

Jaroslav Belza

# OPERAČNÍ ZESILOVAČE

---

**pro obyčejné smrtelníky**

Praha 2004



*Tato praktická příručka o operačních zesilovačích má sloužit nejen pro amatérskou, ale i pro poloprofesionální praxi, neboť shrnuje vše podstatné o operačních zesilovačích. Je vhodná i jako moderní učebnice pro střední školy – vyzdvihuje principy zapojení a konkrétní řešení jednotlivých problémů. Proto také v knize nenajdete rozsáhlé vzorce a složitá matematická odvození, těmi se zabývá odbornější literatura.*

*Knih je určena jako úvodní informace zvláště pro ty, kteří chtějí do problematiky operačních zesilovačů teprve postupně pronikat a které odrazují rozsáhlá díla. Zběhlým konstruktérům jistě kniha poslouží jako inspirace a přehledný zdroj informací o problematice operačních zesilovačů.*

---

Jaroslav Belza

## **Operační zesilovače pro obyčejné smrtelníky**

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

© Ing. Jaroslav Belza, Praha 2004

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

Jaroslav Belza: Operační zesilovače pro obyčejné smrtelníky

BEN – technická literatura, Praha 2004

1. vydání

**ISBN 80-7300-115-2**

# OBSAH

## 1. Úvod ..... 7

Pár slov na začátek o operačních zesilovačích  
Pár slov o autorovi a o knize  
Značky a zkratky, se kterými se často setkáte

## 2. Co je operační zesilovač a trocha teorie ..... 11

Jak OZ funguje  
Základní pojmy  
Potlačení součtového signálu • kmitočtová kompenzace • rychlost přeběhu  
• vstupní napěťová nesymetrie • vstupní proudová nesymetrie

## Obvody s operačními zesilovači

## 3. Napájení OZ ..... 21

Symetrické napájecí napětí  
Zásady blokování napájecího napětí kondenzátory

## 4. Zesilovače ..... 23

Invertující a neinvertující zesilovač  
Sledovač  
Rozdílový zesilovač  
Nastavitelné zesílení  
Přístrojový zesilovač  
Izolující zesilovač  
Oddělovací zesilovač

## 5. Syntetické indukčnosti a gyrátory ..... 35

Prescottův syntetický induktor  
Syntetický induktor s jedním OZ  
Pásmové zádrže se syntetickým induktorem  
Univerzální zapojení pro realizaci impedančních invertorů a konvertorů

## **6. Aktivní filtry ..... 43**

Porovnání Besselových, Butterworthových a Čebyševových filtrů  
Dolní propusti, horní propusti, pásmové propusti a pásmové zadržky  
Konstanty pro výpočet filtrů  
Laditelné pásmové propusti a zadržky  
Obvody pro posuv fáze  
Pásmová propust a pásmová zadržky pro 50 Hz

## **7. Oscilátory harmonických signálů ..... 61**

Oscilátory s Wienovým členem  
Oscilátory se stabilizací amplitudy  
Oscilátory s přemostěným článkem T  
Oscilátory se širokým přeladěním  
Nízkofrekvenční generátor RC

## **8. Multivibrátory a generátory tvarových kmitů ... 69**

Komparátor s hysterezí (Schmittův klopný obvod)  
Astable a monostabilní multivibrátory  
Integrátor  
Generátory tvarových kmitů

## **9. Tvarovače signálu ..... 79**

Tvarování harmonického signálu  
Tvarovače trojúhelník–sinus

## **10. Usměrňovače a převodníky na absolutní hodnotu ... 83**

Jednocestné a dvoucestné usměrňovače  
Převodníky na absolutní hodnotu  
Indikátor úrovně nízkofrekvenčního signálu  
Měřič mezivrcholové úrovně signálu  
Usměrňovače pro ručková měřidla  
Milivoltmetry

## **11. Logaritmické zesilovače ..... 95**

Základní zapojení  
Logaritmický a delogaritmický převodník  
Logaritmický zesilovač  
Logaritmátor

## 12. Převodníky ..... 101

Napětí – kmitočet	Proud – napětí
Teplota – napětí	Napětí – proud (zdroj proudu)
Teplota – kmitočet	Intenzita osvětlení – kmitočet
Napětí – střída	

## 13. Rozšíření rozsahu výstupních napětí a proudů ... 123

Koncový stupeň pracující ve třídě AB
Různé typy koncových stupňů
Zvětšení výstupního proudu paralelním řazením OZ
Rozkmitový stupeň pro zvětšení výstupního napětí

## 14. OZ v napájecích zdrojích ..... 131

Zdroj referenčního napětí s OZ
Stabilizované zdroje s OZ
Symetrický zdroj napětí
Umělý střed napájecího napětí
Zdroj záporného napětí

## 15. OZ v nf technice ..... 137

Předzesilovač pro gramofon
Zesilovač pro magnetofon
Korekční předzesilovače
Vícepásmové nízkofrekvenční korektory
Filtr pro zdůraznění řeči
Obvod pro rozšíření báze stereofonního signálu
Různé nf zesilovače
Obvod pro ochranu reproduktorů
Indikátor vybuzení a přebuzení

## 16. OZ v měřicích přístrojích a zkoušečkách ..... 159

Měření odporů a vodivosti
Měření zesilovacího činitele tranzistorů
Měření teploty
Měření malých stejnosměrných napětí
Automatické přepínání rozsahů
Zkratoměr
Tester operačních zesilovačů

## **17. OZ v indikátorech, testerech a spínačích ..... 173**

Komparátory  
Okénkový diskriminátor  
Testery a indikátory napětí  
Světelné a dotykové spínače

## **18. OZ v dalších zapojeních ..... 187**

Nabíječe akumulátorů  
Vybíječe akumulátorů  
Regulátory otáček  
Světelná závora

## **19. Optoizolační zesilovače ..... 197**

Izolační zesilovač  
Izolační zesilovače se speciálními optočleny

# **Přehledy**

## **20. OZ v datech ..... 205**

Přehled parametrů některých běžných OZ  
Zapojení vývodů pouzder  
Neběžná měření běžných operačních zesilovačů

## **21. Literatura ..... 221**

Knihy a časopisy  
Internetové odkazy a elektronické dokumenty

## **22. Rejstřík ..... 229**

Odborné termíny  
Součástky (integrované obvody, optočleny a senzory)

## **Knihy nakladatelství BEN – technická literatura ... 239**

Knihy na problematiku operačních zesilovačů  
Kontakty na naše specializované prodejny  
Pár slov o nás

# OPERAČNÍ ZESILOVAČE

pro obyčejné smrtelníky

# 1

## ÚVOD

---

- **Pár slov na začátek  
o operačních zesilovačích**
- **Pár slov o autorovi a o knize**
- **Značky a zkratky,  
se kterými se často setkáte**

# Pár slov na začátek o operačních zesilovačích

Operační zesilovač (OZ) není nijak nová součástka. Původně byl používán jako základní prvek analogových počítačů a náročných měřicích systémů. I když analogové počítače se dnes již prakticky nepoužívají – digitální zpracování signálů je výhodnější – nalezneme operační zesilovač v nejrůznějších elektronických přístrojích.

První operační zesilovače byly samozřejmě sestavené z diskrétních součástek. První zmínky o operačních zesilovačích jsou z let 1947 a 1948 a ve svých začátcích byly OZ osazeny elektronikami, později tranzistory. Takové operační zesilovače byly samozřejmě rozměrné a drahé. Jejich základ tvořil stejnosměrný zesilovač a pro zlepšení dynamických vlastností byly doplněny jednou nebo dvěma paralelními cestami pro zpracování signálů středních a vysokých kmitočtů. Zapojení tranzistorového operačního zesilovače je uvedeno např. v [1]. Masové rozšíření však operační zesilovače zaznamenaly až po roce 1965, kdy se po zlepšení planární technologie podařilo umístit celý zesilovač na jeden čip v monolitickém integrovaném obvodu.

Vlastnosti prvních monolitických operačních zesilovačů nebyly nijak skvělé. Proto byly vyráběny i operační zesilovače jako hybridní obvody, v nichž se pro zlepšení vlastností čipy doplňovaly dalšími součástkami. Typickým případem je připojení tranzistorů řízených polem na vstup OZ.

Výhodné vlastnosti OZ předurčily pro mnohé aplikace, v nichž se dříve používala zapojení z diskrétních součástek. Jeden z nejběžnějších operačních zesilovačů – čtyřnásobný OZ typu LM324 lze dnes zakoupit za maloobchodní cenu pod 10 Kč. Pak lze použít operační zesilovač i v místě, kde nahradí třeba jen jediný tranzistor a několik rezistorů – zapojení bude pak nejen jednodušší, ale i levnější.

Dnes se vyrábí na celém světě téměř nespočetné množství nejrůznějších typů operačních zesilovačů. V nabídce výrobců elektronických součástek lze nalézt OZ specializované pro nejrůznější použití; např. OZ pro malá napájecí napětí (od 1 V), s malým příkonem (odběr proudu od jednotek  $\mu\text{A}$ ), OZ pro výkonové obvody (výstupní proud řádu jednotek A), OZ s velmi malou vstupní napětíovou nesymetrií, OZ pracující s kmitočty až stovek MHz, atd. Zcela běžně se vyrábějí operační zesilovače s tranzistory řízenými polem (JFET a MOSFET) ve vstupních obvodech, OZ s velmi malým šumem a zkreslením, vhodné i do elektroakustických zařízení nejvyšší kvality apod. Operační zesilovač se stal – často jen ve zjednodušené formě – nedílnou součástí mnoha dalších integrovaných obvodů.

Poslední přehled základních zapojení s OZ byl na stránkách Amatérského radia otištěn naposled v [2] a [3]. Pro všechny konstruktéry elektronických zařízení jsem proto připravil přehled základních zapojení a věřím, že se jim tato publikace stane praktickou příručkou. Tato publikace shrnuje podstatné části z [4] a [5].

Použitá zapojení byla vybrána z nejrůznějších časopisů a knih. Z tuzemských je to hlavně Sdělovací technika a Amatérské radio od roku 1965. Seznam použitých pramenů by byl značně rozsáhlý – proto se v seznamu literatury omezím jen na ty nejdůležitější.

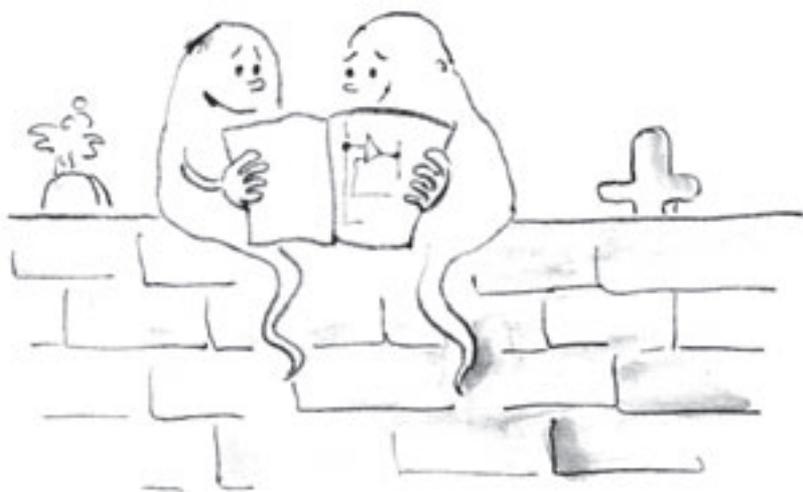
## Pár slov o autorovi a o knize

Jak je na předchozí stránce řečeno, kniha vznikla na základě dvou čísel časopisu Konstrukční elektronika, vydaných v roce 1996 a 1997. Nejen nápad nakladatelství BEN – technická literatura, ale i pozitivní ohlasy čtenářů na výše zmíněné autorovo dílo a také volání odborné veřejnosti po lehčeji stravitelných informacích o operačních zesilovačích – to vše přimělo autora k novému, souhrnnému uspořádání do podoby uceleného knižního vydání.

Je vůbec velkým úspěchem, že se to nakonec podařilo. Zejména vzhledem k tomu, že autor je velmi vytížený člověk – ze strany nakladatelství nepomohlo ani přemlouvání, ani nátlak, zřejmě kniha měla svůj čas – trvalo to skutečně necelé čtyři roky.

Tímto bychom se zároveň chtěli omluvit netrpělivým čtenářům, kteří nás v redakci občas popichovali svými výhružnými, odsuzujícími a někdy i velmi nepříjemnými připomínkami.

*redakce nakladatelství  
BEN – technická literatura*



KONEČNĚ NĚCO PRO NÁS - OBYČEJNÉ SMRTELNÍKY...

# Značky a zkratky, se kterými se často setkáte

značka	anglický význam	český význam
$A_u$		zesílení
$A_{vd}, A_V$	Large Signal Voltage Gain	zesílení pro velké signály (a velmi nízký kmitočet)
$B_{OM}$	viz PBW	
$C_{IN}$	Input Capacitance	vstupní kapacita
CMR	Common-Mode Rejection Ratio	potlačení souhlasných signálů na vstupu
CMRR	viz CMR	
DP		dolní propust
$e_n$	Equivalent Input Noise voltage	ekvivalentní vstupní šumové napětí
GBP	Gain Bandwidth Product Small Signal Bandwidth Unity Gain	kmitočet, při kterém se zesílení zmenší na 1
GBW	viz GBP	
HP		horní propust
$I_{CC}$	Supply Current	napájecí proud
$I_{ib}$	Input Bias Current	vstupní proud
$I_{io}$	Input Offset Current	vstupní proudová nesymetrie
$I_o$	Output Short Circuit Current	výstupní zkratový proud (proud teče z IO)
$I_{sink}$	Output Sink Current	výstupní zkratový proud (proud teče do IO)
PP		pásmová propust
PBW	Power Bandwidth Maximum-output-swing bandwidth	nejvyšší kmitočet, při kterém lze ještě využít maximální rozkmit výstupního napětí
$P_{tot}$	Power Dissipation	výkonová ztráta (pouzdra)
PSRR	Power Supply Rejection Ratio	potlačení vlivu napájecího napětí
$R_{IN}$	Input Resistance	vstupní odpor
SVR	Power Supply Rejection Ratio	potlačení vlivu napájecího napětí
$V_+, V_{CC}$	Supply voltage	napájecí napětí
$V_i$	Input Voltage	vstupní napětí
$V_{icm}$	Input Common-Mode Voltage Range	rozsah vstupních napětí
$V_{io}, V_{OS}$	Input Offset Voltage	vstupní napěťová nesymetrie
$V_{OH}$	High Level Output Voltage	kladné výstupní saturační napětí
$V_{OL}$	Low Level Output Voltage	záporné výstupní saturační napětí
$V_{OUT}$	Maximum Output Voltage Swing	max. rozkmit výstupního napětí
$V_{O1}/V_{O2}$	Amplifier to Amplifier Coupling Channel Separation	oddělení u vícenásobných OZ
SR	Slew Rate	rychlost přeběhu
THD	Total Harmonic Distortion	celkové harmonické zkreslení
$T_{oper}$	Operating Free-air Temperature Range	pracovní teplota
$T_{stg}$	Storage Temperature Range	skladovací teplota