

Jaroslav Doleček

MODERNÍ UČEBNICE ELEKTRONIKY

Operační zesilovače a komparátory

5. díl

Praha 2007



Jaroslav Doleček

Moderní učebnice elektroniky 5. díl – Operační zesilovače a komparátory

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.

© Ing. Jaroslav Doleček, 2007

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

Jaroslav Doleček, MODERNÍ UČEBNICE ELEKTRONIKY

BEN – technická literatura, Praha 2007

ISBN 80-7300-187-X

STRUČNÝ OBSAH

obsah 1. dílu – Základní pojmy, R, L, C

- 1 ZÁKLADNÍ ELEKTRICKÉ VELIČINY A POJMY
- 2 IDEÁLNÍ ELEMENTÁRNÍ AKTIVNÍ A PASIVNÍ LINEÁRNÍ PRVKY
- 3 ODPOROVÉ OBVODY A VÝKONOVÉ PŘIZPŮSOBENÍ
- 4 EKVIVALENCE PASIVNÍCH JEDNOBRANŮ
- 5 ANALÝZA LINEÁRNÍCH ELEKTRONICKÝCH OBVODŮ
- 6 SLOŽENÉ JEDNOBRANY OBSAHUJÍCÍ IDEÁLNÍ OBVODOVÉ PRVKY
- 7 PŘENOSOVÉ VLASTNOSTI DVOJBRANŮ
- 8 REÁLNÉ LINEÁRNÍ SOUČÁSTKY ELEKTRONICKÝCH OBVODŮ
- 9 PŘÍLOHA MATICE A DETERMINANT

obsah 2. dílu – Polovodiče a elektronky

- 1 POLOVODIČOVÉ SOUČÁSTKY S JEDNÍM PŘECHODEM PN
- 2 TRANZISTORY A POLOVODIČOVÉ VÝKONOVÉ A SPÍNACÍ PRVKY
- 3 ELEKTRONKY
- 4 POLOVODIČOVÉ SOUČÁSTKY BEZ PŘECHODU PN

obsah 3. dílu – Optoelektronika

- 1 OPTOELEKTRONIKA
- 2 DIODY LED
- 3 LASEROVÉ DIODY (LD)
- 4 DETEKTORY SVĚTELNÉHO ZÁŘENÍ
- 5 OPTOELEKTRONICKÉ VAZEBNÍ ČLENY – OPTRONY
- 6 ZOBRAZOVACÍ JEDNOTKY
- 7 OBRAZOVÉ SENZORY
- 8 OPTICKÁ VLÁKNA

obsah 4. dílu – Zesilovače a filtry

- 1 PŘENOSOVÉ VLASTNOSTI PASIVNÍCH LINEÁRNÍCH KOMPLEXNÍCH JEDNOBRANŮ A DVOJBRANŮ
- 2 PASIVNÍ KMITOČTOVÉ FILTRY 1. A 2. ŘÁDU
- 3 ANALÝZA ČASOVĚ PROMĚNNÝCH SIGNÁLŮ
- 4 ZESILOVAČE

obsah 5. dílu – Zesilovače a komparátory

- 1 ZESILOVAČE
- 2 OPERAČNÍ ZESILOVAČE (OZ)
- 3 PŘÍSTROJOVÉ (MĚŘICÍ) ZESILOVAČE
- 4 NAPĚŤOVÉ KOMPARÁTORY
- 5 AUDIO ZESILOVAČE

PODROBNÝ OBSAH

1	ZESILOVAČE	9
1.1	Úvod	10
1.2	Přehled integrovaných zesilovačů	11
2	OPERAČNÍ ZESILOVAČE (OZ) (OPERATIONAL	13
2.1	Stručně z historie operačních zesilovačů	14
2.2	Co je operační zesilovač	16
2.3	Ideální operační zesilovač s napětovou zpětnou vazbou (voltage feedback amplifiers, VFA)	19
2.3.1	Hlavní vlastnosti ideálního OZ	19
2.3.2	Základní zapojení ideálního operačního zesilovače ¹	22
2.3.2.1	Neinvertující zapojení zesilovacího stupně s OZ (Non-Inverting Op Amp)	24
2.3.2.2	Invertující zapojení zesilovacího stupně s OZ	28
2.3.2.3	Rozdílový (diferenční) zesilovač (Differential Op Amp)	33
2.3.2.4	Operační zesilovač jako invertující součtový zesilovač (Voltage Adder)	36
2.3.2.5	Složený zpětnovazební obvod	38
2.3.2.6	Obecný tvar invertujícího zapojení OZ	41
2.4	Reálný operační zesilovač s napětovou zpětnou vazbou	54
2.4.1	Zjednodušené schéma zapojení	54
2.4.2	Přehled technologií monolitických operačních zesilovačů	57
2.4.2.1	Bipolární operační zesilovače	57
2.4.2.2	CMOS operační zesilovače	60
2.4.2.3	Operační zesilovače BiFET	60
2.4.2.4	Operační zesilovače BiCMOS a BiMOS	61
2.4.3	Důležité vlastnosti reálného operačního zesilovače	61
2.4.3.1	Zjednodušený model operačního zesilovače	61
2.4.3.2	Vliv záporné zpětné vazby na velikost vstupní a výstupní impedance invertující- ho a neinvertujícího zapojení OZ	64
2.4.3.3	Kladná a záporná saturace	66
2.4.3.4	Vliv konečné hodnoty zesílení otevřené smyčky	66
2.4.3.5	Potlačení souhlasného napětí (Common mode Rejection Ratio – CMRR)	73
2.4.3.6	Citlivost na změnu napájecího napětí (PSRR – power supply rejection ratio, kSVR – supply-voltage rejection ratio)	75

2.4.4	Důležité stejnosměrné parametry OZ	75
2.4.4.1	Vstupní napěťová nesymetrie, vstupní napěťový offset UIO (Input Offset Voltage – VIO, VOS)	75
2.4.4.2	Vstupní klidové proudy (Input Bias Currents, IB)	77
2.4.4.3	Vstupní proudová nesymetrie (vstupní proudový offset) (input offset current – IIO, IOS)	79
2.4.4.4	Celková chyba výstupního napětí způsobená vstupní napěťovou nesymetrií a vstupními klidovými proudy	81
2.4.5	Kmitočtové a přechodné charakteristiky operačních zesilovačů	84
2.4.5.1	Vnější kompenzace kmitočtové charakteristiky OZ	90
2.4.5.2	Vliv kapacit na vstupu a výstupu OZ na jeho stabilitu	92
2.4.5.3	Rychlost přeběhu – SR (Slew Rate)	97
2.4.6	Šумы v zapojeních s operačními zesilovači	101
2.5	Ideální operační zesilovač s proudovou zpětnou vazbou – transimpedanční zesilovač (current feedback amplifier, CFA, též CFB op amps)	107
2.5.1	Princip zesilovače s proudovou zpětnou vazbou (CFA)	107
2.5.2	Hlavní vlastnosti ideálního zesilovače s proudovou zpětnou vazbou .	108
2.5.3	Základní zapojení OZ s proudovou zpětnou vazbou	109
2.5.3.1	Neinvertující zapojení OZ s proudovou zpětnou vazbou	110
2.5.3.2	Invertující zapojení OZ s proudovou zpětnou vazbou	111
2.6	Reálný operační zesilovač s proudovou zpětnou vazbou	112
2.6.1	Kmitočtové charakteristiky CFA	114
2.6.2	Porovnání hlavních vlastností operačních zesilovačů s napěťovou (VFA) a s proudovou (CFA) zpětnou vazbou .	122
2.7	Operační zesilovače pro nízká napájecí napětí	125
2.7.1	Operační zesilovače s nesymetrickým (jednopolovým) napájením (Single Supply Op Amp)	126
2.7.1.1	Stejnoseměrná vazba zdroje signálu se vstupem zesilovače	127
2.7.1.2	Střídavá vazba zdroje signálu se vstupem zesilovače	134
2.7.2	Operační zesilovače se zvětšenými mezemi vstupního a výstupního napětí (rail to rail R–R, r to r)	136
2.8	Rozdělení operačních zesilovačů	141
2.8.1	Dělení OZ podle typu zpětné vazby	142
2.8.2	Dělení OZ podle použité technologie	142

2.8.3	Dělení OZ podle parametrů	144
2.9	Příklady aplikací operačních zesilovačů	147

3 PŘÍSTROJOVÉ (MĚŘICÍ) ZESILOVAČE 155

3.1	Co je přístrojový zesilovač	156
3.2	Rozdílové zesilovače	157
3.2.1	Přístrojový zesilovač se třemi operačními zesilovači	158
3.2.1.1	Potlačení souhlasného signálu CMRR	160
3.2.1.2	Vstupní napěťová nesymetrie	161
3.2.2	Základní zapojení přístrojového zesilovače složeného ze dvou operačních zesilovačů	162
3.2.3	Způsoby nastavení zesílení přístrojových zesilovačů	164
3.2.4	Přístrojové zesilovače s autonulováním	166
3.2.5	Hlavní vlastnosti přístrojových zesilovačů a jejich použití	167
3.2.6	Monolitické diferenční zesilovače	168
3.3	Poznámky k aplikacím přístrojových zesilovačů	169
3.4	Příklady použití přístrojových zesilovačů	170
3.4.1	Příklad měření signálu z tenzometrického můstku napájeného střídavým proudem	170
3.4.2	Nesymetrické napájení přístrojového zesilovače	171
3.4.3	Aplikace AD628	172

4 NAPĚŤOVÉ KOMPARÁTORY 175

4.1	Úvod	176
4.2	Princip funkce napěťového komparátoru	176
4.3	Obvodové uspořádání napěťových komparátorů	178
4.4	Komparační úroveň a hystereze	180
4.4.1	Komparační úroveň	180
4.4.2	Hystereze	180

4.4.3	Komparátor s hysterezí	182
4.4.3.1	Invertující zapojení komparátoru s hysterezí	182
4.4.3.2	Neinvertující zapojení komparátoru s hysterezí	184
4.5	Operační zesilovač ve funkci komparátoru	186
4.6	Použití komparátorů	188
5	AUDIO ZESILOVAČE	193
	Audio předzesilovače	194
	Výkonové audio zesilovače	195
	DODATKY	197
	DODATEK A	197
	DODATEK B	204
	DODATEK C	207
	LITERATURA	215
	REJSTŘÍK	221
	SLOVNÍČEK	222

O KNIZE

Hlavním zaměřením pátého dílu učebnice je oblast operačních zesilovačů a jejich aplikací. Popisuje hlavní vlastnosti a pravidla pro používání operačních zesilovačů s napětovou a s proudovou zpětnou vazbou, vysvětluje principy přístrojových zesilovačů a komparátorů, zmiňuje se o problematice audio zesilovačů. Popisované obvody jsou základními stavebními prvky analogových a analogově číslicových obvodů. Text knihy je úvodem do problematiky, který má čtenáři umožnit, aby získal představu o možnostech a způsobech řešení obvodů a systémů s uvedenými integrovanými obvody. Při správné aplikaci vede používání integrovaných obvodů ke zlepšování technických parametrů, ke zvyšování spolehlivosti, zmenšování rozměrů, snižování energetické náročnosti a ceny elektronických zařízení.

V textu jsou uvedeny příklady obvodů s operačními a přístrojovými zesilovači a s komparátory spolu se způsoby jejich řešení. Aplikacím operačních zesilovačů a některých speciálních integrovaných obvodů v oblasti aktivních filtrů, generátorů signálů, tvarovacích a dalších obvodů je věnováno samostatné pokračování této knihy.

Publikace obsahuje množství obrázků a názorně řešených příkladů. Může sloužit jako studijní pomůcka pro posluchače průmyslových i vysokých škol, a také pro potřeby technické veřejnosti a elektrotechniků – amatérů.

Softwarovou pomoc při řešení obvodů s operačními zesilovači nabízejí jejich výrobci. Do jejich programů stačí zadat hlavní požadované parametry aplikace, načtež program nabídne typ operačního zesilovače daného výrobce a jeho zapojení, nakreslí kmitočtové charakteristiky atd.

Pro obecné řešení elektronických obvodů je možné z českých programů uvést např. program SNAP, jehož verzi 2.61 lze stáhnout z internetu na adrese www.webpark.cz/snap. Světově rozšířenými programy jsou např. PSPICE, MICRO-SIM, TINA a další.