

Josef Punčochář

OPERAČNÍ ZESILOVAČE

V ELEKTRONICE

5. vydání



Kniha je úvodem do problematiky a není rozhodně vyčerpávající. To ani není možné. Vždyť při aplikacích operačních zesilovačů lze projít celou elektronikou. Spolu s citovanou literaturou však dává dostatečnou představu o tom, jak je třeba (a možné) s nimi pracovat.

Vlastní teorie operačních zesilovačů napětových bude uváděna pouze v nezbytně nutné míře. Hlavní pozornost je věnována aplikacím. Čtenář s hlubším zájmem však nalezne potřebnou teorii ve světově uznávané knize Ing. Jiřího Dostála, CSc.: Operační zesilovače [4]. Značná pozornost je však věnována principům moderních zesilovacích struktur.

Matematický aparát je používán v míře nutné pro pochopení základních aplikací operačních zesilovačů a četné příklady a úkoly ozřejmí jeho použití.

Doufám, že kniha poslouží konstruktérům elektronických obvodů, studentům elektronických oborů i vyspělým zájemcům z řad „amatérských“ elektroniků.

V Rožnově pod Radhoštěm
28. 11. 2001

autor

Josef Punčochář

OPERAČNÍ ZESILOVAČE V ELEKTRONICE

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 jsou zveřejněna 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

© Ing. Josef Punčochář, Praha 1996–2002

Nakladatelství BEN – technická literatura, Věšínova 5, Praha 10

Josef Punčochář: Operační zesilovače v elektronice

BEN - technická literatura, Praha 2002

5. vydání

ISBN 80-7300-058-X

OBSAH

PŘEDMLUVA	11
I. ÚVOD DO PROBLEMATIKY	13
1. Proč operační zesilovač	13
2. Rozdílový operační zesilovač napěťový	14
3. Ideální operační zesilovač	14
4. Neinvertující zapojení s ideálním operačním zesilovačem	17
5. Neinvertující zapojení s neideálním operačním zesilovačem	20
6. Jak ovlivňuje neinvertující zapojení operačního zesilovače předcházející obvody?	23
7. Invertující zapojení operačního zesilovače	24
8. Jak ovlivňuje invertující zapojení operačního zesilovače předcházející obvody?	28
9. Co se skrývá v symbolické značce?	29
10. Jak skutečně zesiluje?	31
11. Když nejsou tranzistory stejné	33
12. Za co může korekční kapacita?	35
13. Základní údaje v katalogu	39
14. Závěrečná poznámka	42
II. REÁLNÝ OPERAČNÍ ZESILOVAČ	44
15. Lineární parametry a model OZ	44
16. Nelineární a dynamické parametry, provozní vlastnosti	49
17. Kmitočtové vlastnosti zesilovače	52
18. Příklady konstrukce reálného operačního zesilovače	56
18.1. Bipolární operační zesilovače	57
18.2. Operační zesilovače s tranzistory řízenými polem	59
19. Rozdělení operačních zesilovačů	61
III. ZPĚTNÁ VAZBA, STABILITA A KOREKCE	63
20. Zpětná vazba a Nyquistovo kritérium stability	63
20.1. Korekce operačních zesilovačů	71
20.2. Korekce na vstupu OZ	72
20.3. Korekce ve „vnitřních“ bodech OZ	73
20.4. Korekce kapacity zátěže	74
20.5. Výběr korekce	76
21. Vliv záporné zpětné vazby na vlastnosti zesilovače	78
21.1. Změna zesílení A_z se změnou A	82
21.2. Potlačení vlivu šumů a poruch	83

21.3	Vliv zpětné vazby na zkreslení	84
21.4	Vliv zpětné vazby na vstupní impedanci	84
21.5	Vliv zpětné vazby na výstupní impedanci	86
21.6	Aplikace na operační zesilovače	88
IV.	DYNAMICKÉ VLASTNOSTI OZ A JEJICH SOUVISLOST S ČINITELM NELINEÁRNÍHO ZKRESLENÍ	97
22.	Omezení proudu - příčina konečné rychlosti přeběhu i zkreslení	98
23.	Kritérium pro určení rychlosti přeběhu pro zesilovače NF	100
V.	ŠUMY OPERAČNÍCH ZESILOVAČŮ	103
24.	„Sečítání šumů“	103
25.	Šumová šířka pásma	105
26.	Druhy šumu	106
27.	Výpočet výstupního šumového napětí a reálné OZ	108
28.	Šumy poruch	110
29.	Princip konstrukce zesilovačů s malými šumy	113
VI.	ZÁSADY PRO PRÁCI S OPERAČNÍMI ZESILOVAČI	117
30.	Statická elektřina	117
31.	Ochrana vstupů a výstupů	118
32.	Napájení OZ	120
33.	Ošetření napájecích napětí a zásady zemnění	121
34.	Kompenzace parazitních kapacit spojů	130
35.	Kompenzace napěťové a proudové nesymetrie vstupů	131
36.	Zvětšení proudového a napěťového rozsahu	133
37.	Rozšíření pracovní oblasti pomocí stejného zesilovače	136
37.1	Rozšíření frekvenčního rozsahu	137
37.2	Zvětšení výstupního proudu	139
38.	Výběr operačního zesilovače	141
39.	Boucherotův člen	141
39.1	Transport náboje přes kapacitu	142
39.2	Klidový proud I_{CCO} , příčné přepínací proudy	145
39.3	Měření zesilovačů bez zátěže	146
39.4	Závěr	148
VII.	ZÁKLADNÍ ZAPOJENÍ S OPERAČNÍMI ZESILOVAČI	152
40.	Invertující a neinvertující zesilovač	152
	Úkol 40.1 Stanovení přenosu neinvertujícího zesilovače	158
	Úkol 40.2 Ztrátový výkon a oteplení přechodu	160
	Úkol 40.3 Frekvenční závislost zesílení a doba náběhu t_n	161

	Úkol 40.4 Určení korekční kapacity	162
	Úkol 40.5 Výpočet korekční kapacity	166
	Úkol 40.6 Úhel fázové rezervy	167
41.	Součtový invertující zesilovač	168
42.	Rozdílový zesilovač	168
	Úkol 42.1 Současná realizace součtu a rozdílu	171
43.	Rozdílový zesilovač s velkým vstupním odporem (přístrojový)	173
44.	Integrační zesilovač	174
	Úkol 44.1 Integrační obvod s „vybitím“	177
45.	Derivační zesilovač	180
46.	Logaritmický zesilovač	182
	Úkol 46.1 Stabilita logaritmického zesilovače	183
47.	Exponenciální převodník „zpětnovazební“	187
	Úkol 47.1 Realizace exponenciálního převodníku	188
48.	Obvod umocňování napětí	189
49.	Zesilovač s exponenciálním řízením zesílení	190
50.	Funkční generátor	191
51.	Analogová násobička	192
52.	Jednocestný usměrňovač	195
53.	Precizní dvoucestný usměrňovač	196
54.	Rychlý jednocestný usměrňovač	198
55.	Doba rozpojení diodového typu zpětné vazby operačního zesilovače	199
56.	Vrcholový detektor	210
57.	Precizní omezovač	211
	Úkol 57.1 Oboustranný omezovač	213
	Úkol 57.2 Symetrický omezovač	214
58.	Obnovitel stejnosměrné složky řízený napětím	215
59.	Zdroje napětí	218
	Úkol 59.1 Stabilizátor napětí (zvětšený výstupní proud, omezení proudu)	221
	Úkol 59.2 Stabilizátor napětí	223
	Úkol 59.3 Číslicově řízený zdroj napětí	227
	Úkol 59.4 Stabilizátor napětí s omezením výkonové ztráty	228
	Úkol 59.5 Vlečný (sledovací) stabilizátor napětí	231
60.	Zdroje proudu	233
	Úkol 60.1 Zdroj proudu s uzemněnou zátěží	236
	Úkol 60.2 Zdroj proudu pro malé hodnoty výstupního proudu	238
	Úkol 60.3 Zdroj proudu s uzemněnou zátěží (Howlandův)	240
61.	Komparátory	242
	Úkol 61.1 Schmittův klopný obvod	248
62.	Převodníky proud - napětí	250
63.	Amplitudový selektor	251

64.	Indikátor napětí (okénkový diskriminátor).....	252
65.	Zesilovače s nastavitelným zesílením	253
66.	Nastavení amplitudy a polarity signálu jediným potenciometrem	256
	Úkol 66.1 Přepínač polarity zesílení	261
	Úkol 66.2 Analogový spínač s nulovým výstupním odporem	262
67.	Multiplexor (přepínač) analogových signálů	263
68.	Vzorkovací zesilovač	265
69.	Můstkový zesilovač	267
70.	Kapacitní násobič (řízený)	269
71.	Syntetická indukčnost (gyrátor)	270
72.	Lineární převodník teploty na napětí	271
	Úkol 72.1 Lineární převodník teploty na napětí	272
73.	Dvou vodičový snímač (čidlo).....	274
74.	Optoelektronický převodník	275
75.	Monostabilní obvod	276
76.	Astabilní obvody	277
	Úkol 76.1 Generátor obdélníkového napětí s nastavitelnou střídou ...	288
	Úkol 76.2 Číslicově (napětově) řízený generátor pilového napětí ...	289
77.	Kompresní zesilovače	292
78.	Generátory harmonických signálů (oscilátory)	293
78.1	Generátor s fázovým posuvem 180° ve zpětnovazební smyčce	304
79.	Převodníky napětí - frekvence	307
80.	Základní měřicí zapojení operačních zesilovačů	316
	Úkol 80.1 Zapojení pro určení U_{IO} , I_{IB} , I_{IO}	316
	Úkol 80.2 Vliv omezení výstupního proudu (I_{omax}) na výstupní napětí ...	318
	Úkol 80.3 Zapojení pro určení zesílení bez zpětné vazby - $ A_v $	318
	Úkol 80.4 Zapojení pro určení vlivu změn napájecího napětí	319
	Úkol 80.5 Ekvivalentní napětí vstupního šumu	320
	Úkol 80.6 Přeslech mezi zesilovači	321
81.	Měření ss proudového zesílení tranzistorů	322
VIII.	OPERAČNÍ ZESILOVAČE V TECHNICE NF	326
VIIIa.	FILTRY S OZ (AKTIVNÍ FILTRY)	326
82.	Popis přenosových charakteristik	326
82.1	Dolní propusti (aproximace)	329
	Butterworthova aproximace (Butterworthovy filtry)	329
	Čebyševova aproximace (Čebyševovy filtry)	332
	Besselova aproximace (Besselovy filtry, Thomsonovy)	335
82.2	Minimální řád dolní propusti	337
82.3	Horní propusti (aproximace)	338
83.	Realizace přenosových funkcí typu DP 1. a 2. řádu a řazení do kaskád ...	340
	Úkol 83.1 Aktivní dolní propust 1. řádu (integrátor)	348

Úkol 83.2 Dolní propust 2. řádu (zesilovač invertující - - s konečným zesílením K - filtr Sallen - Key)	351
Úkol 83.3 Butterworthova dolní propust 2. řádu	355
Úkol 83.4 Číslicově řízená dolní propust.....	356
84. Realizace přenosových funkcí typu HP 1. a 2. řádu a řazení do kaskád ...	358
Úkol 84.1 Horní propust (derivátor)	364
Úkol 84.2 Horní propust 2. řádu	365
Úkol 84.3 Číslicově řízená horní propust	367
85. Jiné typy filtrů	368
86. Realizace PP 2. řádu	372
87. Vliv prvního pólu operačního zesilovače na vlastnosti pásmové propusti (s invertujícím zesilovačem)	373
87.1 Analýza zapojení	374
87.2 Zatížení výstupu zesilovače, vstupní impedance	376
87.3 Zapojení s reálnými operačními zesilovači	377
87.4 Postup návrhu při $C_3 = C_4 = C$	380
87.5 Postup návrhu při $C_3 \neq C_4, R_2 = \infty$	382
87.6 Závěr	382
Úkol 87.1 Číslicově řízená pásmová propust a dolní propust 2. řádu ..	385
Úkol 87.2 Napětím řízená pásmová propust a dolní propust 2. řádu ..	387
88. Pásmové zádrže	388
89. Realizace filtrů 2. řádu se třemi (čtyřmi) OZ (state variable)	391
90. Fázovací články	398
91. Pásmová propust s vazbou typu „bootstrap“	400
91.1 Princip činnosti pásmové propusti	400
91.2 Stabilita struktury	403
91.3 Realizace pásmové propusti s operačními zesilovači	404
92. Korektory	409
VIIIb. VÝKONOVÉ ZESILOVAČE	413
IX. ZÁKLADNÍ STRUKTURY ZESILOVAČŮ	416
93. Diferenční napěťový operační zesilovač - shrnutí	416
94. Nortonův zesilovač	419
95. Zesilovače s proudovou zpětnou vazbou	428
96. Srovnání struktur	434
97. Transkonduktanční zesilovač - OTA	435
97.1 Základní schéma	435
97.2 Linearizační diody	438
97.3 Oddělovací zesilovač	439
97.4 Oblast použití OTA	440
98. Current conveyor druhé generace – CCII	447

X.	PERSPEKTIVNÍ OPERAČNÍ ZESILOVAČE	452
99.	Některé moderní OZ	452
100.	Zesilovače RAIL-TO-RAIL	457
100.1	Základní obvodové principy	458
XI.	ZÁVĚREČNÉ POZNÁMKY	462
	Operační zesilovače jako podsystém, programovatelná analogová pole	462
	Operační zesilovač v teorii obvodů	463
	Vztah mezi číslicovou a analogovou technikou	465
	K literatuře	466
	Úplně na závěr	467
XII.	LITERATURA	468
XIII.	REJSTŘÍK	478

PŘÍLOHA

Program VISIO, kterým byly kresleny obrázky v této knize	486
Knihy nakladatelství BEN - technická literatura	490
Prodejní místa BEN - technická literatura	495
Pár slov o nakladatelství BEN - technická literatura	496



PŘEDMLUVA

Operační zesilovače dnes patří k nepoužívanějším elektronickým prvkům, přestože se „dožívají“ v roce 2002 asi 60 let [174]. Jejich použití se rok od roku rozšiřuje, stále se „zlepšují“, objevují se nové zajímavé aplikační možnosti.

Effektivní využití operačních zesilovačů vyžaduje, aby byl konstruktér podrobně seznámen s jejich vlastnostmi a základními aplikačními principy. K tomu by měla přispět i tato kniha, zaměřená na použití operačních zesilovačů „v základních obvodových situacích“ - na popis základních obvodových principů.

Problematika je rozdělena do deseti částí. V úvodní části jsou co nejsrozumitelnější formou vysvětleny základní pojmy týkající se diferenčního operačního zesilovače. Ve druhé části se čtenář seznámí se základními vlastnostmi diferenčních operačních zesilovačů podrobněji.

Třetí část je věnována otázkám zpětné vazby, stability a korekce. Ve čtvrté části je poukázáno na souvislost mezi činitelem nelineárního zkreslení a dynamickými vlastnostmi zesilovače. V páté části se čtenář seznámí s problematikou šumů a v šesté části se zásadami pro práci s operačními zesilovači.

Sedmá a osmá část jsou věnovány analýze základních zapojení s operačními zesilovači. Teoretické úvahy jsou doloženy četnými příklady a řešenými úkoly.

Devátá část obsahuje popis principiálně různých typů operačních zesilovačů a příklady jejich aplikací. Desátá část popisuje některé nejmodernější operační zesilovače předních světových výrobců. Poslední část poukazuje na souvislosti, které se jinam „nevešly“, ale určitě stojí za zamyšlení.

Kniha je rozsáhlým vstupem do problematiky, ale není rozhodně vyčerpávající. To ani není možné. Vždyť při aplikacích operačních zesilovačů lze projít celou elektronikou. Doufám však, že spolu s citovanou literaturou dává dostatečnou představu o tom, jak je třeba (a možné) s nimi pracovat.

Vlastní teorie operačních zesilovačů bude uváděna pouze pro moderní struktury. Hlavní pozornost je věnována aplikacím. Čtenář s hlubším zájmem nalezne potřebnou teorii ve světově uznávané knize Ing. Jiřího Dostála, CSc.: Operační zesilovače [4].

Chtěl bych poděkovat nakladatelství BEN - technická literatura, které uvedlo tuto knihu do světa, včetně rychle následujících dalších vydání. Dík patří i čtenářům, kteří vykouplili předchozí čtyři vydání, a také mé ženě – za trpělivost.

V Ostravě

autor

28. 11. 2001

(VŠB-TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA

Fakulta elektrotechniky a informatiky)