

Jiří Dostál

OPERAČNÍ ZESILOVAČE

Praha 2005



Kniha je praktickou příručkou pro uživatele operačních zesilovačů. Orientačně probírá konstrukci, důkladně se věnuje obecným zásadám analýzy a syntézy operačních obvodů.

Kniha je určena technikům a inženýrům, kteří se zabývají návrhem elektronických měřicích, automatizačních a laboratorních zařízení.

Jiří Dostál

Operační zesilovače

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. Předkládané informace jsou zveřejněny bez ohledu na případné patenty třetích osob. Nároky na odškodnění na základě změn, chyb nebo vynechání jsou zásadně vyloučeny.

Všechny registrované nebo jiné obchodní známky použité v této knize jsou majetkem jejich vlastníků. Uvedením nejsou zpochybněna z toho vyplývající vlastnická práva.

Veškerá práva vyhrazena

© Jiří Dostál, Praha 2005

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

Jiří Dostál: OPERAČNÍ ZESILOVAČE

BEN – technická Literatura, Praha 2005

1. vydání

ISBN 80-7300-049-0

Mé paní Věře

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

Část 2 Operační obvod

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

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 napěťového 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 napěťová definice vstupní impedance	268
8.2.2	Příklady výpočtu vstupní impedance	269
8.3	Výstupní impedance	273
8.3.1	Proudová a napěťová 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 napětového 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 napětového 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 ν -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 Stejnoseměrné 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

Předmluva

Tato kniha je věnována operačnímu zesilovači – nejtvárnějšímu zesilovači, jaký byl vynalezen. Neponechává bez povšimnutí snad žádnou otázku, která může provázet použití operačního zesilovače v praktické situaci, a nabízí přiměřenou odpověď. Výklad se nezříká matematiky, pomáhá-li k pochopení, a doplňuje ji komentářem a praktickým doporučením, v očekávání, že tento způsob přiblíží knihu širšímu okruhu čtenářů.

Látka knihy je rozdělena do dvanácti kapitol ve dvou částech. První tři kapitoly první části se týkají samotného operačního zesilovače, jeho vlastností a konstrukce v míře předpokládaného zájmu. Druhá část, těžiště knihy, je psána jako konfrontace operačního obvodu s ideálním vzorem. Každá kapitola se soustřeďuje na jeden způsob jeho skutečného projevu při idealizaci ostatních: na statické a dynamické chyby ve frekvenční a v časové oblasti, na vstupní a výstupní impedanci, na ofset, šum a stabilitu. Poslední kapitola shrnuje osvědčené laboratorní praktiky.

Výklad doplňuje na 250 obrázků, grafů a oscilogramů a každou kapitolu uzavírá stručné shrnutí. Příležitostně použití knihy usnadňuje osm souhrnných tabulek, ve kterých jsou soustředěny výpočtové vzorce nejčastějších operačních obvodů. Formou dodatku je zmíněn operační zesilovač s proudovou zpětnou vazbou.

Kniha je revidovaným vydáním dřívějšího textu (J. Dostál, *Operační zesilovače*, SNTL, Praha, 1981). Vznikla souběžně s mým působením ve Výzkumném ústavu matematických strojů v Praze (1964–1995) a těží hodně z jeho myšlenkového a hmotného zázemí. Je také odrazem podnětů, které jsem přijímal od svých přátel ve výzkumných ústavech a v průmyslu. Přímou se na její podobě podílel doc. Ing. Miroslav Pacák, CSc. (1911–1988) z Ústavu fyzikální chemie a elektrochemie J. Heyrovského ČSAV v Praze, který ji četl v rukopise a svými radami a výhradami se zasloužil o její věcnou a jazykovou stránku.

K současné podobě knihy velmi přispěl svými poznámkami a doplňky Robert A. Pease z National Semiconductor Corp., Santa Clara, California, který se podílel na přípravě rukopisu anglického vydání knihy (J. Dostál, *Operational Amplifiers*, 2nd ed., Butterworth-Heinemann, Boston, 1993).

Při konečné úpravě rukopisu byly využity mnohé dobré připomínky recenzenta doc. Dr. Ing. Josefa Punčocháře z Fakulty elektrotechniky a informatiky VŠB–TU Ostrava.

Je mi milou povinností poděkovat Liboru Kubicovi z nakladatelství BEN – technická literatura za vstřícný přístup při zdoluhavé přípravě rukopisu. Obzvláštní poděkování náleží redaktoru Janu Paroulkovi za obtížnou sazbu knihy.

Praha, prosinec 2004

Jiří Dostál

