

Obsah

Obsah	v
Předmluva	xiii
Glosář	xv
Operační zesilovač	xv
Operační obvod	xx

Část 1 Operační zesilovač

1. Základní pojmy	5
1.1 Operační zesilovač	5
1.2 Operační obvod	7
1.3 Ideální operační zesilovač a ideální operační obvod	8
Shrnutí	9
Literatura	9
2. Parametry operačního zesilovače	13
2.1 Lineární parametry a lineární model	13
2.1.1 Vstupní rušivé zdroje	15
2.1.2 Vstupní ofset a drift	16
2.1.3 Vstupní šum	19
2.1.4 Zesílení, Diferenční vstupní odpor a výstupní odpor	21
2.1.5 Potlačení souhlasného napětí. Souhlasné vstupní odpory	26
2.2 Nelineární parametry	29
2.3 Doba ustálení a doba zotavení	31
Shrnutí	33
Literatura	33

3.	Vlastnosti operačního zesilovače	37
3.1	Bipolární vstupní stupeň	37
3.1.1	Vstupní zbytkové napětí	40
3.1.2	Teplotní drift vstupního zbytkového napětí	42
3.1.3	Vliv dalších zesilovacích stupňů	46
3.1.4	Vstupní klidový a vstupní zbytkový proud	46
3.1.5	Vstupní šum	48
3.1.6	Diferenční vstupní odpor	54
3.1.7	Potlačení souhlasného napětí. Souhlasné vstupní odpory	54
3.2	Unipolární vstupní stupeň	57
3.2.1	Vstupní zbytkové napětí	64
3.2.2	Teplotní drift vstupního zbytkového napětí	65
3.2.3	Sekundární vlivy	69
3.2.4	Potlačení souhlasného napětí	70
3.2.5	Vstupní klidový proud	71
3.2.6	Vstupní šum	72
3.3	Konstrukční úpravy vstupního stupně	74
3.3.1	Aktivní kolektorová zátěž	75
3.3.2	Složený diferenční stupeň	76
3.3.3	Bootstrapovaný diferenční stupeň	77
3.3.4	Vnější nulování vstupního zbytkového napětí	78
3.3.5	Vnitřní kompenzace vstupních klidových proudů	80
3.3.6	Vstupní ochrana	82
3.4	Výstupní stupeň	83
3.4.1	Základní zapojení	83
3.4.2	Konstrukční úpravy	86
3.4.3	Výstupní ochrana	86
3.5	Frekvenční kompenzace	89
3.5.1	Dynamické vlastnosti dvoustupňového operačního zesilovače	90
3.5.2	Konstrukční příklady	95
	Shrnutí	96
	Literatura	100

Kapitola **3**

VLASTNOSTI OPERAČNÍHO ZESILOVAČE

3.1	Bipolární vstupní stupeň	37
3.2	Unipolární vstupní stupeň	57
3.3	Konstrukční úpravy vstupního stupně	74
3.4	Výstupní stupeň	83
3.5	Frekvenční kompenzace	89

Kapitola 4

IDEÁLNÍ OPERAČNÍ OBVOD

4.1	Typy operačních obvodů	109
4.2	Paralelní operační obvod	113
4.3	Sériový operační obvod	123
4.4	Složený operační obvod	126

Kapitola 5

ANALÝZA REÁLNÉHO OPERAČNÍHO OBVODU

5.1	Zpětnovazební faktor	143
5.2	Operační rovnice	151
5.3	Zesílení	156
5.4	Dynamické chování vybraných operačních obvodů	166

Kapitola 6

STATICKÉ A DYNAMICKÉ CHYBY VE FREKVENČNÍ OBLASTI

6.1	Vektorová, amplitudová a fázová chyba	190
6.2	Statická chyba	197
6.3	Dynamická chyba	204
6.4	Měření chyb	218

Kapitola 7

DYNAMICKÉ CHYBY V ČASOVÉ OBLASTI

7.1	Doba ustálení	227
7.2	Frekvenční dvojče	234
7.3	Kapacita sčítacího uzlu	244
7.4	Rychlostní chyba	249
7.5	Měření doby ustálení	253

Kapitola 8

VSTUPNÍ A VÝSTUPNÍ IMPEDANCE

8.1	Blackmanův impedanční vztah	265
8.2	Vstupní impedance	268
8.3	Výstupní impedance	273

Kapitola 9

OFSET

9.1	Základní vztahy	281
9.2	Ofset jednoduchých operačních obvodů	288
9.3	Ofset způsobený zpětnovazební sítí	316
9.4	Nulování ofsetu	324

Kapitola 10

ŠUM

10.1	Filtrace šumu	335
10.2	Nízkofrekvenční šum	346
10.3	Širokopásmový šum	360
10.4	Interferenční šum	363

Kapitola 11

STABILITA

11.1	Zpětnovazební stabilita	371
11.2	Frekvenční kompenzace	399

Kapitola 12

DOBŘÉ LABORATORNÍ PRAKTIKY

12.1	Vývojové praktiky	422
12.2	Hledání závad	425

4. Ideální operační obvod	109
4.1 Typy operačních obvodů	109
4.1.1 Typ zpětné vazby	109
4.1.2 Linearita	111
4.1.3 Frekvenční obor	112
4.1.4 Aplikační určení	112
4.2 Paralelní operační obvod	113
4.2.1 Proudově napěťový převodník	113
4.2.2 Proudový zesilovač	115
4.2.3 Napěťový invertor	116
4.2.4 Sumátor	117
4.2.5 Obecný invertor	118
4.2.6 Odporový T-článek	119
4.2.7 Logaritmický zesilovač	120
4.2.8 Diodový omezovač	121
4.2.9 Analogový spínač	122
4.2.10 Integrátor	123
4.3 Sériový operační obvod	123
4.3.1 Napěťový zesilovač	123
4.3.2 Napěťový sledovač	125
4.3.3 Napěťově proudový převodník	125
4.4 Složený operační obvod	126
4.4.1 Signálové buzení obou vstupů	126
4.4.2 Násobná zpětná vazba	130
4.4.3 Kombinace záporné a kladné zpětné vazby	130
4.4.4 Operační obvody s několika zesilovači	135
4.4.5 Nestandardní operační obvody	137
Shrnutí	138
Literatura	138
5. Analýza reálného operačního obvodu	141
5.1 Zpětnovazební faktor	143
5.1.1 Definice zpětnovazebního faktoru	143
5.1.2 Příklady výpočtu zpětnovazebního faktoru	146

Dodatek **A**

SOUHRNNÉ TABULKY

A1	Ideální vlastnosti	432
A2	Zpětnovazební faktor	434
A3	Zesílení	436
A4	Statická chyba	438
A5	Vstupní impedance	440
A6	Výstupní impedance	442
A7	Ofset (nevyvážený obvod)	444
A8	Ofset (vyvážený obvod)	448

Dodatek **B**

OPERAČNÍ ZESILOVAČ S PROUDOVOU ZPĚTNOU VAZBOU

B.1	Napěťová a proudová zpětná vazba	455
B.2	Neinvertující zesilovač	463
B.3	Kapacity zpětnovazební sítě	469
B.4	Ofset a šum	477

Dodatek C

ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA (EMC)

C.1	Normy EMC	481
C.2	Usměrněné vysokofrekvenční rušení	483
C.3	Konstrukce odolného operačního obvodu	487

5.2	Operační rovnice	151
5.2.1	Základní tvar operační rovnice	151
5.2.2	Příklad	154
5.3	Zesílení	156
5.3.1	Základní tvar zesílení	156
5.3.2	Zesílení a zpětnovazební faktor	158
5.3.3	Frekvenční charakteristika zesílení	159
5.3.4	Příklady výpočtu zesílení	161
5.4	Dynamické chování vybraných operačních obvodů	166
5.4.1	Neinvertující zesilovač	167
5.4.2	Napěťový invertor	170
5.4.3	Integrátor	171
5.4.4	Řízený zdroj proudu	174
5.4.5	Vliv dopředného přenosu	176
	Shrnutí	181
	Literatura	183
6.	Statické a dynamické chyby ve frekvenční oblasti	189
6.1	Vektorová, amplitudová a fázová chyba	190
6.1.1	Definice chyb	190
6.1.2	Dynamické chyby jednopólového zpožďovacího článku	193
6.1.3	Vliv statické chyby	195
6.1.4	Filtr druhého řádu	196
6.2	Statická chyba	197
6.2.1	Chyba způsobená konečným stejnosměrným zesílením	197
6.2.2	Chyba způsobená konečným stejnosměrným potlačením	198
6.2.3	Chyba způsobená konečným souhlasným vstupním odporem	199
6.2.4	Chyba způsobená zpětnovazební sítí	200
6.2.5	Kompenzace statických chyb	203
6.3	Dynamická chyba	204
6.3.1	Chyba způsobená konečným zesílením rozpojené smyčky	204
6.3.2	Chyba způsobená dopředným přenosem	210
6.3.3	Chyba způsobená souhlasnou vstupní kapacitou	212
6.3.4	Kompenzace dynamických chyb	213

6.4	Měření chyb	218
6.4.1	Měření statických chyb	218
6.4.2	Měření dynamických chyb	219
	Shrnutí	221
	Literatura	223
7.	Dynamické chyby v časové oblasti	227
7.1	Doba ustálení	227
7.1.1	Exponenciální skoková odezva	228
7.1.2	Vliv mezní rychlosti přeběhu	230
7.1.3	Vliv zesílení operačního obvodu	233
7.2	Frekvenční dvojče	234
7.2.1	Kvalitativní vysvětlení dlouhého doběhu	234
7.2.2	Lineární analýza	240
7.3	Kapacita sčítacího uzlu	244
7.3.1	Ustálení napětového invertoru	245
7.3.2	Kompenzace kapacity sčítacího uzlu	248
7.4	Rychlostní chyba	249
7.4.1	Rychlostní chyba neinvertujícího zesilovače	251
7.4.2	Rychlostní chyba integrátoru	253
7.5	Měření doby ustálení	253
	Shrnutí	260
	Literatura	261
8.	Vstupní a výstupní impedance	265
8.1	Blackmanův impedanční vztah	265
8.2	Vstupní impedance	268
8.2.1	Proudová a napětová definice vstupní impedance	268
8.2.2	Příklady výpočtu vstupní impedance	269
8.3	Výstupní impedance	273
8.3.1	Proudová a napětová definice výstupní impedance	273
8.3.2	Příklady výpočtu výstupní impedance	274
	Shrnutí	277
	Literatura	278

9.	Ofset	281
9.1	Základní vztahy	281
9.1.1	Výstupní a vstupní rušení operačního obvodu	281
9.1.2	Šumové zesílení a zpětnovazební faktor	283
9.1.3	Zjednodušený výpočet výstupního a vstupního rušení	284
9.1.4	Ofset operačního obvodu	288
9.2	Ofset jednoduchých operačních obvodů	288
9.2.1	Napěťový invertor	288
9.2.2	Odporové vyvážení operačního obvodu	292
9.2.3	Interakce zesílení a ofsetu. Převážený invertor	295
9.2.4	Sumátor	297
9.2.5	I/V převodník	299
9.2.6	Odporový T-článek	300
9.2.7	Napěťový sledovač	302
9.2.8	Neinvertující zesilovač	304
9.2.9	Proudový zesilovač	305
9.2.10	Derivátor	306
9.2.11	Analogová paměť	308
9.2.12	Integrátor	309
9.2.13	Rozdílový zesilovač	311
9.2.14	Měřicí zesilovač	312
9.2.15	Logaritmický zesilovač	314
9.3	Ofset způsobený zpětnovazební sítí	316
9.3.1	Termoelektrická napětí	317
9.3.2	Napěťové úbytky	320
9.3.3	Svodové proudy	320
9.4	Nulování ofsetu	324
9.4.1	Nulování napěťové složky	327
9.4.2	Nulování proudové složky	328
	Shrnutí	328
	Literatura	330
10.	Šum	335
10.1	Filtrace šumu	335
10.1.1	Šumová šířka pásma	336
10.1.2	Jednopolová dolní propust	337

10.1.3	Násobná dolní propust m -tého řádu	340
10.1.4	Butterworthova dolní propust m -tého řádu	342
10.1.5	Jednoduchá pásmová propust	342
10.1.6	Filtrace barevného šumu	343
10.2	Nízkofrekvenční šum	346
10.2.1	Šum napěťového sledovače	348
10.2.2	Vliv souhlasné vstupní kapacity	352
10.2.3	Teoretická mez měření šumového proudu	353
10.2.4	Šum I/V převodníku	354
10.2.5	Vliv kapacit operačního obvodu	358
10.3	Širokopásmový šum	360
10.3.1	Šum napěťového invertoru	360
10.3.2	Rezonanční posílení šumu	361
10.4	Interferenční šum	363
	Shrnutí	365
	Literatura	366
11.	Stabilita	371
11.1	Zpětnovazební stabilita	371
11.1.1	Absolutní stabilita. Nyquistovo kritérium stability	372
11.1.2	Relativní stabilita. Fázová a amplitudová bezpečnost	374
11.1.3	Odvozené ukazatele relativní stability. Rezonanční převýšení a poměrný překmit	378
11.1.4	Operační obvod v -tého řádu	382
11.1.5	Operační obvod druhého řádu	387
11.1.6	Výstupní kapacitní zátěž	393
11.2	Frekvenční kompenzace	399
11.2.1	Kompenzace derivátoru	399
11.2.2	Izolace kapacitní zátěže	401
11.2.3	Kompenzace kapacity sčítacího uzlu	407
11.2.4	Operační obvod s boosterem	410
11.2.5	Kompenzace operačního zesilovače	411
11.2.6	Blokování napájecích přívodů	413
11.2.7	Praktická stabilizace operačního obvodu	414
	Shrnutí	415
	Literatura	417

12. Dobré laboratorní praktiky	421
12.1 Vývojové praktiky	422
12.1.1 Funkční návrh	422
12.1.2 Zapojení funkčního vzoru	422
12.1.3 Zkoušení funkčního vzoru	423
12.1.4 Dotažení funkčního vzoru	423
12.1.5 Vypracování výrobních podkladů	424
12.2 Hledání závad	425
12.2.1 Stejnosečné závady	425
12.2.2 Střídavé závady	427
Shrnutí	428
Literatura	428
A. Souhrnné tabulky	431
A1 Ideální vlastnosti	432
A2 Zpětnovazební faktor	434
A3 Zesílení	436
A4 Statická chyba	438
A5 Vstupní impedance	440
A6 Výstupní impedance	442
A7 Ofset (nevyvážený obvod)	444
A8 Ofset (vyvážený obvod)	448
B. Operační zesilovač s proudovou zpětnou vazbou	455
B.1 Napěťová a proudová zpětná vazba	455
B.2 Neinvertující zesilovač	463
B.3 Kapacity zpětnovazební sítě	469
B.4 Ofset a šum	477
Literatura	477
C. Elektromagnetická kompatibilita (EMC)	481
C.1 Normy EMC	481
C.2 Usměrněné vysokofrekvenční rušení	483
C.3 Konstrukce odolného operačního obvodu	487
Rejstřík	479

Kapitola 1

ZÁKLADNÍ POJMY

1.1	Operační zesilovač	5
1.2	Operační obvod	7
1.3	Ideální operační zesilovač a ideální operační obvod	8

Kapitola 2

PARAMETRY OPERAČNÍHO ZESILOVAČE

2.1	Lineární parametry a lineární model	13
2.2	Nelineární parametry	29
2.3	Doba ustálení a doba zotavení	31