického systému	164

3.9.1	Charakteristická rovnice lineárního diskrétního systému	164
3.9.2	Spektrální poloměr a jeho odhad	165
3.9.3	Vlastní hodnoty maticové funkce	167
3.9.4	Stabilita chyb řešení	168
3.9.5	Zobrazení roviny μ na rovinu λ	169
3.9.6	Stabilita diskrétního systému se zpožděním	170
3.9.7	Stabilita pohybu nelineárního diskrétního systému	172
3.10	Odhad rychlosti pohybu systému	173
3.10.1	Odhad podle stopy a normy matice dynamiky	173
3.10.2	Index spektrální podmíněnosti a systémy typu stiff	175
3.10.3	Aplikace charakteristické funkce	176
3.10.4	Frekvenční spektrum homogenního pohybu systému	177
3.11	Výpočet koeficientů charakteristické rovnice	178
4	NUMERICKÁ FORMULACE POČÍTAČOVÉHO MODELU	181
4.1	Pojem sériového počítačového modelu	181
4.1.1	Chyby numerického modelu	182
4.1.2	Diskretizace spojitého systému numerickou metodou	184
4.2	Přehled a klasifikace běžných vzorců numerické integrace	186
4.2.1	Koeficienty a řád numerické metody	187
4.2.2	Start numerické metody	189
4.2.3	Zbytková chyba numerické metody	190
4.2.4	Metody Rungovy–Kuttovy	191
4.3	Stabilita numerické metody	193
4.3.1	Stabilita jednouzlového vzorce	194
4.4	Explicitní výpočet podle implicitního vzorce	198
4.4.1	Exponenciální korekce lichoběžníkového vzorce	198
4.5	Iterační metody řešení implicitních vzorců	199
4.5.1	Konvergence iterací korektoru	200
4.5.2	Metody prediktor–korektor	201
4.5.3	Lokální zbytková chyba a modifikátor	203
4.5.4	Řešení implicitních vzorců Newtonovou–Raphsonovou metodou, Gearova metoda	204
4.6	Porovnání numerických metod a volba kroku času	206
4.6.1	Odhad a změna časového kroku	207
4.7	Struktura programu počítačového modelu	210
4.8	Relace modelu dané tabulkou — interpolace	217
4.8.1	Interpolace polynomem 3. stupně	219
4.9	Zpoždění v počítačovém modelu	220
4.9.1	Interpolace polynomem 3. stupně	223
4.9.2	Volání podprogramu zpoždění	225
4.10	Modely s přerušením platnosti relací a typickými nelinearitami	226
4.10.1	Příklady	226
4.10.2	Volba alternativy statické relace	228
4.10.3	Typické nelinearity statické	230
4.10.4	Typické nelinearity s hysterézí	233
4.10.5	Omezení simultánní integrace „přepad“	236
4.11	Ukládání a výstup výsledků	242
4.11.1	Měřítkové úpravy pro grafický výstup	243
4.11.2	Popis grafů a tištěných výsledků	246
4.11.3	Axonometrické zobrazení trojrozměrných výsledků	246
4.11.4	Otáčení zobrazovaného útvaru	248

4.12	Simulační jazyky	251
4.12.1	Popis struktury modelu, strukturní příkazy	252
4.12.2	Příklad simulačního jazyka CSMP 360	256
4.12.3	Interaktivní přístup v simulaci	259
5	MODELY OBJEKTŮ SE SPOJITĚ ROZLOŽENÝMI VLASTNOSTMI	263
5.1	Pojem kontinua	264
5.1.1	Příklady popisu jednorozměrného kontinua parciální diferenciální rovnici	265
5.2	Počáteční a okrajové podmínky	270
5.2.1	Druhy okrajových podmínek	271
5.3	Diskrétní nahrazení polohové proměnné	273
5.3.1	Diskrétní aproximace derivací	274
5.4	Prostorová diskretizace a stavová formulace modelu	277
5.4.1	Intuitivní prostorová diskretizace kontinua	279
5.4.2	Pojem kompartmentu	281
5.5	Časově-prostorově diskrétní model kontinua	282
5.6	Explicitní a implicitní vzorce diskrétního modelu	284
5.7	Volba dílku prostorové diskretizace	285
5.8	Zpoždění jako jev se spojitě rozloženými parametry	286
5.8.1	Náhrada spojitě rozloženého zpoždění soustředěným	290
5.9	Pohyb kontinua popsáný vlnovou rovnici	292
5.10	Řídké matice parametrů modelu	296
6	INDUKTIVNĚ IDENTIFIKOVANÉ RELACE MODELŮ	299
6.1	Experimentální předpoklady identifikace	300
6.1.1	Deterministický a stochastický experiment s objektem	302
6.1.2	Úroveň šumu v deterministickém experimentu	302
6.2	Typy relací vstup–výstup	303
6.3	Metoda nejmenších čtverců	303
6.3.1	Hledisko robustnosti	307
6.3.2	Významnost proměnných, koeficient korelace	308
6.4	Parametrizace přechodové charakteristiky	309
6.4.1	Numerický výpočet frekvenční charakteristiky z přechodové	311
6.4.2	Identifikace koeficientů lineárního modelu	312
6.4.3	Parametrizace postupnou integrací přechodové charakteristiky	316
6.4.4	Předpoklad linearity modelu	318
6.5	Volba stavových proměnných rozkladem spojitě relace V/V	318
6.5.1	Lineární formulace relace V/V	318
6.5.2	Metoda postupné integrace	320
6.5.3	Snižování řádu derivací	324
6.5.4	Rozklad přenosové funkce na kořenové činitele	330
6.5.5	Rozklad přenosu s násobnou konstantou	334
6.6	Diskrétní deterministická relace vstup–výstup	335
6.6.1	Vyjádření relace V/V diferenční rovnici	335
6.6.2	Princip identifikace diferenční rovnice a volba Δt	336
6.7	Identifikace diferenční rovnice metodou nejmenších čtverců	339
6.8	Rozklad diferenční rovnice na stavovou formulaci	342
6.8.1	Rozklad na sériový řetězec zpoždění, SRD-d	342
6.8.2	Rozklad s lineárními kombinacemi vstupu a výstupu, MPI-d	345

6.9	Diskrétní přenos a jeho model	347
6.9.1	Vztah mezi diskretním přenosem a diferenční rovnicí	349
6.10	Stochastická identifikace podle korelačních funkcí	349
7	ANALOGOVÝ MODEL DYNAMICKÉHO SYSTÉMU	352
7.1	Porovnání číslicového a analogového způsobu simulace	353
7.2	Lineární operační jednotky analogového počítače	355
7.2.1	Integrátor a jeho řízení	356
7.2.2	Invertor, sumátor	359
7.2.3	Použití koeficientových potenciometrů	360
7.3	Sestavení lineárního analogového modelu	362
7.4	Prenosová aproximace dopravního zpoždění	366
7.5	Nelineární operační jednotky	368
7.5.1	Násobení a dělení proměnných	371
7.5.2	Nespojitě relace, komparátor	373
7.6	Současný význam a uplatnění analogových modelů	375
7.6.1	Hybridní výpočetní systém	376
7.6.2	Číslicový diferenciální analyzátor	377
8	OPTIMALIZACE PARAMETRŮ DYNAMICKÉHO SYSTÉMU	379
8.1	Formulace úlohy optimalizace parametrů	381
8.1.1	Přípustná oblast parametrů	382
8.1.2	Vzájemná nezávislost parametrů	383
8.2	Kritérium optimality dynamického jevu	384
8.2.1	Hodnocení několika současných pohybů	386
8.3	Extrém funkce kritéria	387
8.3.1	Gradient a stacionární bod funkce kritéria	388
8.3.2	Vázaný extrém funkce kritéria	390
8.4	Vyhledávací metody optimalizace jednoho parametru	393
8.4.1	Metoda zlatého řezu	396
8.4.2	Jednparametrové vyhledávání minima	396
8.4.3	Odhad extrému kvadratickou interpolací	397
8.5	Vyhledávací metody optimalizace několika parametrů	398
8.5.1	Mapovací metoda	401
8.5.2	Cyklická záměna parametrů	402
8.5.3	Diskrétní gradientové metody optimalizace	403
8.5.4	Volba délky kroku gradientové metody	406
8.5.5	Gradientová metoda s optimálním krokem	407
8.5.6	Multimodálnost kritérií a nutnost opakovaného hledání	408
8.5.7	Náhodná optimalizace parametrů	408
8.6	Pokutové funkce kritéria optimality	410
8.7	Řešení okrajové úlohy optimalizační metodou	412
	LITERATURA	414
	REJSTŘÍK	416