

**SLOVENSKÁ POĽNOHOSPODÁRSKA UNIVERZITA**

**V NITRE**

**TECHNICKÁ FAKULTA**

2125276

**DIPLOMOVÁ PRÁCA**

**2011**

**Tomáš Mališka, Bc.**

**SLOVENSKÁ POĽNOHOSPODÁRSKA UNIVERZITA**  
**V NITRE**  
**TECHNICKÁ FAKULTA**

**POROVNANIE VÝSLEDKOV MERANIA A POČÍTAČOVEJ  
ANALÝZY PRE VYBRANÉ ANALÓGOVÉ OBVODY**

**Diplomová práca**

Študijný program: Spôľahlivosť a bezpečnosť technických systémov  
Študijný odbor: 2386800 Kvalita produkcie  
Školiace pracovisko: Katedra elektrotechniky, automatizácie a informatiky  
Školiteľ: Ing. Miroslav Pap, PhD.

**Nitra 2011**

**Tomáš Mališka, Bc.**

## **Čestné vyhlásenie**

Podpísaný Tomáš Mališka vyhlasujem, že som záverečnú prácu na tému „Porovnanie výsledkov merania a počítačovej analýzy pre vybrané analógové obvody“ vypracoval samostatne s použitím uvedenej literatúry.

Som si vedomý zákonných dôsledkov v prípade, ak uvedené údaje nie sú pravdivé.

V Nitre 20. marca 2011

Tomáš Mališka

## **Pod'akovanie**

Touto cestou vyslovujem pod'akovanie Ing. Miroslavovi Papovi, PhD. za pomoc, odborné vedenie, cenné rady a pripomienky pri vypracovaní mojej diplomovej práce, za ochotu, venovaný čas a pomoc pri získavaní informácií.

## **Abstrakt**

Diplomová práca prináša prehľad súčasného stavu riešenej problematiky so zameraním na prostredie SPICE a simulačný program MultiSIM. Dôraz je kladený na jednotlivé vybrané elektronické obvody, ich vlastnosti a jednotlivé zapojenia. Práca je rozdelená do štyroch tematických častí. Prvé dve sú zamerané na prostredie SPICE a simuláciu elektronických obvodov. Popisujú históriu a vývoj simulačných programov, pracovné prostredie programu a základné prvky potrebné pri práci s programom. Ďalšie dve časti popisujú jednotlivé elektronické obvody, ich základné vlastnosti, popisy možných zapojení a definíciu jednotlivých stavov pre výpočet obvodových veličín. Vlastná práca obsahuje teoretické výpočty jednotlivých elektronických obvodov, simuláciu obvodov v programe MultiSIM a hodnoty získané meraním v elektrotechnickom laboratóriu. Záver práce obsahuje porovnanie výsledkov zistených vo vlastnej práci.

**Kľúčové slová:** SPICE. MultiSIM. Zosilňovač. Tranzistor. Operačný zosilňovač.

## **Abstract**

The thesis provides an overview of the current state of the field, dealing with the environment and the SPICE simulation program Multisim. We pay attention individually selected electronic circuit, their characteristics and individual involvement. The work is divided into four thematic units. The first two sections will focus on the environment and SPICE simulation of electronic circuits. They describe the history and development of simulation programs, working environment and the basic elements needed to work with the program. The other two parts will describe the electronic circuits and their basic properties, descriptions of possible involvement of a definition of each status for the calculation of circuit parameters. Custom work includes theoretical calculations of electronic circuits, circuit simulation in Multisim program and the values obtained by measuring the electrical engineering laboratory. In conclusion, this work compares the findings in their own work.

**Keywords:** SPICE. MultiSIM. Amplifier. Transistor. Opamp amplifier.

---

# Obsah

<b>Úvod .....</b>	<b>10</b>
<b>1 Prehľad o súčasnom stave riešenej problematiky.....</b>	<b>12</b>
1.1 Prostredie SPICE .....	12
1.1.1 História a vývoj SPICE.....	12
1.1.2 Programy typu „SPICE-like“ a „SPICE-compatible“ .....	13
1.2 Program MultiSIM .....	13
1.2.1 Používateľské rozhranie.....	14
1.2.2 Základné nastavenie MultiSIM-u .....	16
1.2.3 Panel súčiastok.....	16
1.2.4 Meracie prístroje multi.....	18
1.2.5 Simulácia.....	22
1.3 Tranzistorový zosilňovač.....	23
1.3.1 Definícia zosilňovača.....	23
1.3.2 Rozdelenie zosilňovačov .....	23
1.3.3 Vlastnosti zosilňovačov .....	24
1.3.4 Skreslenie.....	27
1.3.5 Pracovné triedy zosilňovačov .....	29
1.3.6 Základné zapojenia tranzistorových zosilňovačov .....	30
1.3.7 Spätná väzba v zosilňovačoch .....	33

---

1.4	Operačné zosilňovače .....	34
1.4.1	Definícia operačného zosilňovača .....	34
1.4.2	Základne pojmy .....	34
1.4.3	Charakteristické vlastnosti ideálneho operačného zosilňovača .....	35
1.4.4	Základné zapojenia operačných zosilňovačov .....	37
<b>2</b>	<b>Cieľ práce.....</b>	<b>41</b>
<b>3</b>	<b>Metodika práce.....</b>	<b>42</b>
<b>4</b>	<b>Výsledky práce .....</b>	<b>44</b>
4.1	Návrh jednostupňového zosilňovača .....	44
4.1.1	Postup práce .....	44
4.1.2	Riešenie práce .....	45
4.1.3	Meranie tranzistorového zosilňovača: .....	49
4.1.4	Simulácia jednostupňového zosilňovača v programe MultiSIM .....	52
4.1.5	Porovnanie výsledkov merania a simulácie v prostredí MultiSIM.....	54
4.2	Návrh aktívnej priepuste s operačným zosilňovačom .....	55
4.2.1	Postup práce .....	55
4.2.2	Riešenie práce .....	56
4.2.3	Meranie aktívnej pásmovej priepuste .....	57
4.2.4	Simulácia aktívnej pásmovej priepuste v programe MultiSIM .....	59
4.2.5	Porovnanie výsledkov merania a simulácie v prostredí MultiSIM.....	60
	<b>Záver .....</b>	<b>61</b>
	<b>Zoznam použitej literatúry .....</b>	<b>63</b>
	<b>Prílohy.....</b>	<b>65</b>

---



---

## Zoznam použitých veličín a označenie

Označenie	Fyzikálna veličina	Jednotka
$A_u$	napät'ové zosilnenie	-
$A_f$	zosilnenie pri meranom kmitočte	-
$A_i$	prúdové zosilnenie	-
$A_p$	výkonové zosilnenie	-
$A_{ref}$	zosilnenie pri referenčnom kmitočte	-
$B$	šírka prenášaného pásma	Hz
$D$	dynamický rozsah	-
$f_m$	medzná frekvencia	Hz
$f_D$	dolná hraničná frekvencia	Hz
$f_H$	horná hraničná frekvencia	Hz
$\varphi_{vst}$	fáza vstupného napätia	-
$\varphi_{výst}$	fáza výstupného napätia	-
$I_1$	vstupný prúd	A
$I_2$	výstupný prúd	A
$k_f$	činiteľ frekvenčného skreslenia	-
$k_h$	činiteľ harmonického skreslenia	-
$k_i$	činiteľ intermodulačného skreslenia	-
$k_\varphi$	činiteľ fázového skreslenia	-
$P_1$	vstupný výkon	W
$P_2$	výstupný výkon	W
$P_{2ef}$	výstupný efektívny výkon	W
$P_o$	jednosmerný príkon	W
$Q$	činiteľ kvality	-
$R_z$	odpor záťaže	$\Omega$

---

$R_x$	rezistor (index $x$ je číslo umiestnenia rezistora)	$\Omega$
$U_1$	vstupné napätie	V
$U_2$	výstupné napätie	V
$U_{1ef}$	efektívna hodnota vstupného napätia	V
$U_{2ef}$	efektívna hodnota výstupného napätia	V
$U_{f2\pm nf1}$	napätia výstupných intermodulačných zložiek	V
$U_{1min}$	minimálne vstupné napätie	V
$U_{1max}$	maximálne vstupné napätie	V
$Z_{vst}$	vstupná impedancia	$\Omega$
$Z_{výst}$	výstupná impedancia	$\Omega$

# Úvod

V dnešnej dobe sa s elektronikou a elektronickými blokmi stretávame skoro na každom kroku. Či je to mobilný telefón, ktorý používame na každodennú komunikáciu, alebo mp3 player, ktorý nám spríjemňuje cestu vlakom či autobusom. Elektronické bloky je dnes možné nájsť takmer vo všetkých elektrotechnických zariadeniach ako sú osobné počítače, TV prijímače, DVD prehrávače, rôzne audio systémy a iné. Všade je kúsok elektroniky, bez ktorej si náš život už nevieme predstaviť. Elektronika je jednou z najvýraznejších hybných síl sveta.

Práve v audio technike sa najviac využívajú elektronické obvody ako zosilňovače a frekvenčné filtre. Či sa už jedná o výkonové zosilňovače, mikrofónne predzosilňovače, ekvalizéry, výhybky a iné.

Zosilňovače sú zariadenia, ktoré majú za úlohu zosilniť určitý vstupný elektrický signál na požadovaný výstupný signál. Podľa druhu spracovávaného signálu rozlišujeme zosilňovače nízkofrekvenčné a vysokofrekvenčné. Existuje veľa druhov zosilňovačov, podľa účelu a základného usporiadania a tiež podľa použitých súčiastok. Rozoznávame ich od jednoduchých obvodov s malým počtom súčiastok, až po zložité obvody s niekoľkými desiatkami použitých súčiastok.

Frekvenčné filtre sú obvody, ktoré majú za úlohu vybrať požadovaný signál zo zmesi signálov na základe jeho frekvenčných vlastností a tento signál prepustiť na výstup selektora s minimálnym útlmom a ostatné signály, ktoré nespĺňajú požadované frekvenčné vlastnosti zadržať s maximálnym požadovaným útlmom. Frekvenčné filtre môžeme z hľadiska použitých súčiastok rozdeliť na aktívne a pasívne. V našej práci sa budeme zaoberať aktívnymi filtrami, ktoré sa okrem pasívnych súčiastok skladajú aj z aktívnych súčiastok (operačné zosilňovače, tranzistory, elektrónky).

Dôležitou súčasťou tvorby elektronických obvodov v dnešnej dobe je ich simulácia. V minulosti sa musel elektronický obvod najskôr zostrojiť a až potom sa zmerali jeho vlastnosti, ktoré sa nemuseli zhodovať s požadovanými hodnotami. Simulácia nám v súčasnosti tento problém rieši a poskytuje možnosť úpravy obvodu ešte pred jeho samotným zhotovením. Z praktického hľadiska je to výhodne kvôli

---

finančným úsporám. Rola počítača sa tak v praxi elektroniky stáva pri návrhu a simulácii elektronických obvodov významnou.

Cieľom predloženej diplomovej práce je teoreticky navrhnuť jednotlivé elektronické bloky a uskutočniť ich simuláciu v programe MultiSIM. Jednotlivé bloky následne zhotoviť a zrealizovať na nich jednotlivé merania. Výsledky merania zhotovených elektronických obvodov ďalej spracovať a porovnať ich so simuláciou v programe MultiSIM. Vyhodnotiť odlišnosti vo výsledkoch s dôrazom najmä na presnosť simulácie a z toho vyplývajúcu výpočtovú náročnosť modelu vybraného obvodu.

---

# 1 Prehľad o súčasnom stave riešenej problematiky

## 1.1 Prostredie SPICE

SPICE je skratka z anglického „Simulation Program with Integrated Circuits Emphasis“, čo vo voľnom preklade znamená „Simulačný program zameraný hlavne na integrované obvody“.

Samotné slovo SPICE pritom zastrešuje celú skupinu programov určených pre simuláciu činnosti elektrických obvodov, ale tiež aj formát dát, s ktorými tieto programy pracujú (Olejár, 2011).

Prostredie SPICE je štandardom počítačového modelovania a simulácie elektrických obvodov. SPICE - kompatibilné programy sa dnes využívajú k simulácii systémov najrôznejšej povahy, analógových a digitálnych, elektrických i elektromechanických. Sú súčasťou softwarových balíkov elektrotechnického CADu (Biolek, 2005).

### 1.1.1 História a vývoj SPICE

V roku 1971 vytvoril študent Larry Nagel na Kalifornskej Univerzite v Berkeley, program SPICE1 ako vyššiu vývojovú verziu svojho predchádzajúceho programu CANCER (Computer Analysis of Nonlinear Circuits Excluding Radiation).

Program umožňoval analýzu dejov v obvodoch obsahujúcich hlavne bipolárne a unipolárne tranzistory. Užívateľ mal navyše možnosť prakticky neobmedzeného rozširovania sortimentu analyzovaných súčiastok technikou makro modelov zakladaním takzvaných pod obvodov (subcircuits). Pretože program bol v podstate voľne šíriteľný, stal sa viac menej štandardným simulačným nástrojom pre elektrotechnické úlohy.

V roku 1975 bola predstavená verzia SPICE2 s podstatne zdokonalenými modelmi i numerickými algoritmami. Táto verzia bola v priebehu takmer 20 rokov postupne zdokonaľovaná na Berkeleyskej Univerzite až do dnes všeobecne známeho štandardu SPICE2G.6, ktorý bol v roku 1983 sprístupnený k voľnému používaniu.

Zdrojové texty SPICE1 a SPICE2 boli napísané vo Fortrane. Vzhľadom na zvýšené využívanie Unixových pracovných staníc padlo v Berkeleyskej Univerzite rozhodnutie prepísať SPICE2 do jazyka C. Tak začala vznikať verzia SPICE3. Dnes je

---

rozšírená verzia SPICE 3F.2. Oproti SPICE2G.6 sa vyznačuje radom vylepšení, avšak z rôznych dôvodov došlo k strate spätnej kompatibility s SPICE2G.6.

S rastom výkonnosti počítačov PC došlo k prepisovaniu programov, doteraz bežiacich na výkonných pracovných staniciach, na programy spustiteľné na „PCčkách“. Tak vznikol štandard PSpice (Biolek, 2005).

### 1.1.2 Programy typu „SPICE-like“ a „SPICE-compatible“

V dnešnej dobe existuje viacej simulačných programov, ktoré využívajú v podstate tri nie celkom kompatibilné štandardy: SPICE2, SPICE3, PSPICE. Všetky môžeme rozdeliť na takzvané „Spice-like“ a „Spice-compatible“ simulátory.

„*SPICE-like*“ označuje, že simulátor je schopný generovať podobné výsledky analýzy ako SPICE, avšak nemusí byť schopný čítať štandardné vstupné súbory SPICE. Typickými príkladmi sú staré verzie programov MicroCap alebo TINA, program SABER a pod.

„*Spice-compatible*“ označuje simulačné programy, ktoré dokážu čítať štandardné vstupné súbory SPICE, robiť klasické SPICE analýzy a generovať výsledky v štandardnom SPICE2G.6 tvare.

Zo súčasných programov sú to napríklad PSpice, HSpice (štandard SPICE3), WINSpice, MultiSIM, MicroCap od verzie IV, a ďalšie (Biolek, 2005).

## 1.2 Program MultiSIM

Program od firmy National Instrument je elektronické laboratórium pre počítač, ktoré umožňuje analógovú a digitálnu analýzu nakresleného elektronického obvodu. Je to vynikajúci pomocník pre vývoj elektronických zapojení a výborne sa hodí ako vyučujúca pomôcka na školách, pretože má jednoduché interaktívne ovládanie.

Okrem obvyklých vlastností takýchto programov, ako je zostavovanie elektronických obvodov zo súčiastok uložených v knižniciach a rôznych druhov simulácií, obsahuje program MultiSIM aj množstvo meracích prístrojov, ktoré môžeme vložiť na pracovnú plochu a zapojiť ich do samostatného obvodu. Po spustení simulácie sa potom s nimi meria ako na ich skutočných vzoroch.

---

Tento program obsahuje aj neobvyklé prístroje, ako napríklad logický prevodník, ktorý umožňuje vytvoriť z popisu v Boolovej algebre zapojenie súčiastok prevádzajúcich požadovanú funkciu, alebo zo zapojenia zapísať pravdivostnú tabuľku a výraz v Boolovej algebre, či generátor kódov vysielajúcich do zbernice série nastavených dát.

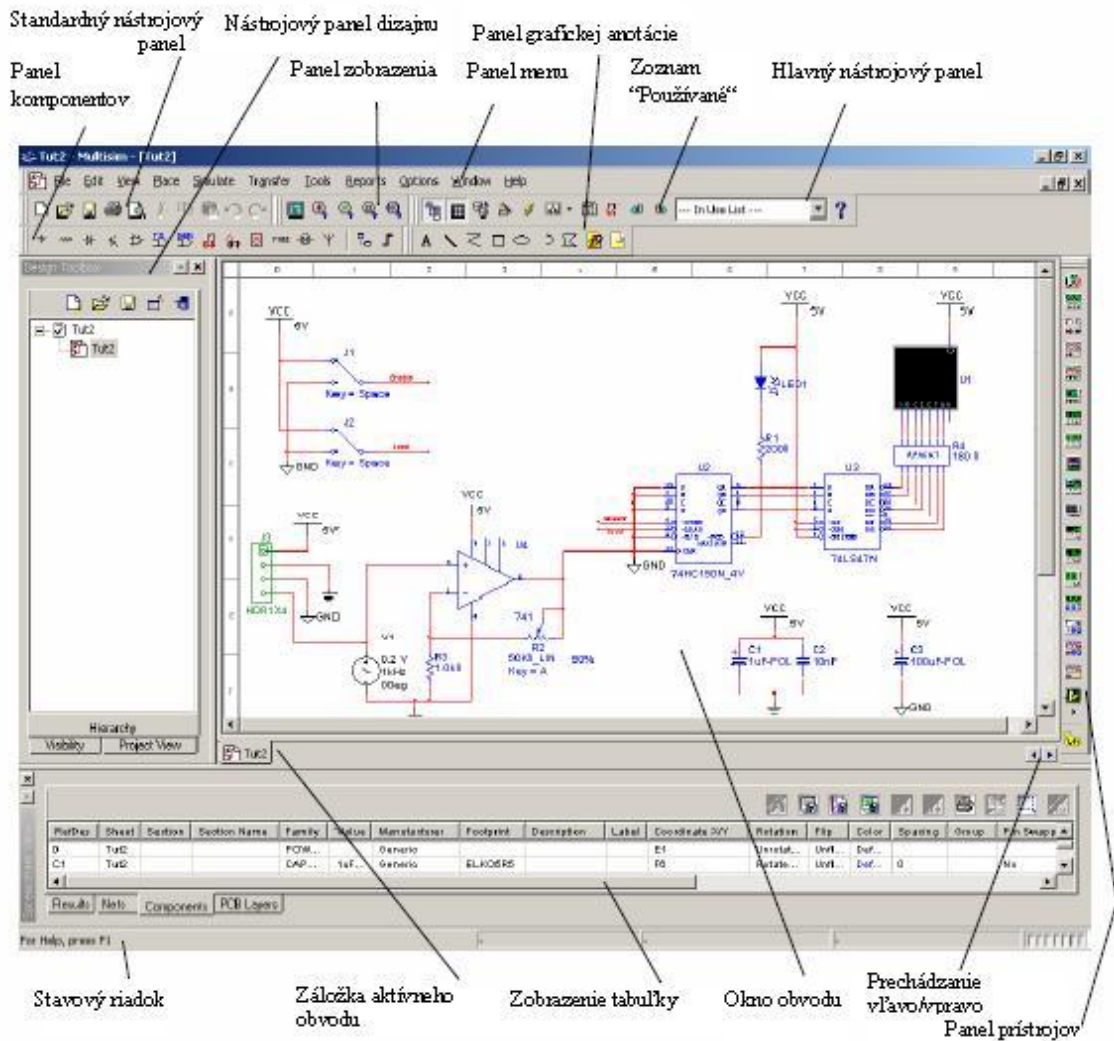
Program umožňuje nakresliť schematické zapojenie obvodu, ku ktorému môžeme pripojiť priamo na obrazovke rôzne meracie prístroje: voltmetre, ampérmetre, digitálny multimeter, dvojkanálový osciloskop, 16-kanálový logický analyzátor atď. Tieto prístroje sú súčasťou programu a plne nahrádzajú skutočné prístroje. Program umožňuje robiť meranie vo vybraných uzloch obvodov a priebehy meraných veličín zobrazíť v grafickej forme. Vďaka použitému princípu merania umožňuje MultiSIM robiť simulácie na analógových aj digitálnych obvodoch naraz. Počet meracích prístrojov zapojených v obvode nie je obmedzený. Časťou programu je knižnica modelov súčiastok so všetkými potrebnými parametrami pre analýzu obvodu. K dispozícii je niekoľko tisíc modelov (to však závisí na verzii programu). Väčšinu modelov súčiastok môžeme ďalej upravovať podľa potreby. Pomocou prvkov už obsiahnutých v knižnici programu môžeme vytvoriť vlastnú súčiastku vo forme pod obvodu (subcircuit), ktorý sa dá následne uložiť do knižnici (Čurdová, Velech, 2005).

Na program MultiSIM nadväzuje priamo aj program UltiBOARD od firmy National Instrument pre návrh dosiek plošných spojov, takže schémy, ktoré nakreslíme v MultiSIMe, môžeme použiť pre návrh dosky plošných spojov bez nutných úprav.

Nadväznosť na iné programy je zabezpečená prostredníctvom prevodníkov dát pre import a export nakresleného zapojenia do niektorých návrhových systémov plošných spojov (Eagle, OrCAD, a pod.). Výsledky analýz je možné exportovať do programu MathCAD a MS Excel (Čurdová, Velech, 2005).

### **1.2.1 Používateľské rozhranie**

Používateľské rozhranie (Obr. 1) ovláda všetky nastavenia - ovládanie programu, ktoré sú k dispozícii používateľovi systému (Pihrt, 2007).



Obr. 1 Používateľské rozhranie programu MultiSIM

Zdroj: Hudák - Lipovský - Draganová, 2009.

Všetky panely môžeme ľubovoľne presúvať po rozhraní (ľavo, vpravo, hore, dole).

- **Štandardný nástrojový panel** - (Standard Toolbar) obsahuje najčastejšie používané nástroje ako je otvoriť, uložiť súbor, tlačíť schému zapojenia atď.
- **Panel prístrojov** - (Instruments Toolbar) táto lišta obsahuje ikony všetkých meracích prístrojov použiteľných v programe.
- **Panel komponentov** – (Components Toolbar) lišta obsahuje súčiastkovú základňu z databázy MultiSIM-u, ktoré použijeme pri vytvorení požadovanej elektrickej schémy.



- 
- **Tabuľka s použitými komponentmi** – (Spreadsheet View) táto tabuľka nám umožňuje pokročilú zmenu parametrov ako označenia vstupov, výstupov, atribútov a pod. (Hudák, Lipovský, Draganová, 2009).
  - **Nástrojový panel dizajnu** – (Design Toolbox) poskytuje informácie o otvorených schémach.
  - **Panel zobrazenia** – (View Toolbar) nástrojová lišta pre priblíženie a oddialenie detailov v schéme, na ploche v celoobrazovkovom rozlíšení.
  - **Panel grafickej anotácie** – (Graphic Annotation) lišta pre doplnkové grafické úpravy znázornenia, zvýraznenia časti schém.
  - **Hlavný nástrojový panel** – (In Use) okno s výpisom všetkých použitých súčiastok v schéme.
  - **Okno obvodu** - (Circuit Window) pracovná plocha, na ktorej vytvárame schému zapojenia.
  - **Záložka aktívneho obvodu** – (Active Circuit Tab) aktívna schéma na ploche.
  - **Stavový riadok** – (Status Bar) stavová lišta.
  - **Panel menu** – (Menu Bar) štruktúrovaná lišta s menu (Pihrt, 2007).

### 1.2.2 Zakladné nastavenie MultiSIM-u

Programom MultiSIM vlastne kreslíme schémy elektrických obvodov, ktoré môžeme následne analyzovať a detailne zisťovať ich správanie. Pre kreslenie elektrických schém je najskôr nutné zabezpečiť požadované nastavenie programu.

Nastavenie sa prevádza v ponuke OPTIONS, pričom pre kreslenie schematických značiek v Európskej norme je potrebné v ponuke GLOBAL PREFERENCES, v záložke PARTS zaškrtnúť v časti SYMBOL STANDART normu DIN pre správne zobrazovanie komponentov v schéme (Čurdová, Velech, 2005).

### 1.2.3 Panel súčiastok

**Virtuálne súčiastky** - pracujeme s nimi v tom prípade, ak musíme často meniť hodnoty súčiastok, nie je tu však možný návrh plošného spoja (Obr. 2).



Obr. 2 Panel virtuálnych súčiastok

Zdroj: Pavlus - Franek, 2009.

**Reálne súčiastky** - pojem je relatívny a závisí na presnosti popisu v prostredí programu (Obr. 3), pracujeme s nimi v prípade, že budeme navrhovať plošný spoj.



Obr. 3 Panel reálnych súčiastok

Zdroj: Pavlus - Franek, 2009.

Výber súčiastok môžeme realizovať viacerými spôsobmi, priamo z lišty alebo kliknutím na PLACE → COMPONENT (Pavlus, Franek, 2009).

Význam jednotlivých položiek v ponuke PLACE → COMPONENT.

- **Sources** - obsahuje napájacie zdroje AC, DC. Napájanie digitálnych obvodov, funkčné zdroje.
- **Basic** - obsahuje rezistory, cievky, kondenzátory rôznych typov, potenciometre, konektory, relé, transformátory atď.
- **Diodes** - obsahuje usmerňovacie, stabilizačné a LED diódy, triaky, diaky, mostíky.
- **Transistors** - obsahuje bipolárne, unipolárne a IGBT tranzistory.
- **Analog** - obsahuje operačné zosilňovače, funkčné obvody.
- **TTL** - obsahuje integrované obvody TTL.
- **CMOS** - obsahuje integrované obvody CMOS.
- **Misc Digital** - obsahuje mikroprocesory, mikrokontrolery, programovateľné polia, pamäte atď.
- **Mixed** - obsahuje časovače, prevodníky atď.
- **Indicators** - obsahuje žiarovky, displeje, barografy, bzučiaky Power - obsahuje poistky, stabilizátory.

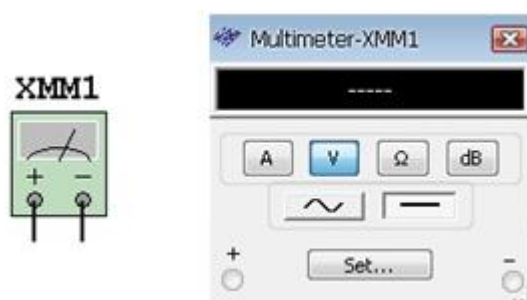
- **Misc** - obsahuje elektrónky, poistky, napät'ové regulátory, optoelektronické súčiastky RF - obsahuje súčiastky a komponenty vf. obvodov.
- **Elektro Mechanical** - kontakty, relé, motory, transformátory.

#### 1.2.4 Meracie prístroje multi

Základné meracie prístroje voltmeter, ampérmeter nájdeme v skupine Indicators, ostatné meracie prístroje sú uložené v lište meracích prístrojov. K dispozícii máme nasledujúce prístroje: multimeter, generátor funkcií, Wattmeter, osciloskop, 4 kanálový osciloskop, Bodeho zapisovač, čítač, generátor slov, logický analyzátor, logický konvertor, zobrazovač charakteristík, spektrálny analyzátor, analyzátor sietí, generátor funkcií Agilent, multimeter Agilent, osciloskop Agilent, osciloskop Tektronix, meracia sonda, prístroje LabVIEW, virtuálne prístroje laboratória NI ELVIS, prúdová sonda (Juránek, 2010).

##### 1.2.4.1 Multimeter (XMM)

Multimeter (Obr. 4) používame pre meranie jednosmerného a striedavého napätia alebo prúdu, odporu alebo útlmu medzi dvoma bodmi obvodu v decibeloch. Má automatické nastavenie rozsahu, vnútorný odpor a prúd, sú prednastavené k takmer ideálnym hodnotám, ktoré však môžeme zmeniť (Chlubný, 2010).



Obr. 4 Ikona a rozvinutý panel Multimetru

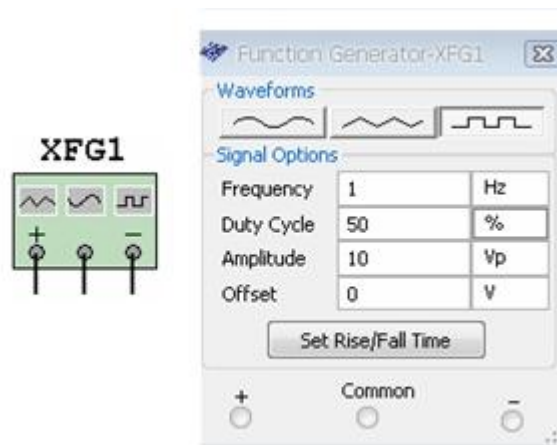
Zdroj: Pavlus - Franek, 2009.

---

### 1.2.4.2 Funkčný generátor (XFG)

Funkčný generátor (Obr. 5) je vlastne zdroj napätia, ktorý nám umožňuje zvoliť si sínusový, trojuholníkový a obdĺžnikový priebeh napájacieho napätia. Tvar výstupného signálu, ktorý dodávame do obvodu môžeme meniť, a to frekvenciu a amplitúdu. Striedavá a jednosmerná zložka je ovládaná používateľom.

Frekvenčný rozsah generátora signálov je dostatočne veľký na pokrytie audio aj rádio frekvencií. Funkčný generátor má tri pripájacie svorky, pomocou ktorých pripájame generátor do obvodu. Spoločná svorka umožňuje vytvorenie referencie pre daný signál (Hudák, Lipovský, Draganová, 2009).



Obr. 5 Ikona a rozvinutý panel Funkčného generátora

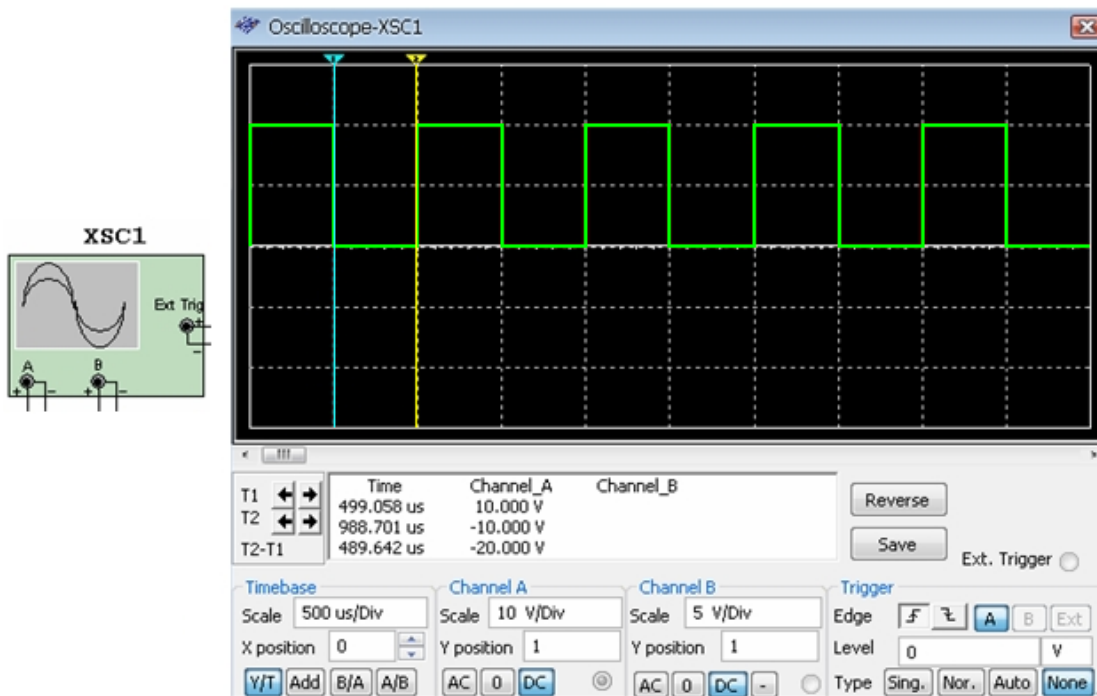
Zdroj: Pavlus - Franek, 2009.

Rozvinutý panel Funkčného generátora.

- **Waveforms** - nastavenie tvaru výstupného signálu.
- **Frequency** - nastavenie kmitočtu.
- **Duty cycle** – pracovný cyklus.
- **Amplitúde** - amplitúda výstupného signálu.
- **Offset** - nastavenie jednosmernej zložky.
- **Set Rise/Fall Time** - u obdĺžnikového signálu nastavenie doby trvania nábežnej a zostupnej hrany (Pavlus, Franek, 2009).

### 1.2.4.3 Dvojkanalový osciloskop (XSC)

Dvojkanalový osciloskop (Obr. 6) slúži k sledovaniu zmien amplitúdy a frekvencie elektrických signálov. Môžeme ním zobrazit' závislosť amplitúdy jedného alebo dvoch signálov na čase alebo ich vzájomné porovnanie (Chlubný, 2010).



Obr. 6 Ikona a rozvinutý panel Dvojkanalového osciloskopu

Zdroj: Pavlus - Franek, 2009.

Rozvinutý panel Dvojkanalového osciloskopu.

**Timebase** - časová základňa.

- Scale - nastavenie časovej základne.
- X position - posun časovej základne v smere osi x.
- B/A - A/B - porovnávanie vstupov signálov kanálov A a B.

**Channel A , Chanel B** - Vstup signálu kanálu A, kanálu B.

- Scale - Nastavenie počtu voltov na dielik.
- Y position - posunutie signálu v osi y (dajú sa oddeliť signály vstupu A a B).
- AC - zobrazenie striedavej zložky signálu.
- DC - zobrazenie striedavej a jednosmernej zložky signálu.

- 
- 0 - odpojenie vstupu.

**Trigger** – synchronizácia.

- Edge - volíme spôsob spúšťania signálu (využitím hrán signálu, kanálmi A alebo B, a spúšťanie externé).
- Level - volíme úroveň spúšťacieho signálu.
- Type (Sing, Nor, Auto, None) - volíme charakter signálu synchronizácie.

**Revers** - inverzné zobrazenie obrazovky osciloskopu.

**Save** - uloženie zobrazených výsledkov signálov.

**T1** - zobrazuje veľkosť napätia v kanáloch A a B v danom čase.

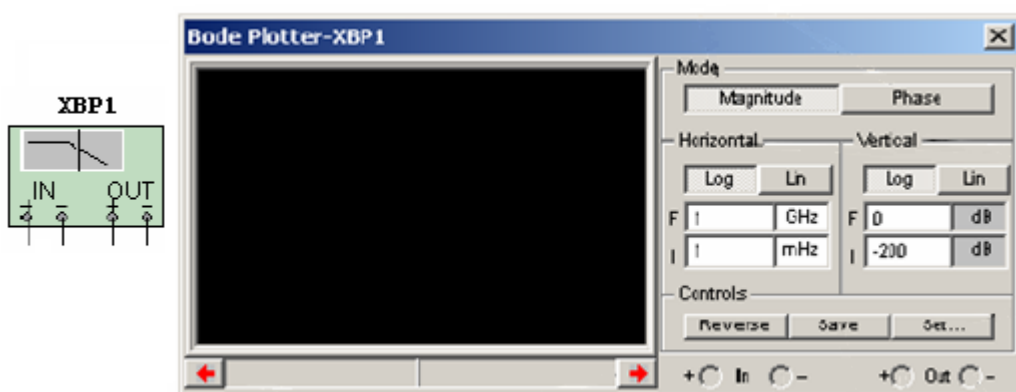
**T2** - zobrazuje veľkosť napätia v kanáloch A a B v danom čase.

**T2 - T1** - určuje rozdiel v napätiach a čase medzi kurzorom T2 a T1

(Pavlus, Franek, 2009).

#### 1.2.4.4 Bodeho zapisovač

Bodeho zapisovač (Obr. 7) zobrazuje frekvenčnú odozvu obvodu a je veľmi užitočný pre analýzu filtrov. Prístroj meria napäťový zisk signálu alebo fázový posun. Po pripojení prístroja prebehne spektrálna analýza obvodu (Chlubný, 2010).



Obr. 7 Ikona a rozvinutý panel Bodeho zapisovača

Zdroj: Hudák - Lipovský - Draganová, 2009.

---

**Mode** – slúži na výber meracieho módu, či chceme merať amplitúdu alebo fázu.

- Horizontal, Vertikal – nastavenie osí.
- Log, Lin – nastavenie základne (logaritmická, lineárna).
- F – konečná hodnota.
- I – počiatočná hodnota.

**Controls** – panel nastavenia.

- Revers - inverzné zobrazenie obrazovky zapisovača.
- Save – uloží výsledky ako súbor \*.bod alebo \*.tdm.
- Set – slúži na výber vzorkovacej frekvencie.

**In, Out** – vstupné a výstupné svorky (Hudák, Lipovský, Draganová, 2009).

### 1.2.5 Simulácia

Začatie simulácie môžeme spustiť z hlavnej ponuky SIMULATE/RUN - SIMULATE/STOP, alebo kliknutím na ikonu simulácie (Obr. 8).



Obr. 8 Ikona simulácie

Zdroj: Pavlus - Franek, 2009.

Spustenie simulácie dokumentuje informácia v stavovom riadku v pravej dolnej časti obrazovky okna TRAN s bežiacim textom SIMULATING a bežiace zelené svetlo. Ak by sme chceli vykonať zmeny parametrov obvodu je potrebné simuláciu zastaviť, zmeny vykonať a simuláciu opätovne spustiť (Pavlus, Franek, 2009).

---

## 1.3 Tranzistorový zosilňovač

### 1.3.1 Definícia zosilňovača

Zosilňovačom nazývame elektronické zariadenie, v ktorom vstupný signál relatívne malého výkonu riadi prenos podstatne väčšej energie z napájacieho zdroja do záťaže. Keďže výkon je súčin dvoch obvodových veličín, napätia a prúdu, v praxi sa to realizuje tak, že vstupným signálom sa ovláda veľkosť prúdu dodávaného z napájacieho zdroja do výstupného obvodu zosilňovacieho stupňa. Teda výstupný (zosilnený) signál je funkciou vstupného (zosilňovaného) signálu. Ako regulačný prvok sa tu používa vhodná elektronická aktívna súčiastka - dnes najčastejšie tranzistor. Zosilňovač predstavuje štvorpól, teda dvojbránu s dvoma vstupnými a dvoma výstupnými svorkami (Žatkovič, 2007).

### 1.3.2 Rozdelenie zosilňovačov

V rádio elektronických zariadeniach sa používajú rôzne druhy zosilňovačov (Michaláč, 1987). Rozdelíme ich podľa rôznych hľadísk:

A. Podľa použitých aktívnych súčiastok :

- tranzistorové zosilňovače,
- elektrónkové zosilňovače,
- zosilňovače s integrovanými obvodmi.

B. Podľa frekvencie vstupného riadiaceho signálu :

- nízkofrekvenčné (nf),
- vysokofrekvenčné (vf),
- širokopásmové.

C. Podľa veľkosti budiaceho signálu:

- zosilňovače malých signálov,
- zosilňovače veľkých signálov.



---

D. Podľa zapojenia zosilňujúcej súčiastky:

- zosilňovače so spoločným emitorom, kolektorom alebo bazou,
- jednočinné alebo dvojčinné.

E. Podľa počtu zosilňujúcich stupňov:

- jednostupňové,
- viacstupňové.

F. Podľa spôsobu väzby medzi zosilňovacími stupňami:

- s väzbou priamou,
- s väzbou RC,
- s väzbou transformátorovou.

### 1.3.3 Vlastnosti zosilňovačov

#### 1.3.3.1 Zosilnenie

Zosilnenie  $A$  je charakterizované ako pomer výstupnej signálovej veličiny k zodpovedajúcej signálovej vstupnej veličine. Poznáme tri základné zosilnenia:

- napät'ové zosilnenie (1)  $A_u = \frac{U_2}{U_1}$  (1)

- prúdové zosilnenie (2)  $A_i = \frac{I_2}{I_1}$  (2)

- výkonové zosilnenie (3)  $A_p = \frac{P_2}{P_1}$  (3)

Ak vyjadrujeme zosilnenie v decibeloch (dB) označujeme ho ako zisk zosilňovača (Michaláč, 1987).

---

### 1.3.3.2 Vstupná impedancia

Vstupná impedancia  $Z_{vst}$  je daná pomerom (4) vstupného napätia  $U_1$  a vstupným prúdom  $I_1$ . Vstupná impedancia nezávisí od veľkosti budiaceho signálu, ale závisí od jeho frekvencie (Žatkovič, 2007).

$$Z_{vst} = \frac{U_1}{I_1}, \Omega \quad (4)$$

### 1.3.3.3 Výstupná impedancia

Výstupná impedancia  $Z_{výst}$  je daná pomerom (5) výstupného napätia  $U_2$  bez pripojenej záťaže a výstupného prúdu  $I_2$ , ktorý je zosilňovač schopný dodať pri skratovaných výstupných svorkách. Výstupná impedancia nezávisí od veľkosti výstupného signálu, ale závisí od jeho frekvencie (Žatkovič, 2007).

$$Z_{výst} = \frac{U_2}{I_2}, \Omega \quad (5)$$

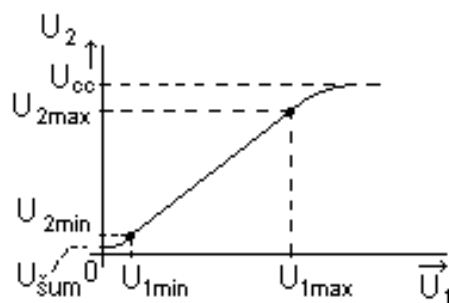
### 1.3.3.4 Dynamický rozsah

Dynamický rozsah  $D$  je daný pomerom (6) najväčšieho k najmenšiemu signálu na vstupe zosilňovača, ktorý je zosilňovač schopný preniesť pri definovanom výstupnom výkone a skreslení (Žatkovič, 2007).

$$D = \frac{U_{1max}}{U_{1min}} \quad \text{alebo vyjadrený v decibeloch} \quad D_{dB} = 20 \log \frac{U_{1max}}{U_{1min}}, \text{Db} \quad (6)$$

### 1.3.3.5 Amplitúdová prevodová charakteristika

Amplitúdová prevodová charakteristika (Obr. 9) je grafické znázornenie závislosti amplitúdy výstupného napätia  $U_2$  od amplitúdy vstupného napätia  $U_1$ .



Obr. 9 Amplitúdová prevodová charakteristika zosilňovača

Zdroj: Žatkovič, 2007.

Napätie  $U_{1min}$  je minimálne vstupné napätie, ak napätie klesne pod jeho hodnotu, signál sa začne strácať vo vlastných rušivých signáloch zosilňovača. Napätie  $U_{1max}$  je maximálne vstupné napätie, po jeho prekročení bude zosilňovač prebudený (Michaláč, 1987).

#### 1.3.3.6 Citlivosť

Citlivosť udáva veľkosť vstupného napätia zosilňovača, pri ktorom dosiahneme na výstupe požadovaný výstupný výkon. Ak má zosilňovač viac vstupov citlivosť udávame pre každý vstup samostatne (Žatkovič, 2007).

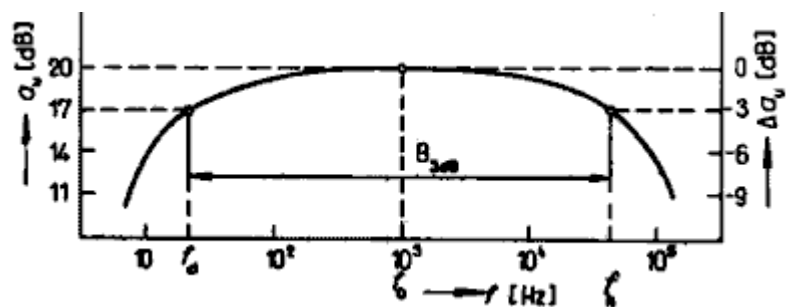
#### 1.3.3.7 Výstupný výkon

Výstupný výkon  $P_{2ef}$  (7) je maximálny výkon zosilňovača, ktorý dostaneme na výstupných svorkách zosilňovača pri definovanom skreslení, frekvencii a tvare signálu (Žatkovič, 2007).

$$P_{2ef} = \frac{(U_{2ef})^2}{R_z}, W \quad (7)$$

#### 1.3.3.8 Šírka prenášaného pásma

Šírka prenášaného pásma  $B$  (Obr. 10) je pásmo frekvencií vstupných signálov, pri ktorých je zosilnenie zosilňovača v daných technických parametroch.



Obr. 10 Útlmová charakteristika zosilňovača

Zdroj: Žatkovič, 2007.

Šírka prenášaného pásma je definovaná hraničnými frekvenciami  $f_D$  dolnou medznou frekvenciou a  $f_H$  hornou medznou frekvenciou, ktoré dostaneme poklesom zisku o 3dB voči referenčnej frekvencii (Michaláč, 1987).

### 1.3.4 Skreslenie

Skreslenie môžeme zaradiť medzi nežiaduce charakteristické vlastnosti zosilňovača. Spôsobuje zmeny priebehu výstupného signálu voči priebehu vstupného signálu (Michaláč, 1987).

Skreslenie rozpoznávame:

- lineárne (frekvenčné, fázové),
- nelineárne (harmonické, intermodulačné).

#### 1.3.4.1 Harmonické skreslenie

Harmonické skreslenie zapríčiňujú nelineárne časti volt ampérovej charakteristiky aktívnych zosilňovacích alebo magnetických prvkov. Veľkosť harmonického skreslenia vyjadruje činiteľom harmonického skreslenia (8) (Žatkovič, 2007).

$$k_h = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_N^2}}{\sqrt{U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_N^2}} \cdot 100, \% \quad (8)$$

---

ak  $U_1 \gg U_2, U_3, \dots, U_n$  potom platí (9):

$$k_h = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_N^2}}{U_1} \cdot 100, \% \quad (9)$$

#### 1.3.4.2 Intermodulačné skreslenie

Intermodulačné skreslenie vzniká, keď na vstup zosilňovača privedieme viac signálov s rôznymi frekvenciami. Intermodulačné skreslenie je viacnásobne rušivejšie ako harmonické skreslenie. Toto skreslenie hodnotí činiteľ intermodulačného skreslenia (10) (Michaláč, 1987).

$$k_i = \frac{\sqrt{U_{f_2+f_1}^2 + U_{f_2-f_2}^2 + U_{f_2+2f_1}^2 + U_{f_2-2f_1}^2 + \dots}}{U_{f_1} + U_{f_2}} \cdot 100\% \quad (10)$$

#### 1.3.4.3 Frekvenčné skreslenie

Frekvenčné skreslenie závisí od frekvencie vstupného signálu nie však od jeho amplitúdy. Toto skreslenie spôsobuje nerovnomerne zosilnenie signálov rôznych frekvencií v zosilňovači. Na výstupe zosilňovača potom dochádza ku zmenám amplitúdy výstupného signálu v závislosti od frekvencie. Toto skreslenie zapríčiňujú parazitné a väzbové prvky v obvode. Frekvenčné skreslenie sa graficky znázorňuje amplitúdovo-frekvenčnou charakteristikou (Michaláč, 1987).

Činiteľ frekvenčného skreslenia vypočítame zo vzťahu (11):

$$k_f = \frac{A_{ref}}{A_f} \quad (11)$$

#### 1.3.4.4 Fázové skreslenie

Fázové skreslenie spôsobuje fázový posun medzi fázou vstupného signálu a fázou výstupného signálu. Fázové skreslenie je závislé od frekvencie a je spôsobené lineárnymi reaktančnými prvkami. Toto skreslenie hodnotí činiteľ fázového skreslenia (12) (Michaláč, 1987).

$$k_\varphi = \varphi_{výst} - \varphi_{vst} \quad (12)$$

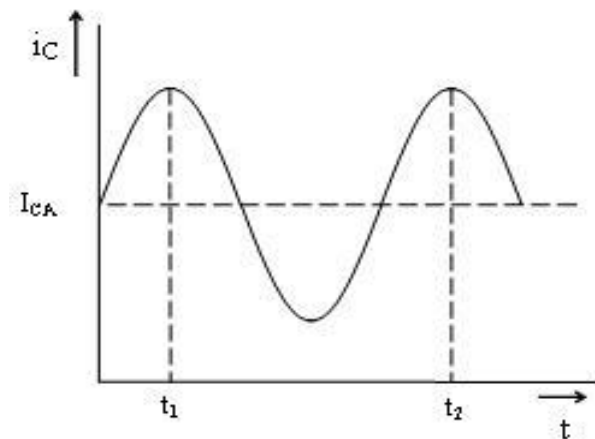
---

### 1.3.5 Pracovné triedy zosilňovačov

#### 1.3.5.1 Pracovná trieda A

Trieda A (Obr. 11) je charakterizovaná umiestnením kludového pracovného bodu  $P_0$  v strede lineárnej časti prevodovej charakteristiky a uhol otvorenia je  $\theta = 2\pi = 360^\circ$ . Potom kolektorový prúd tečie tranzistorom počas celej periódy vstupného budiaceho signálu. Pretože zosilňovacím prvkom aj bez budenia preteká pomerne veľký kolektorový prúd, má trieda malú účinnosť - menej ako 50% .

Výhodou tejto triedy je však veľmi malé skreslenie. Trieda A sa využíva pri nízkofrekvenčných zosilňovačoch, kde nie je treba veľká účinnosť (Uhliř, Křečan, 1985).

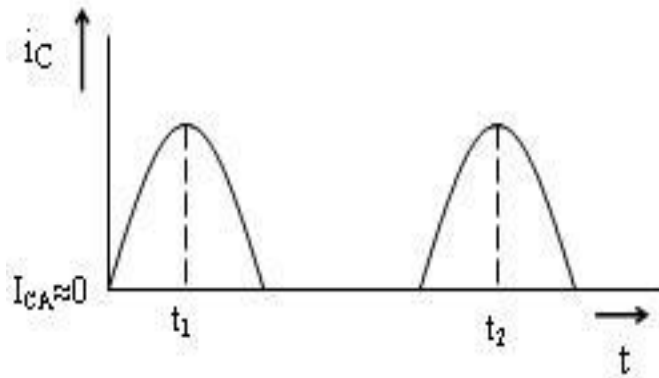


Obr. 11 Pracovná trieda A

Zdroj: Čuntala, 2009.

#### 1.3.5.2 Pracovná trieda B

Trieda B (Obr. 12) je charakterizovaná umiestnením kludového pracovného bodu  $P_0$  do miesta zániku kolektorového prúdu, takže uhol otvorenia  $\theta = \pi = 180^\circ$ . V stave pokoja tranzistorom netečie žiaden prúd. Účinnosť triedy B je menej ako 70%, preto sa trieda B využíva hlavne v dvojčinnom zapojení, kde je účinnosť približne 75%. Trieda B sa používa v koncových stupňoch nízkofrekvenčných zosilňovačov (Uhliř, Křečan, 1985).

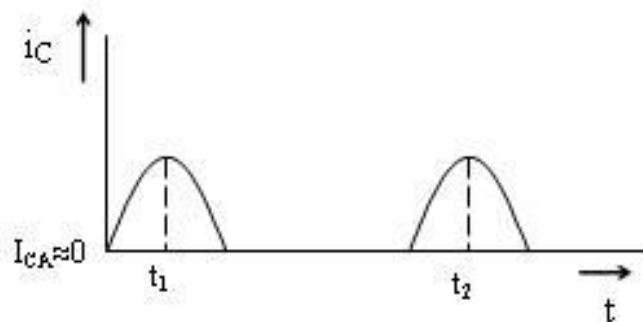


Obr. 12 Pracovná trieda B

Zdroj: Čuntala, 2009.

### 1.3.5.3 Pracovná trieda C

Trieda C (Obr. 13) je definovaná umiestnením kľudového pracovného bodu  $P_0$  za miesto zániku kolektorového prúdu, takže tranzistorom tečie prúd v kratšom čase ako je polperióda vstupného signálu. Uhol otvorenia je  $\theta < \pi < 180^\circ$ . Účinnosť tejto triedy je približne 85%. Nevýhodou triedy C je veľké skreslenie, preto sa využíva tam, kde to nie je chybou, prevažne pri vysokofrekvenčných zmiešavačoch (Uhlíř, Křečna, 1985).



Obr. 13 Pracovná trieda C

Zdroj: Čuntala, 2009.

### 1.3.6 Základné zapojenia tranzistorových zosilňovačov

Tranzistor je polovodičová zosilňovacia súčiastka. Môžeme ich rozdeliť na :

- bipolárny tranzistor (PNP, NPN),
- unipolárny tranzistor (FET , MOS).

---

Bipolárny tranzistor je polovodičový elektronický prvok skladajúci sa z troch polovodičových vrstiev oddelených dvomi priedochmi. Tranzistor má tri elektródy:

- E – emitor,
- B – báza,
- K – kolektor.

Z hľadiska obvodových veličín je tranzistor zapojený ako dvojbrána - jedna z jeho elektród je spoločná vstupnej a výstupnej bráne.

Podľa toho, ktorá elektróda je spoločná rozoznávame tri základné zapojenia tranzistorového zosilňovača:

1. SB – zapojenie so spoločnou bázou,
2. SE – zapojenie so spoločným emitorom (najpoužívanejšie zapojenie),
3. SK – zapojenie so spoločným kolektorom.

Ak má tranzistor vo všetkých troch zapojeniach pracovať ako zosilňovačov musí byť:

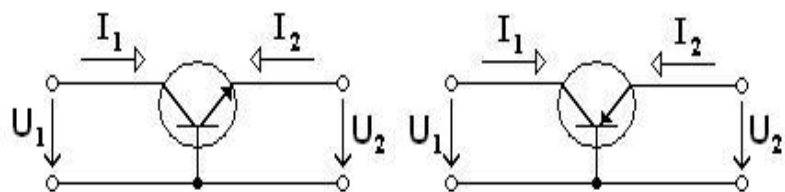
- priedoch emitor - báza polarizovaný v priepustnom smere,
- priedoch kolektor - báza polarizovaný v závernom smere (Makovíny, 1994).

#### 1.3.6.1 Zapojenie tranzistorového zosilňovača so spoločnou bázou

Vstupná impedancia pri zapojení tranzistorového zosilňovača so spoločnou bázou (Obr. 14) je pomerne veľmi malá a preto sa zosilňovač musí budiť určitým výkonom, ktorý sa zväčšuje so zväčšovaním odporu zaťažovacieho rezistora. Výstupná impedancia je veľká.

Prúdové zosilnenie je menšie ako 1. Napät'ové zosilnenie je v širokom rozmedzí priamo úmerné zaťažovaciemu odporu. Zosilnenie výkonu je pomerne malé, 20 až 30 dB (Uhliř, Křečan, 1985).

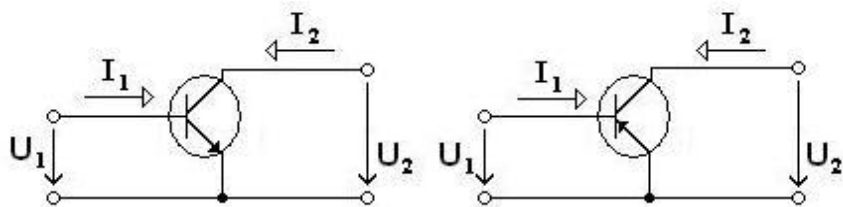




Obr. 14 Zapojenie tranzistora so spoločnou bázou

### 1.3.6.2 Zapojenie tranzistorového zosilňovača so spoločným emitorom

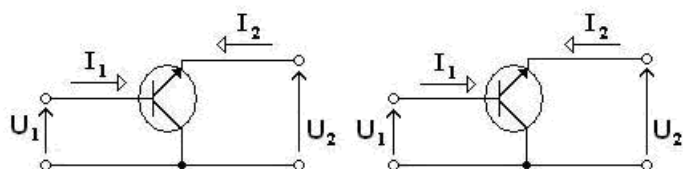
Toto je najčastejšie používané zapojenie (Obr. 15). Vonkajšími obvodmi tranzistora možno ovplyvniť vstupnú a výstupnú impedanciu, veľkosť zosilnenia alebo zosilnenia napätia na úkor prúdu alebo výkonu. Hodnoty vstupnej a výstupnej impedancie závisia od polohy pracovného bodu tranzistora. Výkonové zosilnenie je zo všetkých možných zapojení najväčšie (Uhliř, Křečan, 1985).



Obr. 15 Zapojenie tranzistora so spoločným emitorom

### 1.3.6.3 Zapojenie tranzistorového zosilňovača so spoločným kolektorom

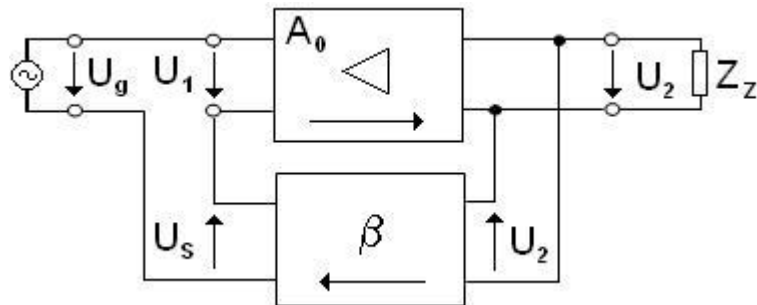
Zapojenie tranzistorového zosilňovača so spoločným kolektorom (Obr. 16) má zo všetkých troch zapojení najväčšiu vstupnú impedanciu a najmenšiu výstupnú impedanciu. Napät'ové zosilnenie je menšie ako 1, prúdové zosilnenie je veľké. Tranzistor v zapojení so spoločným kolektorom sa nazýva tiež emitorový sledovač (Uhliř, Křečan, 1985).



Obr. 16 Zapojenie tranzistora so spoločným kolektorom

### 1.3.7 Spättná väzba v zosilňovačoch

Spättnou väzbou (Obr. 17) v zosilňovačoch rozumieme prenos časti zosilneného elektrického signálu z výstupu zosilňovača spät' na jeho vstup. Podľa veľkosti fázového posunu medzi signálom privádzaným na vstup zosilňovača a signálom privedeným z výstupu sa výsledný prenos buď znižuje (záporná spättná väzba), alebo zväčšuje (kladná spättná väzba).



Obr. 17 Zosilňovač so spättnou väzbou

Výraz  $[1 - \beta(j\omega)A(j\omega)]$  vyjadruje frekvenčne závislú veľkosť spätnej väzby. Účinok spätnej väzby závisí od polarít spätnoväzobného napätia oproti polarite napätia na vstupe zosilňovača. Ak je:

- $|1 - \beta.A| > 1$ , spättná väzba je záporná, platí:  $A^* < A$ ,
- $|1 - \beta.A| < 1$ , spättná väzba je kladná, platí:  $A^* > A$ ,
- $|1 - \beta.A| = 0$ , spättná väzba je kritická,  $A^* \rightarrow \infty$ , potom  $U_2$  nezávisí od  $U_1$ .

Záporná spättná väzba znižuje harmonické, frekvenčné aj fázové skreslenie, vyvoláva pokles zosilnenia a znižuje šírku prenášaného pásma. Používa sa najmä v nízkofrekvenčných zosilňovačoch.

Kladná spättná väzba ovplyvňuje vstupnú aj výstupnú impedanciu obvodu. Vo väčšine prípadov na pôsobí parametre opačne ako záporná spättná väzba. Kladná spättná väzba sa používa najmä v oscilátoroch.

Spättná väzba ovplyvňuje všetky dynamické vlastnosti zosilňovača (Čuntala, 2009).

---

## 1.4 Operačné zosilňovače

### 1.4.1 Definícia operačného zosilňovača

Operačné zosilňovače tvoria skupinu analógových integrovaných obvodov. Sú to jednosmerné zosilňovače s veľkým napät'ovým zosilnením, veľkou vstupnou impedanciou a malou výstupnou impedanciou. Operačný zosilňovač pracuje v princípe ako diferenčný zosilňovač (Michaláč, 1987).

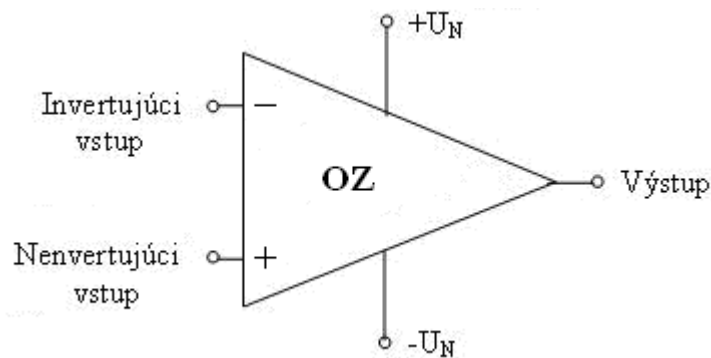
### 1.4.2 Základne pojmy

- **Napät'ová nesymetria vstupov** - je napätie, ktoré musíme priviesť na vstupné svorky operačného zosilňovača, aby sme dostali výstupné nulové napätie.
- **Prúdová nesymetria vstupov** - je rozdiel prúdov privádzaných do oboch vstupov, ak je výstupné napätie nulové.
- **Vstupný napät'ový rozsah** - je to rozsah vstupných napätí, pri ktorom má operačný zosilňovač požadované špecifikované funkčné vlastnosti.
- **Vstupný kludový prúd** - je to hodnota prúdu, ktorý operačný zosilňovač odoberá z napájacieho zdroja pri nulovom vstupnom signáli.
- **Vstupný diferenčný odpor** - je odpor medzi jedným vstupom a druhým uzemneným vstupom.
- **Napät'ové zosilnenie pri otvorenej spätnoväzobnej slučke** – je napät'ové zosilnenie definované pre predpísanú záťaž, napájacie napätie a maximálny prípustný neskreslený signál pri kompenzovanej napät'ovej nesymetrii vstupov.
- **Príkon operačného zosilňovača** - je jednosmerný príkon, ktorý je dodávaný do oboch vetví napájania, potrebný ku činnosti operačného zosilňovača pri nulovom výstupnom napätí.
- **Tepelný drift** – vyjadruje sa súčiniteľom tepelnej závislosti vstupnej napät'ovej alebo prúdovej nesymetrie (Čuntala, 2009).

---

### 1.4.3 Charakteristické vlastnosti ideálneho operačného zosilňovača

- Nekonečné veľké napät'ové zosilnenie v celom frekvenčnom pásme.
- Frekvenčná nezávislosť - nekonečne široké frekvenčné pásmo.
- Nekonečne veľký vstupný odpor  $R_{vst} = \infty \Omega$ .
- Nulový výstupný odpor  $R_{výst} = 0 \Omega$ .
- Nulovému vstupnému napätiu zodpovedá nulové výstupné napätie.
- Statická prevodová charakteristika je priamka  $U_2 = f(U_1)$ .
- Reálny operačný zosilňovač tieto hodnoty nemôže dosiahnuť, ale niektorými parametrami sa približuje:
  - Napät'ové zosilnenie  $A = 10^4$  až  $10^8$
  - Vstupná impedancia  $R_{vst} = 5 * 10^4$  až  $2 * 10^6 \Omega$
  - Výstupný odpor  $R_{výst} = 50$  až  $150 \Omega$  (Michaláč, 1987).
- Operačné zosilňovače majú vysoké zosilnenie v stave naprázdno  $10^3$  až  $10^5$ .
- Zápornou spätnou väzbou však toto zosilnenie znižujeme.
- Čím silnejšia je záporná spätná väzba, tým sú vlastnosti presnejšie a stabilnejšie.



Obr. 18 Schematická značka operačného zosilňovača

Operačné zosilňovače (Obr. 18) sú napájané symetrickým napätím  $\pm U_N$ . Obvykle majú dva vstupy:

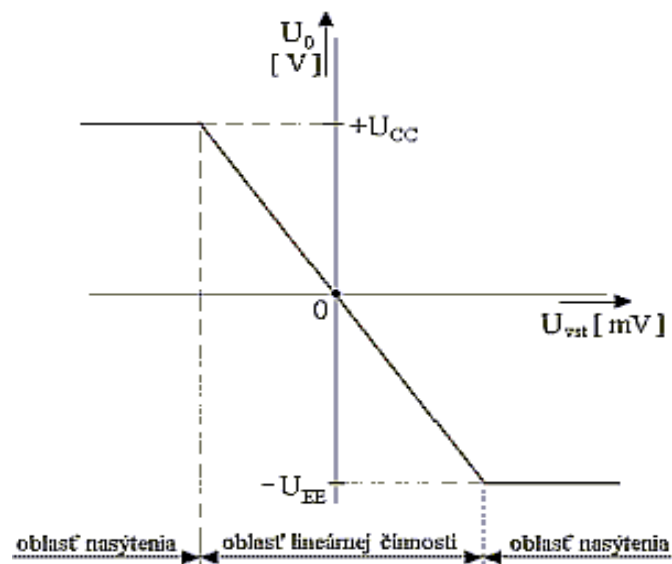
1. Invertujúci (-) signál privedený na tento vstup, má na výstupe opačnú polaritu,
2. Neinvertujúci (+) signál privádzaný na vstup, má na výstupe rovnakú polaritu.

Väčšinou ide o rozdielový zosilňovač (diferenčný), t.j. vstupný signál je zosilneným rozdielom dvoch vstupných signálov. Vonkajším zapojením možno

---

ovplyvniť vlastnosti tohto zosilňovača. Pripojením jednej pasívnej súčiastky alebo niekoľkých pasívnych súčiastok k vývodom operačného zosilňovača sa vytvorí spätná väzba, ktorou sa zabezpečí, že operačný zosilňovač bude pracovať ako diferenčný zosilňovač, lineárny zosilňovač invertujúci vstupný signál, zosilňovač neinvertujúci vstupný signál, integrátor, derivačný článok, generátor rôznych priebehov napätí, filter, oscilátor (Uhliř, Křečan, 1985).

Charakteristické pre operačný zosilňovač je existencia troch pracovných oblastí (Obr. 19). Sú dve oblasti nasýtenia, ktoré sa využívajú v zapojeniach operačného zosilňovača vo funkcii komparátora. Tretia oblasť je oblasť lineárnej činnosti. V tejto oblasti pracuje operačný zosilňovač ako zosilňovač malých vstupných signálov, rádovo niekoľko milivoltov až mikrovoltov so zosilnením A (Žatkovič, 2007).



Obr. 19 Prenosová charakteristika operačného zosilňovača

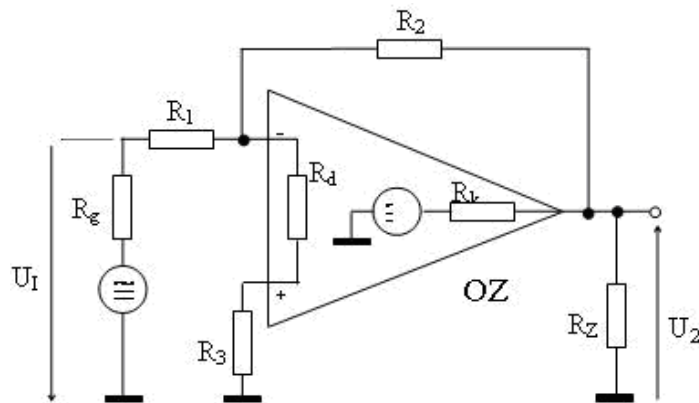
Zdroj: Žatkovič, 2007.

---

## 1.4.4 Základné zapojenia operačných zosilňovačov

### 1.4.4.1 Invertujúci operačný zosilňovač

Výstupné napätie má oproti vstupnému napätiu opačnú polaritu. Fázový posuv medzi vstupným a výstupným napätím je  $180^\circ$ . Toto zapojenie (Obr. 20) môže pracovať s kladným i záporným signálom, ktorý môže byť jednosmerný alebo striedavý (Čuntala, 2009).



Obr. 20 Schéma invertujúceho operačného zosilňovača

Zdroj: Čuntala, 2009.

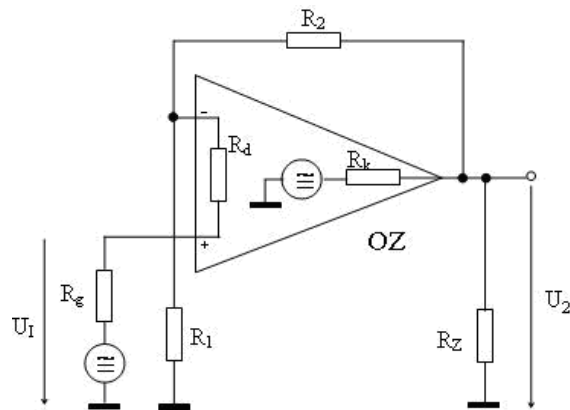
V prípade použitia ideálneho operačného zosilňovača určujeme celkové zosilnenie pomerom rezistorov  $R_1$  a  $R_2$ . Vstupný odpor sa rovná rezistoru  $R_1$ . Možno ho brať do úvahy ako kombinovaný prevodník. Rezistor  $R_1$  pracuje v prevodníku prúdu, rezistor  $R_2$  v prevodníku napätia. Rezistor  $R_3$  kompenzuje vplyv vstupného prúdu operačného zosilňovača (Uhlíř, Křečan, 1985). Jeho odpor sa volí podľa vzťahu (13):

$$R_3 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (13)$$

### 1.4.4.2 Neinvertujúci operačný zosilňovač

Výstupné napätie má rovnakú polaritu ako vstupné napätie. Fázový posuv je 0. Zapojenie (Obr. 21) môže pracovať aj s kladným i záporným signálom, ktorý môže byť

jednosmerný alebo striedavý. V prípade použitia ideálneho operačného zosilňovača vlastnosti obvodu určujú rezistory  $R_1$  a  $R_2$  (Čuntala, 2009).



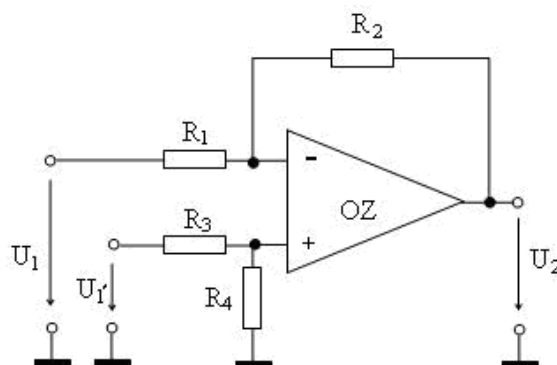
Obr. 21 Schéma neinvertujúceho operačného zosilňovača

Zdroj: Čuntala, 2009.

#### 1.4.4.3 Rozdielový operačný zosilňovač

Spojením invertujúceho a neinvertujúceho zapojenia vzniká rozdielový operačný zosilňovač (Obr. 22). Toto zapojenie môže pracovať s jednosmernými aj striedavými vstupnými signálmi. Ja to najtypickejšie a často používané zapojenie. V praxi sa často volí hodnota rezistorov  $R_1 = R_2$ ,  $R_3 = R_4$ . Výstupný signál  $U_2$  (14) sa rovná násobku rozdielu obidvoch vstupných signálov  $U_1$  a  $U_1'$  a prenosu napätia  $A_U$  (Uhliř, Křečan, 1985).

$$U_2 = (U_1 - U_1') \frac{R_2}{R_1} \quad (14)$$



Obr. 22 Schéma rozdielového operačného zosilňovača

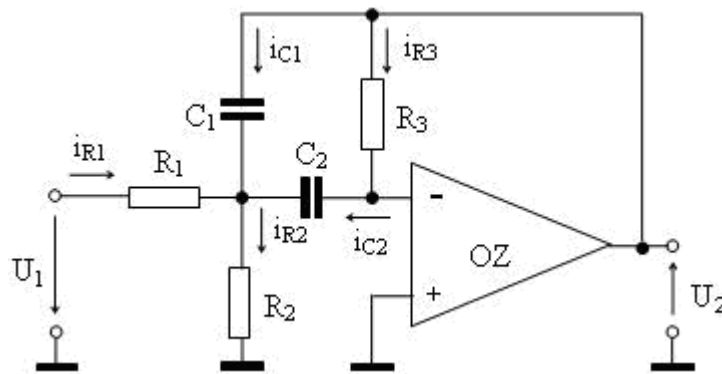
Zdroj: Čuntala, 2009.

Pre zosilnenie platí (15):

$$A = \frac{U_2}{U_1' - U_1} \quad \text{alebo} \quad A = \frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3} \quad (15)$$

#### 1.4.4.4 Aktívna pásmová priepusť

Aktívna pásmová priepusť (Obr. 23) pracuje ako filter, ktorý prepúšťa signály (Obr. 24) od určitej požadovanej dolnej hraničnej frekvencie  $f_D$  až po určitú požadovanú hornú hraničnú frekvenciu  $f_H$  s minimálnym útlmom a všetky ostatné signály s frekvenciami nižšími ako  $f_D$  a vyššími ako  $f_H$  prenáša s požadovaným útlmom (Žatkovič, 2007).



Obr. 23 Schéma aktívnej pásmovej priepuste

Zdroj: Čuntala, 2009.

Pre harmonický signál platí, že zosilnenie pri  $\omega_0$  je (16):

$$A(\omega_0) = \frac{U_2}{U_1} = -\frac{R_3}{R_1(1 + C_1/C_2)} \quad (16)$$

Šírku B prenášaného pásma pre pokles o 3 dB vypočítame zo vzťahu (17):

$$B = \frac{f_0}{Q} \quad f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} \quad (17)$$

Činiteľ kvality Q vypočítame zo vzťahu (18):

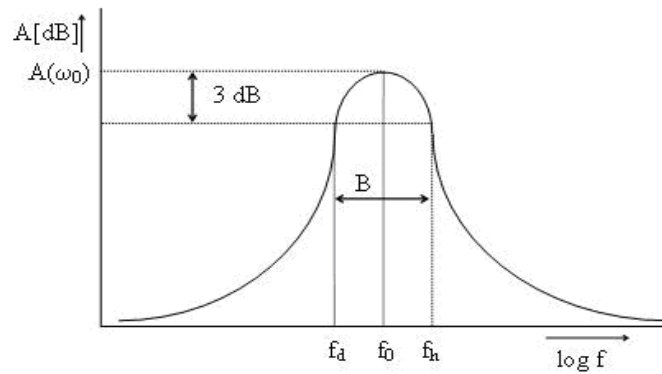
$$Q = \frac{\sqrt{R_3/R_1 + R_3/R_2}}{\sqrt{C_1/C_2 + \sqrt{C_2/C_1}}} \quad (18)$$



---

Ak platí  $C=C_1=C_2$ , potom (19):

$$A(\omega_0) = \frac{-R_3}{2R_1} \quad Q = \frac{1}{2} \sqrt{R_3/R_1 + R_3/R_2} \quad (19)$$



Obr. 24 Ideálna amplitúdovo-frekvenčná charakteristika pásmového priepustu

Zdroj: Čuntala, 2009.

---

## 2 Cieľ práce

Cieľom mojej diplomovej práce je navrhnúť funkčné elektronické obvody ako jedноступňový tranzistorový zosilňovač a aktívnu pásmovú priepusť, ktoré sa budú využívať ako študijná pomôcka na cvičeniach z predmetu Elektronika. Jednotlivé elektronické obvody následne zhotoviť a uskutočniť na nich jednotlivé merania.

Výsledky merania zhotovených elektronických obvodov ďalej spracovať, porovnať ich so simuláciou v programe MultiSIM. Vyhodnotiť odlišnosti vo výsledkoch s dôrazom najmä na presnosť simulácie a z toho vyplývajúcu výpočtovú náročnosť modelu vybraného obvodu.

---

### 3 Metodika práce

Pri spracovaní diplomovej práce bude potrebné zhromaždiť materiál zameraný na problematiku zaoberajúcu sa elektronikou, nízkofrekvenčnou technikou a simuláciou elektronických obvodov v prostredí SPICE.

Informácie budeme získavať prevažne z odborných publikácií z knižnice Slovenskej Poľnohospodárskej Univerzity v Nitre, odborných elektrotechnických časopisov a z internetu.

Teoretická časť bude pozostávať z definovania jednotlivých elektronických obvodov, prostredia SPICE a simulačného programu MultiSIM. Tento celok bude ďalej rozdelený na štyri elementárne časti:

- prostredie SPICE,
- program MultiSIM,
- tranzistorový zosilňovač,
- operačný zosilňovač.

Prvé dve časti budú zamerané na simuláciu elektronických obvodov. Budú popisovať históriu a vývoj simulačných programov, pracovné prostredie programu a základné prvky potrebné pri práci s programom.

Ďalšie dve časti budú popisovať jednotlivé elektronické obvody, ich základné vlastnosti, popisy možných zapojení a definíciu jednotlivých stavov pre výpočet obvodových veličín.

Vlastná práca bude pozostávať z návrhu jednotlivých elektronických obvodov, simulácie obvodov v programe MultiSIM, zhotovenia a zmerania jednotlivých elektronických obvodov.

Pri návrhu jednotlivých obvodov budeme postupovať nasledovne:

- zadanie základných parametrov obvodu,
- výber jednotlivej schémy pre daný elektronický obvod,
- vypracovanie postupu práce,
- riešenie práce – výpočet obvodových veličín jednotlivých elektronických obvodov,

- 
- pridelenie hodnôt normalizovaných súčiastok podľa katalógu k vypočítaným hodnotám jednotlivých súčiastok.

Simulácia jednotlivých elektronických obvodov v programe MultiSIM bude pozostávať z nasledovných krokov:

- zostavenie obvodov podľa schémy zapojenia,
- nastavenie parametrov obvodov,
- pripojenie meracích prístrojov a ich nastavení,
- simulácia obvodov,
- úprava grafických výsledkov zo simulácie.

Realizácia samotných funkčných blokov:

- zaobstaranie jednotlivých súčiastok obvodu,
- návrh obvodu na dosku plošných spojov,
- zhotovenie dosky plošných spojov,
- osadenie dosky plošných spojov.

Po zhotovení elektronických obvodov budeme pristupovať k oživeniu jednotlivých elektronických obvodov a meraní. Meranie budeme uskutočňovať v elektrotechnickom laboratóriu Strednej odbornej školy vo Vrábl'och, kde si zostavíme meracie pracovisko a zmeriame sme amplitúdovo-frekvenčnú charakteristiku daných obvodov.

Meracie pracovisko bude pozostávať z osciloskopu MOS – 620CH, milivoltmetera TESLA BM 512, RC generátora TESLA BM 534 a pre napájanie použijeme stabilizované zdroje TESLA BS 554.

Namerané výsledky budeme následne porovnávať s výsledkami zo simulácie a vyhodnotíme meranie.

---

## 4 Výsledky práce

### 4.1 Návrh jednostupňového zosilňovača

Navrhňte jednostupňový mikrofónový predzosilňovač. Ako zosilňujúcu súčiastku použijete bipolárny tranzistor v zapojení so spoločným emitorom. Vnútorňý odpor mikrofónu je  $R_g = 1 \text{ k}\Omega$ . Na výstupe bude zosilňovač zaťažený vstupným odporom nasledujúceho stupňa  $R_z = 10 \text{ k}\Omega$ .

#### 4.1.1 Postup práce

V tomto zapojení (Obr. 25) použijeme bipolárny tranzistor typu BC 547. Z katalógu si pre odporúčaný pracovný bod  $U_{CE} = 5 \text{ V}$ ,  $I_C = 2 \text{ mA}$ ,  $U_{BE} = 0,6 \text{ V}$  vypíšeme parametre  $h$  tranzistora:

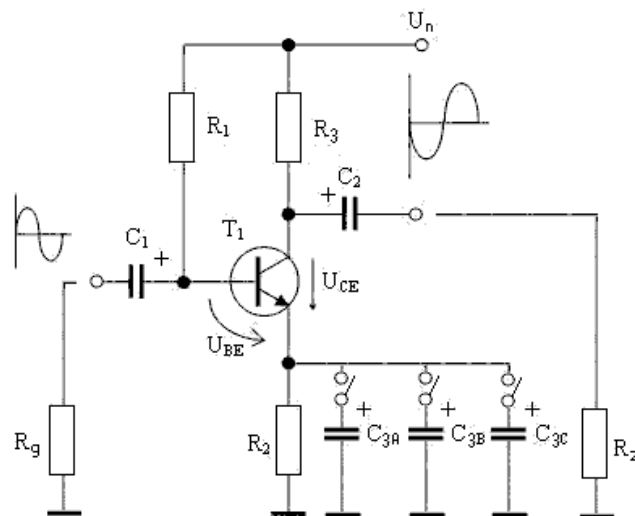
vstupná impedancia  $h_{11e} = 4,5 \text{ k}\Omega$ ,

činiteľ spätného zosilnenia  $h_{12e} = 1,5 \cdot 10^{-4}$ ,

prúdový zosilňujúci činiteľ  $h_{21e} = 300$ ,

vstupná admitancia  $h_{22e} = 30 \text{ }\mu\text{S}$ .

Obvod bude napájaný jednosmerným napätím  $U_{CC} = 12 \text{ V}$ .



Obr. 25 Schéma zapojenia jednostupňového zosilňovača

---

#### 4.1.2 Riešenie práce

Predpokladajme, že pre dobrú teplotnú stabilizáciu pracovného bodu volíme  $U_{RE} = 1,2V$  to je 10% napájacieho napätia.

$$\Delta h = h_{11e} \cdot h_{22e} - h_{21e} \cdot h_{12e} = 4,5 \cdot 10^3 \cdot 30 \cdot 10^{-6} - 1,5 \cdot 10^{-4} \cdot 300 = 0,09 \quad (20)$$

$$I_B = \frac{I_C}{h_{21e}} = \frac{2 \cdot 10^{-3}}{300} = 6,66 \mu A \quad (21)$$

$$I_E = I_C + I_B = 2 \cdot 10^{-3} + 6,66 \cdot 10^{-6} \doteq 2 mA \quad (22)$$

$$R_E = \frac{U_{Re}}{I_E} = \frac{1,2}{2 \cdot 10^{-3}} = 600 \Omega \quad (23)$$

Volíme normalizovaný rezistor  $R_2 = 680 \Omega / 50mW$

Pri pohľade na obvod tranzistora zo strany bázy platí obvodová rovnica podľa II. Kirchhoffového zákona:

$$U_{RB} + U_{BE} + U_{RE} - U_{CC} = 0 \quad \text{pretože} \quad U_{RB} = R_B \cdot I_B \quad (24)$$

vypočítame hodnotu  $R_B$  (25)

$$R_B = \frac{U_{CC} - U_{BE} - U_{RE}}{I_B} = \frac{12 - 0,6 - 1,2}{6,66 \cdot 10^{-6}} = 1531531,532 \Omega \quad (25)$$

Volíme normalizovaný rezistor  $R_1 = 1,5 M\Omega / 50mW$

Pri pohľade na obvod tranzistora zo strany kolektora platí obvodová rovnica podľa II. Kirchhoffového zákona (26):

$$U_{RC} + U_{CE} + U_{RE} - U_{CC} = 0 \quad \text{pretože} \quad U_{RC} = R_C \cdot I_C \quad (26)$$

vypočítame hodnotu  $R_C$  (27)

$$R_C = \frac{U_{CC} - U_{CE} - U_{RE}}{I_C} = \frac{12 - 5 - 1,2}{2 \cdot 10^{-3}} = 2900 \Omega \quad (27)$$

Volíme normalizovaný rezistor  $R_3 = 3,3 k\Omega / 50mW$

---

Vnútorý odpor zdroja signálu pre bázu je (28):

$$R_{g'} = \frac{R_g \cdot R_B}{R_g + R_B} = \frac{1000 \cdot 1531531,532}{1000 + 1531531,532} = 999,347\Omega \quad (28)$$

Účinný zaťažovací odpor zosilňovača je v dynamickom režime tvorení paralelnou kombináciou kolektorového odporu  $R_C$  a vonkajšieho zaťažovacieho odporu  $R_Z$  (29).

$$R_{Z'} = \frac{R_C \cdot R_Z}{R_C + R_Z} = \frac{10000 \cdot 2900}{1000 + 2900} = 2248\Omega \quad (29)$$

Vstupný odpor zosilňovača

Pre vyjadrenie vstupného odporu zosilňovača, musíme najskôr určiť vstupný odpor zosilňovacej súčiastky  $r_1$ . Tranzistor sa na svojich vstupných svorkách b - e javí ako nelineárny rezistor, jeho veľkosť v danom pracovnom bode môžeme vyjadriť pomerom odpovedajúcich vstupných veličín  $U_{BE}$  a  $I_B$ . Vyjadríme tak vstupný odpor súčiastky z linearizovaných rovníc podľa vzťahu (30):

$$r_1 = \frac{h_{11e} + \Delta h \cdot R_{Z'}}{1 + h_{22e} \cdot R_{Z'}} = \frac{4500 + 0,09 \cdot 2248}{1 + 30 \cdot 10^{-6} \cdot 2248} = 4405,231\Omega \quad (30)$$

Z výpočtu je vidieť, že tento odpor sa príliš nelíši od hodnoty parametru  $h_{11e}$ . V bežných výpočtoch budeme môcť obvykle nahradiť  $r_1$  parametrom  $h_{11e}$ .

Na vstupných svorkách celého zosilňovača pôsobí vstupný odpor zosilňovača  $R_{VST}$  (31). Jeho veľkosť je daná paralelnou kombináciou všetkých rezistorov, ktoré vo vstupe zosilňovača pôsobia.

$$R_{VST} = \frac{r_1 \cdot R_B}{r_1 + R_B} = \frac{4405,231 \cdot 1531531,532}{4405,231 + 1531531,532} = 4392,596\Omega \quad (31)$$

Pri porovnaní výslednej hodnoty  $R_{VST}$  a hodnoty parametru  $h_{11e}$  je vidieť, že pri veľkom rozdielne hodnôt odporov  $R_B$  a  $R_{VST}$  je možno vyjadriť v prvom priblížení  $R_{VST} = h_{11e}$ .

Výstupný odpor zosilňovača

Tranzistor sa na svojich výstupných svorkách c-e správa ako zdroj s vnútorným odporom  $r_2$ , ktorý nazývame výstupný odpor zosilňovača súčiastky - tranzistora. Jeho veľkosť závisí na vlastnostiach tranzistora a na rezistore, ktorý je pripojený medzi vstupné svorky tranzistora b-e, t. j. na vnútornom odpore zdroja signálu pre bázu tranzistoru  $R_g$ .

Z linearizovaných rovníc vyplýva (32):

$$r_2 = \frac{h_{11e} + R_g'}{\Delta h_e + h_{22e} \cdot R_g'} = \frac{4500 + 999,347}{0,09 + 30 \cdot 10^{-6} \cdot 999,347} = 45827,892 \Omega \quad (32)$$

Zosilňovač ako celok sa medzi svojimi výstupnými svorkami správa, vzhľadom na vnútorný zaťažovací odpor, ako zdroj s vnútorným odporom, ktorý nazývame výstupný odpor zosilňovača. Jeho veľkosť (33) určíme ako paralelnú kombináciu odporov, ktoré sú medzi výstupnými svorkami zapojené:

$$R_{vYST} = \frac{r_2 \cdot R_C}{r_2 + R_C} = \frac{45827,892 \cdot 2900}{45827,892 + 2900} = 2727,409 \Omega \quad (33)$$

Výpočet kondenzátorov  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ . Ich voľbou ovplyvníme dolnú hraničnú frekvenciu zosilňovača  $f_d$ . Volíme  $f_d = 30$  Hz, pri ktorej poklesne napäťový zisk zosilňovača o 3 dB. Je to výsledný pokles zisku zodpovedajúci súčtu poklesov spôsobených jednotlivými kondenzátormi  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ . Celkový pokles výstupného napätia (34) (Tab. 1)  $a_x = -3$  dB (-6 dB, -9 dB) preto rozdelíme medzi jednotlivé kondenzátory.

$$a_x = -10 \log \left[ 1 + \left( \frac{\omega n}{\omega d} \right)^2 \right] \quad (34)$$

$$\omega d = 2 \cdot \pi f d \quad (35)$$

Údaje k pre zvolené poklesy  $a_x$  vypočítame zo vzťahu (36):

$$k = \sqrt{10^{\frac{a_x}{10}} - 1} \quad (36)$$

Tab. 1 Údaje k pre zvolené poklesy  $a_x$

$a_x$	-0,25	-0,5	-1	-,125	-2	-3	-3,5	-6,5	-9
k	0,243	0,349	0,509	0,578	0,765	1	1,113	1,862	2,635



---

Kondenzátorom  $C_1, C_2$  volíme rovnaké poklesy  $a_{x1} = a_{x2} = -1,25dB$

Pre výpočet kondenzátorov  $C_{3a}, C_{3b}, C_{3c}$  volíme:

$$a_{x3a} = -3 - (a_{x1} + a_{x2}) = -3 - (-1,25 - 1,25) = -0,5dB \quad (37)$$

$$a_{x3b} = -6 - (a_{x1} + a_{x2}) = -6 - (-1,25 - 1,25) = -3,5dB \quad (38)$$

$$a_{x3c} = -9 - (a_{x1} + a_{x2}) = -9 - (-1,25 - 1,25) = -6,5dB \quad (39)$$

Pre zvolený pokles  $a_x$  hľadáme frekvenciu  $f_n$ .

$$\omega n1 = \omega n2 = k \cdot \omega d = 0,578 \cdot 188,4 = 109 rad \cdot s^{-1} \quad (40)$$

$$\omega n3a = k \cdot \omega d = 0,349 \cdot 188,4 = 66 rad \cdot s^{-1} \quad (41)$$

$$\omega n3b = k \cdot \omega d = 1,113 \cdot 188,4 = 210 rad \cdot s^{-1} \quad (42)$$

$$\omega n3c = k \cdot \omega d = 1,862 \cdot 188,4 = 351 rad \cdot s^{-1} \quad (43)$$

$$C_1 = \frac{1}{\omega n1 \cdot (R_{vstT} + R_g)} = \frac{1}{109 \cdot (4392,596 + 1000)} = 1,701 \cdot 10^{-6} F \quad (44)$$

Volíme normalizovaný kondenzátor 2,2  $\mu F$  /100V

$$C_2 = \frac{1}{\omega n2 \cdot (R_C + R_z)} = \frac{1}{109 \cdot (2900 + 10000)} = 7,112^{-7} F \quad (45)$$

Volíme normalizovaný kondenzátor 680 nF/100V

$$C_{3a} = \frac{1h_{21e}}{\omega nEA \cdot (R_{vstT} + R_g)} = \frac{1}{66 \cdot (4500 + 1000)} = 8,26^{-4} F \quad (46)$$

Volíme normalizovaný kondenzátor 1000  $\mu F$ /35V

$$C_{3b} = \frac{1h_{21e}}{\omega nEB \cdot (R_{vstT} + R_g)} = \frac{1}{210 \cdot (4500 + 1000)} = 2,6^{-4} F \quad (47)$$

Volíme normalizovaný kondenzátor 330  $\mu F$ /35V

$$C_{3c} = \frac{1h_{21e}}{\omega nEC \cdot (R_{vstT} + R_g)} = \frac{1}{351 \cdot (4500 + 1000)} = 1,55^{-4} F \quad (48)$$

Volíme normalizovaný kondenzátor 220  $\mu F$ /35V

Napät'ové zosilnenie (49):

$$A_U = \frac{-h_{21e} \cdot R_Z'}{h_{11e} + R_Z' \cdot \Delta h_e} = \frac{-300 \cdot 2248}{4500 - 0,09 \cdot 2248} = -143,42 \quad (49)$$

Napät'ový zisk (50):

$$A_u(dB) = 20 \log A_u = 43,132dB \quad (50)$$

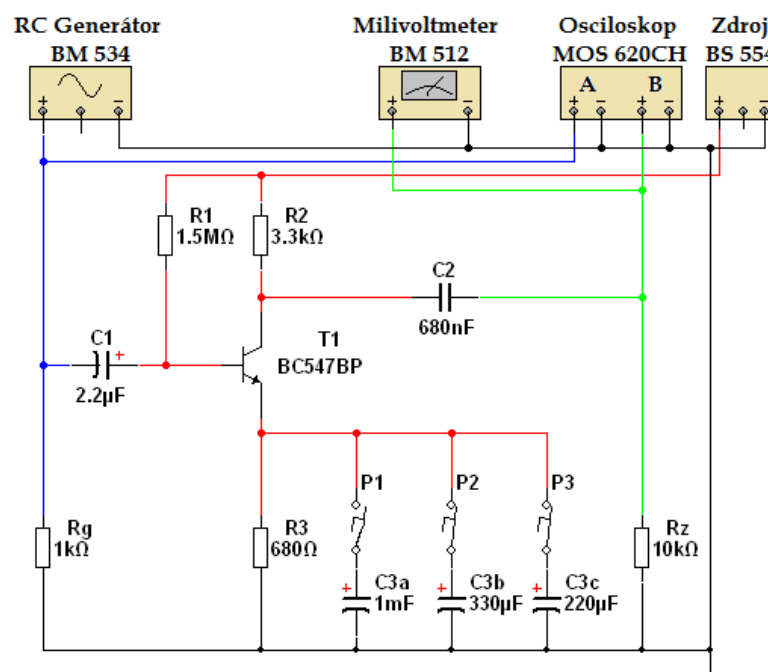
#### 4.1.3 Meranie jednostupňového zosilňovača:

Na vstupné svorky jednostupňového zosilňovača (Obr. 26) sme pripojili RC generátor a na výstupné svorky sme pripojili osciloskop a milivoltmeter. Obvod sme stabilizovaným zdrojom napájali napätím 12 voltov.

Pre meranie zapojenia s kondenzátorom  $C_{3a}$  sme prepínač prepli do polohy 1. Na RC generátore sme si nastavili vstupné napätie  $U_{vst} = 10$  mV frekvenciu 1 kHz. Hodnotu výstupného napätia z milivoltmetra sme zapísali do tabuľky. Potom sme si na RC generátore nastavili frekvenciu 20 Hz a postupne sme zvyšovali až po frekvenciu 10 MHz. Do tabuľky sme si zapisovali hodnoty výstupného napätia (Tab. 2).

Pre meranie zapojenia s kondenzátorom  $C_{3b}$  sme prepínač prepli do polohy 2 a opakovali meranie ako pri prvom kondenzátore  $C_{3a}$  a hodnoty výstupného napätia zapísali do tabuľky (Tab. 3).

Pre meranie zapojenia s kondenzátorom  $C_{3c}$  sme prepínač prepli do polohy 3 a opakovali meranie (Tab. 4).



Obr. 26 Zapojenie meracieho pracoviska pri meraní jednostupňového zosilňovača

Tab. 2 Namerané hodnoty výstupného napätia jednostupňového zosilňovača  
so zapojeným kondenzátorom C<sub>3a</sub>

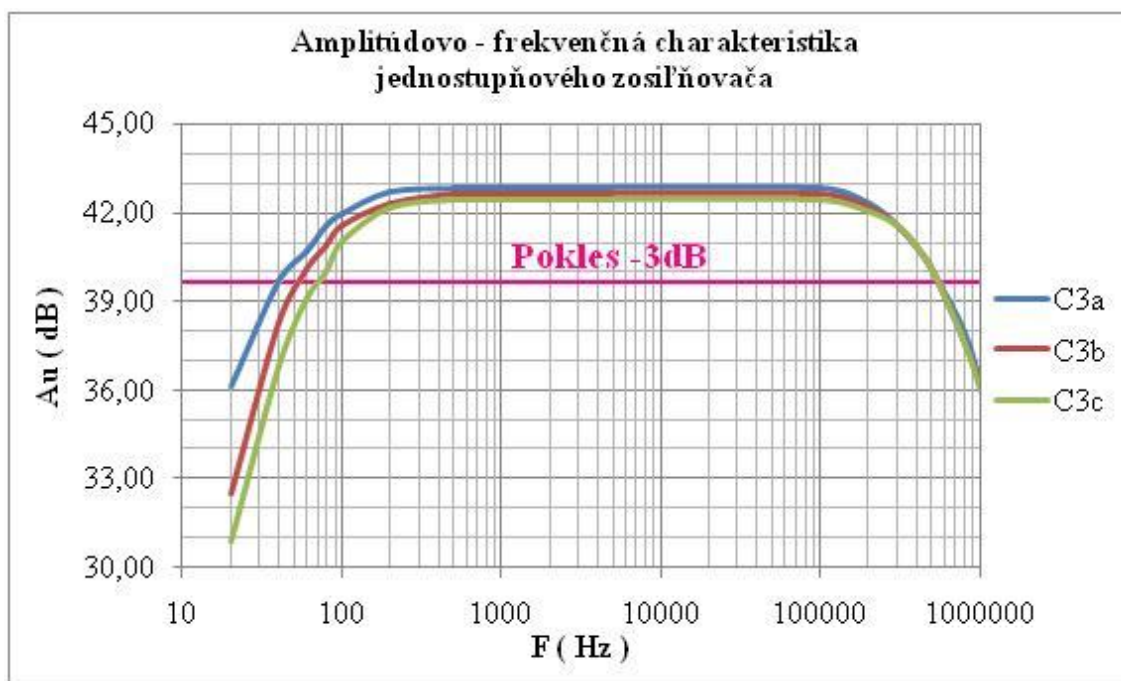
<b>Frekvencia [Hz]</b>	<b>20</b>	<b>40</b>	<b>60</b>	<b>80</b>	<b>100</b>
<b>Uvýstupné [mV]</b>	640,00	960,00	1080,00	1200,00	1250,00
<b>A<sub>U</sub></b>	64,00	96,00	108,00	120,00	125,00
<b>A<sub>U</sub> [dB] C3a</b>	36,12	39,65	40,67	41,58	41,94
<b>Frekvencia [Hz]</b>	<b>200</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>100000</b>	<b>200000</b>
<b>Uvýstupné [mV]</b>	1360,00	1380,00	1380,00	1380,00	1300,00
<b>A<sub>U</sub></b>	136,00	138,00	138,00	138,00	130,00
<b>A<sub>U</sub> [dB] C3a</b>	42,67	42,80	42,80	42,80	42,28
<b>Frekvencia [Hz]</b>	<b>300000</b>	<b>400000</b>	<b>500000</b>	<b>800000</b>	<b>1000000</b>
<b>Uvýstupné [mV]</b>	1200,00	1100,00	1000,00	790,00	645,00
<b>A<sub>U</sub></b>	120,00	110,00	100,00	79,00	64,50
<b>A<sub>U</sub> [dB] C3a</b>	41,58	40,83	40,00	37,95	36,19

Tab. 3 Namerané hodnoty výstupného napätia jednostupňového zosilňovača  
so zapojeným kondenzátorom C3b

<b>Frekvencia [Hz]</b>	<b>20</b>	<b>40</b>	<b>60</b>	<b>80</b>	<b>100</b>
<b>Uvýstupné [mV]</b>	420,00	820,00	1010,00	1110,00	1200,00
<b>A<sub>U</sub></b>	42,00	82,00	101,00	111,00	120,00
<b>A<sub>U</sub> [dB] C3b</b>	32,46	38,28	40,09	40,91	41,58
<b>Frekvencia [Hz]</b>	<b>200</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>100000</b>	<b>200000</b>
<b>Uvýstupné [mV]</b>	1300,00	1350,00	1350,00	1350,00	1280,00
<b>A<sub>U</sub></b>	130,00	135,00	135,00	135,00	128,00
<b>A<sub>U</sub> [dB] C3b</b>	42,28	42,61	42,61	42,61	42,14
<b>Frekvencia [Hz]</b>	<b>300000</b>	<b>400000</b>	<b>500000</b>	<b>800000</b>	<b>1000000</b>
<b>Uvýstupné [mV]</b>	1200,00	1100,00	1000,00	760,00	640,00
<b>A<sub>U</sub></b>	120,00	110,00	100,00	76,00	64,00
<b>A<sub>U</sub> [dB] C3b</b>	41,58	40,83	40,00	37,62	36,12

Tab. 4 Namerané hodnoty výstupného napätia jednostupňového zosilňovača so zapojeným kondenzátorom C3c

<b>Frekvencia [Hz]</b>	<b>20</b>	<b>40</b>	<b>60</b>	<b>80</b>	<b>100</b>
<b>Uvýstupné [mV]</b>	350,00	690,00	900,00	1000,00	1120,00
<b>A<sub>U</sub></b>	35,00	69,00	90,00	100,00	112,00
<b>Au [dB] C3c</b>	30,88	36,78	39,08	40,00	40,98
<b>Frekvencia [Hz]</b>	<b>200</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>100000</b>	<b>200000</b>
<b>Uvýstupné [mV]</b>	1280,00	1320,00	1320,00	1320,00	1260,00
<b>A<sub>U</sub></b>	128,00	132,00	132,00	132,00	126,00
<b>Au [dB] C3c</b>	42,14	42,41	42,41	42,41	42,01
<b>Frekvencia [Hz]</b>	<b>300000</b>	<b>400000</b>	<b>500000</b>	<b>800000</b>	<b>1000000</b>
<b>Uvýstupné [mV]</b>	1200,00	1100,00	1000,00	760,00	630,00
<b>A<sub>U</sub></b>	120,00	110,00	100,00	76,00	63,00
<b>Au [dB] C3c</b>	41,58	40,83	40,00	37,62	35,99



Obr. 27 Amplitúdovo-frekvenčná charakteristika jednostupňového zosilňovača

Tab. 5 Pokles výstupného napätia -3 dB

Kondenzátor	C3a	C3b	C3c
Fd [Hz]	44	54	68
Fh [Hz]	540000	560000	580000
B [Hz]	539956	559946	579932

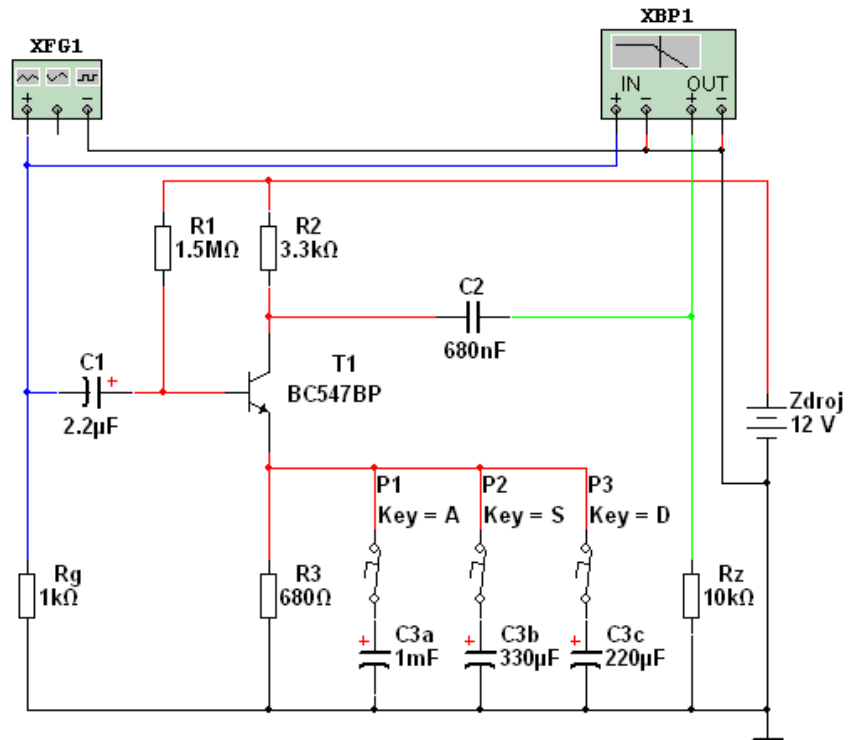
#### 4.1.4 Simulácia jednostupňového zosilňovača v programe MultiSIM

Po spustení programu MultiSIM sme si cez nástrojovú lištu panel súčiastok vložili na pracovnú plochu potrebné pasívne a aktívne súčiastky. Dvojklikom na jednotlivú súčiastku sme si nastavili požadované parametre a zobrazenie. Následne sme nastavili ich orientáciu v obvode. Podľa schémy zapojenia sme súčiastky pospájali kliknutím na kontakt jednej súčiastky s kontaktom druhej súčiastky. Pri spájaní kontaktu novej súčiastky na už existujúcu cestu nám program automaticky vytvoril uzol v mieste dotyku. Po zostavení schémy (Obr. 28) sme si z panelu prístrojov vytiahli Funkčný generátor a Bodeho zapisovač. Funkčný generátor sme pripojili na vstupné svorky odvodu paralelne s rezistorom  $R_g$ , ktorý simuloval vnútorný odpor mikrofónu.

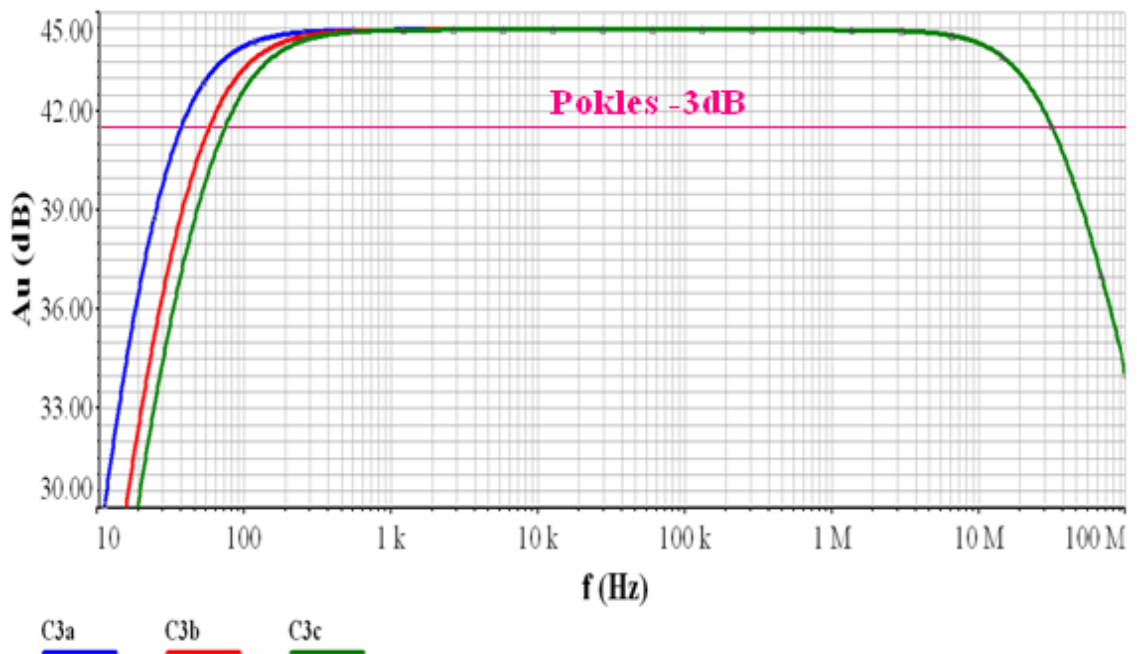
V rozvinutom paneli funkčného generátora sme si v kolónke Frequency nastavili frekvenciu 20 Hz a v kolónke amplitúde napätie 10 mV. Bodeho zapisovač sme jeho vstupnými svorkami pripojili na vstupné svorky obvodu a výstupne svorky zapisovača sme pripojili na výstupné svorky obvodu paralelne s rezistorom  $R_z$ , ktorý simuloval vstupný odpor nasledujúceho stupňa. V rozvinutom paneli bodeho zapisovača sme si nastavili mód amplitúde, horizontálnu os začínajúcu od 1Hz a končiacu v 1GHz. Vertikálnu os sme nastavili začínajúcu od -200 dB a končiacu v 200 dB. Po nastavení všetkých parametrov sme spustli prvú simuláciu s kondenzátorom  $C_{3a}$ . Stlačením ikony grapher sa nám na obrazovke zobrazil grafický priebeh z Bodeho zapisovača.

Po ukončení simulácie sme pomocou prepínača prepli kondenzátor  $C_{3a}$  na  $C_{3b}$  a opakovali simuláciu. Následne sme znovu ukončili simuláciu, prepínačom sme prepli kondenzátor  $C_{3b}$  na  $C_{3c}$  a opakovali simuláciu.

Po ukončení všetkých simulácií sme si v grapheri zlúčili grafické priebehy z jednotlivých simulácií do výsledného grafického priebehu.



Obr. 28 Schéma jednostupňového zosilňovača v pracovnom prostredí programu MultiSIM



Obr. 29 Amplitúdovo-frekvenčná charakteristika jednostupňového zosilňovača nasimulovaná v programe MultiSIM

Tab. 6 Pokles výstupného napätia -3 dB

Kondenzátor	C3a	C3b	C3c
<b>Fd [Hz]</b>	35,676	55,375	70,925
<b>Fh [Hz]</b>	31769000	31769000	31769000
<b>B [Hz]</b>	31768964	31768945	31768929

#### 4.1.5 Porovnanie výsledkov merania a simulácie v prostredí MultiSIM

Pri jednostupňovom zosilňovači sme vypočítali napät'ový zisk  $A_u = 43,123$  dB. My sme toto zosilnenie nameranými výsledkami potvrdili, podľa ktorých sme vypočítali napät'ový zisk  $A_u$  v rozsahu 42,41 až 42,80 dB. Simuláciou sme zistili napät'ový zisk  $A_u = 44,46$  dB.

Pokles výstupného napätia o – 3 dB (Tab. 5, Obr. 27) sme pri zapojenom kondenzátore  $C_{3a}$  namerali pri frekvencii 44 Hz a 540 kHz, simuláciou sme zistili pokles (Tab. 6, Obr. 29) pri frekvencii 36 Hz a 31 MHz. Pri zapojenom kondenzátore  $C_{3b}$  sme pokles namerali pri frekvencii 54 Hz a 560 kHz, simuláciou sme zistili pokles pri frekvencii 55 Hz a 31 MHz. Pri zapojenom kondenzátore  $C_{3c}$  sme pokles namerali pri frekvencii 68 Hz a 580 kHz, simuláciou sme zistili pokles pri frekvencii 71 Hz a 31 MHz.

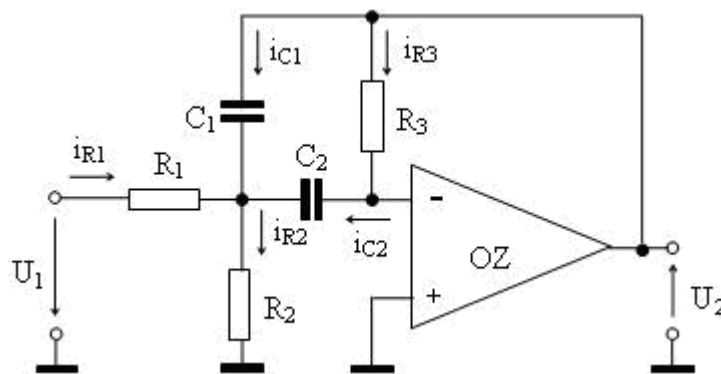
Rozdiely medzi nameranými hodnotami a hodnotami získanými simuláciou môžu byť sú zapríčinené toleranciou použitých súčiastok, vplyvom prostredia. Program MultiSIM, simuluje obvody v ideálnom prostredí, kde je vplyv rušivých elementov (teplota, tlak ovzdušia, a vlhkosť) odstránený a pri simulácii používa presné súčiastky bez tolerancie. Odlišnosť šírky prenášaného pásma vypočítanej z nameraných výsledkov od šírky prenášaného pásma získanej simuláciou je spôsobená modelom tranzistora použitého v simulácii. Ten je charakterizovaný veľkou šírkou prenášaného pásma ,pričom reálne tranzistor BC 547 nie je na takú šírku pásma stavaný.

## 4.2 Návrh aktívnej pásmovej priepuste s operačným zosilňovačom

Navrhňte aktívnu pásmovú priepusť v zapojení s operačným zosilňovačom s hraničnou frekvenciou  $f_0 = 10$  kHz a šírkou prenášaného pásma  $B = 1$  kHz. Zosilnenie  $A(\omega_0) = 10$ .

### 4.2.1 Postup práce

Zvolíme si zapojenie s operačným zosilňovačom MA741CN (Obr. 30).



Obr. 30 Schéma aktívnej pásmovej priepuste

Zdroj: Čuntala, 2009.

Pre harmonický signál platí, že zosilnenie  $A$  pri  $\omega_0$  je vyjadrené vzťahom (51):

$$A(\omega_0) = \frac{U_2}{U_1} = \frac{R_3}{R_1 \cdot \left(1 + \frac{C_1}{C_2}\right)} \quad (51)$$

$$\omega_0^2 = \frac{R_1 + R_2}{R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot C_1 \cdot C_2} \quad (52)$$

Pre  $\omega = 2\pi f$  platí (53) :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{1}{C_1 \cdot C_2 \cdot R_3} \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)} \quad (53)$$



Šírku prenašaného pásma B (pre pokles o 3 dB) vypočítame zo vzťahu (54):

$$B = \frac{f_0}{Q} \text{ alebo z grafu } B = f_H - f_D \quad (54)$$

Činiteľ kvality Q vypočítame zo vzťahu (55):

$$Q = \frac{\sqrt{\frac{R_3}{R_1} + \frac{R_3}{R_2}}}{\sqrt{\frac{C_1}{C_2} + \sqrt{\frac{C_2}{C_1}}}} \text{ alebo z grafu } Q = \frac{f_0}{B} = \frac{f_0}{f_H + f_D} \quad (55)$$

Ak si v zapojení zvolíme že  $C = C_1 = C_2$ , tak potom zosilnenie a činiteľ kvality vypočítame (57):

$$A(\omega_0) = -\frac{R_3}{2R_1} \quad (56)$$

$$Q = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{R_3}{R_1} + \frac{R_3}{R_2}} \quad (57)$$

#### 4.2.2 Riešenie práce

Zvolíme si  $C = C_1 = C_2 = 100\text{pF}$ .

$$B = \frac{f_0}{Q} = \frac{10 \cdot 10^3}{1 \cdot 10^3} = 10 \quad (58)$$

$$R_3 = \frac{\sqrt{\frac{R_3}{R_1} + \frac{R_3}{R_2}}}{\omega_0 C} = \frac{2Q}{\omega_0 C} = \frac{2 \cdot 10}{2\pi \cdot 1 \cdot 10^3 \cdot 100 \cdot 10^{-12}} = 3,18 \cdot 10^6 \Omega \quad (59)$$

Volíme normalizovaný rezistor  $R_3 = 3,3 \text{ M}\Omega/50\text{mW}$ .

$$R_1 = \frac{R_3}{2|A(\omega_0)|} = \frac{3,18 \cdot 10^6}{2 \cdot 10} = 159 \cdot 10^3 \Omega \quad (60)$$

Volíme normalizovaný rezistor  $R_1 = 160 \text{ k}\Omega/50\text{mW}$

$$R_2 = \frac{R_3}{4Q^2 - \frac{R_3}{R_1}} = \frac{R_3}{4Q^2 - 2|A(\omega_0)|} = \frac{3,18 \cdot 10^6}{4 \cdot 10^2 - 2 \cdot 10} = 8,37 \cdot 10^3 \Omega \quad (61)$$

Volíme normalizovaný rezistor  $R_2 = 8,2 \text{ k}\Omega/50\text{mW}$ .

### 4.2.3 Meranie aktívnej pásmovej priepuste

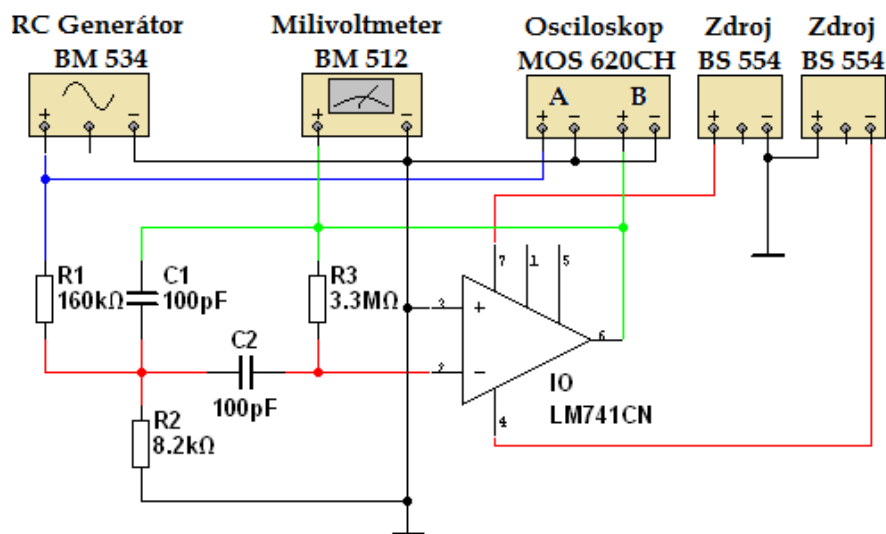
Na RC generátore (Obr. 31) sme si nastavili vstupné napätie  $U_{\text{vst}} = 245 \text{ mV}$ , frekvenciu 1 kHz a hodnotu výstupného napätia sme zapísali. Následne sme hodnotu frekvencií skokovo zvyšovali po 1 kHz až po 20 kHz a hodnoty výstupných napätí sme zapisovali do tabuľky (Tab. 7).

Potom sme na RC generátore točili potenciometrom zvyšovania a znižovania frekvencií až kým sme na výstupe nedostali maximálne napätie. Tým sme našli frekvenciu  $f_0$ . Potom sme hľadali hraničné frekvencie  $f_D$  a  $f_H$  a to tak, že sme na multivoltmetri sledovali pokles napätia o 3 dB (Obr. 32).

Hraničná frekvencia  $f_0 = 8600 \text{ Hz}$

Hodnoty hraničných frekvencií sú:  $f_D = 7800 \text{ Hz}$  a  $f_H = 9600 \text{ Hz}$

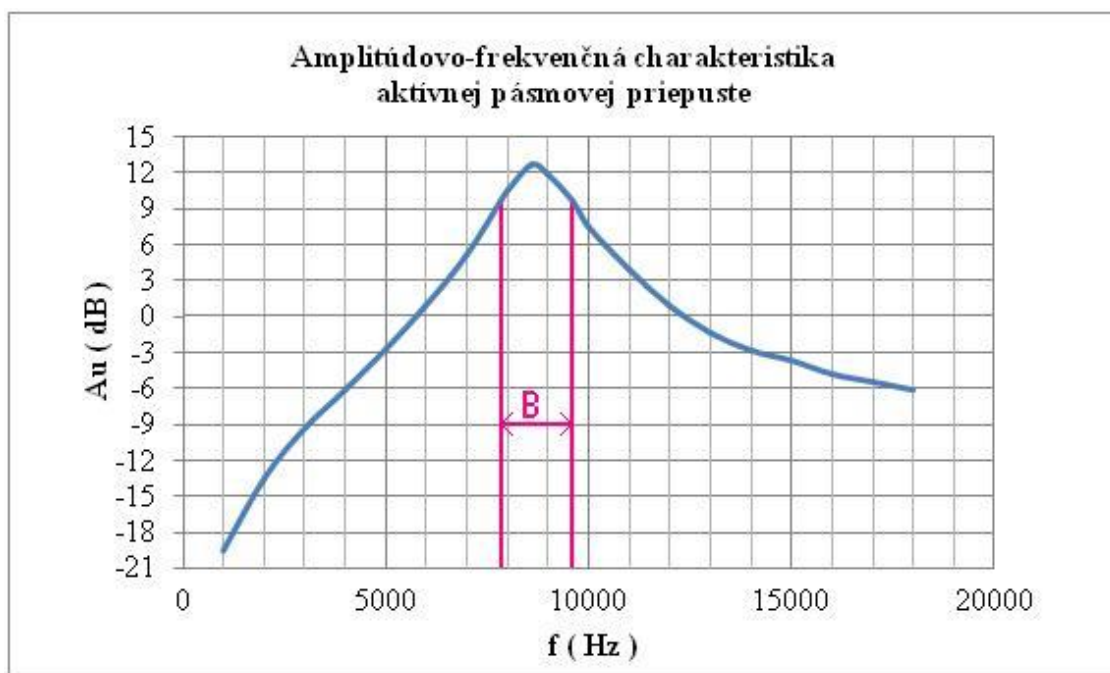
Šírka prenášaného pásma :  $B = f_H - f_D = 9600 - 7800 = 1800 \text{ Hz}$



Obr. 31 Zapojenie meracieho pracoviska pri meraní aktívnej pásmovej priepuste

Tab. 7 Namerané hodnoty výstupného napätia aktívnej pásmovej priepuste

<b>Frekvencia [Hz]</b>	<b>1000</b>	<b>2000</b>	<b>3000</b>	<b>4000</b>	<b>5000</b>	<b>6000</b>	<b>7000</b>
<b>Uvýstupné [mV]</b>	25,5	52	84	120	180	270	440
<b>AU</b>	0,10	0,21	0,34	0,49	0,73	1,10	1,80
<b>AU[dB]</b>	-19,65	-13,46	-9,30	-6,20	-2,68	0,84	5,09
<b>Frekvencia [Hz]</b>	<b>7800</b>	<b>8000</b>	<b>8600</b>	<b>9000</b>	<b>9600</b>	<b>10000</b>	<b>11000</b>
<b>Uvýstupné [mV]</b>	740	820	1050	960	740	580	380
<b>AU</b>	3,02	3,35	4,29	3,92	3,02	2,37	1,55
<b>AU[dB]</b>	9,60	10,49	12,64	11,86	9,60	7,49	3,81
<b>Frekvencia [Hz]</b>	<b>12000</b>	<b>13000</b>	<b>14000</b>	<b>15000</b>	<b>16000</b>	<b>17000</b>	<b>18000</b>
<b>Uvýstupné [mV]</b>	270	210	175	160	140	130	120
<b>AU</b>	1,10	0,86	0,71	0,65	0,57	0,53	0,49
<b>AU[dB]</b>	0,84	-1,34	-2,92	-3,70	-4,86	-5,50	-6,20



Obr. 32 Amplitúdovo-frekvenčná charakteristika aktívnej pásmovej priepuste

#### 4.2.4 Simulácia aktívnej pásmovej priepuste v programe MultiSIM

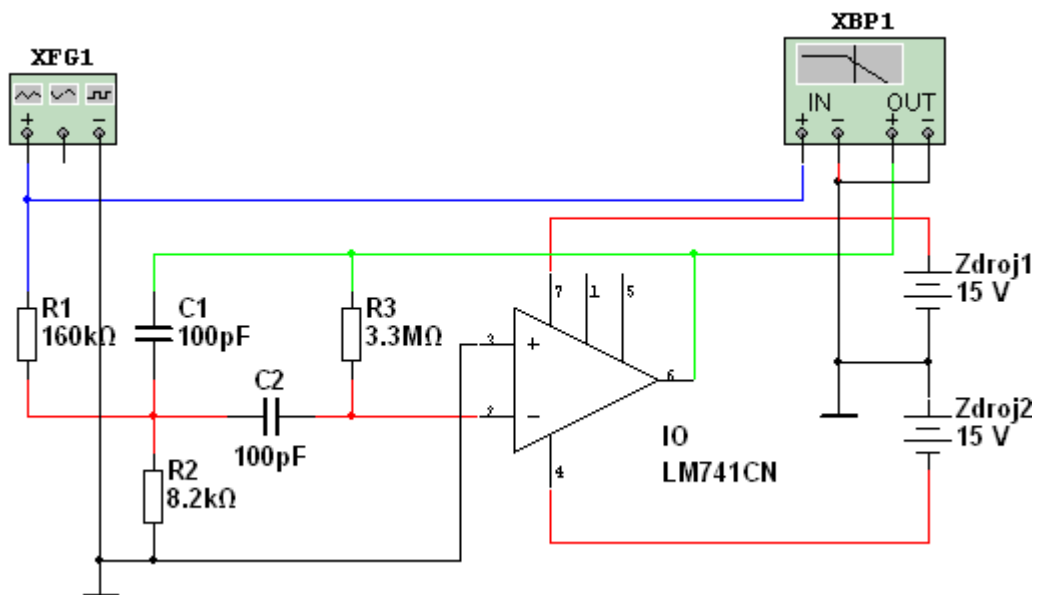
V programe MultiSIM sme si na pracovnú plochu vložili potrebné pasívne a aktívne súčiastky. Nastavili ich orientáciu a požadované parametre. Následné sme si podľa schémy zapojenia súčiastky pospájali vodivými cestami. Po zostavení schémy (Obr. 33) sme si na vstupné svorky pripojili Funkčný generátor a na výstupne svorky Bodeho zapisovač. V rozvinutom paneli funkčného generátora sme si v kolónke Frequency nastavili frekvenciu 1 kHz a v kolónke amplitúde napätie 245 mV. V rozvinutom paneli Bodeho zapisovača sme si nastavili mód amplitúde, horizontálnu os začínajúcu od 1 kHz a končiacu v 100 kHz. Vertikálnu os sme nastavili začínajúcu od -100 dB a končiacu v 100 dB. Po finálnej kontrole obvodu sme spustili simuláciu a stlačením ikony grapher sa nám na obrazovke zobrazil grafický priebeh z Bodeho zapisovača.

Z grafického priebehu (Obr. 34) sme zistili:

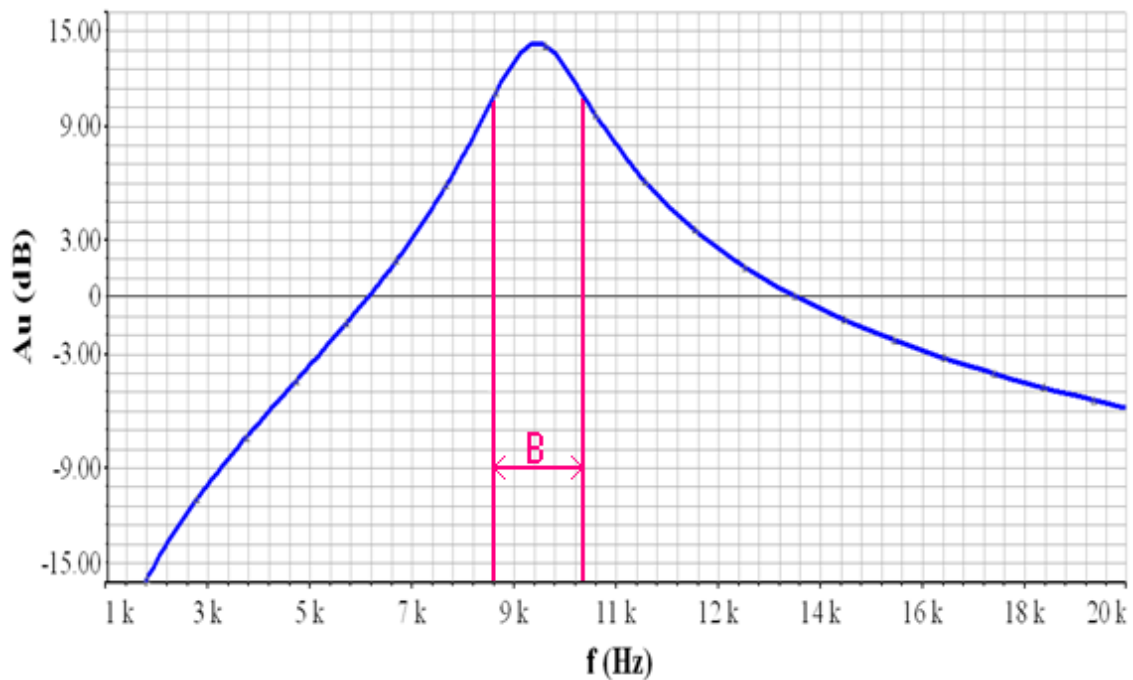
Hraničnou frekvencia  $f_0 = 8918$  Hz pri  $A_u 13,369$  dB.

Hodnoty hraničných frekvencií sú:  $f_D = 8162$  Hz a  $f_H = 9926$  Hz.

Šírka prenášaného pásma :  $B = f_H - f_D = 9926 - 8162 = 1764$  Hz



Obr. 33 Schéma aktívnej pásmovej priepuste v pracovnom prostredí programu MultiSIM



Obr. 34 Amplitúdovo-frekvenčná charakteristika aktívnej pásmovej priepuste nasimulovaná v programe MultiSIM

#### 4.2.5 Porovnanie výsledkov merania a simulácie v prostredí MultiSIM

Pre aktívnu pásmovú priepusť sme mali zadané parametre hraničnej frekvencii  $f_0 = 10\text{kHz}$  a šírku prenášaného pásma  $B = 1\text{ kHz}$ . Nameranými hodnotami zostrojeného obvodu aktívnej pásmovej priepuste sme zistili, že hraničná frekvencia daného obvodu je  $f_0 = 8,6\text{ kHz}$  a hranične frekvencie  $f_D = 7800\text{ Hz}$  a  $f_H = 9600\text{ Hz}$ . Šírku prenášaného pásma sme vypočítali  $B = 1800\text{ Hz}$ . Simuláciou sme zistili hraničnú frekvenciu  $f_0 = 8,918\text{ kHz}$ , hranične frekvencie  $f_D = 8162\text{ Hz}$  a  $f_H = 9926\text{ Hz}$ . Šírka prenášaného pásma je  $B = 1764\text{ Hz}$ .

Namerané výsledky sa zhodujú s hodnotami získanými simuláciou, avšak od zadaných parametrov sa mierne odlišujú. To môže byť spôsobené zlým výpočtom obvodových parametrov obvodu.

---

## Záver

V našej práci s názvom „Porovnanie výsledkov merania a počítačovej analýzy pre vybrané analógové obvody“ sme sa zaoberali návrhom, výrobou a simuláciou funkčných elektronických blokov. V úvodných častiach poskytujeme prehľad súčasného stavu riešenej problematiky so zameraním na prostredie SPICE a simulačný program MultiSIM. Pozornosť sme venovali jednotlivo vybraným elektronickým obvodom, ich vlastnostiam a jednotlivým zapojeniam.

Vo vlastnej práci sme sa zaoberali teoretickým návrhom jednotlivých elektronických obvodov – tranzistorového zosilňovača a aktívnej pásmovej priepuste a to podľa vopred zadaných technických parametrov. Obvody sme simulovali v programe MultiSIM, zostrojili a realizovali merania v elektrotechnickom laboratóriu Strednej odbornej školy vo Vrábľoch. Namerané výsledky sme porovnali s výsledkami získanými simuláciou a vyhodnotili odlišnosti, pričom sme dospeli k jednotlivým záverom.

Pri jednostupňovom zosilňovači sme vypočítali napäťový zisk  $A_u = 43,123$  dB. Toto zosilnenie sme nameranými výsledkami potvrdili, podľa ktorých sme vypočítali napäťový zisk  $A_u$  v rozsahu 42,41 až 42,80 dB. Simuláciou sme zistili napäťový zisk  $A_u = 44,46$  dB. Rozdiely medzi nameranými hodnotami a hodnotami získanými simuláciou mohli byť zapríčinené tým, že program MultiSIM simuluje obvody v ideálnom prostredí, kde je vplyv rušivých elementov (teplota, tlak ovzdušia, a vlhkosť) odstránený a pri simulácií používa presné súčiastky bez tolerancie.

Pri meraní poklesu výstupného napätia o  $-3$  dB sa namerané hodnoty dolných hraničných frekvencií takmer zhodovali s hodnotami dolných hraničných frekvencií získaných simuláciou. Rozdiel sme zistili pri horných hraničných frekvenciách, kde namerané hodnoty sa výrazne odlišovali od hodnôt vygenerovaných simuláciou. Odlišnosť šírky prenášaného pásma vypočítanej z nameraných výsledkov od šírky prenášaného pásma získanej simuláciou, bola spôsobená modelom tranzistora použitého v simulácií. Ten bol charakterizovaný veľkou šírkou prenášaného pásma, pričom reálne tranzistor BC 547 nie je na takú šírku pásma stavaný.

---

Pre aktívnu pásmovú priepusť sme mali zadané parametre hraničnej frekvencie  $f_0 = 10$  kHz a šírku prenášaného pásma  $B = 1$  kHz. Nameranými hodnotami zostrojeného obvodu aktívnej pásmovej priepuste sme zistili, že hraničná frekvencia daného obvodu bola  $f_0 = 8,6$  kHz a šírku prenášaného pásma sme vypočítali  $B = 1800$  Hz. Simuláciou sme zistili hraničnú frekvenciu  $f_0 = 8,918$  kHz, hraničné frekvencie  $f_D = 8162$  Hz a  $f_H = 9926$  Hz. Šírka prenášaného pásma bola  $B = 1764$  Hz.

Namerané výsledky boli veľmi podobné s hodnotami získanými simuláciou avšak odlišovali sa od zadaných parametrov, čo mohlo byť spôsobené zaokrúhľovaním výpočtov obvodových parametrov.

Program MultiSIM považujeme z vyššie uvedených dôvodov za vhodnú študijnú pomôcku, ktorá poskytuje dobrú simuláciu elektronických obvodov, kvôli jeho nenáročnému ovládaniu a kvalitne spracovanému simulačnému prostrediu.

---

## Zoznam použitej literatúry

BIOLEK, D. 2005. *Modelování a simulace v mikroelektronice*. [online]. 2005. [cit. 2010-10-20]. Dostupné na:

<[http://user.unob.cz/biolek/vyukaVUT/skripta/PSPICE\\_v\\_kostce.pdf](http://user.unob.cz/biolek/vyukaVUT/skripta/PSPICE_v_kostce.pdf)>.

ČUNTALA, J. 2009. *Elektronika I*. 2009. č. 2-5. [cit.2011-01-04]. Dostupné na:  
< <http://fel.uniza.sk/kme/pages/pedagogika/elektronika.htm> >.

ČURDOVÁ, D. – VELECH, P. 2005. *MultiSIM. Simulace a analýza číslicových obvodů*. [online]. 2005. [cit. 2010-11-21]. Dostupné na:

< [www.spstrutnov.cz/.../simulace...obvodu/multisim-cislicove-obvody.pdf](http://www.spstrutnov.cz/.../simulace...obvodu/multisim-cislicove-obvody.pdf)>.

HUDÁK, J. – LIPOVSKÝ, P. – DRAGANOVÁ, K. 2009. *MultiSIM*. [online]. 2009. [cit. 2011-03-20]. Dostupné na: < <http://www.senzorika.leteckafakulta.sk/?q=node/75>>.

CHLUBNÝ, J. 2010. *MultiSIM – součástky a měřící přístroje 2. díl*. [online]. 2010. [cit. 2011-01-20]. Dostupné na:

<<http://coptel.coptkm.cz/?action=2&doc=3731&sourceGroup=-1>>.

JURÁNEK, A. 2010. *A/D simulace obvodu v programu MultiSIM*. [online]. 2010. [cit. 2011-02-15]. Dostupné na: <[http://www.mikrozone.eu/soubory/downloads/print/dps-az/1/cad-ad\\_simulace.pdf](http://www.mikrozone.eu/soubory/downloads/print/dps-az/1/cad-ad_simulace.pdf)>.

*Katalóg spoločnosti SOS Electronic*. 2011. [online]. 2010. [cit. 2011-02-12]. Dostupné na: < <http://www.sos.sk/?str=21>>.

MAKOVÍNY, I. 1994. *Elektronické prvky a obvody*. Zvolen : Technická univerzita, 1994. 108 s. ISBN 80-228-0339-1.

MICHALÁČ, R. 1987. *Elektronické zariadenia A - I*. Bratislava : Alfa, 1987. 288 s.

OLEJÁR, M. 2011. *Úvod do SPICE*. [online]. 2011. [cit. 2011-02-12]. Dostupné na:<  
[http://www.pees.sk/index.php?option=com\\_content&view=article&id=19:spice&Itemid=20](http://www.pees.sk/index.php?option=com_content&view=article&id=19:spice&Itemid=20)>.

PAVLUS, P. – FRANEK, P. 2009. *Zbierka príkladov. CAD systémy v elektronike*. [online]. 2009. [cit. 2011-01-23]. Dostupné na: < [www.souknm.sk/node/111](http://www.souknm.sk/node/111)>.

PIHRT, M. 2007. *Electronics Workbench MultiSIM 10.0*. [online]. 2007. [cit. 2010-12-14]. Dostupné na: <<http://mereni.souepi.cz/data/ewb10/knihy%20ewb.pdf>>.



---

RATAJ, V. a kol. 2007. *Metodika písania záverečných prác na SPU v Nitre*. Nitra : SPU, 2007. 80 s. ISBN 978-80-8069-832-4.

UHLÍŘ, J. – KŘEČAN, Z. 1985. *Elektronika*. Bratislava: Alfa, 1985. 320 s.

ŽATKOVIČ, A. 2007. *Elektronika a Elektronické obvody*. [online]. 2007. [cit. 2011-02-11]. Dostupné na: <<http://alzat.szm.sk/>>.

---

## **Prílohy**

Zoznam príloh:

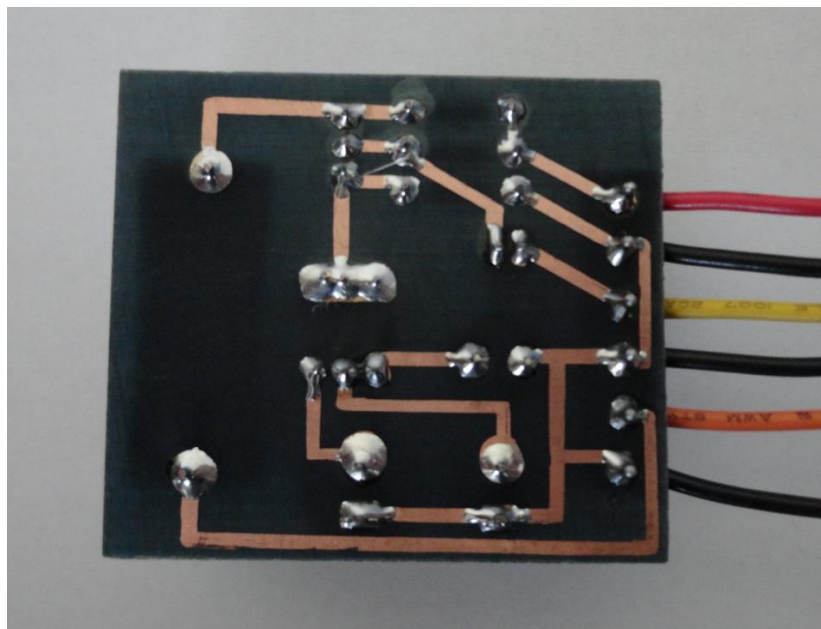
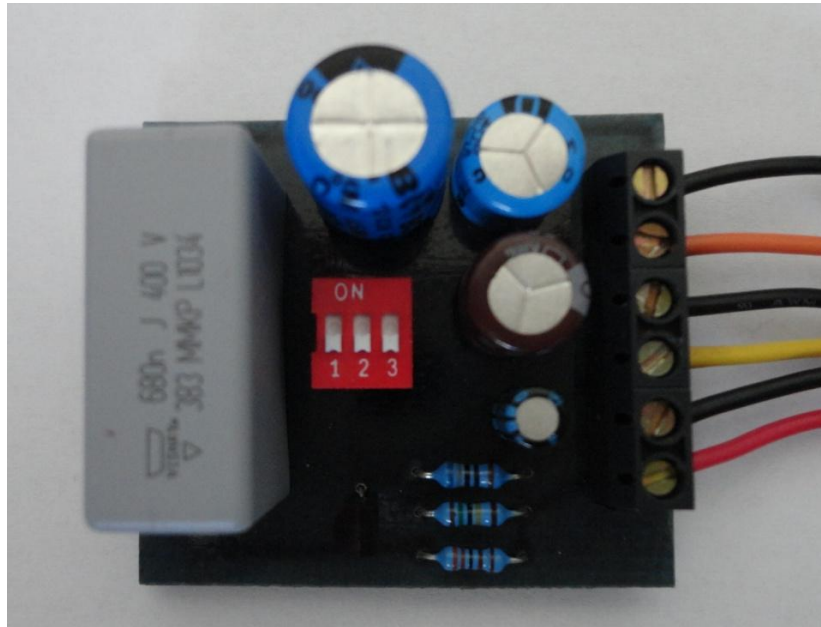
Príloha 1 – Fotografie zostrojeného jednostupňového zosilňovača

Príloha 2 – Fotografie zostrojenej aktívnej pásmovej priepuste

Príloha 3 – Vnútorne zapojenie operačného zosilňovača MA 741 CN

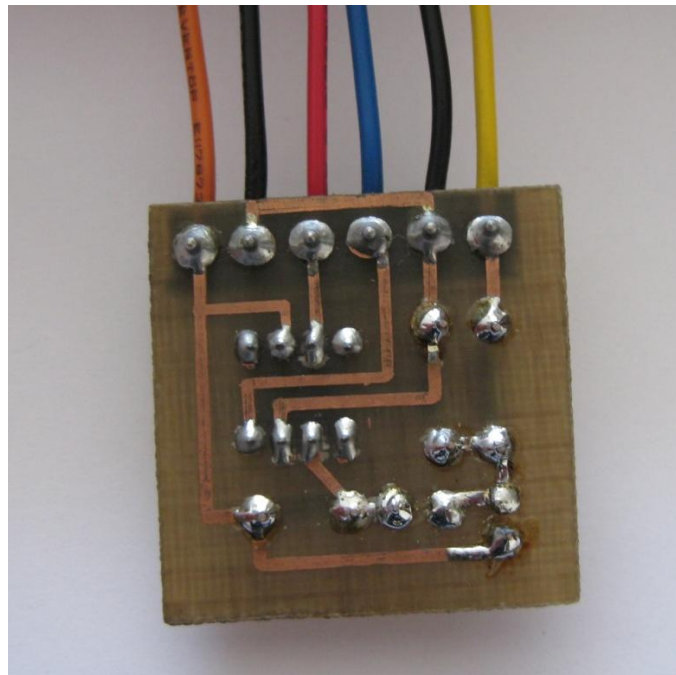
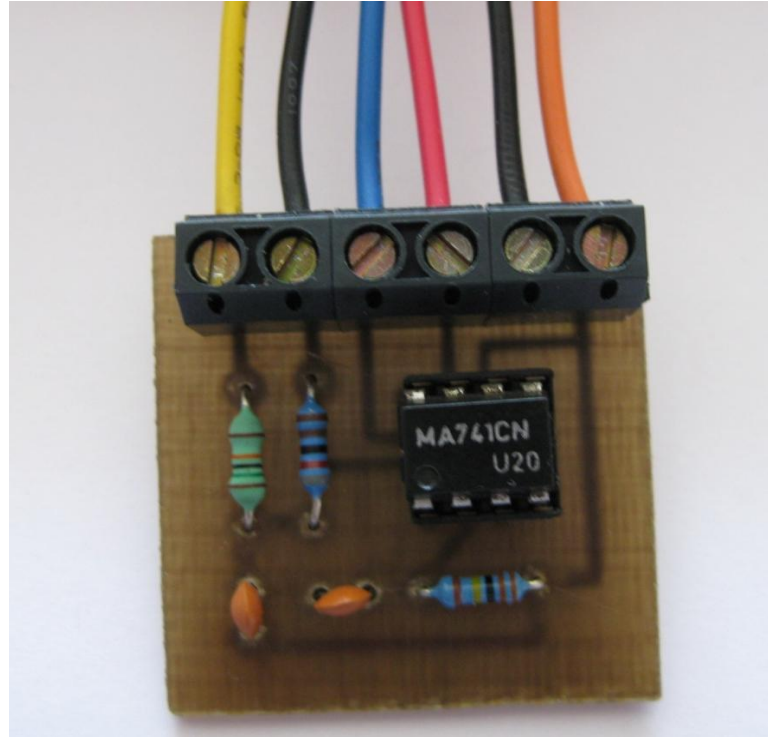
---

**Príloha 1 – Fotografie zostrojeného jednostupňového zosilňovača**



---

**Príloha 2 – Fotografie zostrojenej aktívnej pásmovej  
priepuste**



---

## Príloha 3 – Vnútorné zapojenie operačného zosilňovača MA 741 CN

