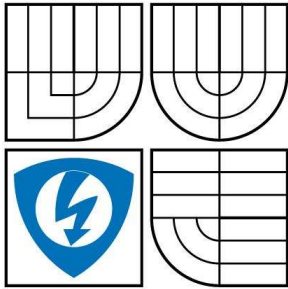


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

## DVOUKANÁLOVÝ DEVÍTIPÁSMOVÝ EKVALIZÉR

TWO-CHANNEL NINE-BAND EQUALIZER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

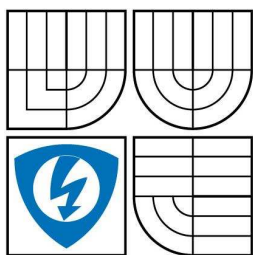
MARCEL KOLLÁR

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JIŘÍ PETRŽELA, Ph.D.

BRNO 2009



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
**Elektronika a sdělovací technika**

**Student:** Marcel Kollár

**ID:** 98053

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2008/2009

## NÁZEV TÉMATU:

### Dvoukanálový devítipásmový ekvalizér

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s možnostmi úpravy audio signálu, kmitočtovými výhybkami a principem analogového ekvalizéru. Vámi vybranou obvodovou strukturou realizujte devítipásmový ekvalizér a navržený obvod odsimulujte v programu Pspice.

V programu Eagle navrhnete desku plošného spoje a ekvalizér prakticky realizujte, a to včetně indikátoru vybuzení. Správnou funkci ekvalizéru ověřte měřením.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] DOSTÁL, T., AXMAN, V. Elektrické filtry. Elektronické skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 2007.

[2] NOVOTNÝ, V. Nízkofrekvenční elektronika. Elektronické skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 2002.

**Termín zadání:** 9.2.2009

**Termín odevzdání:** 5.6.2009

**Vedoucí práce:** Ing. Jiří Petržela, Ph.D.

**prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida**

*Předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

# LICENČNÍ SMLOUVA POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

## 1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Marcel Kollár  
Bytem: Ihráč 97, Kremnica, 96701  
Narozen/a (datum a místo): 8.6.1987, Banská Bystrica

(dále jen „autor“)

a

## 2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií  
se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00  
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:  
prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida, předseda rady oboru Elektronika a sdělovací technika  
(dále jen „nabyvatel“)

### Čl. 1

#### Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- disertační práce
  - diplomová práce
  - bakalářská práce
  - jiná práce, jejíž druh je specifikován jako .....
- (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Dvoukanálový devítipásmový ekvalizér

Vedoucí/ školitel VŠKP: Ing. Jiří Petržela, Ph.D.

Ústav: Ústav radioelektroniky

Datum obhajoby VŠKP: \_\_\_\_\_

VŠKP odevzdal autor nabyvateli\*:

- v tištěné formě – počet exemplářů: 2
- v elektronické formě – počet exemplářů: 1

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.

3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.

4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

---

## Článek 2

### Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
  - ihned po uzavření této smlouvy
  - 1 rok po uzavření této smlouvy
  - 3 roky po uzavření této smlouvy
  - 5 let po uzavření této smlouvy
  - 10 let po uzavření této smlouvy  
(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

## Článek 3

### Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 5. června 2009

.....  
Nabyvatel

.....  
Autor

## ANOTÁCIA

Cieľom bakalárskej práce je zoznámenie sa s úpravou audio signálu s kmitočtovými výhybkami a návrhom deväťpásmového ekvalizéra. Následne po navrhnutí ekvalizéra bolo nutné ho odsimulovať v programe PSpice. V programe Eagle navrhnuť dosku plošného spoja a ekvalizér prakticky realizovať a to vrátane s indikátorom vybudenia. Najvýhodnejšia možnosť pre následnú realizáciu ekvalizéra sa javilo použitie pásmových korektorov zo sériovým rezonančným obvodom. Každé pásmo sa vyznačuje určitým rezonančným kmitočtom  $f_0$  a mierou korekcie  $\pm$ dB. Táto práca poukazuje na niektoré možnosti úpravy audio signálu pomocou kmitočtových korektorov a filtrov.

**Kľúčové slová:** ekvalizér, kmitočtová výhybka, kmitočtové filtre, operačný zosilňovač, sériový rezonančný obvod, frekvenčné pásmo

## ANNOTATION

The aim of this project has been making the acquaintance of the adjustment of the audio signal of the frequencies switches and the suggestion of the nine band analogue equalizer. The suggestion equalizer was simulating in the program PSpice. Make a printed circuit using Eagle software and construct equalizer also with excitation indicator. The best option for the implementation of the equalizer has seemed to apply of the band's correctors with the series resonant circuit. Every band in the equalizer has the distinction with the definite resonant frequency  $f_0$  and with extent of the correction  $\pm$ dB. This project points out some options of the adjustment of the audio signal with help frequencies correctors and filters.

**Keywords:** equalizer, frequency switch, series resonant circuit, frequency band, frequency filters, operating amplifier

**Bibliografická citace:**

KOLLÁR, M. *Dvoukanálový devítipásmový ekvalizér*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2009. 40 s., 1 s. příloh. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Petržela, Ph.D.

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma dvoukanálový devítipásmový ekvalizér jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrálního projektu a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedený v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedeného bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č.140/1961 Sb.

V Brně dne 5. června 2009

.....  
podpis autora

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Jiří Petržela, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne 5. června 2009

.....  
podpis autora

# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>ÚPRAVA AUDIO SIGNÁLU</b> .....	<b>2</b>
2.1.	KMITOČTOVÉ FILTRE .....	2
2.2.	ZÁKLADNÉ TYPY FILTROV .....	3
2.2.1.	<i>Dolná priepusť (DP)</i> .....	3
2.2.2.	<i>Horná priepusť (HP)</i> .....	5
2.2.3.	<i>Pásmová priepusť (PP)</i> .....	6
2.2.4.	<i>Pásmová zádrž (PZ)</i> .....	7
<b>3</b>	<b>KOREKCIE PRE ÚPRAVU TVARU KMITOČTOVEJ CHARAKTERISTIKY ...</b>	<b>9</b>
3.1.	PASÍVNY KOREKTOR HLĎBOK .....	9
3.2.	PASÍVNY KOREKTOR VÝŠOK .....	11
<b>4</b>	<b>KMITOČTOVÉ VÝHYBKY PRE AKUSTICKÉ PÁSMO</b> .....	<b>13</b>
4.1.	TROJPÁSMOVÁ VÝHYBKA .....	14
<b>5</b>	<b>EKVALIZÉR</b> .....	<b>15</b>
5.1.	GRAFICKÝ EKVALIZÉR .....	15
5.2.	PARAMETRICKÝ EKVALIZÉR .....	16
5.3.	KOREKTOR SO SÉRIOVÝMI REZONANČNÝMI OBVODMI .....	16
5.3.1.	<i>Návrh deväťpásmového ekvalizéra</i> .....	17
5.3.2.	<i>Prehľad vypočítaných hodnôt deväťpásmového ekvalizéra</i> .....	21
<b>6</b>	<b>REALIZÁCIA CELKOVÉHO ZARIADENIA.</b> .....	<b>21</b>
6.1.	EKVALIZÉR. ....	21
6.1.1.	<i>Návrh dosky plošného spoja ekvalizéra</i> .....	23
6.1.2.	<i>Zoznam súčiastok ekvalizéra.</i> .....	26
6.2.	INDIKÁTOR VYBUDENIA .....	27
6.2.1.	<i>Návrh dosky plošného spoja indikátoru vybudenia.</i> .....	28
6.2.2.	<i>Zoznam súčiastok indikátora vybudenia.</i> .....	29
6.3.	NAPÁJACÍ ZDROJ PRE EKVALIZÉR A INDIKÁTOR VYBUDENIA .....	29
6.3.1.	<i>Návrh dosky plošného napájacieho zdroja.</i> .....	30
6.3.2.	<i>Zoznam súčiastok napájacieho zdroja</i> .....	31
6.4.	KONŠTRUKČNÉ RIEŠENIE .....	31
<b>7</b>	<b>VÝSLEDKY MERANIA</b> .....	<b>32</b>
7.1.	MERANIE EKVALIZÉRA POMOCOU PROGRAMU PSICE .....	32
7.2.	MERANIE ZHOTOVENÉHO EKVALIZÉRA .....	33
<b>8</b>	<b>ZÁVER</b> .....	<b>36</b>
<b>9</b>	<b>POUŽITÁ LITERATÚRA</b> .....	<b>37</b>
<b>10</b>	<b>ZOZNAM SKRATIEK</b> .....	<b>37</b>
<b>11</b>	<b>ZOZNAM GRAFOV</b> .....	<b>38</b>
<b>12</b>	<b>ZOZNAM TABULIEK</b> .....	<b>39</b>
<b>13</b>	<b>ZOZNAM PRÍLOH</b> .....	<b>39</b>



# 1 ÚVOD

Táto bakalárska práca sa zaoberá problematikou úpravy audio signálu a návrhom deväťpásmového ekvalizéra a jeho následnou realizáciou. Pred uskutočnením realizácie ekvalizéra sme ho museli najprv odsimulovať v programe PSpice. Aby sme dokázali upraviť audio signál na požadovanú kmitočtovú charakteristiku je potrebné do prenosového reťazca medzi zdroj signálu a výkonový zosilňovač zaradiť ekvalizér prípadne iné zariadenie, ktorým môžeme upraviť audio signál. Tieto zariadenia využívajú rôzne typy filtrov, najčastejšie pásmovú priepusť. Bakalárska práca je členená do viacerých kapitol. V druhej kapitole popisujem najzákladnejšie typy kmitočtových filtrov ako sú HP,DP, PP,PZ. Každý tento filter je špecifický svojou kmitočtovou charakteristikou. Napríklad horná priepusť HP sa používa pri audio signále na potlačenie veľmi nízkych frekvencií a dolná priepusť DP na potlačenie veľmi vysokých frekvencií. Kombináciou hornej a dolnej priepusti nám vznikne pásmová priepusť, ktorú môžeme využiť v prípade, keď je potrebné, aby signál bol prepúšťaný v kmitočtovej oblasti 20Hz-20kHz.

V tretej kapitole popisujem najzákladnejšie obvody na úpravu audio signálu. Je to korektor hĺbok a korektor výšok. Tieto dve zapojenia nám dávajú najjednoduchšie zariadenie pre úpravu kmitočtovej charakteristiky. Korektor hĺbok nám potláča respektíve zosilňuje prenosový signál v oblasti nízkych kmitočtov. Korektor výšok je presný opak korektora hĺbok, čiže nám zoslabuje prípadne zosilňuje kmitočtové pásmo vysokých frekvencií. Aby sme mali vyrovnanjšiu kmitočtovú charakteristiku v oblasti celého prenosového pásma, používame takzvaný ekvalizér. V piatej kapitole je uvedený stručný prehľad delenia ekvalizérov a v podkapitole predstavujem návrh deväťpásmového ekvalizéra. Ekvalizér je zariadenie na úpravu frekvenčnej charakteristiky signálu. Má určitý počet pásiem a tieto pásma sa vyznačujú určitým rezonančným kmitočtom. Na tomto rezonančnom kmitočte môžeme zoslabovať alebo zosilňovať amplitúdu signálu. Ak sa jedná o parametrický ekvalizér, tak dokonca môžeme regulovať až tri parametre o čom sa podrobnejšie dočítate v piatej kapitole. Ešte predtým však prejdeme v štvrtej kapitole tému kmitočtových výhybiek. Výhybky sú neodmysliteľnou súčasťou reproduktorovej sústavy. Rozdeľujú signály akustického pásma tak, aby každý reproduktor dostal len tú časť svojho spektra, ktorú dokáže optimálne vyžiariť. Ako predposledné dve kapitoly, kapitola šesť a kapitola sedem uvádzajú realizáciu ekvalizéra a jeho výsledky z meraní. Celá realizácia závisela na zhotovený dosiek plošného spoja pomocou programu Eagle.

## 2 ÚPRAVA AUDIO SIGNÁLU

Audio signál sa upravuje z rôznych dôvodov, napríklad kvôli počuteľnosti ľudského ucha, alebo ak chceme zvýrazniť alebo potlačiť určité frekvencie, ktoré nám najlepšie vyhovujú. Úprava audio signálu by nebola možná pomocou kmitočtových (frekvenčných) filtrov. Sú to vlastne lineárne elektrické obvody, ktorých úlohou je vybrať požadovaný signál (súbor signálov) zo zmesi signálov na základe jeho frekvenčných vlastností a tento signál prepustiť na výstup frekvenčného filtra s čo najmenším možným útlmom, pričom ostatné signály, ktoré nespĺňajú frekvenčné vlastnosti zadržať s maximálnym možným útlmom. V elektroakustike sa najčastejšie používajú korekčné filtre. Korekčné filtre slúžia na úpravu priebehu amplitúdovo frekvenčnej charakteristiky daného elektronického zariadenia (korekčný predzosilňovač, ekvalizér) na presne definovaný tvar. V týchto obvodoch sa využívajú rôzne typy filtrov a ich vzájomné kombinácie.[1]

### 2.1. KMITOČTOVÉ FILTRE

S kmitočtovými filterami sa môžeme stretnúť v rôznych oblastiach elektrotechniky, elektroakustiky a elektroniky. Hlavnou činnosťou filtra je výber kmitočtových zložiek prechádzajúceho signálu podľa ich kmitočtu. Filtre niektoré kmitočtové zložky prepustia bez útlmu a túto oblasť nazývame priepustné pásmo resp. iné kmitočtové zložky potláčajú s určitým útlmom, čiže hovoríme o nepriepustnom pásme. Pri priechode signálu filtrom dochádza k určitému časovému oneskoreniu signálu, čo má za následok určitý fázový posun. Okrem fázového posunu sa zmení i veľkosť amplitúdy. Prenos napätia ku harmonického signálu filtrom sa dá pre daný kmitočet  $f$  vyjadriť pomocou modulu a argumentu vzťah (2.1) [1] str.25

$U_2$ .....amplitúda výstupného napätia

$U_1$ .....amplitúda vstupného napätia

$K_u$ .....modul prenosu

$\varphi$ .....fázový posun

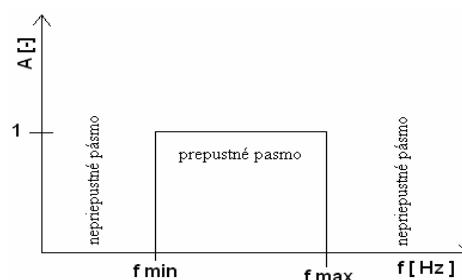
$\varphi_2$ .....fáza výstupného signálu

$\varphi_1$ .....fáza vstupného signálu

$$K_u = \frac{U_2}{U_1}, \quad \varphi = \varphi_2 - \varphi_1 \quad (2.1)$$

V praxi sa modul prenosu často používa v takzvanej logaritmickej miere.

$$K_u [dB] = 20 * \log(K_u) \quad (2.2)$$



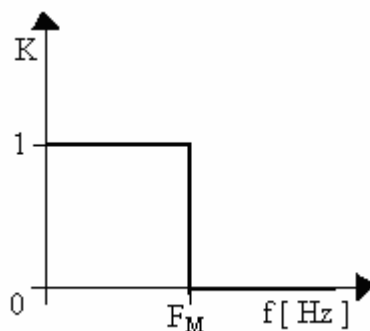
Obr.2.1: Princiálna úloha filtra

## 2.2. ZÁKLADNÉ TYPY FILTROV

Filtre sa delia podľa rôznych vlastností a hľadísk. Najdôležitejšie je delenie podľa potlačenia kmitočtových zložiek signálu v nepriepustnom pásme (DP,HP,PP,PZ). Ďalšie delenie spočíva vo výbere použitých prvkov. Pri použití jedného akumuláčného prvku hovoríme o filtroch RC s prenosovou funkciou prvého stupňa. Pri použití dvoch akumuláčnych prvkov hovoríme o filtroch RLC. Pri filtroch RC nemôžeme vytvoriť napríklad, pásmovú priepust a pásmovú zádrž. Máme číslicové filtre, ktoré majú špecifické vlastnosti a sú v niektorých prípadoch výhodnejšie ako analógové filtre. Analógové filtre sa používajú pri vysokom kmitočte signálu ak je zašumený a slabý signál pri výkonovej aplikácii atď. [3]

### 2.2.1. Dolná priepusť (DP)

Dolná priepusť prepúšťa signály od najnižších frekvencií až po medzný kmitočet  $F_M$  s minimálnym útlmom (v ideálnom prípade je to nulový útlm) a všetky ostatné frekvencie vyššie ako  $F_M$  prenáša s požadovaným útlmom (v ideálnom prípade sa na výstup nedostane žiaden signál, ktorý je prenesený vyššie ako  $F_M$ ) obr.2.2. V technickej praxi sa často označuje ako *dolnopriepustný filter*. [10]



Obr.2.2: Ideálna modulová charakteristika filtra dolná priepusť (DP)

**Dolná priepusť 1. stupňa** - je to filter s prenosovou funkciou 1.stupňa, ktorý má v systéme okrem rezistoru R zvyčajne jeden akumuláčny prvok. Akumuláčny prvok môže byť kondenzátor alebo cievka. Častejšie sa oproti cievke však používa kondenzátor, ktorého výhodou je jeho jednoduchosť a finančná nenáročnosť. Tento filter sa označuje ako filtre RC. Praktické využitie majú filtre iba prvého a druhého radu s nízkym činiteľom akosti Q. Filtre RC vyšších stupňov sa málo používajú v praxi. Najčastejšie zapojenie je uvedené na obr.2.3. Pre kmitočet blízky nule sa impedancia kondenzátora blíži ku nekonečnu a prenos je vzhľadom k nulovému úbytku napätia na rezistore R jednotkový. Pre kmitočet blížiaci sa k nule (skrat) je prenos napätia nulový. Z toho vyplýva, že obvod splňuje základné požiadavky DP. Obr.2.4 nám to jasne potvrdzuje, že nízke kmitočty prepustí s minimálnym útlmom a vysoké potlačí s maximálnym útlmom. Medzný kmitočet je definovaný poklesom o -3 dB.

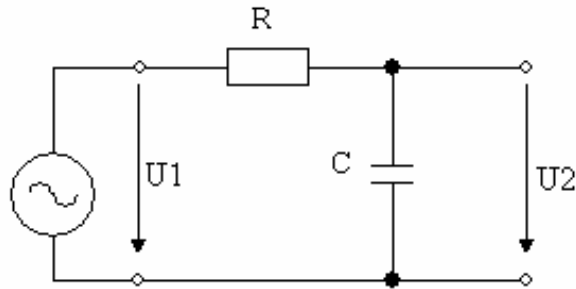
Vzťah pre výpočet medzného kmitočtu :

$$F_M = \frac{1}{2\pi RC}, [Hz] \quad (2.3)$$

Prenosová funkcia má tvar:

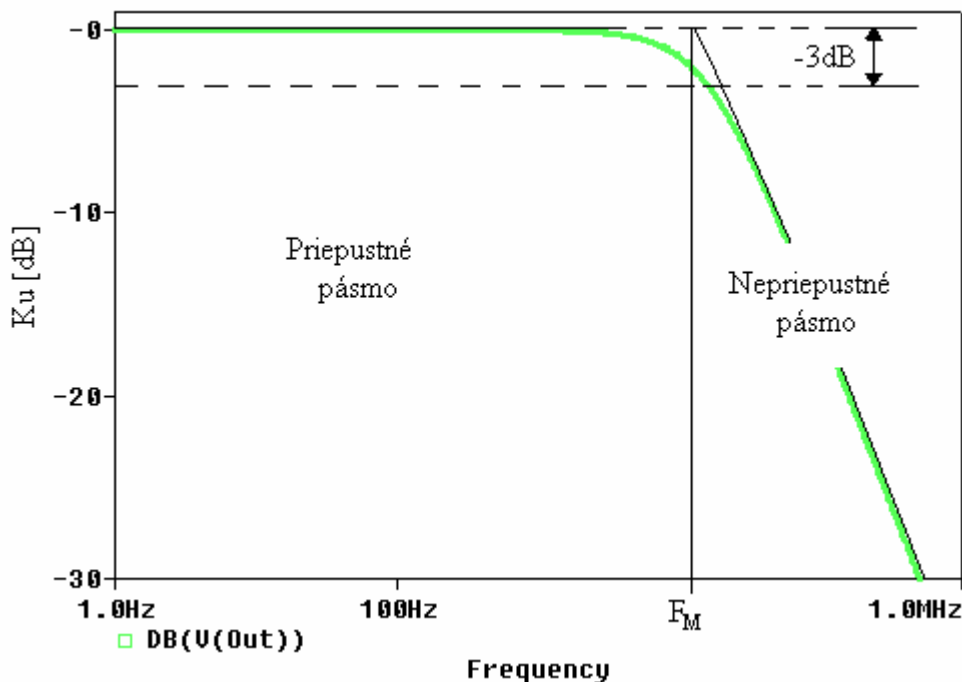
$$K(j\omega) = \frac{1/j\omega C}{R + 1/j\omega C} = \frac{1/RC}{j\omega + 1/RC} = \frac{\Omega_0}{j\omega + \Omega_0} \quad (2.4)$$

$\Omega_0 = 1/RC = 1/\tau$ ,  $\tau$  je časová konštanta



Obr.2.3: Zapojenie DP 1.stupňa

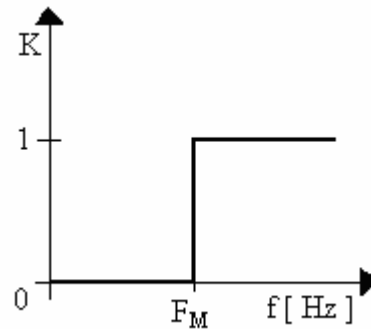
**Dolná priepust 2. stupňa** - základný rozdiel medzi 1 a 2 stupňom je v tom, že filtre 2 stupňa musia obsahovať okrem rezistoru najmenej 2 akumulčné prvky. Najčastejšie sa používa kombinácia prvkov R,L,C a menej častá kombinácia je použitie dvoch rezistorov, dvoch kondenzátorov a dvoch cievok. Princíp dolnej priepusti je podobný ako u priepusti 1. stupňa. Najčastejšie zapojenie je so sériovým rezonančným obvodom RLC. Výhoda spočíva v tom, že pri použití dvoch akumulčných prvkov sa dá dosiahnuť väčšia strmosť v kmitočtovej modulovej charakteristike v priepustnom či nepriepustnom pásme. [1]



Obr.2.4: Modulová charakteristika reálneho filtra typu DP.1 stupňa  $R=1k\Omega$  a  $C=10nF$

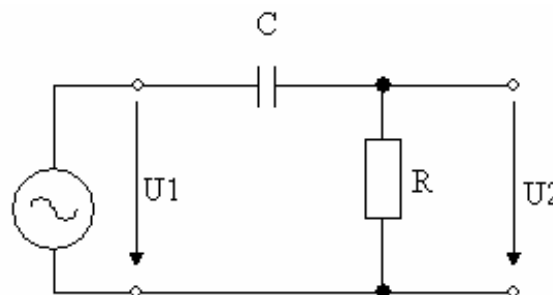
### 2.2.2. Horná priepusť (HP)

Opakom dolnej priepuste je takzvaná horná priepusť. Je to filter, ktorý prepúšťa zložky signálu o kmitočtoch vyšších ako medzná frekvencia  $F_M$  s minimálnym útlmom a zložky signálov s frekvenciami nižšími ako je  $F_M$  prenáša s požadovaným útlmom obr.2.5. V bežnom použití sa označuje ako *hornopriepustný filter*. [10]



Obr.2.5: Ideálna modulová charakteristika filtra horná priepusť (HP)

**Horná priepusť 1. stupňa** - je to filter s prenosovou funkciou 1. stupňa, ktorý má v systéme okrem rezistoru  $R$  zvyčajne jeden akumuláčny prvok. Oproti dolnej priepusti sa líši iba vo vzájomnej zámene prvkov  $R$  a  $C$  vid'. obr.2.3. Najčastejšie používané zapojenie je uvedené na obr.2.6. Pre nulovú frekvenciu je prenos nulový a pre frekvenciu blížiacu sa k nekonečnu je rovný jednej. Na obr.2.7 je znázornená modulová charakteristika HP 1. stupňa.



Obr.2.6: Zapojenie HP 1.stupňa

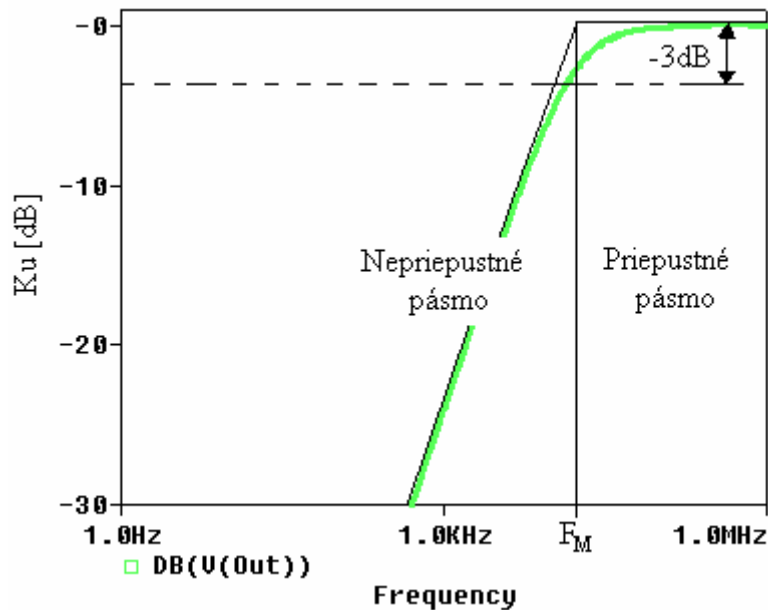
Medzný kmitočet je definovaný:

$$F_M = \frac{1}{2\pi RC}, [Hz] \quad (2.5)$$

Prenosová funkcia má tvar:

$$K(j\omega) = \frac{j\omega}{j\omega + 1/jRC} = \frac{j\omega}{j\omega + \Omega_0} \quad (2.6)$$

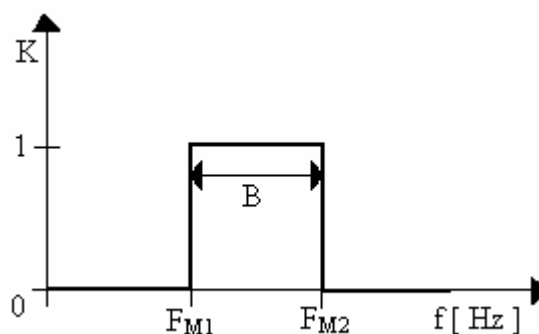
$\Omega_0 = 1/RC = 1/\tau$ ,  $\tau$  je časová konštanta rovnako ako u DP.[1]



Obr.2.7: Modulová charakteristika reálneho filtra typu HP.1 stupňa  $R=1k\Omega$  a  $C=10nF$

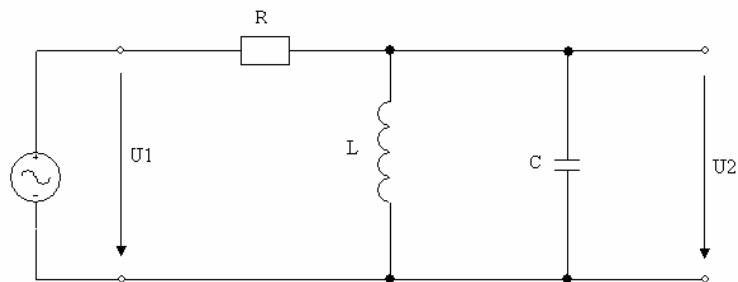
### 2.2.3. Pásmová priepusť (PP)

Pásmová priepusť je ďalší typ filtra, ktorý prepúšťa zložky signálov medzi medzným dolným kmitočtom  $F_{M1}$  a horným medzným kmitočtom  $F_{M2}$ . To znamená, že všetky ostatné signály s frekvenciami nižšími ako  $F_{M1}$  a vyššími ako  $F_{M2}$  sa prenášajú s požadovaným útlmom (v ideálnom prípade je útlm čo najväčší a prenos sa preto rovná nule). Na obr.2.8 je znázornená modulová charakteristika ideálnej pásmovej priepusti. V technickej praxi sa často označuje ako *pásmový filter*. [10]



Obr.2.8: Ideálna modulová charakteristika filtra pásmovej priepusti (PP)

**Pásmová priepusť 2. stupňa** - túto priepusť môžeme zapojiť viacerými variantmi. Najpoužívannejšia varianta je zapojenie s paralelným rezonančným obvodom RLC, ktorý je graficky znázornený na obr. 2.9. Menej bežné zapojenie je so sériovým rezonančným obvodom. Ďalšia možnosť môže vzniknúť zapojením hornej a dolnej priepusti. Dva hlavné parametre, ktoré určujú vlastnosti PP sú šírka pásma  $B$  a činiteľ akosti  $Q$ . V praxi sa najviac používa činiteľ, ktorý má  $Q \gg 1$ . Kmitočtová charakteristika pásmovej priepusti je zobrazená na obr.2.10.



Obr.2.9: Zapojenie PP 2. stupňa

Prenosová funkcia má tvar:

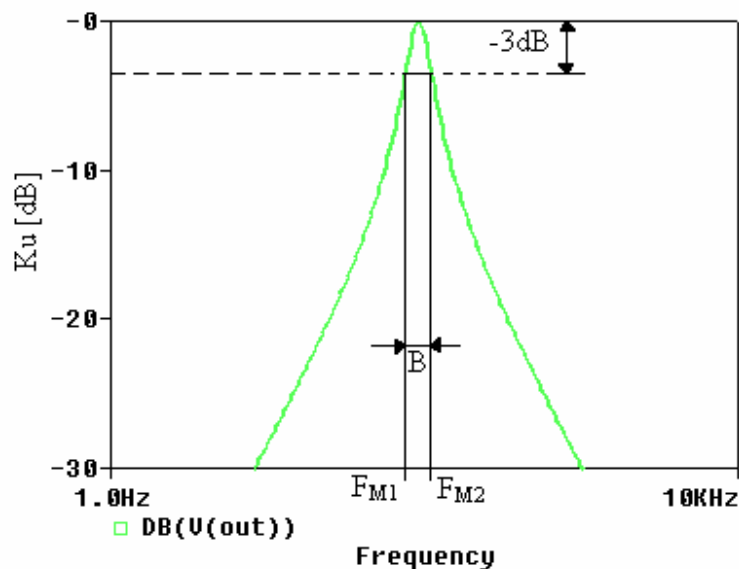
$$K(p) = \frac{p / R_p C}{p^2 + p / (R_p C) + 1 / (LC)} = \frac{p \Omega_0 / Q}{p^2 + p \Omega_0 / Q + \Omega_0^2} \quad (2.7)$$

$\Omega_0 = 1/RC = 1/\tau$ ,  $\tau$  je časová konštanta

Q- činiteľ akosti u pararelného obvodu  $Q = R_p / (\Omega_0 / L)$

Šírka priepustného pásma je definovaná poklesom o  $-3\text{dB}$  a vyjadruje ju vzťah:[1]

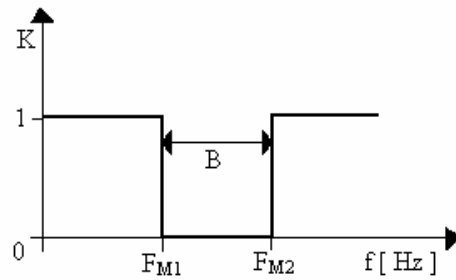
$$B = \frac{F_0}{Q} \quad [\text{Hz}] \quad (2.8)$$



Obr.2.10: Modulová charakteristika pásmovej priepusti (PP) 2. stupňa

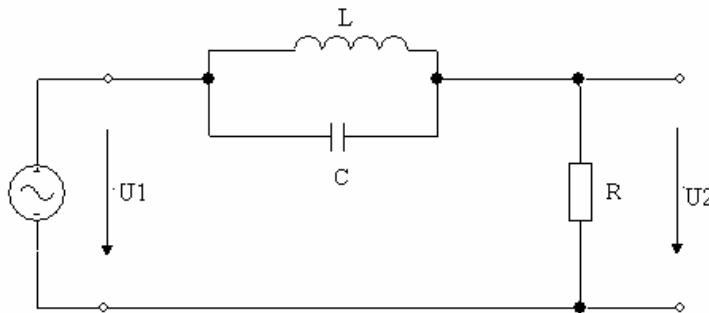
#### 2.2.4. Pásmová zadrž (PZ)

Pásmová zadrž je opačný prípad pásmovej priepusti. PZ neprepúšťa zložky signálov medzi medzným dolným kmitočtom  $F_{M1}$  a horným medzným kmitočtom  $F_{M2}$ . Z toho vyplýva, že prenáša všetky signály s frekvenciami nižšími ako je  $F_{M1}$  a signály s frekvenciami vyššími ako  $F_{M2}$  sa prenášajú s minimálnym útlmom. Princiipiálne vysvetlenie pásmovej zadrže uvádzam na obr. 2.11.



Obr.2.11: Ideálna modulová charakteristika filtra pásmovej zádrže (PZ)

**Pásmová zádrž 2. stupňa** - jej základný princíp spočíva v kmitočtových závislostiach impedancie rezonančného obvodu. Jej zapojenie uvádzam na obr. 2.12 a na obr.2.13 zobrazujem jej modulovú charakteristiku. Nekonečná impedancia paralelného obvodu spôsobuje nulový prenos na rezonančnom kmitočte, pričom prenos kmitočtu blížiaci sa k nulovému a nekonečnému kmitočtu je rovný jednej. Šírku pásma potlačenia prenosu je obtiažne definovať kvôli monotónnemu zužovaniu. [1]

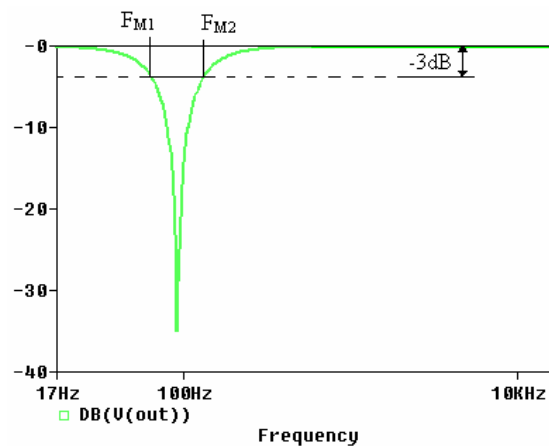


Obr.2.12: Zapojenie PZ 2.stupňa

Prenosová funkcia má tvar:

$$K(p) = \frac{p^2 + 1/(LC)}{p^2 + p/(RC) + 1/(LC)} = \frac{p^2 + \Omega_0^2}{p^2 + p\Omega_0/Q + \Omega_0^2} = \frac{p^2 + \Omega_N^2}{p^2 + p\Omega_0/Q + \Omega_0^2} \quad (2.9)$$

$\Omega_0, Q$  sú obdobné ako u pásmovej priepusti  $\Omega_N$  je kmitočet nulového prenosu



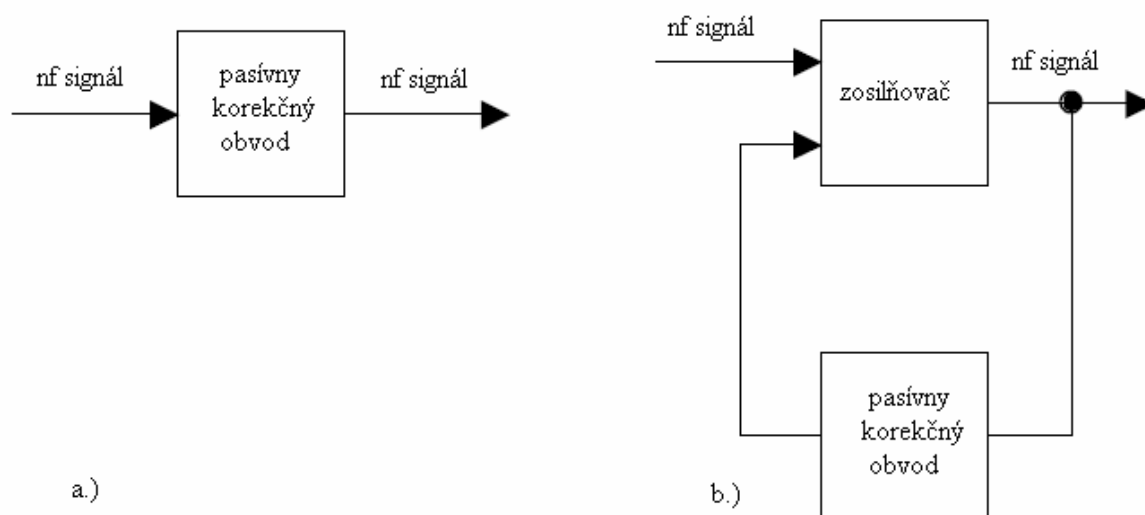
Obr.2.13: Modulová charakteristika pásmovej zádrže (PZ) 2.stupňa



### 3 KOREKCIE PRE ÚPRAVU TVARU KMITOČTOVEJ CHARAKTERISTIKY

V predchádzajúcej kapitole sme si opísali základné filtre, bez ktorých by tieto korekcie nemohli fungovať. Tieto korekcie nám slúžia na úpravu tvaru priebehu amplitúdovo - frekvenčnej charakteristiky daného elektronického zariadenia na presne požadovaný tvar. Bez týchto korekcií nie je možné realizovať žiaden zosilňovač, ktorý je určený na zosilňovanie striedavého signálu. Pre svoju činnosť využívajú rôzne typy filtrov a ich vzájomné kombinácie. Najdôležitejšie sú korektory, ktoré slúžia na zosilňovanie nízkych frekvencií kmitočtového signálu (basov) a v oblasti vysokých frekvencií kmitočtového signálu (výšok) v akustickom pásme. Spojením týchto dvoch obvodov vzniká takzvaný združený pasívny korektor. Akustické pásmo má šírku pásma od 20 Hz do 20 KHz. Keďže by bolo zbytočné prenášať vyššie frekvencie nad 20 KHz a nižšie frekvencie pod 20 Hz sa v týchto obvodoch využívajú rôzne DP a HP filtre.

Z hľadiska konštrukcie rozdeľujeme korektory na pasívne a aktívne. Pasívne korektory sú zapojené priamo v ceste nízkofrekvenčného signálu. Vkladajú sa medzi dva zosilňovacie stupne a to najčastejšie na vstup zosilňovača. Ich úlohou je obmedziť prenos signálu rôznych akustických kmitočtov. Aktívny korektor obsahuje z pravidla napäťový zosilňovač, u ktorého sa kmitočtovo závislým článkom v spätnej väzbe dosahuje požadovaný priebeh amplitúdovej charakteristiky. Relatívne zdôraznenie alebo potlačenie signálu v príslušnom kmitočtovom pásme sa dosiahne nastavením zosilnenia väčšieho alebo menšieho ako jedna. Hlavná výhoda tohto korektora je možnosť presnejšie realizovať lineárny priebeh zosilnenia a lepší odstup rušivých napätí oproti pasívnemu korektoru. Najjednoduchším aktívnym prvkom je jednostupňový zosilňovač a nakoľko má dosť veľké skreslenie, používajú sa kvalitné integrované operačné zosilňovače. Principiálne znázornenie je zobrazené na obr. 3.1.

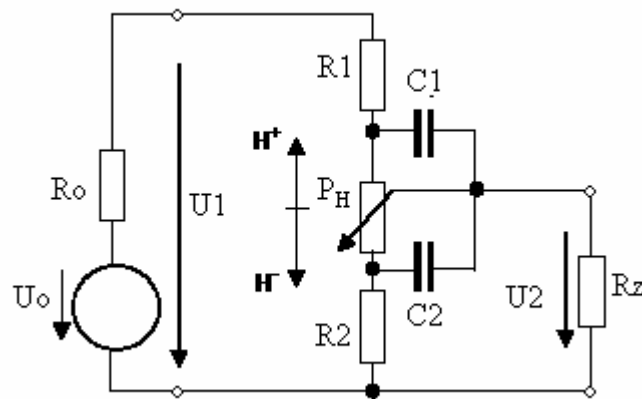


Obr.3.1: Zapojenie korektora v obvode pasívne (a) a aktívne (b)

#### 3.1. PASÍVNY KOREKTOR HLĎBOK

Už z nadpisu je zrejmé, že sa bude jednať o reguláciu dolnej polovici akustického pásma s možnosťou zdôraznenia, alebo potlačenia nízkych frekvencií. Základná schéma zapojenia je

graficky zobrazená na obr.3.2. Pri návrhu vychádzame z požadovaného zdôraznenia, alebo potlačenia pri danom kmitočte  $f_0$ . Ďalej musí byť zadaný medzný kmitočet  $f_1$ , od ktorého má zdôraznenie alebo potlačenie pôsobiť a požadovaná veľkosť základného útlmu. Princíp spočíva na odporovom deliči, ktorý je tvorený kondenzátormi  $C_1$  a  $C_2$ . Tieto kondenzátory majú malú reaktanciu na vysokých a stredných frekvenciách. Na nízkych frekvenciách sa reaktancia kondenzátorov začne uplatňovať a do obvodu sa začne zapájať potenciometer  $P_H$ , ktorý bol na vysokých frekvenciách skratovaný kondenzátormi  $C_1$  a  $C_2$ . Modulová (kmitočtová) charakteristika je znázornená na obr.3.3. [4]



Obr.3.2: Pasívny korektor hĺbok

Pre stredný prenos platí vzťah:

$$K_{SH} = \frac{R_2}{R_2 + R_1'} \quad \text{kde} \quad R_1' = R_1 + R_0 \quad (3.1)$$

$$K_{SH} = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \quad (3.2)$$

Pre prenos  $K_{H+}$  t.j. potenciometer v hornej polohe platí:

$$K_{H+} = \frac{R_2 + P_H}{R_2 + P_H + R_1'} \quad (3.3)$$

Pre prenos  $K_{H-}$  t.j. potenciometer v dolnej polohe platí:

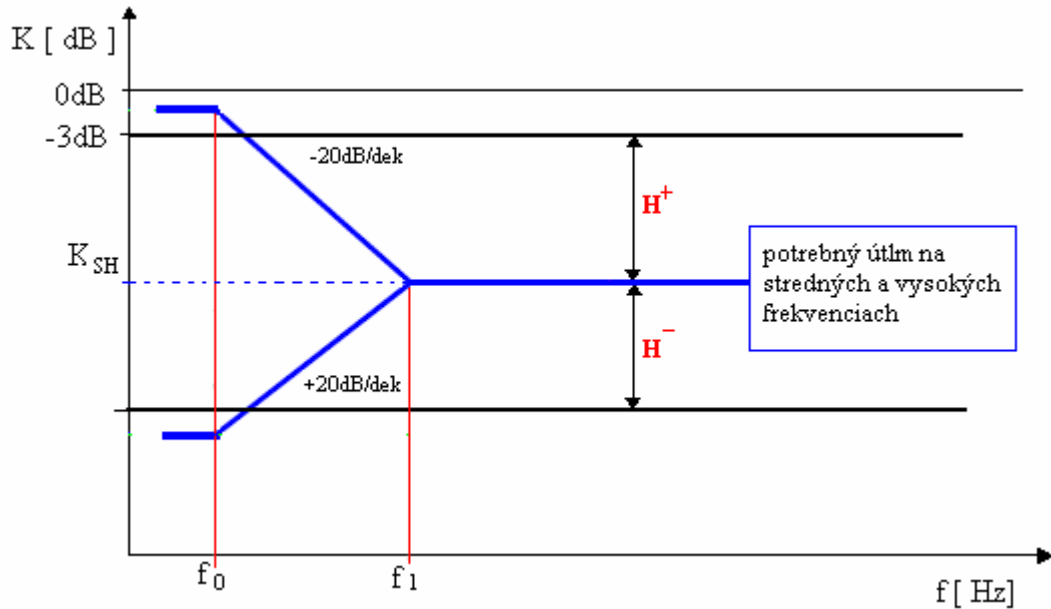
$$K_{H-} = \frac{R_2}{R_2 + P_H + R_1'} \quad (3.4)$$

Pre zdôraznenie charakteristiky (+) platia pre hraničné kmitočty nasledujúce vzťahy:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi(R_2 + R_1)C_2} \quad f_1 = \frac{1}{2\pi R_2 C_2} \quad (3.5)$$

Pre pokles charakteristiky (-) platia pre hraničné kmitočty nasledujúce vzťahy:

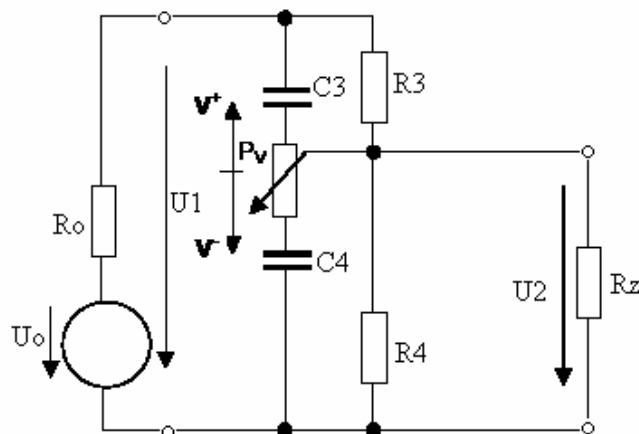
$$f_0' = \frac{1}{2\pi P_H C_1} \quad f_1' = \frac{1}{2\pi(R_2 + R_1)C_1} \quad (3.6)$$



Obr.3.3: Ideálna modulová charakteristika pasívneho korektora hĺbok

### 3.2. PASÍVNY KOREKTOR VÝŠOK

Tento korektor je presný opak hĺbkového korektora. Jeho úlohou je zdôrazniť resp. potlačiť vysoké frekvencie, pričom nízke a stredné frekvencie musia zostať na požadovanom strednom prenose. Základná schéma zapojenia je uvedená na obr.3.4. Korektor výšok je na stredných a nízkych frekvenciách tvorený odporovým deličom R3 a R4, ktorý definuje prenos na nízkych kmitočtoch. Na vysokých frekvenciách sa začína reaktancia kondenzátorov C3 a C4 zmenšovať a do obvodu začína zasahovať potenciometer PV, ktorý bol na nízkych a stredných frekvenciách odpojený kvôli kondenzátorom C3 a C4. Modulová (kmitočtová) charakteristika je znázornená na obr.3.5.[4]



Obr.3.4: Pasívny korektor výšok

Pre stredný prenos platí vzťah:

$$K_{sv} = \frac{R_4}{R_3 + R_4 + R_0} \quad (3.7)$$

Pre prenos  $K_{V+}$ , kde potenciometer je v hornej polohe platí nasledovné:

$$K_{V+} = K_{sv} \frac{(1 + p\tau_5)}{(1 + p\tau_6)}, \text{ kde } \tau_5 = C_3 R_3 \quad \text{a} \quad \tau_6 = C_3 (R_3 // (R_4 + R_0)) \quad (3.8)$$

Musí platiť:  $\tau_5 > \tau_6$

Pre prenos  $K_{V-}$ , kde potenciometer je v dolnej polohe platí nasledovné:

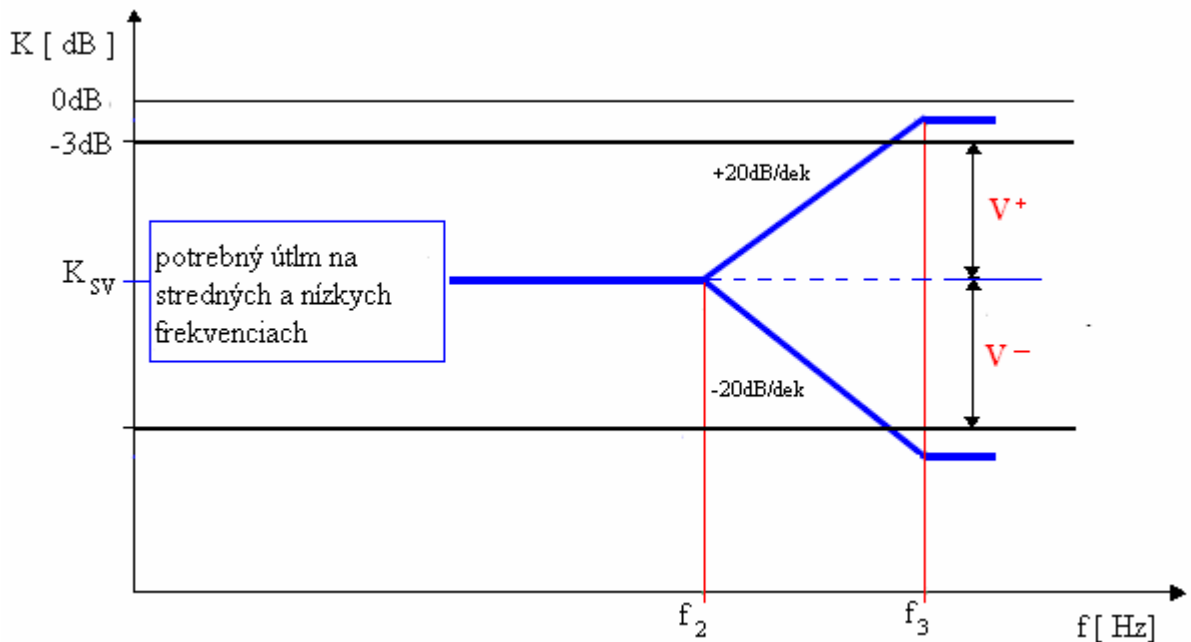
$$K_{V-} = K_{sv} \frac{1}{(1 + p\tau_7)} \quad \text{musí platiť: } \tau_7 = C_4 (R_3 // R_4) \quad (3.9)$$

Pre zdôraznenie charakteristiky (+) platia pre hraničné kmitočty nasledujúce vzťahy:

$$f_2 = \frac{1}{2\pi R_3 C_3} \quad f_3 = \frac{1}{2\pi R_4 C_3} \quad (3.10)$$

Pre pokles charakteristiky (-) platia pre hraničné kmitočty nasledujúce vzťahy:

$$f_2' = \frac{1}{2\pi R_4 C_4} \quad f_3' = \frac{1}{2\pi R_V C_4} \quad (3.11)$$



Obr.3.5: Ideálna modulová charakteristika pasívneho korektora výšok

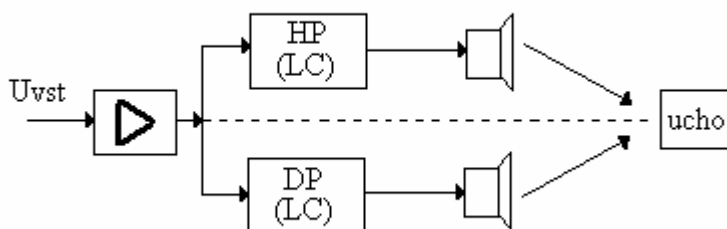
## 4 KMITOČTOVÉ VÝHYBKY PRE AKUSTICKÉ PÁSMO

Nízkofrekvenčný signál, ktorý privádzame do reproduktorovej sústavy musíme rozdeliť na určité frekvenčné pásma. A to z toho dôvodu, že každý reproduktor nedokáže zahrať celé spektrum prenášaného signálu. Preto sa pred reproduktorom zapája takzvaná výhybka, ktorá určuje ako bude signál rozdelený medzi jednotlivé reproduktory z hľadiska kmitočtu a amplitúdy. Umožňuje využiť prednosti jednotlivých reproduktorov a potlačiť ich zlé vlastnosti. Výhybky sa navrhujú tak, aby každý reproduktor pracoval v optimálnom režime, t.j. aby reprodukováný signál sa čo najviac podobal tomu, ktorý do sústavy privádzame.

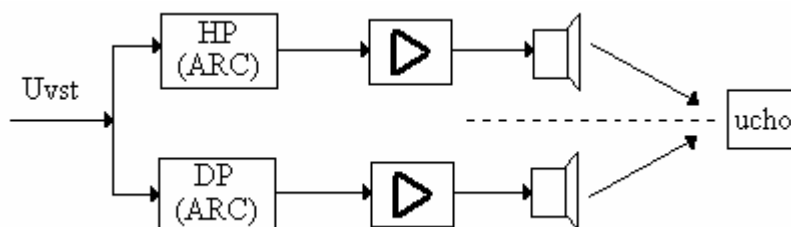
Výhybky delíme na pasívne a aktívne. Pasívne výhybky sú tvorené RLC súčiastkami a ich vzájomnou kombináciou. Do obvodu sa zapájajú pred reproduktorom obr.4.1 Aktívne výhybky sa v dnešnej dobe značne rozšírili obr.4.2. Základný rozdiel oproti pasívnym výhybkám je v tom, že obsahujú jeden aktívny prvok (zvyčajne operačný zosilňovač) a sú zapojené v prenosovom reťazci pred zosilňovačom, kde rozdeľujú signál. Dôležitým parametrom je strmosť výhybky. Udáva sa v dB/okt, to znamená, že o koľko je signál utlmený na každú ďalšiu oktávu, voči deliacej frekvencii. [1] a [8]

### Rozdelenie strmosti výhybiek: [7]

- strmosť 6dB/okt - filter I stupňa
- strmosť 12dB/okt - filter II stupňa
- strmosť 18dB/okt - filter III stupňa
- strmosť 24dB/okt - filter IV stupňa
- strmosť 30dB/okt - filter V stupňa



Obr.4.1 Pasívna výhybka v elektroakustike

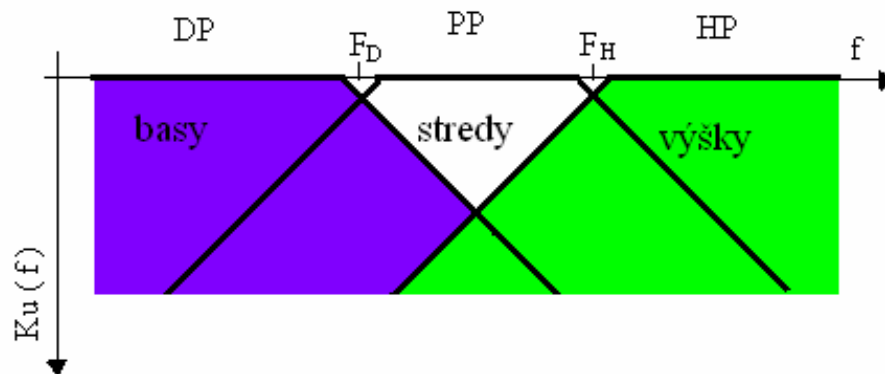


Obr.4.2: Aktívna výhybka v elektroakustike

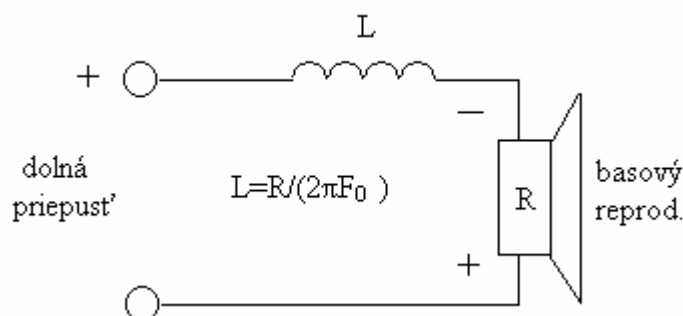
## 4.1. TROJPÁSMOVÁ VÝHYBKA

Najčastejšie sa konštruujú dvojpásmové a trojpásmové výhybky. Rozdiel medzi dvojpásmovou a trojpásmovou je len ten, že dvojpásmová výhybka neobsahuje pásmovú priepusť pre strednotónový reproduktor. Následne si opíšeme trojpásmovú výhybku, ktorá sa používa najčastejšie. Rozdeľuje kmitočtovú rozsah pre použitie bežných basových, stredových a výškových reproduktorov. Podľa typu reproduktora sa volí deliaci kmitočet  $F_D$ , ktorý vlastne určuje medzu prenosových pásiem jednotlivých reproduktorov. Bežne sa volí medza  $F_D$  medzi basovým a stredovým kanálom 300 až 400Hz a medza  $F_H$  medzi stredovým a výškovým kanálom 3 až 4 KHz [1].

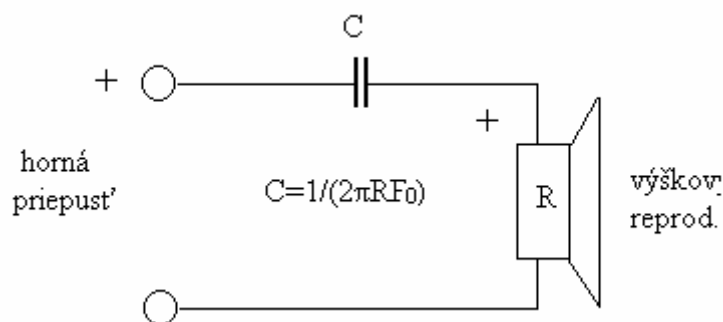
V prípade dvojpásmovej výhybky sa  $F_D = F_H$ . Pre basový reproduktor používame dolnú priepusť obr. 4.4. Pre stredový reproduktor pásmovú priepusť obr. 4.6 a pre výškový reproduktor hornú priepusť obr. 4.5. V praxi sa najčastejšie navrhuje so strmou 12dB/okt. Pri zapojení výhybiiek nastáva určitá zmena celkového prenosu, kvôli vzájomnému ovplyvňovaniu prenosu jednotlivých výhybiiek. Napríklad, keď sa k prenosu medzi stredami a výškami pripočíta i nie celkom potlačený prenos z cesty basov. Rozdelenie kmitočtových pásiem je na obr. 4.3.[8]



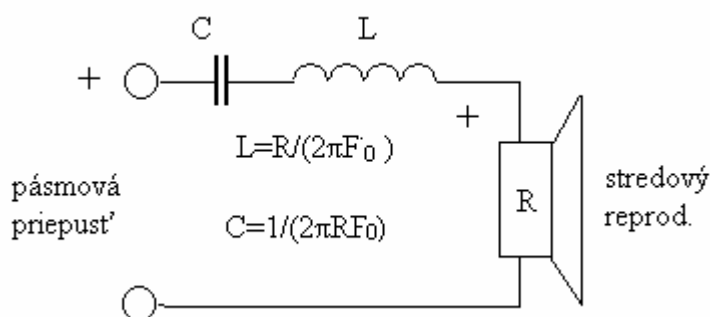
Obr.4.3: Rozdelenie kmitočtových pásiem pre 3 pásmovú výhybku



Obr.4.4: Dolná priepusť 6dB/okt.



Obr.4.5: Horná priepusť 6dB/okt.



Obr.4.6: Pásmová priepusť 6dB/okt.

## 5 EKVALIZÉR

Je elektrické zariadenie, ktoré slúži na úpravu frekvenčnej charakteristiky zvukového signálu a to buď zosilnením alebo potlačením niektorých častí akustického spektra. EQ je podstate rada pásmových priepustí. Jednotlivé pásmové priepuste sú naladené na rôzne frekvencie, ktoré požadujeme. V každej tejto priepusti sa dá nastavovať úroveň signálu bez najmenšieho ovplyvnenia susedného pásma. Využíva sa to hlavne v prípade, ak potrebujeme vyvážiť nedostatky reprosústav, požadujeme zdôrazniť určité frekvenčné pásmo pri rôznych hudobných nástrojoch, pri vyrovnaní kmitočtových charakteristík, zvýraznenie zrozumiteľnosti reči pre lepší posluš poslucháča alebo ak potrebujeme ozvučiť nejakú sálu tak, aby kmitočtové pásmo bolo prispôsobené okolitému prostrediu atď. Ekvalizéry sa delia na grafické a parametrické.

### 5.1. GRAFICKÝ EKVALIZÉR

S týmto ekvalizérom sa najčastejšie stretávame pri mixážnych pulloch. Grafický sa označuje preto, že je osadený ťahovými potenciometrami, ktoré bývajú umiestnené vedľa seba a ich polohy určujú body pomyselného grafu frekvenčnej charakteristiky. Každý potenciometer je priradený k jednému pásmu (to znamená, že frekvenčná oblasť toho pásma má svoju rezonančnú frekvenciu), pri ktorej sa nastavuje maximálna miera korekcie. Bežne sa používa miera korekcie  $\pm 12$  dB, alebo  $\pm 15$  dB. Tieto ekvalizéry sa delia podľa oktáv (šírka pásma) na oktávové (majú desať pásiem), dvojtretinooktávové (majú 15 pásiem) a tretinooktávové (majú 30 pásiem). V praxi sa dôsledne dodržia tretinooktávové kmitočty, ekvalizéry s menším počtom pásiem (pod 10 pásiem) sa volia výberom z tretinooktávových kmitočtov, poprípade i odlišným spôsobom. EQ s menším počtom pásiem sa vyskytujú vo

vstupných jednotkách mixážnych pultoch, predzosilňovačoch, v gitarových kombách a pod.[9]

Korekčné kmitočty grafických ekvalizérov sú dané normou ISO a zobrazuje ich Tab.5.1. Grafické ekvalizéry majú oproti parametrickým ekvalizérom viacero nevýhod. Počet pásiem sa pri výrobe pevne zvolí, ich šírka regulačného pásma (hodnota Q) a ich stredná (rezonančná)frekvencia je pevne zadaná a tak isto aj rozsah regulácie miery korekcie. Ich výhoda spočíva v jednoduchosti ovládania.[1] V prílohe č.1 sú uvedené ukážky grafických ekvalizérov.

1 okt.	2/3 okt.	1/3 okt.	1 okt.	2/3 okt.	1/3 okt.	1 okt.	2/3 okt.	1/3 okt.	1 okt.	2/3 okt.	1/3 okt.
		20	125		125			800			5k
	25	25		160	160	1k	1k	1k		6,3k	6,3k
31,5		31,5			200			1,25k	8k		8k
	40	40	250	250	250		1,6k	1,6k		10k	10k
		50			315	2k		2k			12,5k
63	63	63		400	400		2,5k	2,5k	16k	16k	16k
		80	500		500			3,15k			20k
	100	100		630	630	4k	4k	4k			

Tab.5.1: Korekčné kmitočty grafických ekvalizérov (všetky uvedené hodnoty v [Hz])

## 5.2. PARAMETRICKÝ EKVALIZÉR

Parametrický ekvalizér sa používa v profesionálnych zariadeniach kde, nestačí len regulovať mieru korekcie a pevne zadaný kmitočet korekcie. Základný rozdiel je v tom, že každé pásmo sa dá nastavovať pomocou obvodu o troch parametroch:

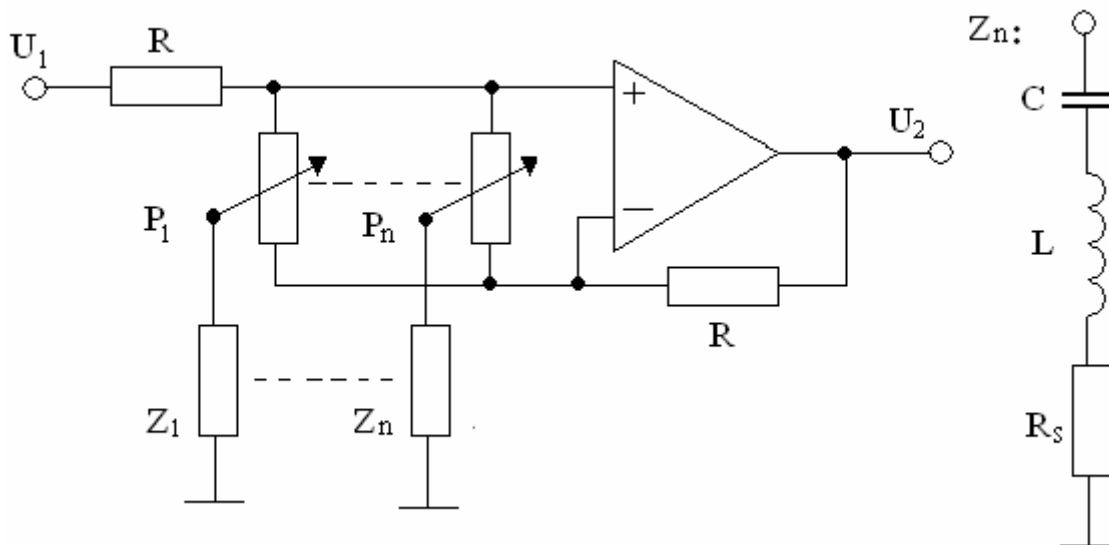
- ♦ Frekvencia – prvým ovládačom sa nastavuje kmitočet korekcie upravovaného pásma.
- ♦ Kvantita- druhým ovládačom sa nastavuje miera korekcie (potlačenie alebo zosilnenie daného pásma)
- ♦ Kvalita- tretím ovládačom sa nastavuje činiteľ akosti Q (nastavuje sa ním takzvaná šírka pásma). Čím je činiteľ akosti Q vyšší, tým je pásmo užšie.

Je to zostava niekoľkých preladiteľných filtrov typu pásmová priepusť. Tieto ekvalizéry majú menší počet pásiem obvykle 3 a viac. Ich použitie je napríklad vo vstupných jednotkách mixážneho pultu. Výhodou tohto ekvalizéra je napríklad možnosť utlmiť úzke pásmo kmitočtu v okolí rezonančných vrcholov, hlavne pri basových nástrojoch. Keď máme pevne stanovený činiteľ akosti, nazývame tento typ ekvalizéru *pseudoparametrický*. [9]

## 5.3. KOREKTOR SO SÉRIOVÝMI REZONANČNÝMI OBVODMI

**Korektor so sériovými rezonančnými obvodmi** (s neinvertujúcim zosilňovačom). Principiálne zapojenie je na obr. 5.1.[1]





Obr.5.1: Principiálne zapojenie pre viac pásiem so sériovými rezonančnými obvodmi

Tento korektor pracuje v hornej polohe regulačného potenciometra ako pasívny delič napätia R-Z s oddeľovacím jednotkovým deličom. Sériové rezonančné obvody RLC sú v ekvalizéri zapojené do spätnoväzobnej slučky neinvertujúceho operačného zosilňovača cez potenciometre P1 až P9, ktorými regulujeme zosilnenie OZ na rezonančnom kmitočte každého obvodu RLC. Obvod RLC má na svojom rezonančnom kmitočte minimálny odpor. Ak ho potom pripojíme na neinvertujúci vstup operačného zosilňovača (jazdec potenciometra je v hornej polohe), pôsobí obvod ako súčasť deliča napätia na vstupe OZ a tým na danom kmitočte znižuje amplitúdu. Ak je obvod RLC pripojený na invertujúci vstup operačného zosilňovača (jazdec potenciometru je v dolnej polohe), pôsobí obvod ako súčasť deliča napätia v zápornej väzbe a tým vlastne dostávame na danom kmitočte väčšiu amplitúdu signálu. Potenciometre potom umožňujú plynulú reguláciu medzi týmito dvoma stavmi. Vplyvy všetkých obvodov RLC sa sčítajú a na výstupe dostaneme signál na rôznych kmitočtoch rôzne zosilnený podľa polohy potenciometrov P1 až Pn. V strednej polohe potenciometrov je prenos jednotkový a kmitočtovo nezávislý.

Korektor so sériovými rezonančnými obvodmi je impedančne závislý s poklesom hodnoty akosti Q obr. 5.2. Regulačný potenciometer pri nastavení regulácie znižuje Q obvodu a to svojím vlastným odporom zapojeným v sérii. Preto hodnota odporu potenciometra je tiež dôležitá, pričom sa bežne volí hodnota 22kΩ. Vyššia hodnota ako 100kΩ by mala za následok neplynulú reguláciu a uprostred odporovej dráhy by bola oblasť necitlivosti. Nevýhoda tohto zapojenia je impedančný vplyv susedných pásiem, keď kmitočtový priebeh prenosu korektora ovplyvňuje rezonančný obvod RLC susedného korektora a to aj vtedy, keď je v nulovej regulačnej polohe. Tento vplyv sa dá odstrániť takým spôsobom, že rozdelíme najbližšie korekčné pásma medzi dva alebo tri zosilňovače. Z toho vyplýva, že každý susedný kmitočet je v inom sumačnom obvode.[5]

### 5.3.1. Návrh deväťpásmového ekvalizéra

V tejto práci som sa pokúsil navrhnuť analógový ekvalizér, ktorý by vyhovoval požadovaným vlastnostiam v bežných amatérskych podmienkach. Oproti klasickým korekčným predzosilňovačom má výhodu a to takú, že pomocou viacerých regulovaných pásiem dosiahneme lepšiu vyrovnanú kmitočtovú charakteristiku. Pre realizáciu

nastaviteľných pásmových korektorov som využil zapojenie, ktoré vyhovuje mojím požiadavkám. Použil som zapojenie uvedené v kapitole 5.3. Korektor so sériovými rezonančnými obvodmi (s neinvertujúcim zosilňovačom).

### Postup návrhu obsahuje nasledovné kroky:

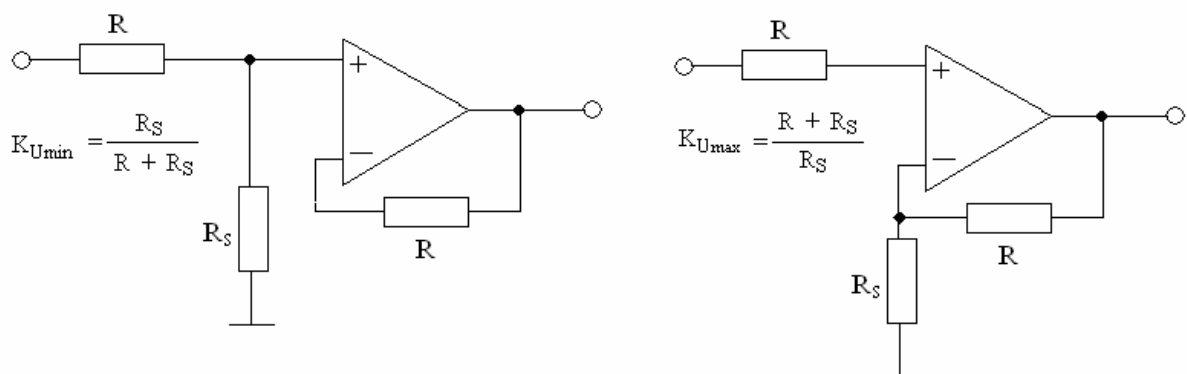
1.) Prvým krokom bude zvolenie deviatich pásiem pre navrhovaný deväťpásmový ekvalizér. Zvolíme si nasledovné korekčné kmitočty podľa tab.5.1, ktoré sú vybraté z tretinooktávových kmitočtov a sú zvolené takým spôsobom, aby výsledná charakteristika mala vyrovnanú kmitočtovú charakteristiku.

**63 Hz, 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz, 16 kHz**

2.) Zvolíme si maximálnu mieru korekcie, pričom bežne sa používa  $\pm 15$  dB. U tohto typu ekvalizéra to bude jediný regulovateľný parameter.

3.) Ďalšia hodnota, ktorú si zvolíme je hodnota odporu R vid'. obr. 5.1. Jej hodnota býva spravidla okolo 10 k $\Omega$ . Pre navrhovaný ekvalizér sme zvolili **R= 6k8 $\Omega$** .

4.) Keď už poznáme maximálnu mieru korekcie a hodnotu odporu R, môžeme pristúpiť k výpočtu hodnoty  $R_S$ , kde  $R_S$  je sériový odpor impedancie  $Z_n$  obr.5.1. Budeme vychádzať zo vzťahu uvedenom na obr.5.2.



Obr.5.2: Modely pre maximálny a minimálny prenos

Keďže maximálna miera prenosu je v dB. Musíme tento prenos prepočítať na  $K_U$ , ktoré sa rovná potom  $K_{U_{max}}$ . Zo vzťahu (5.1) vypočítame modul prenosu  $K_U$ . Pričom vieme nasledovné:

$$K_{dB} = +15 \text{ dB}$$

$$K_{dB} = 20 \log K_U \Rightarrow K_U = 10^{\frac{K_{dB}}{20}} = \underline{\underline{5,623}} \quad (5.1)$$

Výpočet  $R_S$  odporu podľa vzťahu (5.2). Odpor sa bude líšiť od presne vypočítanej hodnoty len minimálne a to z dôvodu, že odporová rada taká neexistuje, preto sme zvolili najbližšiu možnú hodnotu (táto hodnota sa už vyrába v odporovej rade E 96), ktorá sa blíži k vypočítanej hodnote. Hodnota odporu  $R_S$  bude vo všetkých ďalších rezonančných obvodoch rovnaká, čiže odpory R18 až R26 obr. 5.4 majú hodnotu 1k47 $\Omega$ .

$$K_{U_{\max}} = \frac{R + R_S}{R_S} \Rightarrow R_S = \frac{R}{(K_{U_{\max}} - 1)} = \frac{6k8}{5,623 - 1} = 1470,70 \Rightarrow \underline{\underline{1470\Omega}} \quad (5.2)$$

5.) Od tohto bodu budeme do výpočtu zahrňovať prvý rezonančný kmitočet  $f_r=63 \text{ Hz}$   
*Výpočet kondenzátora C* na obr.5.1 sériového rezonančného obvodu impedancie  $Z_n$ . Pri výpočte budeme vychádzať zo vzťahu (5.3) pre výpočet činiteľa akosti Q. Vzorec pre výpočet činiteľa akosti sériového rezonančného obvodu je nasledovný:

$$Q = \frac{1}{\omega_r C R_S} [-] \quad (5.3)$$

Pri realizácii s kaskádnym spojením korektorov je voľba hodnoty Q problémovnejšia ako pri iných zapojeniach, pretože je tu väčšie zvlnenie a väčšie ovplyvňovanie susedných pásiem. Ako prijateľný kompromis sa volí šírka u tretinooktávového korektora hodnota Q v rozmedzí 8 až 10. Keďže tento ekvalizér má len deväť pásiem zvolili sme si hodnotu  $Q=6$  a to z dôvodu, že čím je menej pásiem, tým klesá hodnota Q.

Takže poznáme hodnotu Q a prvý rezonančný kmitočet  $f_r=63 \text{ Hz}$ , z čoho vyplýva, že  $\omega_R$  sa rovná:

$$\omega_R = 2\pi f_r = 2\pi 63 = \underline{\underline{395,64 \text{ Hz}}} \quad (5.4)$$

Teraz sa dostaneme k návrhu kondenzátora C, ktorý si vyjadríme zo vzťahu (5.3). Výpočet kondenzátora C v impedancii  $Z_n$  sériového rezonančného obvodu:

$$Q = \frac{1}{\omega_r C R_S} \Rightarrow C = \frac{1}{Q \cdot \omega_r R_S} = \frac{1}{6 * 395,64 * 1470} = 286,57 \text{ nF} \Rightarrow \underline{\underline{270 \text{ nF}}} \quad (5.5)$$

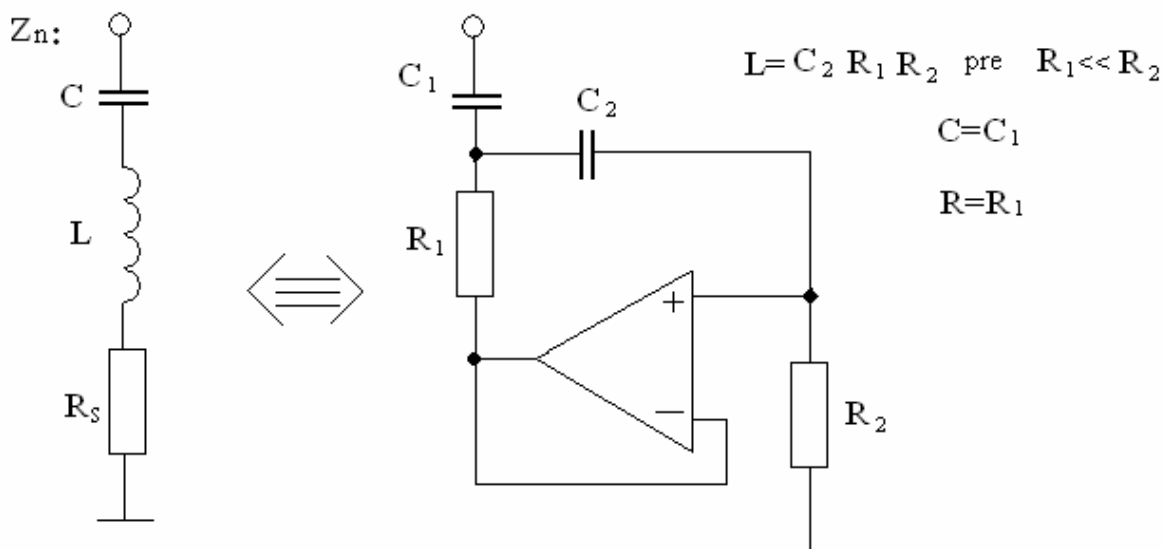
6.) *Výpočet cievky L* na obr. 5.1 sériového rezonančného obvodu impedancie  $Z_n$ . Keď už poznáme hodnotu kondenzátora C, môžeme pomocou vzorca pre výpočet rezonančnej frekvencie určiť jej hodnotu. Vzorec pre výpočet rezonančného kmitočtu: [1]

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad [\text{Hz}] \quad (5.6)$$

Zo vzťahu vzorca (5.6) si vyjadríme hodnotu cievky L:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \Rightarrow L = \frac{1}{f_r^2 4\pi^2 C} = \frac{1}{63^2 * 4\pi^2 * 286 * 10^{-9}} = \underline{\underline{22,27 \text{ H}}} \quad (5.7)$$

Keďže použitie klasickej cievky by bolo veľmi nákladné a aj nepraktické, použijeme syntetickú indukčnosť (gyrátor). Pomocou tejto indukčnosti môžeme dosahovať vysoké hodnoty indukčnosti. Gyrátor je obvod, ktorý transformuje jednu impedanciu na inú. V tomto prípade na indukčnosť. Náhrada sériového rezonančného obvodu s klasickou a so syntetickou indukčnosťou je zobrazená na obr. 5.3.



Obr.5.3: Náhrada RLC sériového obvodu pomocou syntetickej indukčnosti

### Návrh syntetickej indukčnosti

Budeme vychádzať zo vzorca :

$$L = C_2 R_1 R_2 \quad [\text{H}] \quad (5.8)$$

Z podmienky  $R_1 \ll R_2$  si zvolíme  $R_2$ . Tento odpor by mal byť niekoľko násobne väčší ako  $R_1$ , čiže  $R_2 = 147 \text{ k}\Omega$ . Vieme, že  $R_1 = R_s$ . Poznáme hodnoty súčastok  $R_1$ ,  $R_2$  a  $L$  teda musíme dopočítať hodnotu  $C_2$ , ktorú vypočítame vyjadrením zo vzorca (5.8).

$$L = C_2 R_1 R_2 \Rightarrow C_2 = \frac{L}{R_1 R_2} = \frac{22,27}{1470 * 147000} = 103,05 \text{ nF} \Rightarrow \underline{\underline{110 \text{ nF}}} \quad (5.9)$$

Teraz môžeme dopočítať výslednú indukčnosť cievky  $L$ , ktorá je nahradená syntetickou indukčnosťou. Do nasledovného vzorca (5.8) dosadíme všetky už známe veličiny a výsledok z tohto výpočtu mám vyjadriť neznámu indukčnosť  $L$  sériového rezonančného obvodu.[5]

$$L = C_2 R_1 R_2 = 110 * 10^{-9} * 1470 * 147000 = \underline{\underline{23,77 \text{ H}}} \quad (5.10)$$

Vypočítaním hodnoty  $L$  sme skončili návrh pásmového korektora pre rezonančný kmitočet  $f_r = 63 \text{ Hz}$ . Ostatné pásma korektora sa počítajú podobne ako toto pásmo, ale s tým rozdielom, že sa začína pokračovať až od bodu č.5. Pretože sériový odpor  $R_s$  zostáva pre všetky pásma rovnaký a tak isto aj základná hodnota  $Q$ . Pri tomto bode č.5 sa len zmení parameter rezonančného kmitočtu na  $125 \text{ Hz}$  a takýmto spôsobom je možné vypočítať rezonančné kmitočty pre zvyšných osem pásiem. Na záver v tejto kapitole uvádzam menší súhrn vypočítaných hodnôt v Tab.5.2 pre prvé pásmo korektora  $f_r = 63 \text{ Hz}$ .

$R_s = R_1$ [ $\Omega$ ]	$R_2$ [ $\text{k}\Omega$ ]	$L$ [ $\text{H}$ ]	$C = C_1$ [ $\text{nF}$ ]	$C_2$ [ $\text{nF}$ ]
1470	147	23,77	270	110

Tab.5.2: Vypočítané hodnoty pre sériový rezonančný obvod  $f_r = 63 \text{ Hz}$

Pre kontrolu rezonančného kmitočtu z vypočítaných hodnôt RLC použijeme vzťah (5.6).

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{23,77 * 270 * 10^{-9}}} = \underline{\underline{62,82Hz}} \quad (5.11)$$

Menšia nepresnosť pri tomto type korektora sa dala aj očakávať a to z toho dôvodu, že problém nastáva s hodnotami kondenzátorov. Nakoľko vypočítané hodnoty sa nedajú voliť z vyrábaných radov je potrebné hľadať najbližšiu možnú hodnotu k vypočítanej hodnote kondenzátora, ktorá sa vyrába.

### 5.3.2. Prehľad vypočítaných hodnôt deväťpásmového ekvalizéra

Všetky hodnoty, ktoré sme vypočítali sú uvedené v tabuľke Tab.5.3.

fr [Hz]	Rs = R1 [Ω]	R2 [kΩ]	L [H]	C=C1 [nF]	C2 [nF]
63	1470	147	23,778	270	110
125	1470	147	11,023	150	51
250	1470	147	5,834	75	27
500	1470	147	2,593	39	12
1000	1470	147	1,469	18	6,8
2000	1470	147	0,713	9,1	3,3
4000	1470	147	0,345	4,7	1,6
8000	1470	147	0,177	2,2	820pF
16000	1470	147	0,084	1,2	390pF

Tab.5.3: Tabuľka vypočítaných hodnôt pre všetky rezonančné kmitočty

Kontrola rezonančných kmitočtov z vypočítaných hodnôt RLC, všetky pásma sú uvedené v Tab.5.4.

Požadovaný fr [Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
Vypočítaný fr [Hz]	62,8	123,8	252,7	500,5	978,8	1975,9	3948,4	8061,0	15826,8

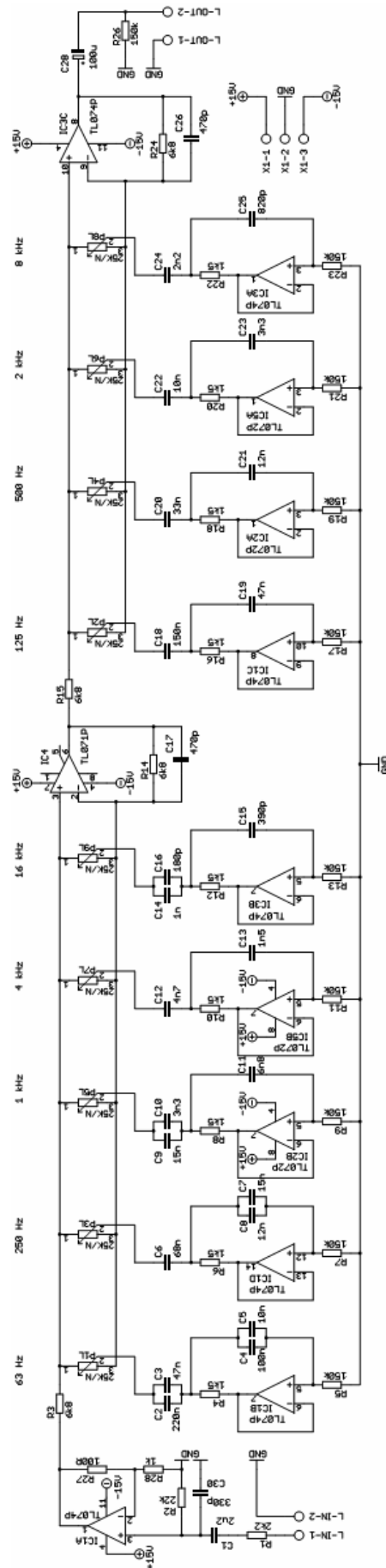
Tab.5.4: Tabuľka vypočítaných rezonančných kmitočtov podľa dostupných hodnôt súčiastok

## 6 REALIZÁCIA CELKOVÉHO ZARIADENIA.

Celé zariadenie obsahuje okrem ekvalizéra aj iné časti a to napájací zdroj a indikátor vybudenia. Cieľom tohto bodu bude zoznámenie sa s týmito časťami .

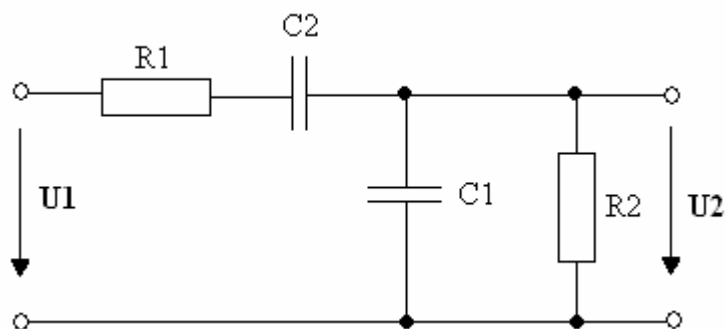
### 6.1. EKVALIZÉR.

Ekvalizér je napájaný symetrickým napätím  $\pm 15V$ . Ako regulovateľný parameter využívame deväť potenciometrov s ktorými regulujeme mieru korekcie  $\pm 15dB$  pri rôznych rezonančných kmitočtoch .Schéma zapojenia je na obr.6.1. Ľavý kanál je totožný s pravým kanálom.



Obr.6.1: Schéma zapojenia ekvalizéra pre jeden kanál

Na vstupe ľavého kanála L-IN je zapojený Wienov článok 1.stupňa obr.6.2.

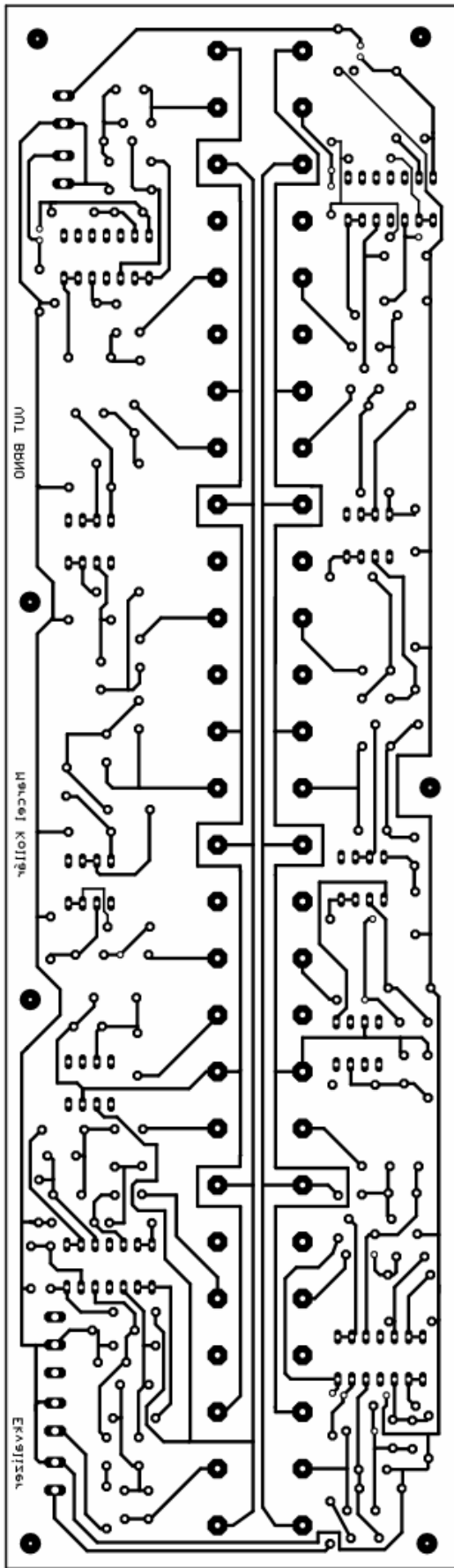


Obr.6.2: Wienov článok.

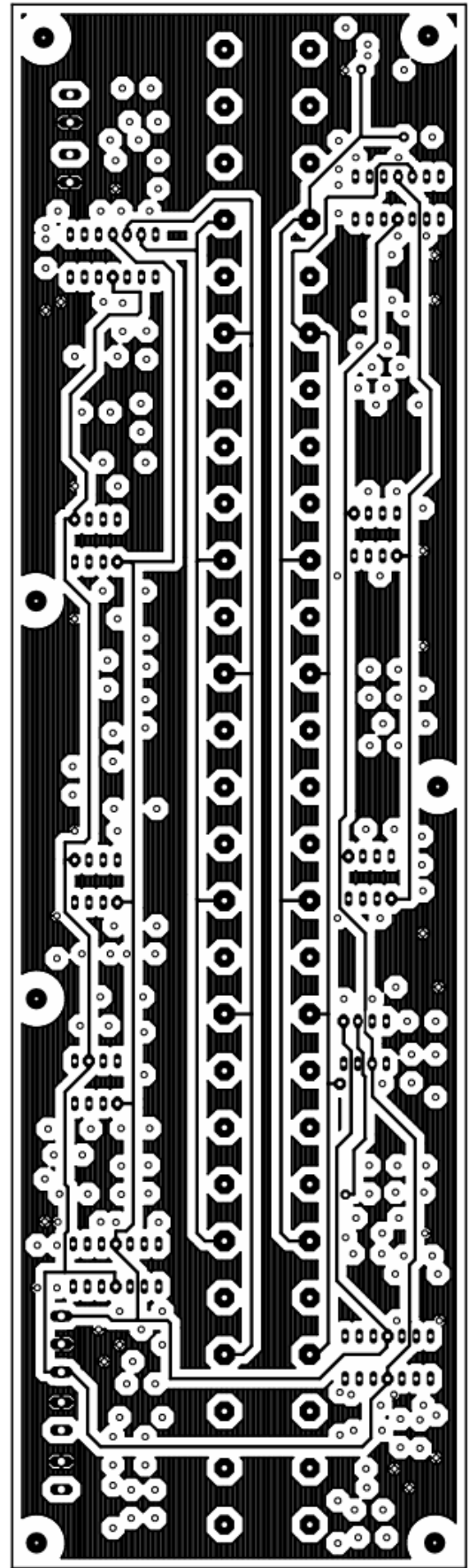
Wienov článok patrí medzi filtre 1 .stupňa. Tento článok sa správa ako takzvaná pásmová priepusť. Je to spojenie jednoduchého integračného článku  $R_1C_1$ , čo je dolnopriepustný filter 1. stupňa. Medzná frekvencia je  $f_m= 220$  kHz. A spojenie jednoduchého derivačného článku  $R_2C_2$ , čo je hornopriepustný filter 1.stupňa.Medzná frekvencia  $f_m= 3,3$  Hz. Popis činnosti ekvalizéra som opísal v bode 5.3. korektor so sériovými rezonančnými obvodmi.

### 6.1.1. Návrh dosky plošného spoja ekvalizéra

Pre návrh dosky plošného spoja som použil editor plošných spojov program EAGLE (Easily Applicable Graphical Layout Editor), ktorý je od ostatných programov jednoduchší, ale efektívne výkonný nástroj pre návrh DPS. Ja som použil verziu EAGLE 4.13 Light, ktorá mi umožňovala plné využitie programu. Program sa skladá z troch hlavných modulov a to z editora spojov, editora schém a autorouter. V prvom rade som nakreslil schému, ktorú som potom následne použil pre editor spojov. Pretože schéma bola dosť zložitá musel som použiť obojstranný plošný spoj. Šírku ciest som volil 0,6mm. Táto šírka úplne vystačuje pre prenos prúdu okolo 45mA. Cesty som navrhoval podľa normy, čiže žiadne ostré uhly a zbytočne dlhé cesty som úplne minimalizoval. Vŕtacie otvory som volil pre rezistory, kondenzátory a operačné zosilňovače 0,8 mm. Pre svorkovnice do plošného spoja 1 mm a pre potenciometre 1,8 mm. Keďže potenciometre som použil ako dvojité, tým pádom som nemusel navrhovať dve rovnaké DPS, ale postačila iba jedna. Pri návrhu som dodržiaval minimálny rozmer šírka spoja a medzery 0,25 mm. Na hornej vrstve ( TOP) som použil polygón na celý rozmer DPS. Polygón slúži ako tienenie proti elektromagnetickému rušeniu, ktoré sa dostáva z okolitého prostredia. Je spojený so zemou a príslušné spoje sú spojené pomocou štyroch bodov, to má výhodu takú že sa spoj pri pájaní lepšie prehreje. Veľkosť izolačnej medzery , to je vzdialenosť polygónu od spoja je 1,4 mm. Celá doska plošného spoja má sedem otvorov pre uchytenie distančných stĺpikov po celom obvode dosky. Doska má rozmer 280x81 mm. Tento veľký rozmer je zapríčinený hlavne veľkosťou potenciometrov, keďže jeden potenciometer má takmer šírku 3cm. Obrázec dosky spojov (strana BOTTOM) je na obr.6.3. Obrázec dosky spojov (strana TOP) je na obr.6.4. Rozloženie súčiastok na doske je zobrazené na obr.6.5.

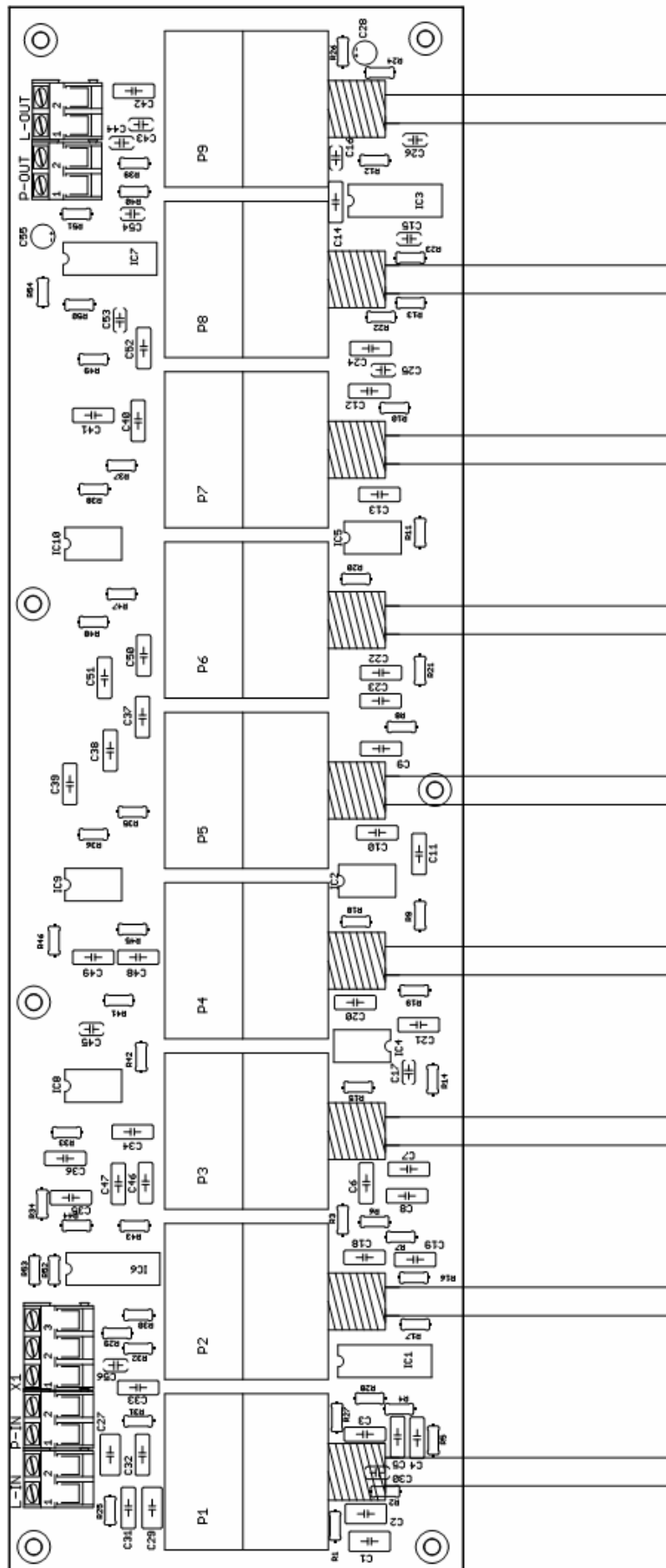


Obr.6.3: Strana BOTTOM



Obr.6.4: Strana TOP





Obr.6.5: Rozloženie súčiastok na ekvalizéri

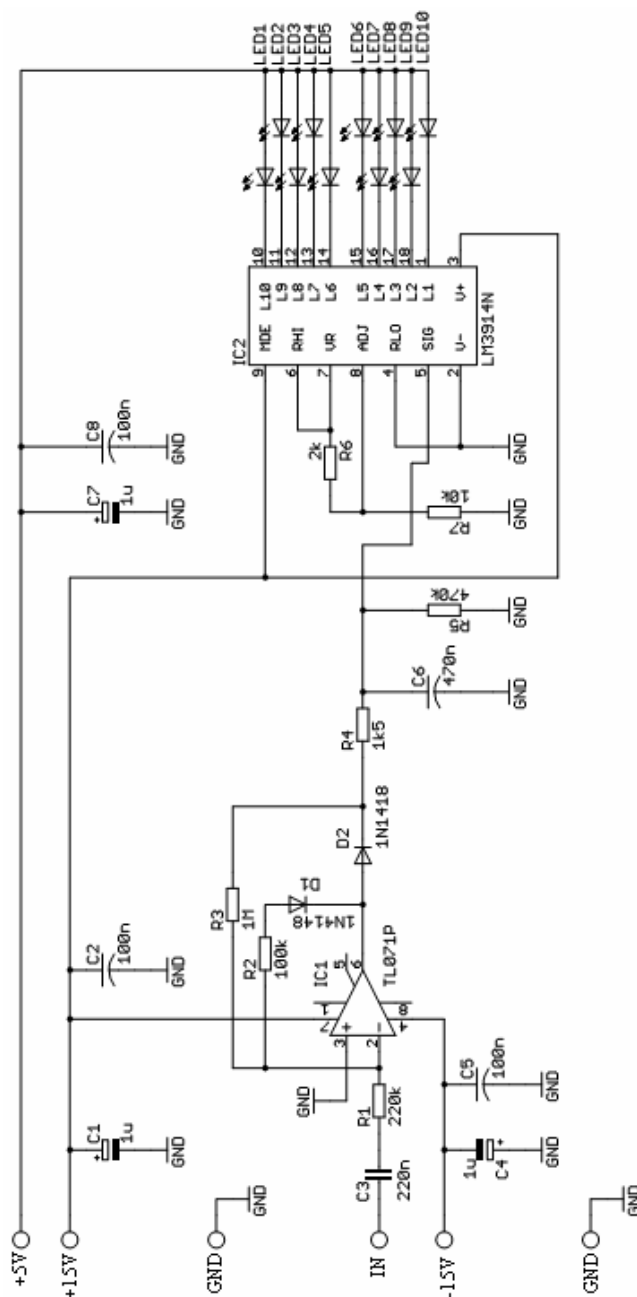
## 6.1.2. Zoznam súčiastok ekvalizéra.

Názov	Hodnota	Poznámka	Cena [ Kč ]
R1,R25	2k2	metal 0,6W	2
R2,R29	22k	metal 0,6W	2
R28,R53	1k	metal 0,6W	2
R27,R52	100R	metal 0,6W	2
R26,R54	150k	metal 0,6W	2
R3,R14,R15,R24 R30,R41,R42,R51	6k8	metal 0,6W	8
R4,R6,R8,R10,R12 R16,R18,R20,R22 R31,R33,R35,R37 R39,R43,R45,R47,R49	1k5	metal 0,6W	18
R5,R7,R9,R11,R13 R17,R19,R21,R23 R32,R34,R36,R38,R40 R44,R46,R48,R50	150k	metal 0,6W	18
C1,C27	2u2	elyt radialny	2
C28,C55	100u	elyt radialny	2
C30,C56	330p	keramický	2
C17,C26,C45,C54	470p	keramický	6
C16,C43	180p	keramický	3
C25,C53	820p	keramický	3
C2,C29	220n	foliový	4
C3,C19,C31,C47	47n	foliový	6
C4,C32	100n	foliový	3
C5,C33,C22,C50	10n	foliový	6
C6,C34	68n	foliový	3
C8,C36,C21,C49	12n	foliový	6
C7,C9,C35,C37	15n	foliový	6
C10,C38,C23,C51	3n3	foliový	14
C11,C39	6n8	foliový	3
C12,C40,	4n7	foliový	3
C13,C41	1n5	foliový	3
C14,C42	1n	foliový	5
C18,C46	150n	foliový	4
C20,C48	33n	foliový	3
C24,C52	2n2	foliový	3
P1až P9	25k/N	dvojité potenc.	315
IC1,IC3,IC6,IC7	TL074	4-0Z	34
IC2,IC5,IC9,IC10	TL072	2-0Z	28
IC4,IC8	TL071		21
KDR20 ( 7 kus)	3,6/20mm	distančný stípk	7
ARK306/2P	svorkovnica	4 kus	8
ARK306/3P	svorkovnica	1kus	3,5
<b>Celková cena súčiastok</b>			<b>560,5</b>

Tab.6.1: Zoznam súčiastok ekvalizéra pre 9 pásmový ekvalizér

## 6.2. INDIKÁTOR VYBUDENIA

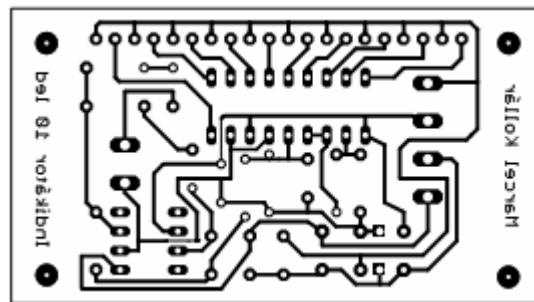
Hlavné jadro indikátoru vybudenia tvorí integrovaný obvod LM3915 s logaritmickou charakteristikou zobrazovania na vstupnom napätí. Schéma zapojenia mono verzie je na obr.6.6. Základom je integrovaný obvod IC2 s logaritmickou závislosťou. Rezistory R6 a R7 určujú rozsah indikovaných napätí a prúd diódami LED. Indikovaný rozsah je od -21dB až +6dB. Tento rozsah zaisťuje vybudenie 10 led diód. Rezistory R4 a R5 a kondenzátor C6 filtrujú usmernený signál. Kondenzátor C3 a rezistory R1,R2,R3 a diódy D1 a D2 tvoria usmerňovač. Ostatné kondenzátory a to C1,C2,C4,C5,C7 a C8 slúžia k blokovaniu napájacieho napätia integrovaného obvodu. Napájanie integrovaného obvodu IC1 je  $\pm 15V$ , IC2 je +15V a napájanie diód je +5V. Prúd diódami LED je nastavený približne na 10 mA. Vstupná impedancia je 220 k $\Omega$ . Stereo verziu získame ešte ďalšou mono verziou.



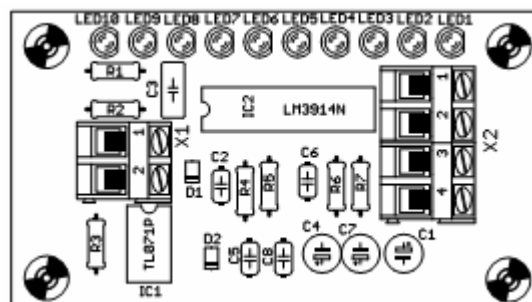
Obr.6.6: Schéma zapojenia mono verzie indikátoru vybudenia

### 6.2.1. Návrh dosky plošného spoja indikátoru vybudenia.

Celá doska je zhotovená na jednostrannom plošnom spoji. Šírka ciest je konštantná po celej doske a to 0,5 mm. Vŕtacie otvory sú zhotovené pre vrtáky od 0,8mm do 1 mm. V každom rohu dosky je diera na uchytenie distančného stĺpika. Rozmiestnenie diód je na kraji dosky, kvôli lepšej manipulácii s viacžilovým káblom. Rozmer dosky je 70x39mm. Obrazec dosky spojov (strana BOTTOM) uvádzam na obr.6.7. Rozloženie súčiastok na doske zobrazujem na obr.6.8.



Obr.6.7: Obrazec dosky spojov (strana BOTTOM) indikátoru vybudenia mierka1:1



Obr.6.8: Rozloženie súčiastok na doske indikátoru vybudenia.

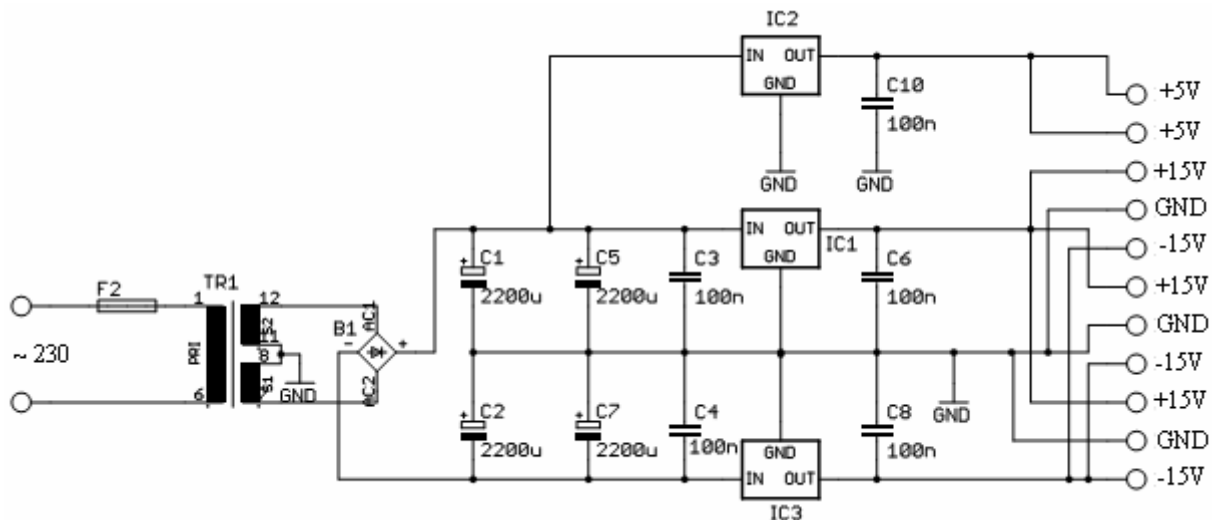
## 6.2.2. Zoznam súčiastok indikátora vybudenia.

Názov	Hodnota	Poznámka	Cena [ Kč ]
R1	220k	metal 0,6 W	1
R2	100k	metal 0,6 W	1
R3	1M	metal 0,6 W	1
R4	1k5	metal 0,6 W	1
R5	470k	metal 0,6 W	1
R6	2k	metal 0,6 W	1
R7	10k	metal 0,6 W	1
C6	470n	fóliový	2
C1,C4,C7	1u	elyt radiálny	3
C2,C5,C8	100n	keramický	3
IC1	TL071		7
IC2	LM3915	log.budič	35
Led 1 až Led 5	green	3mm	15
Led 6 až Led 8	yellow	3mm	9
Led 9, Led 10	red	3mm	6
KDR20 ( 4 kus)	3,6/20mm	distančný stĺpik	4
<b>Celková cena súčiastok</b>			<b>91</b>

Tab.6.2: Zoznam súčiastok indikátora vybudenia

## 6.3. NAPÁJACÍ ZDROJ PRE EKVALIZÉR A INDIKÁTOR VYBUDENIA

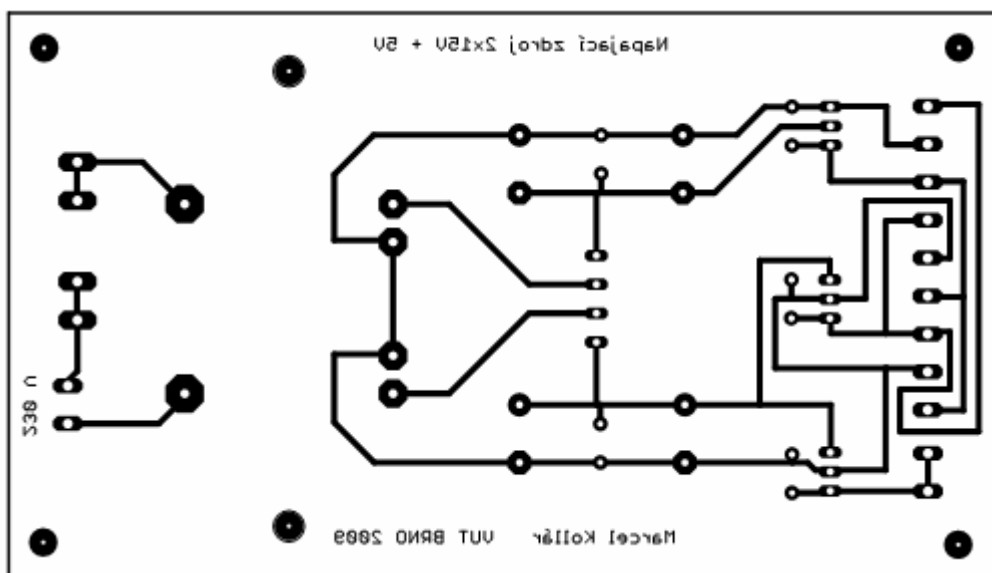
Napájací zdroj je navrhovaný pre napájanie ekvalizéra a indikátora vybudenia. Tento zdroj je symetrický a jeho výstup je  $\pm 15V$  a  $+5V$ . Schéma zapojenia je na obr.6.9. Zapojenie je veľmi jednoduché a priehľadné. Pred ochranou poistkou F2 je striedavé napätie 230V privedené na primárne vinutie transformátora. Z dvoch sekundárnych vinutí sieťového transformátora TR1 sa dvojcestne usmerní napätie pomocou mostíkového usmerňovača B1, ktoré sa následne vyhládí elektrolytickými kondenzátormi C1, C2,C5, a C7. Pretože tento typ kondenzátorov má na vysokých kmitočtoch viac induktívny charakter, pripojujú sa k nim paralelné keramické kondenzátory C3 a C4, u ktorých je i na vysokých kmitočtoch indukčnosť minimálna. Za týmito kondenzátormi sú umiestnené integrované stabilizátory 7815 a 7805 v kladnej vetve napätia a integrovaný stabilizátor 7915 v zápornej vetve napätia. Tieto stabilizátory stabilizujú napätie na  $\pm 15 V$  a  $+5 V$ , ktoré nám vyhovuje pre napájanie častí celkového zariadenia. Za týmito stabilizátormi sa nachádzajú blokovacie kondenzátory C6, C8 a C10. Výstup je opatrený svorkovnicami pre jednoduchosť pripojenia kabeláže. Stabilizátory sa musia chladiť hliníkovými chladičmi, keďže chceme aby na nich teplota nepresiahla viac ako  $60^{\circ}$  Celzia. Maximálny prúdový odber by nemal prekročiť hodnotu 333mA, táto hodnota plne vystačuje pre napájanie nášho zariadenia.



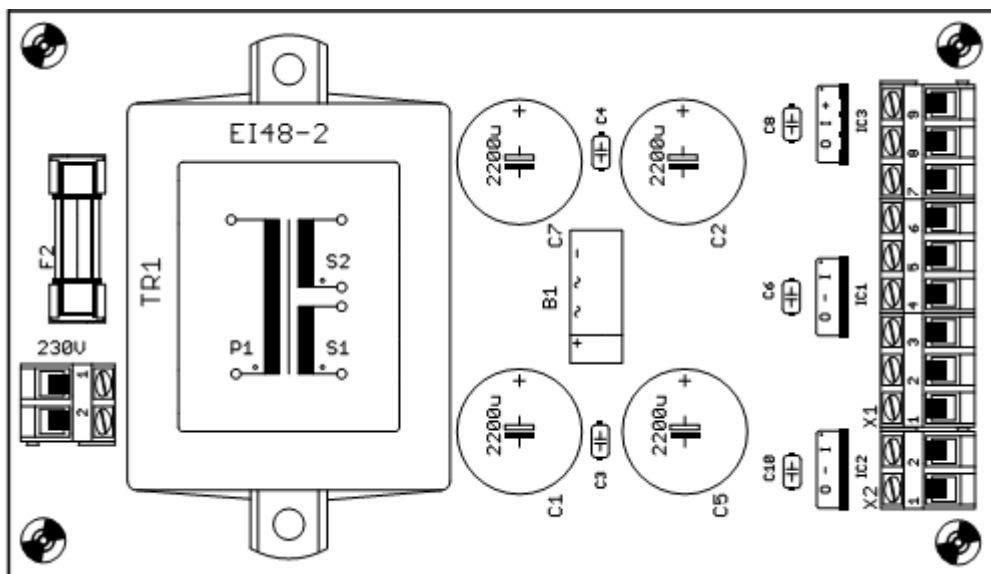
Obr.6.9: Schéma zapojenia napájacieho zdroja

### 6.3.1. Návrh dosky plošného napájacieho zdroja.

Opäť sa jedná o jednostranný plošný spoj, ktorý sa musel riadiť niektorými bezpečnostnými opatreniami. Najzákladnejšie opatrenie bolo vytvorenie dost' veľkej izolačnej medzery medzi primárnym a sekundárnym obvodom. Šírku spojov som volil 0,8mm. Celkový zdroj má na uchytenie 4 distančné stĺpiky po okrajoch dosky. Celkový rozmer dosky je 130x75 mm. Obrázec dosky spojov (strana BOTTOM) je na obr.6.10. Rozloženie súčiastok na doske je na obr.6.11.



Obr.6.10: Obrázok dosky spojov (strana BOTTOM) napájacieho zdroja mierka 1:1



Obr.6.11: Rozloženie súčiastok na doske napájacieho zdroja

### 6.3.2. Zoznam súčiastok napájacieho zdroja

Názov	Hodnota	Poznámka	Cena [ Kč ]
C1,C2,C5,C7	2200u	elyt radiálny	44
C3,C4,C6,C8,C10	100n	keramický	5
IC1	7815	TO220	7
IC2	7805	TO220	7
IC3	7915	TO220	7
B1	B250C1500F	250V/1A	5
F2	160mA	5x20mm	3
X1	ARK306 3P	svorkovnica	9
X2	ARK306 2P	svorkovnica	3
TR1	230V/2x15V	10VA	132
<b>Celková cena súčiastok</b>			<b>222</b>

Tab.6.3: Zoznam súčiastok napájacieho zdroja

## 6.4. KONŠTRUKČNÉ RIEŠENIE

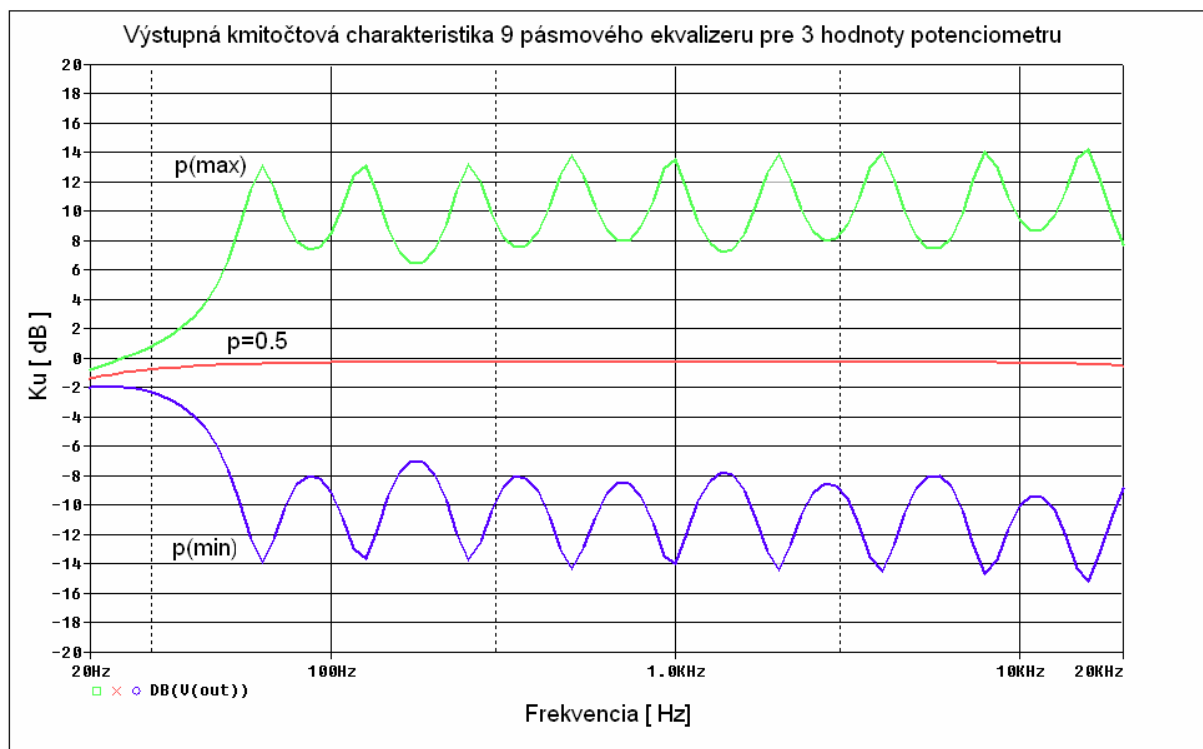
Po navrhnutí všetkých troch blokov (ekvalizér, indikátor vybudenia, napájací zdroj) v programe Eagle nasledovala ďalšia časť realizácie celého zariadenia. Všetky dosky plošných spojov som si dal vyrobiť na ústave Rádioelektroniky na 6. poschodí, číslo dverí 627. Po vyhotovení dosiek som ich musel vyvŕtať vŕtákmi v rozmedzí od 0,6-1,8 mm, podľa potreby vývodov súčiastok. Po vyvrtaní som ich natrel nepájivou maskou proti vzniku oxidácie. Pri spájkovaní som osádzal súčiastky od najmenších po najväčšie, aby nevznikli miesta s ťažko dostupnou manipuláciou menších súčiastok .Po spájkovaní všetkých súčiastok som sa mohol pustiť k oživeniu modulov. Všetky moduly fungovali hneď po prvom zapnutí. Výsledky merania sú zhrnuté v kapitole 7. Po oživení som umiestnil všetky tri moduly do

plechovej krabice z rozmermi 310x210x75 mm. Na čelnom paneli sa nachádza regulácia deviatych potenciometrov a na každom kraji je indikátor vybudenia. Na zadnom paneli sa nachádza poistka, napájacia šnúra na 230V, vstupné a výstupné konektory tzv.chince. Pre lepší odvod tepla som na oboch bokoch krabici vyvítal vetracie otvory. Krabica je nastriekaná bielou farbou.

## 7 VÝSLEDKY MERANIA

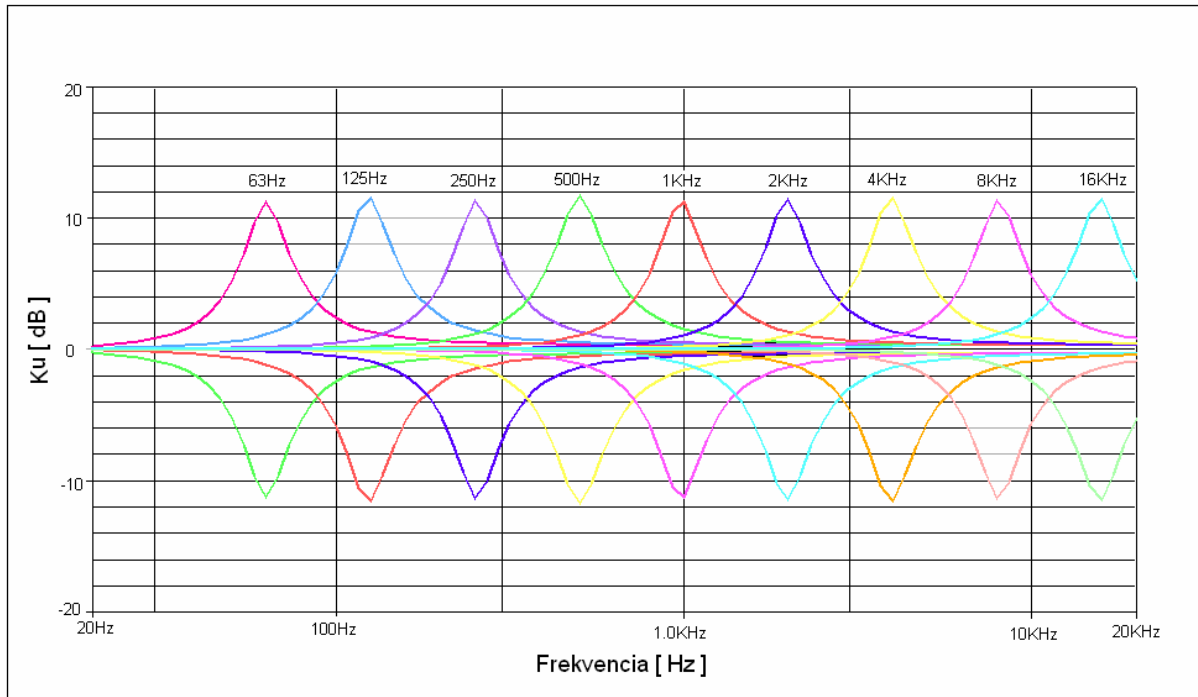
### 7.1. MERANIE EKVALIZÉRA POMOCOU PROGRAMU PSpICE

Ekvalizér som najprv odsimuloval v programe PSpice. Výsledná kmitočtová charakteristika pre tri polohy potenciometrov je uvedená na obr.7.1. Na obr.7.2 je kmitočtová charakteristika deväťpásmového ekvalizéra v pásme 20Hz-20kHz. Pomocou kurzorov v programe sme odčítali rezonančné kmitočty  $f_r$ , ktoré sú uvedené v tab. 7.1.



Obr.7.1: Výstupná kmitočtová charakteristika 9 pásmového ekvalizéra pre tri hodnoty nastavenia regulačných potenciometrov





Obr.7.2: Kmitočtová charakteristika 9 pásmového ekvalizéra v pásme 20Hz-20kHz

Požadovaný fr [Hz]:	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
Namerané v PSpice fr [Hz]	63,0	125,8	251,4	502,2	991,4	1992,1	3979,5	7902,7	15880,0

Tab.7.1: Namerané hodnoty rezonančných kmitočtov v programe PSpice pre 9 pásmový ekvalizér

## 7.2. MERANIE ZHOTOVENÉHO EKVALIZÉRA

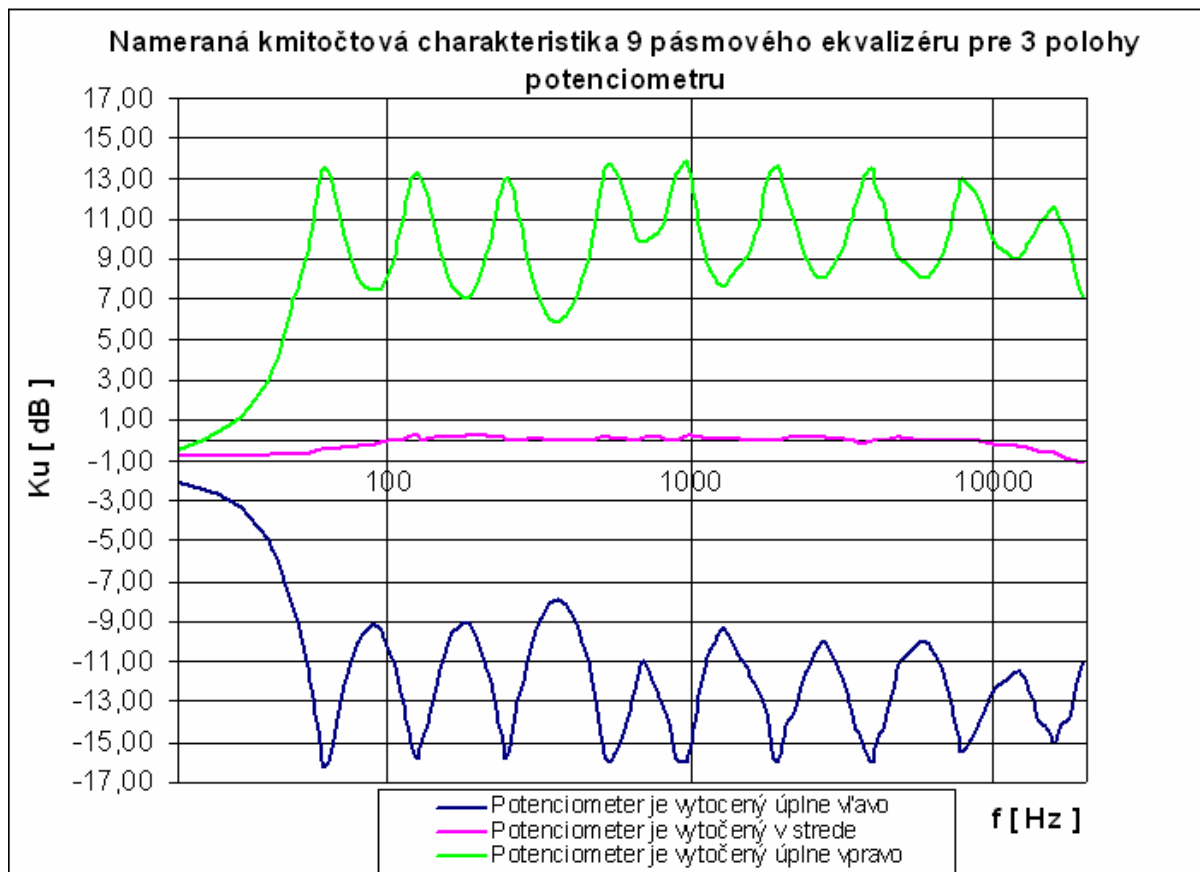
Zhotovený ekvalizér som zmeral s pomocou môjho konzultanta Ing. Jiří Petržela, Ph.D, ktorému ďakujem za pomoc. Oživenie prebiehalo bez problémov a zhotovený ekvalizér fungoval hneď na prvýkrát. Základ merania bolo zmerať modulovú kmitočtovú charakteristiku, ktorej tabuľka je uvedená tab.7.2. Namerané hodnoty sú vynesené v grafe obr.7.3.

Výsledky merania presluchu signálu medzi kanálmi je uvedený v tab.7.3. Prúdový odber je uvedený v tab.7.4. Zmerané rezonančné kmitočty deväťpásmového ekvalizéra sú uvedené v tab.7.5. Harmonické skreslenie oboch kanálov THD+N vyšlo 0,180 % pri frekvencii 1kHz a  $U_1=800\text{mV}$ .

f [ Hz ]	A1 [ dB ]	A2 [ dB ]	A3 [ dB ]
20	-2,00	-0,50	-0,80
30	-3,00	0,80	-0,80
40	-5,00	3,00	-0,70
50	-9,00	7,50	-0,65
55	-12,00	10,00	-0,60
60	-15,00	13,00	-0,40
62	-16,20	13,50	-0,40
70	-13,00	11,00	-0,30
80	-10,00	8,00	-0,25
90	-9,20	7,50	-0,12
100	-10,20	8,00	-0,05
110	-12,50	10,50	0,00
120	-15,00	13,00	0,20
126	-15,80	13,20	0,20
130	-15,00	13,00	0,00
140	-13,00	11,00	0,10
160	-10,00	8,00	0,10
180	-9,00	7,00	0,20
200	-10,20	8,00	0,30
220	-12,50	10,50	0,10
230	-14,00	12,00	0,20
240	-15,00	12,80	0,10
248	-15,80	13,00	0,00
260	-14,10	12,50	0,00
280	-12,00	10,00	0,00
300	-10,00	8,00	0,10
350	-8,00	6,00	-0,05
400	-8,50	6,50	-0,02
440	-10,00	8,00	0,00
470	-12,00	10,00	0,00
500	-14,00	12,00	0,10
542	-16,00	13,80	0,10
610	-14,00	12,00	0,05
670	-12,00	10,00	0,00
700	-11,00	9,80	0,10
800	-13,00	10,50	0,10
850	-14,00	12,00	0,00
900	-15,80	13,20	0,00
960	-16,00	13,90	0,20
1000	-15,00	13,00	0,20

f [ Hz ]	A1 [ dB ]	A2 [ dB ]	A3 [ dB ]
1100	-12,00	10,00	0,10
1200	-10,00	8,00	0,05
1300	-9,50	7,80	0,10
1600	-12,00	9,80	0,00
1800	-13,50	12,90	0,00
1900	-15,80	13,50	0,00
1950	-16,00	13,60	0,00
2100	-14,00	12,00	0,10
2200	-13,50	11,00	0,10
2500	-11,00	8,50	0,15
2800	-10,00	8,00	0,10
3200	-12,00	9,60	0,05
3500	-14,00	11,50	0,00
3700	-15,00	12,90	-0,10
4000	-16,00	13,50	-0,05
4100	-15,00	12,50	0,00
4400	-14,00	11,50	0,00
4800	-12,00	9,50	0,10
5000	-11,00	9,00	0,10
6000	-10,00	8,00	0,00
7000	-12,20	9,80	0,05
7500	-14,00	11,80	0,00
7800	-15,00	12,50	0,00
7940	-15,50	13,00	-0,05
9000	-14,00	12,00	-0,05
10000	-12,50	10,00	-0,10
12000	-11,50	9,00	-0,20
13000	-12,10	9,70	-0,30
14000	-13,80	10,50	-0,50
15000	-14,20	11,20	-0,55
16000	-15,00	11,50	-0,60
17000	-14,10	10,80	-0,80
18000	-13,80	9,70	-0,90
19000	-12,10	8,00	-1,00
20000	-11,00	7,00	-1,10

Tab.7.2: Tabuľka kmitočtových hodnôt pre tri rôzne hodnoty nastavenia potenciometrov



Obr.7.3: Graf kmitočtovo modulačnej charakteristiky pre tri polohy potencietrov ekvalizéra

f [ Hz ]	Ľavý kanál			Pravý kanál		
	U <sub>1L</sub> [ mV ]	U <sub>2L</sub> [ mV ]	presluch [ dB ]	U <sub>1P</sub> [ mV ]	U <sub>2P</sub> [ mV ]	presluch [ dB ]
100	775	3,1	-47,95	775	3,8	-46,19
1000	775	3	-48,24	775	3,8	-46,19
10000	775	4,1	-45,53	775	4	-45,74

Tab.7.3: Presluch signálu medzi ľavým a pravým kanálom

U <sub>cc+</sub> [ V ]	U <sub>cc-</sub> [ V ]	I <sub>cc+</sub> [ mA ]	I <sub>cc-</sub> [ mA ]
15	15	45,2	45,4

Tab.7.4: Prúdový odber ekvalizéra

Požadovaný fr [ Hz ]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
Zmeraný fr [ Hz ]	62	126	248	542	960	1950	4000	7940	16000

Tab.7.5: Zmerané rezonančné kmitočty deväťpásmového ekvalizéra

## 8 ZÁVER

Na záver tejto bakalárskej práce, by som rád zhodnotil dosiahnutie cieľa tejto práce, t.j. oboznámenie sa so zariadením audio signálu tzv. ekvalizérom a jeho následným návrhom a odsimulovaním v programe PSpice ako aj jeho výsledkami merania. Ako základné zapojenie pre návrh deväťpásmového ekvalizéra som použil sériové rezonančné obvody zapojené kaskádne (s neinvertujúcim zosilňovačom). Tento typ ekvalizéra má iba jeden regulovateľný parameter a to je miera korekcie (udáva maximálny a minimálny zdvih pásma pre určitý rezonančný kmitočet). Miera korekcie navrhnutého ekvalizéra je približne  $\pm 14$  dB. Tento údaj bol odčítaný pomocou programu PSpice a od požadovaného návrhu  $\pm 15$  dB sa líšil o 1 dB. Hodnoty rezonančných kmitočtov pre všetky pásma boli navrhnuté na 63 Hz, 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz, 8 kHz, 16 kHz.

V programe PSpice sa namerané rezonančné kmitočty líšili nepatrne od požadovaných kmitočtov a to len do šiesteho pásma. Od siedmeho pásma do deviateho pásma bola odchýlka maximálne 120 Hz. Program PSpice bol veľmi nápomocný pri testovaní ekvalizéra, ktorý je nevyhnutnou súčasťou nízko frekvenčných zariadení. Po odsimulovaní nasledovala realizácia ekvalizéra a jeho zmeranie. Modulovo kmitočtová charakteristika deväťpásmového ekvalizéra sa až tak nelíšila od odsimulovanej charakteristiky v programe PSpice. Jediný rozdiel bol vo veľkosti zosilnenia v polohe potenciometra vytočenej na maximum, pri tejto polohe malo zosilnenie približne pri všetkých rezonančných kmitočtoch +13 dB. To sa od požadovaného zosilnenia líšilo o 2 dB. V polohe potenciometra vytočeného na minime, malo zosilnenie približne pri všetkých rezonančných kmitočtoch -15,5 dB. To sa od požadovaného zosilnenia líšilo o 0,5 dB. Všetky tieto nepresnosti boli spôsobené hodnotami kondenzátorov, pretože vypočítané hodnoty sa nedajú jednoducho voliť z vyrábaných rádov a je nutné nájsť najbližšiu hodnotu, ktorá sa vyrába. Nepresné hodnoty súčiastok mali za následok menšiu odchýlku od presne požadovaných rezonančných kmitočtových hodnôt. Ale napriek tomu sa ekvalizér podarilo realizovať a jeho kmitočtové charakteristiky sa podobajú k charakteristikám uvedených v učebniciach. Ďalší parameter, ktorý sa meral bol presluch medzi kanálmi, ktorý u oboch kanáloch vyšiel okolo -50 dB pri celom kmitočtovom pásme. V knihách uvádzajú, že pri signáli 1000 Hz musí byť na výstupe najmenej o 50 dB menšia úroveň. Táto požiadavka bola splnená. Harmonické skreslenie ekvalizéra bolo 0,180%, čo nie je až také veľké, aby ho dokázalo ľudské ucho zaznamenať. Toto skreslenie bolo merané pri frekvencii 1 kHz a pri vyváženej kmitočtovej charakteristike. Preto z toho dôvodu môže skreslenie kolísať pri iných frekvenciách aj pri zvlnenej kmitočtovej charakteristike. Táto bakalárska práca mi dala väčší obzor v oblasti zariadení na úpravu kmitočtových charakteristík.

## 9 POUŽITÁ LITERATÚRA

- [1] HÁJEK, K., SEDLÁČEK, J. *Kmitočtové filtry*. Praha: BEN - technická literatúra, 2002, 535 s. ISBN 80-7300-023-7
- [2] PUNČOCHÁR, J. *Operační zesilovače v elektronice*. Praha: BEN – technická literatúra, 1996, 479s. ISBN 80-901984-3-0
- [3] DOSTÁL, T., AXMAN, V. *Elektrické filtry*. Elektronické skriptum. Brno: FEKT VUT v Brne, 2007.
- [4] NOVOTNÝ, V. *Nízkofrekvenční elektronika*. Elektronické skriptum. Brno: FEKT VUT v Brne, 2002.
- [5] Amatérské Rádio. *Devítipásmový ekvalizér*. Ročník V/2000. Číslo 2. str. 10
- [6] Amatérské Rádio. *Zapojení s operačními zesilovači*. Ročník I/1996. Číslo 3.
- [7] [www.zesilovace.cz/view.php?cislocclanku=2002121603](http://www.zesilovace.cz/view.php?cislocclanku=2002121603)
- [8] [http://electriccore.webovastranka.sk/forum/399/267\\_Výhybky](http://electriccore.webovastranka.sk/forum/399/267_Výhybky)
- [9] WIKIPEDIE. *Ekvalizér*. [online] Dostupný: <http://cs.wikipedia.org/wiki/ekvalizér>
- [10] Ing. Alexander Žatkovič. *Frekvenčné korektory*. [online] Dostupný: [http://alzat.szm.sk/selektory/frekvenc/frek\\_sel.htm](http://alzat.szm.sk/selektory/frekvenc/frek_sel.htm)

## 10 ZOZNAM SKRATIEK

DP	filter typu dolná priepusť
HP	filter typu horná priepusť
PP	filter typu pásmová priepusť
PZ	filter typu pásmová zádrž
RC	pasívny filter (obsahuje jeden akumuláčny prvok)
RLC	pasívny filter (obsahuje dva akumuláčny prvky)
Q	činiteľ akosti
EQ	ekvalizér
L	induktor (cievka)
C	kapacitor (kondenzátor)
R	rezistor
$F_M$	medzný kmitočet
OZ	operačný zosilňovač
DPS	doska plošného spoja
fr	rezonančný kmitočet

## 11 ZOZNAM GRAFOV

OBR.2.1 PRINCIPIÁLNA ÚLOHA FILTRU .....	2
OBR.2.2 IDEÁLNA MODULOVÁ CHARAKTERISTIKA FILTRA DOLNÁ PRIEPUST (DP).....	3
OBR.2.3 ZAPOJENIE DP 1.STUPŇA.....	4
OBR.2.4 MODULOVÁ CHARAKTERISTIKA REÁLNEHO FILTRU TYPU DP.1 STUPŇA $R=1K\Omega$ A $C=10NF$ .....	4
OBR.2.5 IDEÁLNA MODULOVÁ CHARAKTERISTIKA FILTRA HORNÁ PRIEPUŠŤ (HP) .....	5
OBR.2.6 ZAPOJENIE HP 1.STUPŇA.....	5
OBR.2.7 MODULOVÁ CHARAKTERISTIKA REÁLNEHO FILTRU TYPU HP.1 STUPŇA $R=1K\Omega$ A $C=10NF$ .....	6
OBR.2.8 IDEÁLNA MODULOVÁ CHARAKTERISTIKA FILTRA PÁSMOVEJ PRIEPUSTI (PP) .....	6
OBR.2.9 ZAPOJENIE PP 2. STUPŇA.....	7
OBR.2.10 MODULOVÁ CHARAKTERISTIKA PÁSMOVEJ PRIEPUSTI (PP) 2. STUPŇA .....	7
OBR.2.11 IDEÁLNA MODULOVÁ CHARAKTERISTIKA FILTRA PÁSMOVEJ ZÁDRŽE (PZ) .....	8
OBR.2.12 ZAPOJENIE PZ 2.STUPŇA .....	8
OBR.2.13 MODULOVÁ CHARAKTERISTIKA PÁSMOVEJ ZÁDRŽE (PZ) 2.STUPŇA .....	8
OBR.3.1 ZAPOJENIE KOREKTORA V OBVODE PASÍVNE (A) A AKTÍVNE (B).....	9
OBR.3.2 PASÍVNY KOREKTOR HLĎOK.....	10
OBR.3.3 IDEÁLNA MODULOVÁ CHARAKTERISTIKA PASÍVNEHO KOREKTORU HLĎOK.....	11
OBR.3.4 PASÍVNY KOREKTOR VÝŠOK.....	11
OBR.3.5 IDEÁLNA MODULOVÁ CHARAKTERISTIKA PASÍVNEHO KOREKTORU VÝŠOK.....	12
OBR.4.1 PASÍVNA VÝHYBKA V ELEKTROAKUSTIKE.....	13
OBR.4.2 AKTÍVNA VÝHYBKA V ELEKTROAKUSTIKE.....	13
OBR.4.3 ROZDELENIE KMITOČTOVÝCH PÁSIEM PRE 3 PÁSMOVÚ VÝHYBKU .....	14
OBR.4.4 DOLNÁ PRIEPUŠŤ 6DB/OKT. ....	14
OBR.4.5 HORNÁ PRIEPUŠŤ 6DB/OKT. ....	15
OBR.4.6 PÁSMOVÁ PRIEPUŠŤ 6DB/OKT.....	15
OBR.5.1 PRINCIPIÁLNE ZAPOJENIE PRE VIAC PÁSIEM SO SÉRIOVÝMI REZONANČNÝMI OBVODMI .....	17
OBR.5.2 MODEL Y PRE MAXIMÁLNY A MINIMÁLNY PRENOS .....	18
OBR.5.3 NÁHRADA RLC SÉRIOVÉHO OBVODU POMOCOU SYNTETICKEJ INDUKČNOSTI .....	20
OBR.6.1 SCHÉMA ZAPOJENIA EKVALIZÉRA PRE JEDEN KANÁL .....	22
OBR.6.2 WIENOV ČLÁNOK.....	23
OBR.6.3 STRANA BOTTOM	
OBR.6.4 STRANA TOP.....	24
OBR.6.5 ROZLOŽENIE SÚČIASTOK NA EKVALIZÉRI. ....	25
OBR.6.6 SCHÉMA ZAPOJENIA MONO VERZIE INDIKÁTORU VYBUDENIA.....	27
OBR.6.7 OBRAZEC DOSKY SPOJOV ( STRANA BOTTOM) INDIKÁTORA VYBUDENIA MIERKA1:1	28
OBR.6.8 ROZLOŽENIE SÚČIASTOK NA DOSKE INDIKÁTORA VYBUDENIA.....	28
OBR.6.9 SCHÉMA ZAPOJENIA NAPÁJACIEHO ZDROJA.....	30
OBR.6.10 OBRÁZOK DOSKY SPOJOV ( STRANA BOTTOM) NAPÁJACIEHO ZDROJA MIERKA1:1 ..	30

OBR.6.11 ROZLOŽENIE SÚČIASTOK NA DOSKE NAPÁJACIEHO ZDROJA .....	31
OBR.7.3 GRAF KMITOČTOVO MODULAČNEJ CHARAKTERISTIKY PRE TRI POLOHY POTENCIOMETROV EKVALIZÉRA .....	35

## 12 ZOZNAM TABULIEK

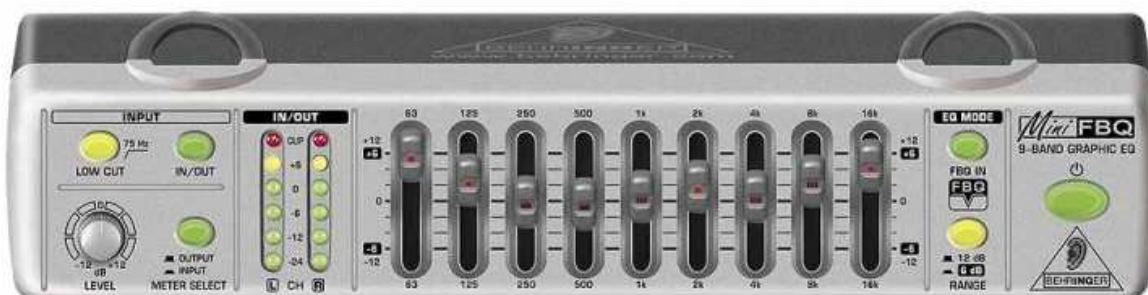
TAB.5.1 KOREKČNÉ KMITOČTY GRAFICKÝCH EKVALIZÉROV (VŠETKY UVEDENÉ HODNOTY V [HZ]) .....	16
TAB.5.2 VYPOČÍTANÉ HODNOTY PRE SÉRIOVÝ REZONANČNÝ OBVOD $F_R=63$ HZ .....	20
TAB.5.3 TABUĽKA VYPOČÍTANÝCH HODNÔT PRE VŠETKY REZONANČNÉ KMITOČTY .....	21
TAB.5.4 TABUĽKA VYPOČÍTANÝCH REZONANČNÝCH KMITOČTOV PODĽA DOSTUPNÝCH HODNÔT SÚČIASTOK .....	21
TAB.6.1 ZOZNAM SÚČIASTOK EKVALIZÉRA PRE 9 PÁSMOVÝ EKVALIZÉR. ....	26
TAB.6.2 ZOZNAM SÚČIASTOK INDIKÁTORA VYBUDENIA .....	29
TAB.6.3 ZOZNAM SÚČIASTOK NAPÁJACIEHO ZDROJA .....	31
TAB.7.1 NAMERANÉ HODNOTY REZONANČNÝCH KMITOČTOV V PROGRAME PSPICE PRE 9 PÁSMOVÝ EKVALIZÉR .....	33
TAB.7.2 TABUĽKA KMITOČTOVÝCH HODNÔT PRE TRI RÔZNE HODNOTY NASTAVENIA POTENCIOMETROV .....	34
TAB.7.3 PRESLUCH SIGNÁLU MEDZI ĽAVÝM A PRAVÝM KANÁLOM .....	35
TAB.7.4 PRÚDOVÝ ODBER EKVALIZÉRA .....	35
TAB.7.5 ZMERANÉ REZONANČNÉ KMITOČTY DEVÄTPÁSMOVÉHO EKVALIZÉRA .....	35

## 13 ZOZNAM PRÍLOH

PRÍLOHA Č.1 UKÁŽKY GRAFICKÝCH EKVALIZÉROV .....	40
-------------------------------------------------	----

Príloha č. 1:

UKÁŽKY GRAFICKÝCH EKVALIZÉROV



a) Behringer FBQ 800, 9 - pásmový grafický ekvalizér



b) Ultragraph pro FBQ 3102, 31-pásmový grafický ekvalizér