



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

EKVALIZÉR S KOREKČÍ HLASITOSTI PRO LABORATORNÍ VÝUKU

EQUALIZER WITH LOUDNESS REGULATION FOR LABORATORY MEASUREMENTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Karkoška

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.

BRNO 2017

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Elektronika a sdělovací technika**
Ústav radioelektroniky

Student: Jan Karkoška

ID: 164743

Ročník: 3

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Ekvalizér s korekcí hlasitosti pro laboratorní výuku

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

V teoretické části práce navrhnete blokovou a obvodovou strukturu vícepásmového ekvalizéru, který by současně obsahoval fyziologickou korekci hlasitosti a který by byl využitelný v laboratorní výuce předmětu Nízkofrekvenční a audio elektronika. Měření ekvalizéru by mělo demonstrovat vliv volby zdůraznění nebo potlačení jednotlivých frekvenčních pásem na výslednou přenosovou charakteristiku. Při návrhu zohledněte nejmodernější součástkovou základnu.

V praktické části práce vytvořte kompletní konstrukční podklady k realizaci návrhu (schéma zapojení, návrh desky plošného spoje, rozložení a soupiska součástek, atd.). Navržený ekvalizér realizujte formou funkčního prototypu a experimentálním měřením v laboratoři nízkofrekvenční elektroniky ověřte jeho činnost. Výsledky měření zpracujte formou standardního protokolu a vytvořte kompletní podklady pro laboratorní úlohu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] WIRSUM, S. Abeceda nf techniky. Praha: BEN – technická literatura, 2003.

[2] KOTISA, Z. NF zesilovače – 1. díl Předzesilovače. BEN – technická literatura, Praha, 2001.

[3] METZLER, B. Audio Measurement Handbook. Beaverton, Audio Presision, Inc., 1993.

Termín zadání: 6. 2. 2017

Termín odevzdání: 30.5.2017

Vedoucí práce: prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.

Konzultant:



[Signature]
prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.
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 části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem a konstrukcí ekvalizéru s korekcí hlasitosti pro laboratorní výuku a simulací jednotlivých částí v programu LTspice. Pro návrh bylo použito pásmových korektorů se sériovými rezonančními obvody. Všechny pásma jsou naladěná na mezní frekvenci f_0 s mírou korekce ± 12 dB. Součástí práce je blokové schéma, podrobný návrh ekvalizéru, schéma zapojení ekvalizéru s fyziologickou regulací a návrh plošného spoje.

KLÍČOVÁ SLOVA

Grafický ekvalizér, frekvenční korekce, kmitočtové filtry, fyziologická regulace hlasitosti, operační zesilovač, laboratorní přípravek

ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with a draft and construction of the design of equalizer with loudness regulation for laboratory measurements lessons and also simulation of individual parts in the program LTspice. For design was used bandpass correction with series resonance circuits. All bands are tuned to a frequency f_0 with a degree of ± 12 dB. Thesis includes block diagram, design of equalizer in detail, scheme of equalizer with physiological regulation and the design of printed circuit boards.

KEYWORDS

Graphic equalizer, frequency correction, frequency filters, loudness volume control, operational amplifier, laboratory preparation

KARKOŠKA, J. Ekvalizér s korekcí hlasitosti pro laboratorní výuku. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2017. 43 s., 8 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci na téma Ekvalizér s korekcí hlasitosti pro laboratorní výuku jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené 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/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

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

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ	VI
SEZNAM TABULEK	VII
ÚVOD	1
1 ZÁKLADNÍ FILTRAČNÍ OBVODY	2
1.1 Rozdělení filtrů	2
1.2 Použití v různých oblastech	2
1.3 Rozdělení filtrů podle způsobu realizace	3
2 PŘEDZESILOVAČE	3
2.1 Korekční předzesilovač	3
2.2 Ekvalizér	3
2.2.1 Grafický ekvalizér	4
2.2.2 Parametrický ekvalizér	4
2.3 Šířka pásma a činitel jakosti Q	5
3 DEVÍTIPÁSMOVÝ EKVALIZÉR	6
3.1 Blokové schéma	6
3.2 Popis zapojení filtru	7
3.3 Návrh	9
3.4 Schéma zapojení	12
3.4.1 Napájení ekvalizéru	12
3.4.2 Pásmová propust	13
3.4.3 Regulátor hlasitosti	13
3.5 Návrh desky plošných spojů	14
4 SIMULACE	15
4.1 Potenciometry ve střední poloze, přenos 0 dB	15
4.2 Parametrické rozmítání pro všechna pásma	16
4.3 Parametrické rozmítání pásma 1 kHz	17

5	MĚŘENÍ LAB. PŘÍPRAVKU	18
5.1	Laboratorní úloha - podklady	26
6	ZÁVĚR	34
	LITERATURA	35
	SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK	36
A	PŘÍLOHA - OSTATNÍ SIMULACE	37
B	PŘÍLOHA – NÁVRH EKVALIZÉRU	38
B.1	Schéma zapojení ekvalizéru	38
B.2	Deska plošných spojů ekvalizéru	39
B.3	Osazovací plán ekvalizéru	40
C	PŘÍLOHA - SEZNAM SOUČÁSTEK	41
D	PŘÍLOHA - KONSTRUKCE EKVALIZÉRU	43
D.1	Konstrukce desky plošných spojů	43
D.2	Devítipásmový ekvalizér - zepředu.....	43
D.3	Devítipásmový ekvalizér - zezadu	44

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 3.1	Blokové schéma ekvalizéru	6
Obrázek 3.2	Sériový rezonanční obvod RLC	7
Obrázek 3.3	Pásmový filtr s RLC obvodem	7
Obrázek 3.4	Náhrada rezonančního obvodu RLC za syntetickou indukčnost	8
Obrázek 3.5	Modely pro minimální a maximální přenos	9
Obrázek 3.6	Wienův člunek	13
Obrázek 3.7	Fyziologický regulátor hlasitosti	14
Obrázek 4.1	Simulace ekvalizéru, přenos roven 0 dB	15
Obrázek 4.2	Simulace ekvalizéru, rozmítání všech devíti pásem	16
Obrázek 4.3	Simulace ekvalizéru, zdůraznění všech devíti pásem	16
Obrázek 4.4	Simulace ekvalizéru, potlačení všech devíti pásem	17
Obrázek 4.5	Simulace ekvalizéru, rozmítání pásma 1 kHz	17
Obrázek 5.1	Hlasitost laboratorního přípravku na minimum	18
Obrázek 5.2	Hlasitost laboratorního přípravku na maximum	18
Obrázek 5.3	Pohled na výst. napětí z osciloskopu ($V_{PP} = 4,16V \approx V_{RMS} = 1,5V$)	18

SEZNAM TABULEK

Tabulka 2.1	Korekční kmitočty grafických ekvalizérů (hodnoty v [Hz])	4
Tabulka 3.1	Výpočty mezních frekvencí	11

ÚVOD

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem a konstrukcí korekčního předzesilovače pro laboratorní výuku do předmětu BNFE - nízkofrekvenční a audio elektronika. Korekční předzesilovač je vybaven na vstupu Wienovým článkem, který má mezní kmitočet $f_{01} = 160 \text{ kHz}$ a $f_{02} = 4 \text{ Hz}$. Dále je zapojen regulátor hlasitosti, u kterého se podle potřeby dá zapnout nebo vypnout fyziologická regulace s logaritmickým potenciometrem s jednou odbočkou. Samotné pásmové propusti a pásmové zádrže jsou realizovány sériovými rezonančními obvody RLC, které jsou řazeny paralelně vedle sebe. Regulace je realizována pomocí lineárních potenciometrů od 12 dB do -12 dB. Dalším bodem návrhu bylo, s využitím programu LTspice, odsimulovat funkčnost regulace jednotlivých pásem.

V první teoretické kapitole bude okrajově popsáno rozdělení základních filtrů, použití filtrů v různých oblastech elektrotechniky a rozdělení filtrů podle způsobu realizace.

Další kapitola se bude dělit na korekční předzesilovače, grafické a parametrické ekvalizéry.

Třetí kapitola bude obsahovat náš konkrétní devítipásmový ekvalizér. Je tu popsána bloková struktura devítipásmového ekvalizéru, popis našeho použitého pásmového filtru (tímto filtrem je sériový rezonanční obvod RLC), podrobný návrh celého ekvalizéru, schéma zapojení s jednotlivými popsánymi bloky a návrh desky plošných spojů.

V předposlední části bakalářské práce budou vloženy a popsány jednotlivé simulace (potenciometry ve střední poloze, parametrické rozmítání všech pásem a rozmítání pásma 1 kHz).

Poslední část je věnována měření zkonstruovaného devítipásmového ekvalizéru a zhotovení laboratorní úlohy.

1 ZÁKLADNÍ FILTRAČNÍ OBVODY

Kmitočtové filtry jsou většinou lineární dvojbrany, které propustí harmonické složky spektra v určitém pásmu frekvencí, pak je to propustné pásmo. V nepropustném pásmu jsou tyto složky potlačovány. Pro vyjádření těchto vlastností se používá modulová kmitočtová charakteristika.

1.1 Rozdělení filtrů

Rozdělení filtrů [1] dle nejdůležitějšího dělení je dle přenášeného kmitočtového spektra:

- dolní propust (DP)
- horní propust (HP)
- pásmová propust (PP)
- pásmová zadrž (PZ)

a také dle použitých prvků:

- pasivní filtry RC
- pasivní filtry LC
- aktivní filtry RC
- filtry se syntetickými prvky
- a další

1.2 Použití v různých oblastech

Filtry se používají hlavně pro zpracování signálů v několika oblastech. V měřicí technice, elektroakustice, radiotechnice (telekomunikace), v regulační technice a v dalších [1].

V **radiotechnice** se používá pásmová propust k výběru přijímaného signálu (vstupní obvody přijímačů, mezifrekvenční filtry), dolní a horní propust v anténních obvodech a předzesilovačích, pásmová zadrž na potlačení rušivých signálů.

V **elektroakustice** se využívá korekčních filtrů (přeladitelné korektory hloubek, výšek, pásmové korektory, výhybky pro reproduktorové soustavy) a některé typy filtrů na omezení šumu (Dolby atd.).

Filtry se používají také v **měřicí technice**, abychom mohli měřit jen daná kmitočtová pásma, hlavně u selektivního měření (měření různých zkreslení a vysokofrekvenčních měření).

1.3 Rozdělení filtrů podle způsobu realizace

Realizace pomocí [1]:

- diskrétních prvků – lze si filtr jednoduše navrhnout podle svých požadavků pomocí odporů, kondenzátorů, cívek, operačních zesilovačů a dalších
- integrovaného bloku – toto řešení je obvykle menší, levnější a propracovanější (bohužel filtr nelze navrhnout přesně podle svých požadavků, musí se dodržet podmínky dle výrobce)
- číslicového filtru – zpracování signálu probíhá prostřednictvím číslicových zařízení (převodníky D/A a A/D, počítače, signálové procesory, vhodné programy)

Z tohoto rozdělení vyplývá, že pro každý typ filtru bude zapotřebí jiné realizace. Máme-li zpracovávat číslicový signál v daném úkolu a máme k dispozici dostatek výpočetního výkonu, zvolíme číslicovou realizaci. Naopak když budeme chtít zpracovávat vysoké kmitočty, slabé a zarušené signály, použijeme realizaci integrovaného bloku. Kdybychom chtěli filtr speciálního druhu, museli bychom sáhnout po realizaci z diskrétních prvků a takový filtr si sami navrhnout a vyrobit.

2 PŘEDZESILOVAČE

Předzesilovače se dělí na korekční předzesilovače a ekvalizéry [2].

2.1 Korekční předzesilovač

Korekční předzesilovače slouží na ovládání zesilovače, tj. regulaci hlasitosti, výšek, hloubek a také třeba na stereofonní vyvážení kanálů (balance).

Speciální druh korekčního předzesilovače je např. předzesilovač RIAA pro gramofony nebo magnetofony [2].

2.2 Ekvalizér

Ekvalizér se používá na nastavení frekvenční charakteristiky, na redukci akustických zpětných vazeb, ke zlepšení srozumitelnosti řeči a na úpravu zvuků živých nástrojů. Ekvalizéry vznikly proto, aby nastavením úrovně jednotlivých frekvencí byl poslech co nejpříjemnější. [3]

Ekvalizéry se dělí na grafické a parametrické [1].

2.2.1 Grafický ekvalizér

Grafický se nazývá proto, že je nejčastěji osazený tahovými potenciometry. Tyto tahové potenciometry bývají umístěny vedle sebe a jejich poloha určuje body grafu frekvenční charakteristiky. Maximální míra korekce se nejčastěji používá ± 12 dB nebo ± 15 dB.

Jednotlivé kmitočtové korekce, které můžeme vidět v tabulce 1 [1], se volí z násobků oktáv (dvojnásobných kmitočtů). Typickým počtem na kmitočtu 20 Hz až 20 kHz je tedy 10, 15 a 31 pásem.

Tabulka 2.1 Korekční kmitočty grafických ekvalizérů (hodnoty v [Hz])

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			

2.2.2 Parametrický ekvalizér

Parametrický ekvalizér je podstatně složitější při realizaci a nastavování. Používá se hlavně pro profesionální účely, kde nestačí jen regulovat přenos a pevně zadaný kmitočet jako u grafického ekvalizéru. Tento ekvalizér umožňuje nastavit hned několik parametrů:

- přenos – nastavuje se zesílení nebo potlačení daného pásma
- rezonanční či mezní kmitočet
- šířku pásma – nastavuje se hodnota činitele jakosti Q (při vysokém Q má výsledný přenos velké zvlnění, při nízkém Q zase dochází k ovlivnění přenosu sousedních pásem)

2.3 Šířka pásma a činitel jakosti Q

Činitel jakosti obvodu Q je jen u přenosových funkcí řádu $n > 1$. Velikost jakosti nám určuje strmost přechodu modulové charakteristiky z propustného do nepropustného pásma. Jakost u pásmové zadržky a pásmové propusti má vliv na šířku propustného pásma.

Šířka pásma je dána rozdílem frekvencí f_1 a f_2 vyskytujících se kolem střední frekvence f_0 , při poklesu o 3 dB oproti f_0 . Šířka pásma B souvisí s činitelem jakosti Q filtru. Vztah pro výpočet (2.1) [1].

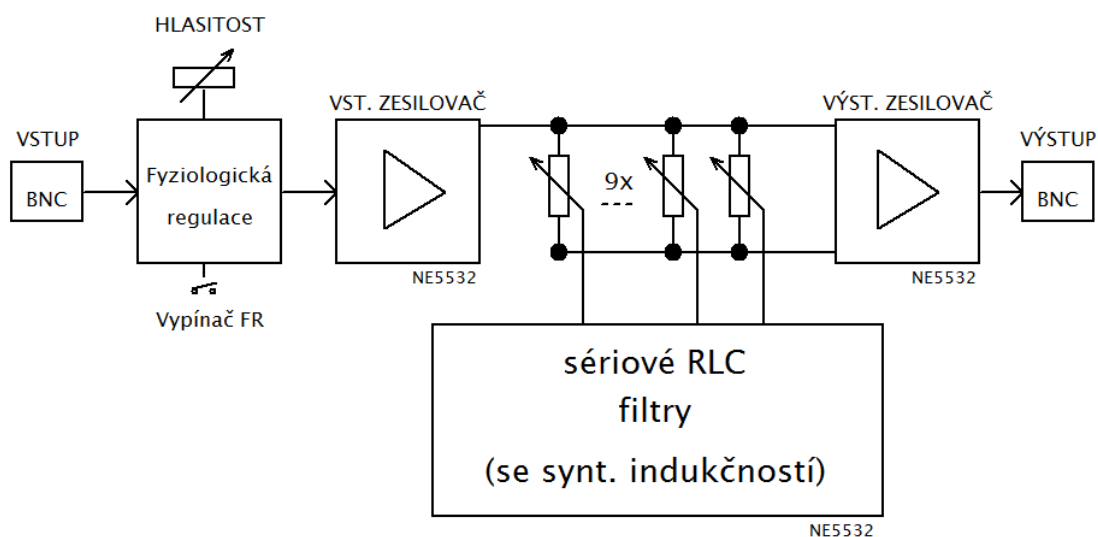
$$Q = \frac{f_0}{B} [-], \quad (2.1)$$

kde činitel jakosti Q je definován jako střední frekvence f_0 děleno šířkou pásma B.

3 DEVÍTIPÁSMOVÝ EKVALIZÉR

3.1 Blokové schéma

Blokové schéma obrázek 3.1 popisuje celkové zapojení ekvalizéru. Přípravek je na vstupu a výstupu vybaven BNC konektory, které se dají spolehlivě připojit a odpojit. Další část je věnována bloku s regulací hlasitosti. Tato regulace je vybavena fyziologickou regulací hlasitosti s potenciometrem s odbočkou a také vypínačem pro zapnutí a vypnutí fyziologie. Dalším blokem je vstupní zesilovač s duálním operačním zesilovačem NE5532. Dále jsou zapojeny samotné sériové rezonanční RLC obvody, které obsahují, místo nepraktické cívky, syntetickou indukčnost zapojenou s operačním zesilovačem. Dalším blokem je výstupní zesilovač s operačním zesilovačem, který má za úkol sčítat všechny vlivy rezonančních obvodů. Z výstupního BNC konektoru tedy dostáváme signál s různým kmitočtem a podle polohy jednotlivých potenciometrů také signál s různým zesílením.

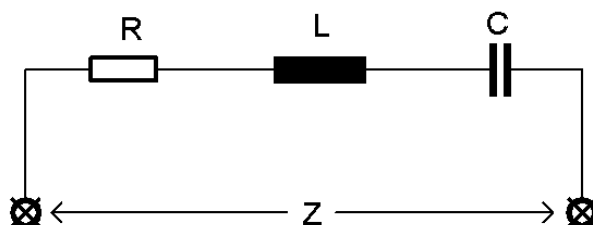


Obrázek 3.1 Blokové schéma ekvalizéru

3.2 Popis zapojení filtru

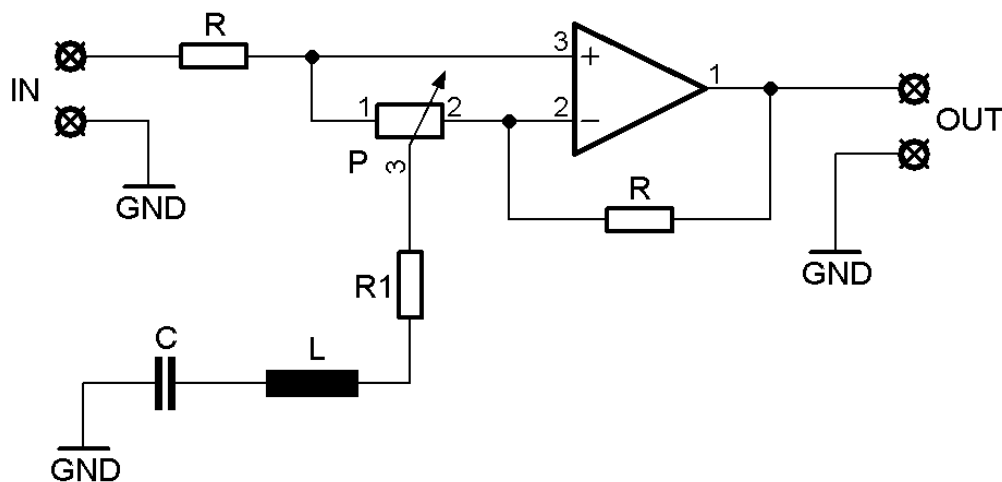
Jak už název napovídá, bylo použito devět sériových rezonančních obvodů RLC řazené paralelně. Jednotlivé rezonanční obvody byly naladěny na mezní frekvenci f_0 a to (63 Hz, 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz, 8 kHz a 16 kHz).

Schéma sériového rezonančního obvodu RLC je na obrázku 3.2.



Obrázek 3.2 Sériový rezonanční obvod RLC

Filtr se sériovým rezonančním obvodem je na obrázku 3.3 [1].



Obrázek 3.3 Pásmový filtr s RLC obvodem

Protože cívky L jsou drahé a nepraktické (rušivá napětí a konstrukce), je v zapojení použita syntetická indukce (gyrátor), můžeme tak vytvořit vysoké hodnoty indukčnosti. Gyrátor je obvod, který transformuje jednu impedanci v jinou a je realizován pomocí operačního zesilovače a příslušných součástek. Toto zapojení má jednu výhodu. Má menší sériový odpor a induktor se může použít tam, kde je požadavek na dosažení většího činitele jakosti Q .

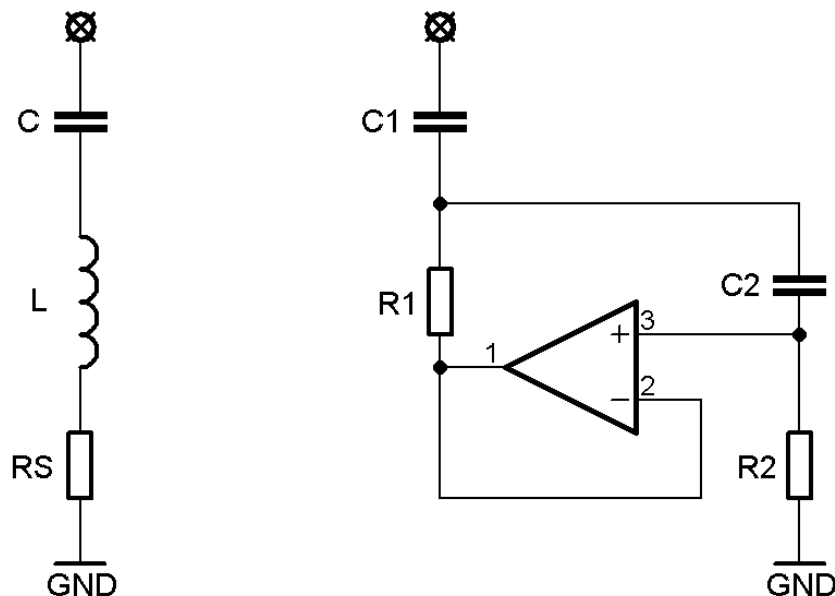
Aby se nezhoršily vlastnosti zapojení, je potřeba dodržet podmínku (uvedena v [4]), aby rezistor R_2 byl mnohem větší než R_1 ($R_2 \gg R_1$). Náhrada cívky L za syntetický induktor v rezonančním obvodu RLC je na obrázku 3.4 [4].

Pro naše zapojení platí podmínka a vztahy [4]:

$$L = R_1 \cdot R_2 \cdot C_2 \quad \text{pro} \quad R_2 \gg R_1$$

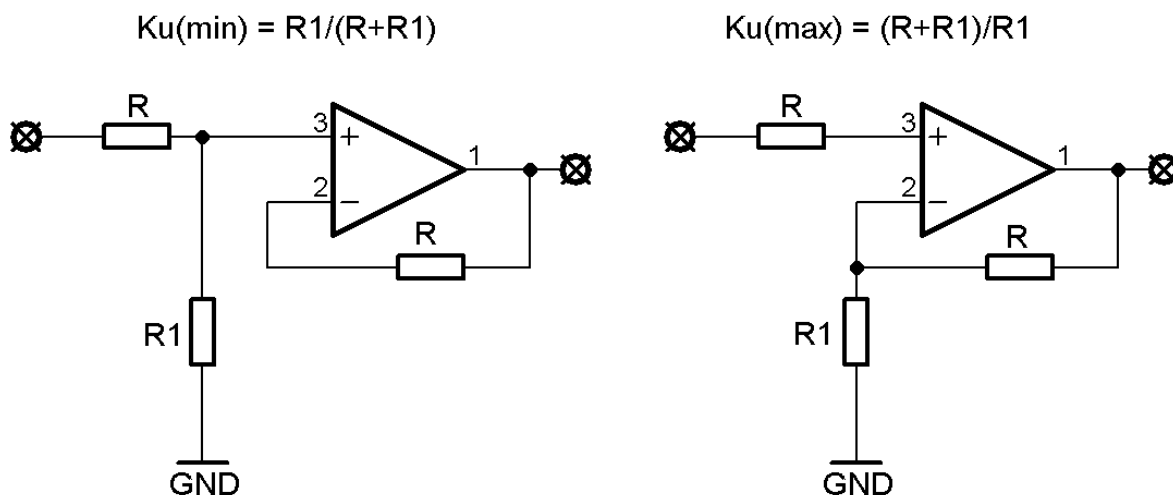
$$C = C_1$$

$$R_s = R_1$$



Obrázek 3.4 Náhrada rezonančního obvodu RLC za syntetickou indukčnost

Když bude jezdec vytočený doleva ke vstupnímu rezistoru R , bude zesílení $R_1/(R+R_1)$ obrázek 3.5 vlevo, teda menší jak 1 a obvod bude signál zeslabovat. Bude-li to naopak, jezdec vytočený doprava k rezistoru R , tak bude zesílení $(R+R_1)/R_1$ obrázek 3.5 vpravo, teda větší jak 1 a bude zesilovat. Z toho plyne, že nastavením potenciometru doleva nebo doprava získáváme pásmovou zadrž nebo pásmovou propust. Ve střední poloze potenciometru je přenos jednotkový a frekvenčně nezávislý [1].



Obrázek 3.5 Modely pro minimální a maximální přenos

3.3 Návrh

V prvním kroku bylo zvoleno devět pásem pro náš devítipásmový ekvalizér. Bylo použito standardní oktávové frekvenční spektrum.

63 Hz, 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz, 8 kHz a 16 kHz

- 1) V druhém kroku byla zvolena nejčastější míra korekce a to je ± 15 dB.
- 2) Poté byla zvolena hodnota odporu R . Tato hodnota bývá okolo $10 \text{ k}\Omega$. Pro naše účely jsme vybrali $R = 8,2 \text{ k}\Omega$ [1].

- 3) Vypočítáme odpor R_1 , což je sériový odpor. Vzorce máme na obrázku 5. A protože přenos je v dB, tak ho musíme přepočítat.

$$K_{dB} = +15 \text{ dB} \quad (3.1)$$

$$K_{dB} = 20 \log K_u \rightarrow K_u = 10^{\frac{K_{dB}}{20}} = 5,623 \quad (3.2)$$

Hodnota odporu R_1 podle výpočtu 3.3 bude mít hodnotu 1.8 k Ω a víme, že odpor $R_S = R_1$. Tato hodnota bude pro všechny rezonanční obvody stejná.

$$K_{Umax} = \frac{R+R_1}{R_1} \rightarrow R_1 = \frac{R}{(K_{Umax}-1)} = \frac{8200}{5,623-1} = 1773,8 \Omega \rightarrow 1800 \Omega \quad (3.3)$$

- 4) Vypočítáme hodnotu kondenzátoru C z obrázku 4. Výpočet provedeme pomocí vztahu činitele jakosti Q.

$$Q = \frac{1}{\omega_0 \cdot R_1 \cdot C_1} [-] \quad (3.4)$$

Tento ekvalizér má devět pásem, zvolili jsme $Q = 4$ [1].

$$C_1 = \frac{1}{Q \cdot \omega_0 \cdot R_1} = \frac{1}{Q \cdot 2\pi \cdot f_1 \cdot R_1} = \frac{1}{4 \cdot 2\pi \cdot 63 \cdot 1800} = 350,8 \text{ nF} \rightarrow 330 \text{ nF} \quad (3.5)$$

- 5) Vypočítáme hodnotu cívky L z obrázku 4. Pro výpočet použijeme vztah (3.6) a vyjádříme si hodnotu cívky L.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C_1}} [\text{Hz}] \quad (3.6)$$

$$L = \frac{1}{4\pi^2 \cdot C_1 \cdot f_0^2} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot 350 \cdot 10^{-9} \cdot 63^2} = 19,33 \text{ H} \quad (3.7)$$

Cívku nahradíme již zmíněným gyrátorem v zapojení s OZ obrázek 4 [4]

Návrh gyrátoru (syntetické indukčnosti).

$$L = R_1 \cdot R_2 \cdot C_2 \quad [\text{H}] \quad (3.8)$$

Z podmínky $R_1 \ll R_2$ si zvolíme $R_2 = 180 \text{ k}\Omega$. Zbývá nám dopočítat kondenzátor C_2 .

$$C_2 = \frac{L}{R_1 \cdot R_2} = \frac{19,33}{1800 \cdot 180 \cdot 10^3} = 59,6 \text{ nF} \rightarrow 56 \text{ nF} \quad (3.9)$$

Pro ostatní rezonanční kmitočty postupujeme zcela stejně od bodu číslo 5. Výpočty z prvních čtyř bodů zůstávají pro všechna rezonanční pásma stejná. Všechny výpočty ostatních mezních frekvencí jsou v tabulce 2.

Tabulka 3.1 Výpočty mezních frekvencí

f_0 [Hz]	Q [-]	R_1 [k Ω]	R_2 [k Ω]	C_1 [nF]	C_2 [nF]	L [H]	$f_{\text{vypoč}}$ [Hz]
63	4	1,8	180	330	56	19,33	63,01
125	4	1,8	180	180	27	9	125,04
250	4	1,8	180	91	13	4,45	250,1
500	4	1,8	180	43	7,5	2,35	500,67
1000	4	1,8	180	22	3,6	1,15	1000,6
2000	4	1,8	180	11	1,8	0,57	2009,95
4000	4	1,8	180	5,6	0,82	0,28	4019,26
8000	3	1,8	180	2,7	0,47	0,146	8016,1
16000	4	1,8	180	1,3	0,24	0,076	16011,85

3.4 Schéma zapojení

Schéma zapojení příloha B bylo provedeno v programu pro návrh desek plošných spojů (DPS). Eagle je zkratka z anglických slov Easily Applicable Graphical Layout Editor. Program se skládá ze tří hlavních částí:

- Editor schémat
- Editor spojů
- Autorouter

Jednotlivé funkční bloky jsou popsány v podkapitole níže.

3.4.1 Napájení ekvalizéru

Tento ekvalizér bude sloužit jako laboratorní přípravek, proto je nutné, aby napájení mělo různé ochrany např. ochranu proti přepólování. Napájení celého zařízení je z laboratorního zdroje o symetrickém napětí ± 15 V. Zpracovávané signály jsou vztaženy ke středu napájecího napětí GND (0 V) tedy k zemi. Schéma napájení je v příloze B. Na přívodních svorkách 15 V a -15 V jsou 500 mA pojistky. Dále tam jsou zapojeny diody proti přepólování symetrického napětí.

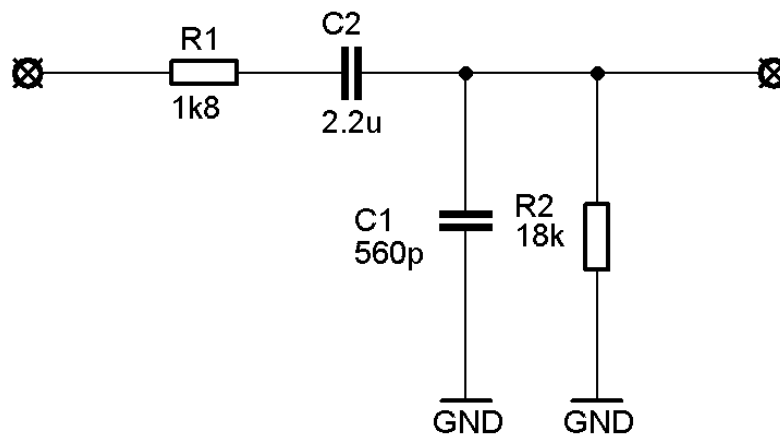
U napájení operačních zesilovačů jsou přívody zablokované keramickými kondenzátory s kapacitou 100 nF [5]. Jako operační zesilovač byl zvolen NE5532. Je to duální operační zesilovač, což znamená, že v jednom pouzdru jsou dva operační zesilovače, tudíž v našem zapojení je potřeba šest OZ.

3.4.2 Pásmová propust

Na přívodních svorkách je připojena pásmová propust neboli Wienův článek obrázek 3.6 se skládá ze dvou RC článků [1]. První RC článek je DP a druhý RC článek je HP. DP nepropouští vysoké frekvence a má mezní kmitočet f_{01} přibližně 160 kHz. HP nepropouští nízké frekvence a má mezní kmitočet f_{02} přibližně 4 Hz.

$$f_{01} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_1 \cdot C_1} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 1800 \cdot 560 \cdot 10^{-12}} = 157,9 \text{ kHz} \cong 160 \text{ kHz} \quad (3.1)$$

$$f_{02} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_2 \cdot C_2} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 18 \cdot 10^3 \cdot 2,2 \cdot 10^{-6}} = 4,02 \text{ Hz} \cong 4 \text{ Hz} \quad (3.2)$$

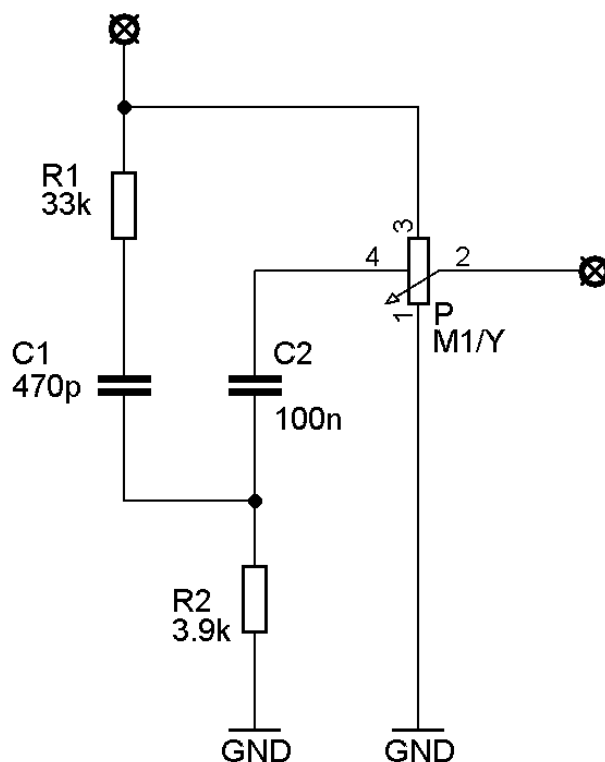


Obrázek 3.6 Wienův článek

3.4.3 Regulátor hlasitosti

Regulátor hlasitosti bývá většinou u každého elektroakustického zařízení. Nastavení hlasitosti probíhá prostřednictvím jednoduchého napěťového děliče. Jako hlavní regulační součástka se používá potenciometr. Potenciometry se používají logaritmické, pak změna hlasitosti odpovídá úhlu natočení osy potenciometru. Aby nedocházelo ke zhoršení odstupu cizích napětí, samotná regulace by měla být zapojena tam, kde už nedochází k napěťovému zesílení [6].

Pro naše účely byl vybrán fyziologický regulátor hlasitosti. Ten se používá u lepších a kvalitnějších zařízení. Lidé totiž nemají sluchový orgán stejně citlivý pro signály různých kmitočtů. Při nízkých hlasitostech jsme méně citliví na nízké a vysoké frekvence. Proto se využívá této regulace, která zdůrazňuje hloubky a výšky. Pro fyziologické regulátory se nejčastěji používají speciální potenciometry s jednou nebo více odbočkami. Náš regulátor obsahuje potenciometr s jednou odbočkou a má hodnotu 100 k Ω /Y. Schéma zapojení je na obrázku 3.7 [7].



Obrázek 3.7 Fyziologický regulátor hlasitosti

Pro názornost laboratorní úlohy půjde fyziologická regulace zcela vypnout, jak můžeme vidět v kompletním schématu příloha B.

Další dílčí bloky jsou popsány v kapitole 3.2 Popis zapojení filtru.

3.5 Návrh desky plošných spojů

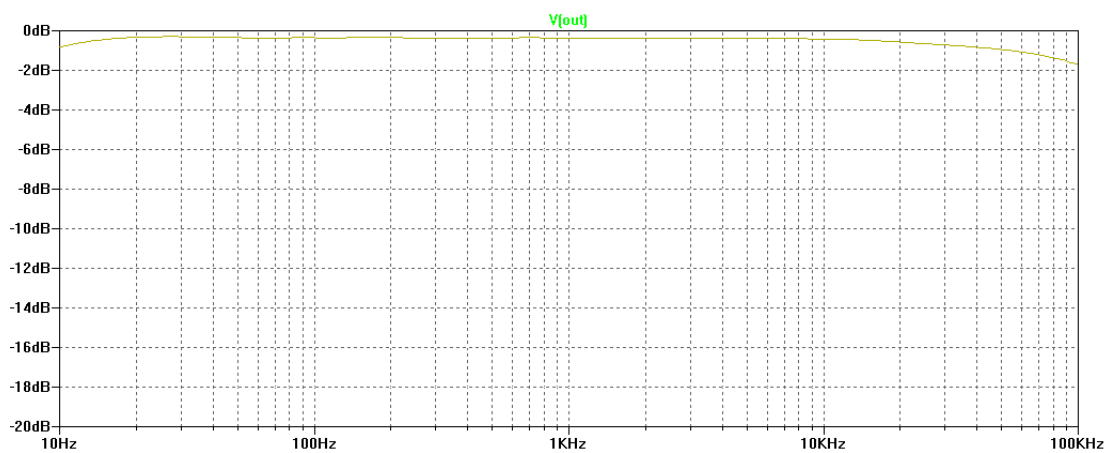
Pro návrh desky plošných spojů jsem použil program EAGLE ve verzi 7.2, který jsem už popisoval v kapitole 3.4. V tomto programu jsou sice rozsáhlé knihovny, ale byla potřeba navrhnout tahové potenciometry značky Alps v editoru součástek. Navržená DPS (příloha B.2) je jednovrstvá a všechny součástky jsou na jediné desce, na které je aplikována nepájivá maska. Na velké části desky plošných spojů se nachází rozlévaná zemnicí plocha (rozlévaná měď). Avšak byla potřeba se nutně vyhnout zemním smyčkám. Rozměry desky jsou 218 x 104 mm. Na desce se nenachází žádné prokovy, což je levnější a zabere to méně času při výrobě. Celé zařízení bylo zasazeno do plastové krabičky.

4 SIMULACE

Simulace byla provedena ve freeware programu LTspice IV, který je volně stažitelný ze stránek firmy Linear Technology. Program je složený ze tří částí, grafický editor schémat, simulátor nazvaný LTspice a samotného programu na vizualizaci simulovaného obvodu.

4.1 Potenciometry ve střední poloze, přenos 0 dB

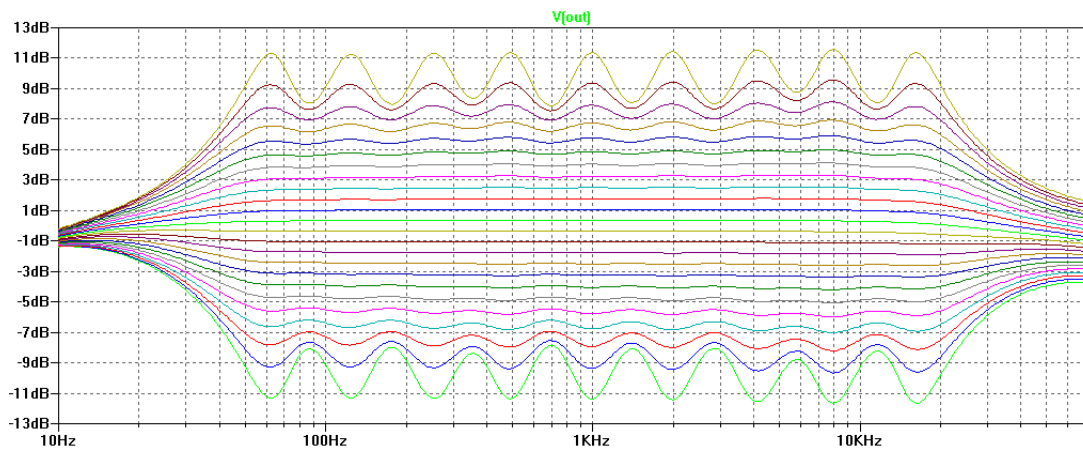
Ekvalizér byl simulován od frekvence $f_{\min} = 10$ Hz do $f_{\max} = 100$ kHz. Potenciometry byly nastaveny do střední polohy. Z obrázku 4.1 jde vidět, že modulová frekvenční charakteristika je v celém kmitočtovém pásmu takřka rovna a zesílení je přibližně rovno 0 dB, což odpovídá přenosu rovno 1. Při velmi nízkých a velmi vysokých frekvencích přenos nepatrně klesá, což je akceptovatelné.



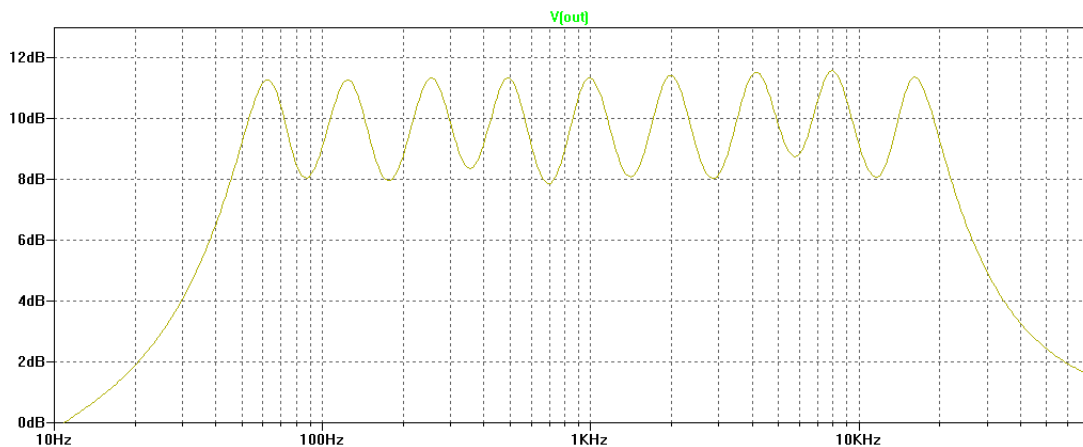
Obrázek 4.1 Simulace ekvalizéru, přenos roven 0 dB

4.2 Parametrické rozmítání pro všechna pásma

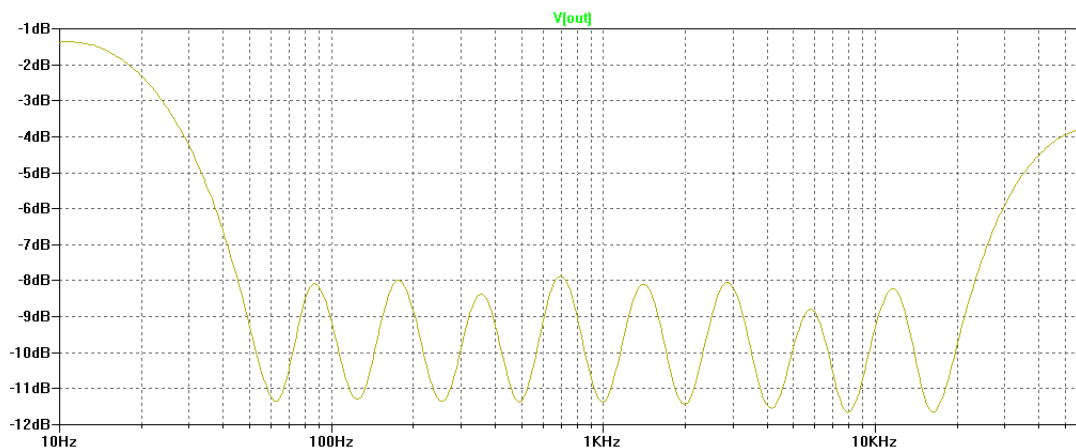
Ekvalizér byl simulován od frekvence $f_{\min} = 10 \text{ Hz}$ do $f_{\max} = 70 \text{ kHz}$. V této simulaci obrázek 4.2 bylo využito parametrického rozmítání potenciometru od $1 \text{ k}\Omega$ do $24 \text{ k}\Omega$ pro všechna pásma. Z charakteristiky jdou jasné vidět jednotlivá pásma, která mají potlačení a zdůraznění $\pm 12 \text{ dB}$. Na frekvenci od 63 Hz do 16 kHz vykazují vrchní žlutá křivka a spodní zelená křivka nejvyšší zvlnění a to přibližně 3 dB . Toto zvlnění jde lépe pozorovat na obrázku 4.3 a obrázku 4.4.



Obrázek 4.2 Simulace ekvalizéru, rozmítání všech devíti pásem



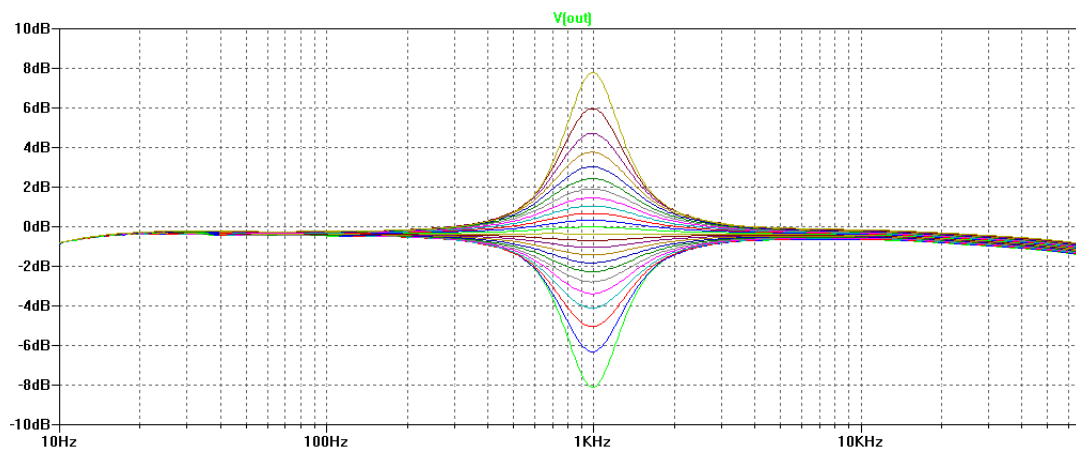
Obrázek 4.3 Simulace ekvalizéru, zdůraznění všech devíti pásem



Obrázek 4.4 Simulace ekvalizéru, potlačení všech devíti pásem

4.3 Parametrické rozmítání pásma 1 kHz

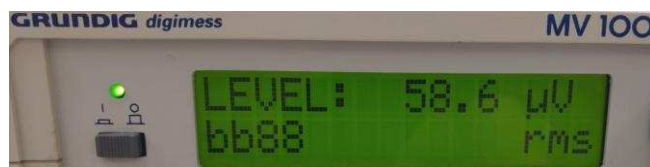
V této simulaci bylo rozmítáno jen pásmo 1 kHz. Všechny potenciometry byly nastavené do střední polohy, až na potenciometr, který ovládá přenos pásma 1 kHz. Výsledek simulace je na obrázku 4.5. Z modulové frekvenční charakteristiky jde vidět, že střední frekvence je opravdu 1 kHz.



Obrázek 4.5 Simulace ekvalizéru, rozmítání pásma 1 kHz

5 MĚŘENÍ LAB. PŘÍPRAVKU

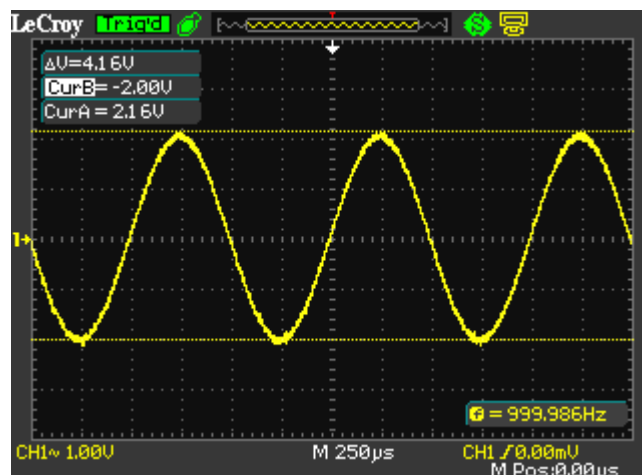
Funkčnost laboratorního přípravku je ukázána zde. Na generátoru jsme nastavili frekvenci $f = 1 \text{ kHz}$ a vstupní napětí $U_1 = 1 \text{ V}$.



Obrázek 5.1 Hlasitost laboratorního přípravku na minimum



Obrázek 5.2 Hlasitost laboratorního přípravku na maximum



Obrázek 5.3 Pohled na výst. napětí z osciloskopu ($V_{PP} = 4,16 \text{ V} \approx V_{RMS} = 1,5 \text{ V}$)

Jako inspirace pro vytvoření laboratorní úlohy nám posloužily již existující laboratorní úlohy z předmětu BNFE (Nízkofrekvenční a audio elektronika). Naše úloha „Devítipásmový ekvalizér“ by měla nahradit úlohu č. 2 „Korekční nízkofrekvenční zesilovač“.

Nízkofrekvenční elektronika (BNFE, SNFE, KNFE)

Laboratorní úloha č. 2 (teoretická část)

Devítipásmový ekvalizér

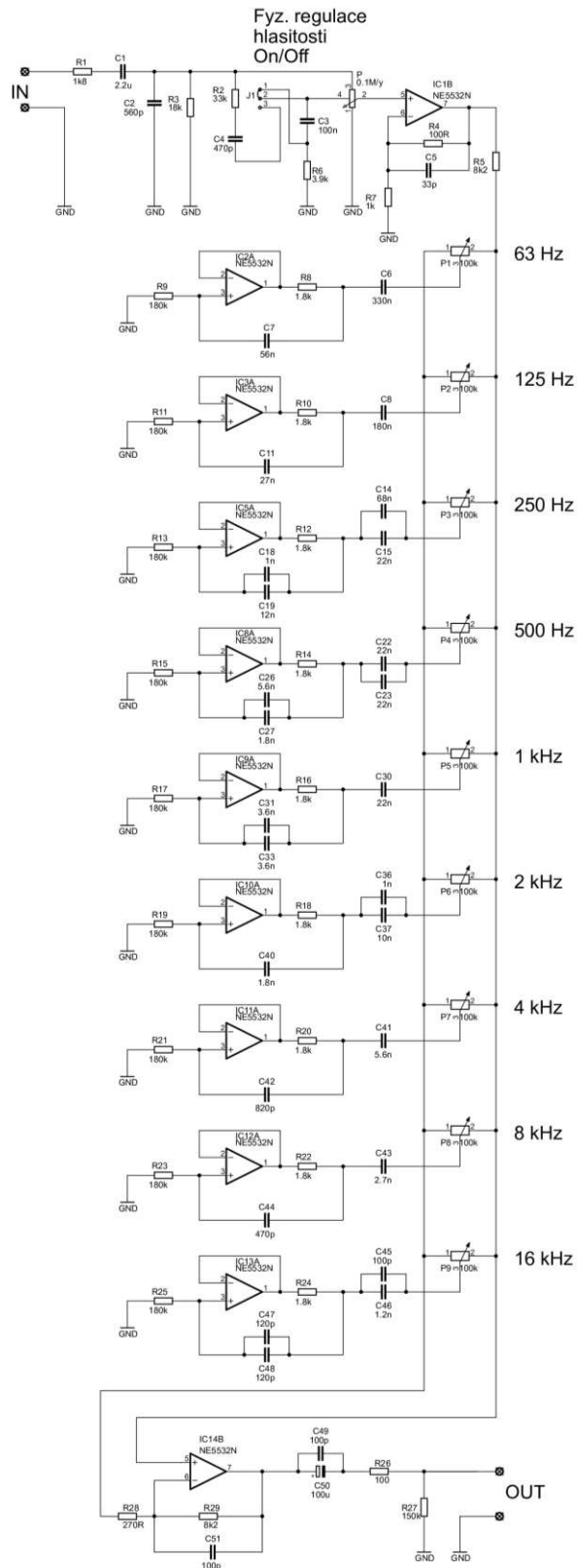
Cílem úlohy je seznámit studenty s vlastnostmi a základními parametry přípravku „Devítipásmový ekvalizér“, který obsahuje devět pásmových korektorů a regulaci hlasitosti s přepínačem fyziologické regulace hlasitosti. Během měření studenti získají představu o vlastnostech grafických ekvalizérů v kmitočtové oblasti, průběhu regulace hlasitosti a vstupním odporu.

ÚVOD

Schéma zapojení přípravku je uvedeno na Obr. 1. Měřený devítipásmový ekvalizér je zařízení s možností nastavení frekvenční charakteristiky pro devět pásem (od 63 Hz do 16 kHz) a regulace hlasitosti (přepínačem lze nastavit fyziologickou regulaci hlasitosti – „loudness“). Přípravek je nutné napájet symetrickým napětím o hodnotě $\pm 15\text{V}$. Jádrem korekčního zesilovače je sériový rezonanční obvod naladěný na určitou frekvenci. Modul je osazen nízkošumovými OZ NE5532N.

Na vstupních svorkách je zapojena pásmová propust, která má mezní frekvence 4 Hz a 160 kHz. Dále je vstupní signál přiveden na regulátor hlasitosti. Potenciometr P má vyvedenou odbočku a přepínačem lze připojit fyziologický regulátor hlasitosti, který při malé hlasitosti zdůrazní hloubky a výšky tak, aby se kompenzovaly specifické vlastnosti lidského sluchu. Poté vstupní zesilovač zpracovává nízkofrekvenční signál a impedančně přizpůsobuje zdroj nízkofrekvenčního signálu k aktivnímu korektoru. Zesílení vstupního zesilovače je určeno zpětnovazebním děličem s rezistory R_4 a R_7 . Vstupní odpor zesilovače je přibližně dán paralelní kombinací odporu R_3 a potenciometru P. Zesílený nízkofrekvenční signál z výstupu IC1B je přiváděn na sériové rezonanční RLC obvody, které jsou řazeny paralelně vedle sebe. Sériové RLC obvody fungují jako pásmová propust a mají rezonanční frekvenci na mezním kmitočtu daného pásma. Z praktického hlediska nebyly použity cívky, ale byla použita syntetická indukčnost, realizována pomocí gyrátoru (převodník impedance) s OZ. S potenciometry P_1 až P_9 lze regulovat jednotlivá naladěná pásma (v horních polohách běžců potenciometrů jsou zesilovány, v dolních polohách jsou potlačovány).

Za posledním potenciometrem P_9 následuje výstupní operační zesilovač, který zajišťuje sčítání všech vlivů rezonančních obvodů a také malou výstupní impedanci celého korekčního předzesilovače.



Obr. 1 Schéma zapojení přípravku „Devítipásmový ekvalizér“

Nízkofrekvenční elektronika (BNFE, SNFE, KNFE)

Laboratorní úloha č. 2 (protokol)

Devítipásmový ekvalizér

Jméno a příjmení: Studijní skupina:

Datum a čas měření: Hodnocení vyučujícího:

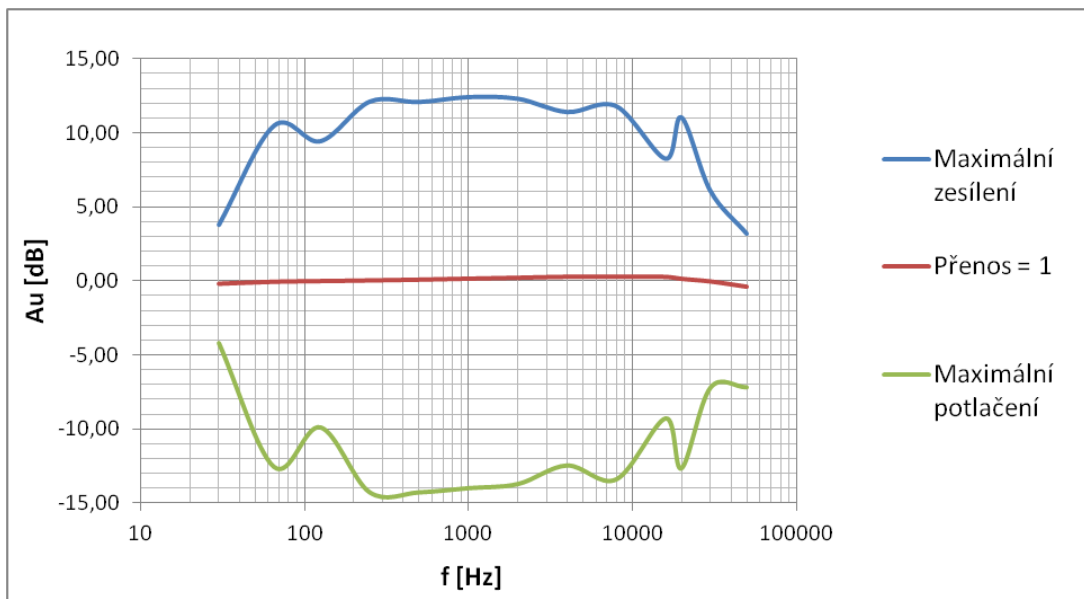
ZADÁNÍ, POZNÁMKY K MĚŘENÍ A VYPRACOVÁNÍ PROTOKOLU

1. Změřte modulovou kmitočtovou charakteristiku přípravku postupně pro lineární korekci, korekci s maximálním zdůrazněním všem pásem, korekci s maximálním potlačením všem pásem pro vstupní napětí $U_1 = 775$ mV. Před měřením nastavte hlasitost pro přenos zesilovače na kmitočtu $f = 1$ kHz a bez korekcí na $A_U = 1$ (kdy $U_1 = U_2 = 775$ mV). Modul přenosu vypočítejte podle vzorce (počítejte s efektivními hodnotami napětí RMS)

$$A_U = 20 \log \frac{U_2}{U_1}. \quad (1)$$

Tab. 1 Modulová kmitočtová charakteristika korekcí ($U_1 = 775$ mV)

f [Hz]	Pásma +		Pásma =		Pásma -	
	U_2 [V]	A_U [dB]	U_2 [mV]	A_U [dB]	U_2 [mV]	A_U [dB]
30	1,20	3,80	0,76	-0,22	0,48	-4,16
65	2,58	10,45	0,77	-0,08	0,18	-12,54
125	2,29	9,41	0,77	-0,03	0,25	-9,86
250	3,11	12,07	0,78	0,01	0,15	-14,26
500	3,10	12,04	0,78	0,07	0,15	-14,26
1000	3,22	12,37	0,79	0,13	0,16	-13,98
2000	3,18	12,26	0,79	0,20	0,16	-13,70
4000	2,87	11,37	0,80	0,26	0,19	-12,44
8000	3,00	11,76	0,80	0,26	0,17	-13,38
16000	2,00	8,23	0,80	0,25	0,27	-9,26
20000	2,75	11,00	0,79	0,12	0,18	-12,63
30000	1,56	6,08	0,77	-0,06	0,34	-7,18
50000	1,12	3,20	0,74	-0,42	0,34	-7,16



Graf 1 Modulová kmitočtová charakteristika měřených korekcí zesilovače

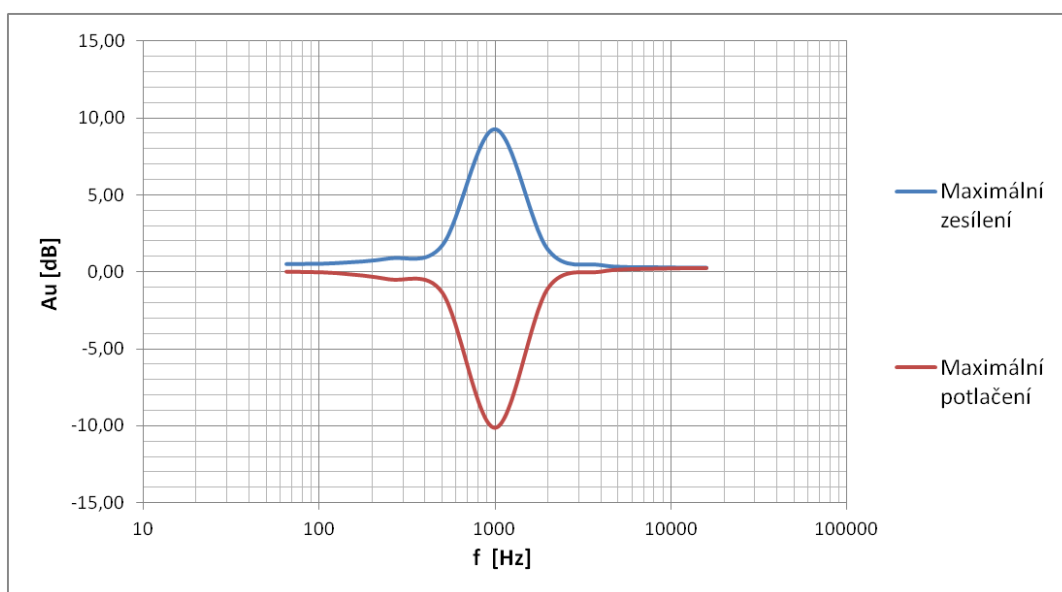
2. Změřte vlivy pásmových filtrů na kmitočtu $f = 1$ kHz. Před měřením nastavte hlasitost pro přenos zesilovače na kmitočtu $f = 1$ kHz a bez korekcí na $A_u = 1$ (kdy $U_1 = U_2 = 775$ mV). Na generátoru nechte kmitočet 1 kHz a postupně pro každý potenciometr nastavte maximální zesílení, zapište si výstupní napětí, poté to samé pro maximální potlačení. Po skončení každé pásmo vyrovnejte do střední polohy. Takto pokračujte se všemi tahovými potenciometry podle tabulky níže. Dále z grafu zjistěte šířku pásma, ta je dána rozdílem frekvencí f_1 a f_2 vyskytujících se kolem mezní frekvence f_0 , při poklesu o 3 dB oproti f_0 . Z šířky pásma poté vypočítejte činitel jakosti Q podle vzorce.

$$Q = \frac{f_0}{B}. \quad (2)$$

$$Q = \frac{f_0}{f_2 - f_1} = \frac{1000}{1050 - 700} = \frac{1000}{350} = 2,86 [-]$$

Tab. 2 Modulová kmitočtová charakteristika korekčního pásma 1 kHz ($U_1 = 775 \text{ mV}$)

Potenciometr	Ovlivňované pásmo - frekvence [Hz]	Maximální zesílení		Maximální potlačení	
		U_2 [V]	A_U [dB]	U_2 [V]	A_U [dB]
1	65	0,82	0,48	0,78	0,00
2	125	0,83	0,54	0,77	-0,09
3	250	0,86	0,85	0,73	-0,50
4	500	0,94	1,69	0,66	-1,34
5	1000	2,26	9,30	0,24	-10,15
6	2000	0,91	1,43	0,68	-1,08
7	4000	0,81	0,42	0,78	0,00
8	8000	0,80	0,28	0,79	0,19
9	16000	0,80	0,24	0,80	0,23

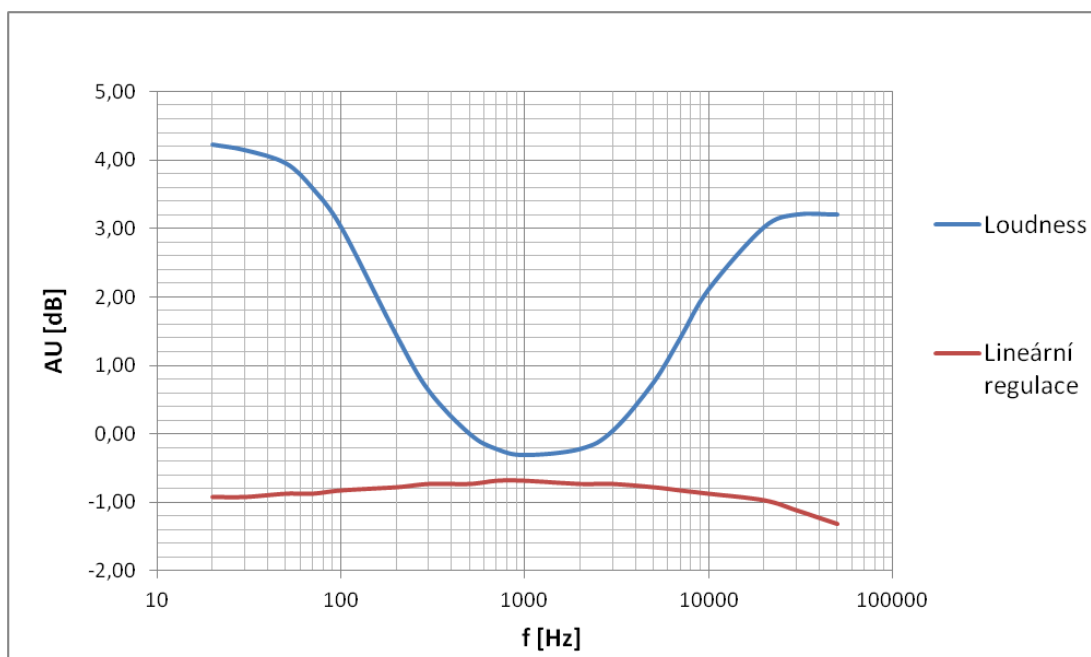


Graf 2 Modulová kmitočtová charakteristika korekčního pásma 1 kHz

3. Změřte frekvenční závislost funkce fyziologické regulace hlasitosti přípravku. Vstupní napětí $U_1 = 775$ mV a před měřením nastavte hlasitost zesilovače na kmitočtu $f = 1$ kHz a bez korekcí na výstupní napětí $U_2 = 200$ mV). Všechny pásma dejte do střední polohy.

Tab. 4 Závislost regulace hlasitosti korekčního zesilovače ($U_1 = 775$ mV)

f [Hz]	Lineární regulace		Loudness	
	U_2 [mV]	AU [dB]	U_2 [mV]	AU [dB]
20	0,18	-0,92	0,33	4,22
30	0,18	-0,92	0,32	4,14
50	0,18	-0,87	0,32	3,95
70	0,18	-0,87	0,30	3,58
100	0,18	-0,82	0,28	3,02
200	0,18	-0,77	0,24	1,44
300	0,18	-0,72	0,22	0,63
500	0,18	-0,72	0,20	0,00
700	0,19	-0,68	0,20	-0,22
1000	0,19	-0,68	0,19	-0,31
2000	0,18	-0,72	0,20	-0,22
3000	0,18	-0,72	0,20	0,04
5000	0,18	-0,77	0,22	0,75
7000	0,18	-0,82	0,24	1,40
10000	0,18	-0,87	0,26	2,11
20000	0,18	-0,96	0,28	3,02
30000	0,18	-1,11	0,29	3,20
50000	0,17	-1,31	0,29	3,20



Graf 3 Modulová kmitočtová charakteristika regulací hlasitosti

4. Určete vstupní odpor přípravku. Do přívodu mezi generátor a přípravek do série vložte cejchovaný proměnný odpor cca 100 k Ω . Při nastavené hodnotě odporu 0 Ω nastavte výstupní napětí na $U_2 = 300\text{mV}$. Pak zvyšujte vložený odpor, až výstupní napětí klesne na polovinu tj. na $U_2 = 150\text{mV}$. Pak na stupnici přímo odečtete velikost vstupního odporu (pochopitelně pouze modulu vstupní impedance, nejsme schopni rozlišit případnou imaginární složku vstupní impedance). Měřte na kmitočtu $f = 1\text{kHz}$.

Vstupní odpor $R_{vst} = 17\text{ k}\Omega$.

POUŽITÉ MĚŘICÍ PŘÍSTROJE

GEN nízkofrekvenční funkční generátor Agilent 33220A

NMV nízkofrekvenční milivoltmetr Grundig MV100

OSC digitální osciloskop Agilent 54621A

NZ napájecí zdroj MCP M10-DP-305E (napájení přípravku $\pm 15\text{V}$)

měřený přípravek „Devítipásmový ekvalizér“

vstupní cejchovaný proměnný odpor 100 k Ω

propojovací vodiče 3 x BNC-BNC, propojovací vodiče 3 x „banánek“

ZÁVĚR

V prvním bodě bylo zjištěno maximální zesílení, které se pohybovalo hlavně okolo 13 db a maximální potlačení, které bylo hlavně okolo 14 až 15 db. Ověřili jsme také, že ekvalizér má bez korekcí přenos roven 1, což odpovídá 0 dB. V dalším bodě jsme měřili maximální zesílení a potlačení u jediného pásma a to 1 kHz. Přenos vyšel přibližně ± 10 dB. Bylo také zjištěno ovlivňování sousedních pásem, což u devítipásmového ekvalizéru můžeme předpokládat. Šířka pásma B po odečtení obou frekvencí nám vyšla kolem 350 Hz. Z šířky pásma jsme dopočítali činitele jakosti Q, který nám vyšel 2,86.

Ve třetím bodě jsme ověřili funkci fyziologické regulace hlasitosti (loudness), která zdůrazňuje hloubky a výšky při nízkých hlasitostech.

Vstupní odpor 17 k Ω jsme odečetli přímo ze stupnice cejchovaného proměnného odporu, kdy výstupní napětí kleslo na polovinu.

5.1 Laboratorní úloha - podklady

Nízkofrekvenční elektronika (BNFE, SNFE, KNFE)

Laboratorní úloha č. 2 (teoretická část)

Devítipásmový ekvalizér

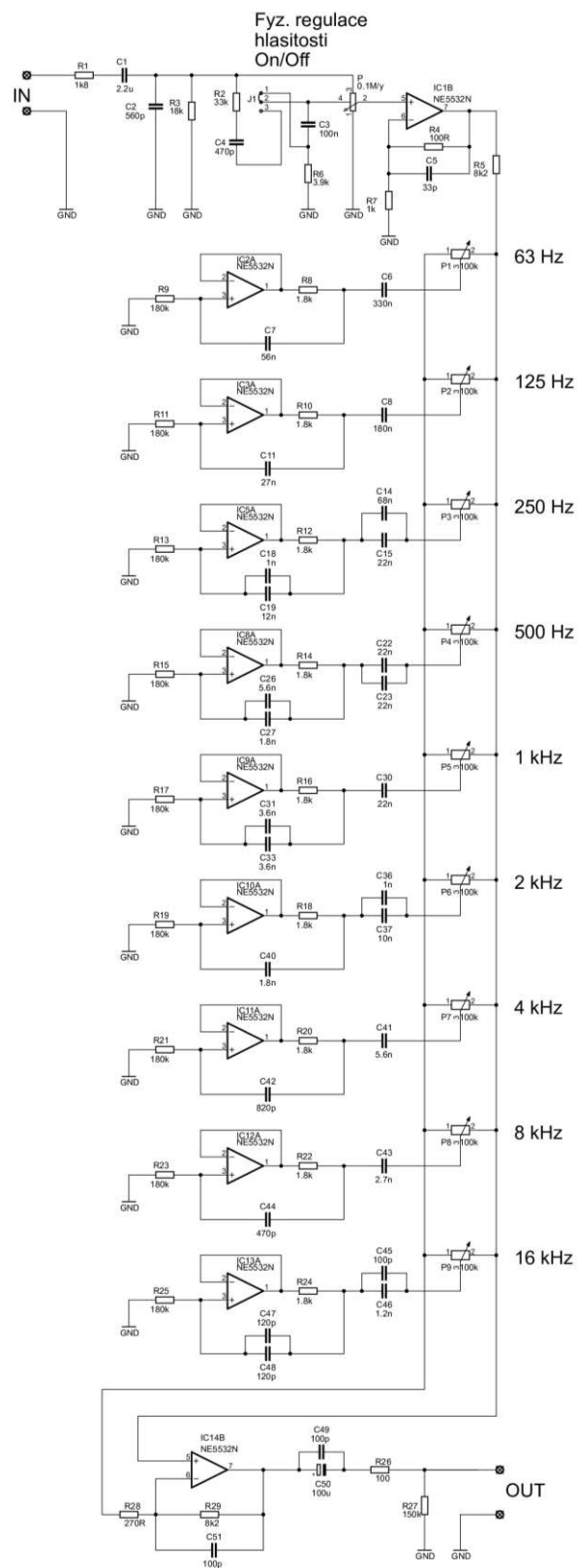
Cílem úlohy je seznámit studenty s vlastnostmi a základními parametry přípravku „Devítipásmový ekvalizér“, který obsahuje devět pásmových korektorů a regulaci hlasitosti s přepínačem fyziologické regulace hlasitosti. Během měření studenti získají představu o vlastnostech grafických ekvalizérů v kmitočtové oblasti, průběhu regulace hlasitosti a vstupním odporu.

ÚVOD

Schéma zapojení přípravku je uvedeno na Obr. 1. Měřený devítipásmový ekvalizér je zařízení s možností nastavení frekvenční charakteristiky pro devět pásem (od 63 Hz do 16 kHz) a regulace hlasitosti (přepínačem lze nastavit fyziologickou regulaci hlasitosti – „loudness“). Přípravek je nutné napájet symetrickým napětím o hodnotě $\pm 15\text{V}$. Jádrem korekčního zesilovače je sériový rezonanční obvod naladěný na určitou frekvenci. Modul je osazen nízkošumovými OZ NE5532N.

Na vstupních svorkách je zapojena pásmová propust, která má mezní frekvence 4 Hz a 160 kHz. Dále je vstupní signál přiveden na regulátor hlasitosti. Potenciometr P má vyvedenou odbočku a přepínačem lze připojit fyziologický regulátor hlasitosti, který při malé hlasitosti zdůrazní hloubky a výšky tak, aby se kompenzovaly specifické vlastnosti lidského sluchu. Poté vstupní zesilovač zpracovává nízkofrekvenční signál a impedančně přizpůsobuje zdroj nízkofrekvenčního signálu k aktivnímu korektoru. Zesílení vstupního zesilovače je určeno zpětnovazebním děličem s rezistory R_4 a R_7 . Vstupní odpor zesilovače je přibližně dán paralelní kombinací odporu R_3 a potenciometru P. Zesílený nízkofrekvenční signál z výstupu IC1B je přiváděn na sériové rezonanční RLC obvody, které jsou řazeny paralelně vedle sebe. Sériové RLC obvody fungují jako pásmová propust a mají rezonanční frekvenci na mezním kmitočtu daného pásma. Z praktického hlediska nebyly použity cívky, ale byla použita syntetická indukčnost, realizována pomocí gyrátoru (převodník impedance) s OZ. S potenciometry P_1 až P_9 lze regulovat jednotlivá naladěná pásma (v horních polohách běžců potenciometrů jsou zesilovány, v dolních polohách jsou potlačovány).

Za posledním potenciometrem P_9 následuje výstupní operační zesilovač, který zajišťuje sčítání všech vlivů rezonančních obvodů a také malou výstupní impedanci celého korekčního předzesilovače.



Obr. 1 Schéma zapojení přípravku „Devítipásmový ekvalizér“

Laboratorní úloha č. 2 (protokol)

Devítipásmový ekvalizér

Jméno a příjmení:Studijní skupina:

Datum a čas měření: Hodnocení vyučujícího:

ZADÁNÍ, POZNÁMKY K MĚŘENÍ A VYPRACOVÁNÍ PROTOKOLU

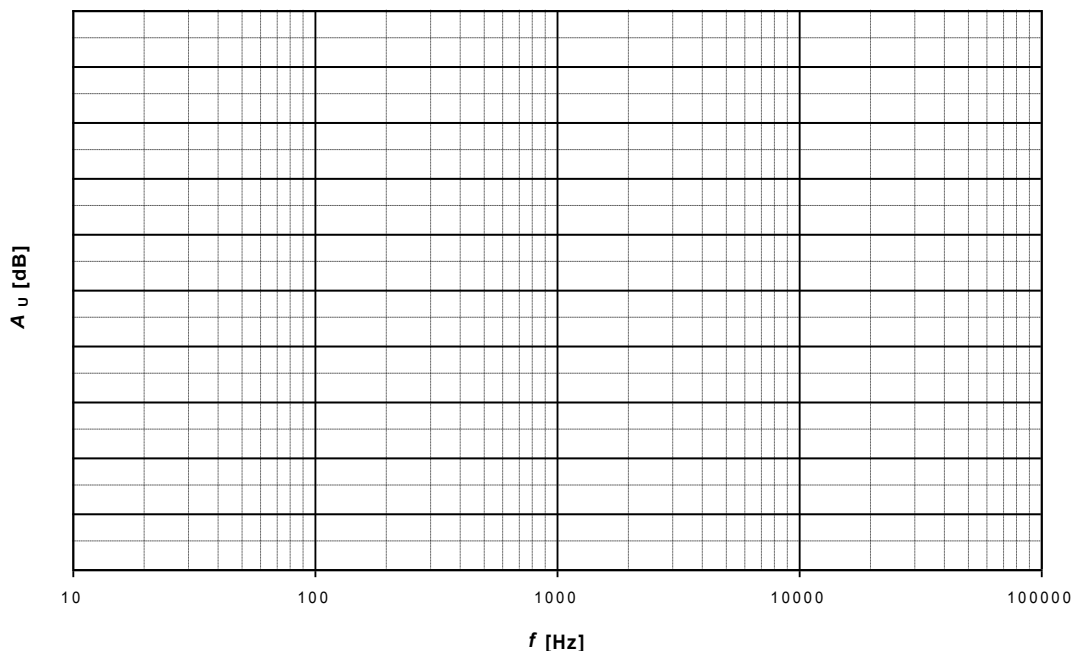
1. Změřte modulovou kmitočtovou charakteristiku přípravku postupně pro lineární korekci, korekci s maximálním zdůrazněním všem pásem, korekci s maximálním potlačením všem pásem pro vstupní napětí $U_1 = 775 \text{ mV}$. Před měřením nastavte hlasitost pro přenos zesilovače na kmitočtu $f = 1 \text{ kHz}$ a bez korekcí na $A_u = 1$ (kdy $U_1 = U_2 = 775 \text{ mV}$). Modul přenosu vypočítejte podle vzorce (počítejte s efektivními hodnotami napětí RMS)

$$A_U = 20 \log \frac{U_2}{U_1} . \quad (1)$$

Tab. 1 Modulová kmitočtová charakteristika korekcí ($U_1 = 775 \text{ mV}$)

f [Hz]	Pásma +		Pásma =		Pásma -	
	U_2 [V]	A_U [dB]	U_2 [mV]	A_U [dB]	U_2 [mV]	A_U [dB]
30						
65						
125						
250						
500						
1000						
2000						
4000						
8000						
16000						
20000						
30000						
50000						

2. Sestrojte modulovou kmitočtovou charakteristiku $A_U = f(U_2/U_1)$ pro všechny naměřené průběhy do jednoho grafu. Ocejchujte vhodně osu Y a zakreslete průběhy modulů všech korekcí.



Graf 1 Modulová kmitočtová charakteristika měřených korekcí zesilovače

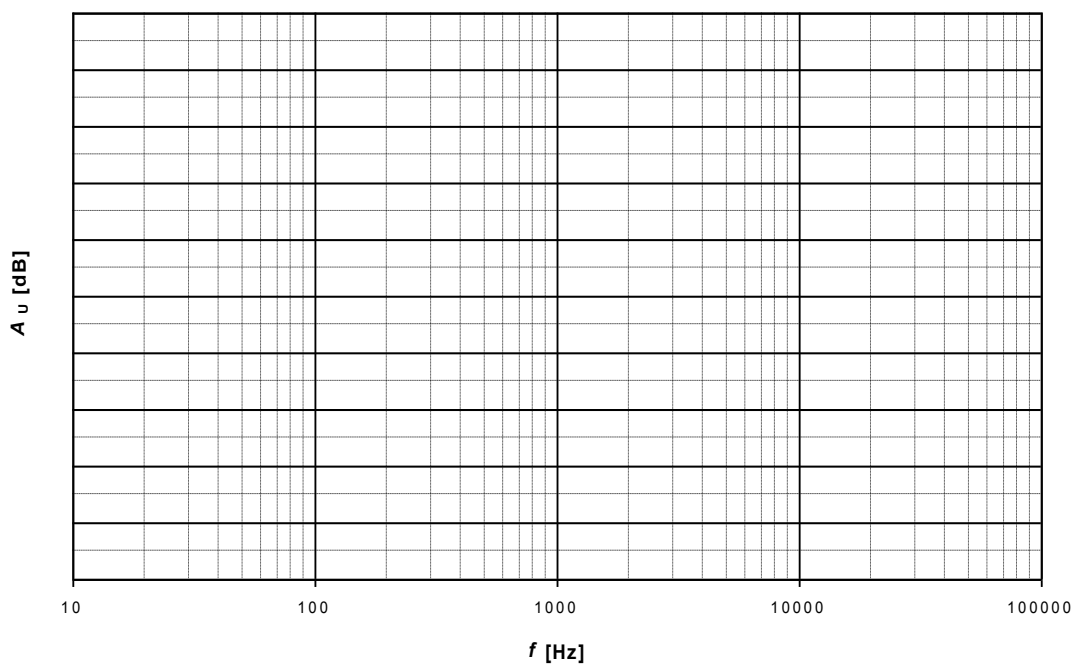
3. Změřte vlivy pásmových filtrů na kmitočtu $f = 1$ kHz. Před měřením nastavte hlasitost pro přenos zesilovače na kmitočtu $f = 1$ kHz a bez korekcí na $A_u = 1$ (kdy $U_1 = U_2 = 775$ mV). Na generátoru nechte kmitočet 1 kHz a postupně pro každý potenciometr nastavte maximální zesílení, zapište si výstupní napětí, poté to samé pro maximální potlačení. Po skončení každé pásma vyrovnejte do střední polohy. Takto pokračujte se všemi tahovými potenciometry podle tabulky níže. Dále z grafu zjistěte šířku pásma, ta je dána rozdílem frekvencí f_1 a f_2 vyskytujících se kolem mezní frekvence f_0 , při poklesu o 3 dB oproti f_0 . Z šířky pásma poté vypočítejte činitele jakosti Q podle vzorce.

$$Q = \frac{f_0}{B}. \quad (2)$$

Tab. 2 Modulová kmitočtová charakteristika korekčního pásma 1 kHz ($U_1 = 775 \text{ mV}$)

Potenciometr	Ovlivňované pásmo - f [Hz]	Maximální zesílení		Maximální potlačení	
		U_2 [V]	A_U [dB]	U_2 [V]	A_U [dB]
1	65				
2	125				
3	250				
4	500				
5	1000				
6	2000				
7	4000				
8	8000				
9	16000				

4. Sestrojte modulovou kmitočtovou charakteristiku $A_U = f(U_2/U_1)$ pro všechny naměřené průběhy do jednoho grafu. Ocejchujte vhodně osu Y a zakreslete průběhy maximálního zesílení a maximálního potlačení.



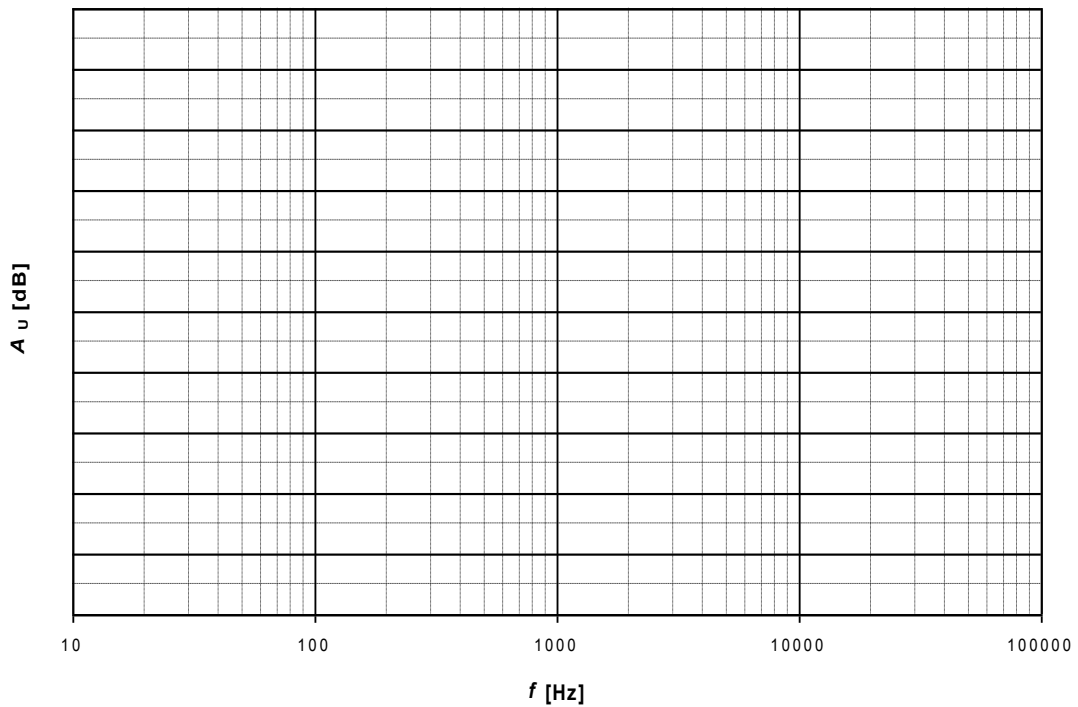
Graf 2 Modulová kmitočtová charakteristika korekčního pásma 1 kHz

5. Změřte frekvenční závislost funkce fyziologické regulace hlasitosti přípravku. Vstupní napětí $U_1 = 775 \text{ mV}$ a před měřením nastavte hlasitost zesilovače na kmitočtu $f = 1 \text{ kHz}$ a bez korekcí na výstupní napětí $U_2 = 200 \text{ mV}$. Všechny pásma dejte do střední polohy.

Tab. 4 Závislost regulace hlasitosti korekčního zesilovače ($U_1 = 775 \text{ mV}$)

f [Hz]	Lineární regulace		Loudness	
	U_2 [mV]	A_U [dB]	U_2 [mV]	A_U [dB]
20				
30				
50				
70				
100				
200				
300				
500				
700				
1k				
2k				
3k				
5k				
7k				
10k				
20k				
30k				
50k				

6. Sestrojte modulovou kmitočtovou charakteristiku $A_U = f(U_2/U_1)$ pro naměřené průběhy do jednoho grafu. Ocejchujte vhodně osu Y a zakreslete průběhy modulů lineární regulace hlasitosti a regulace „loudness“.



Graf 3 Modulová kmitočtová charakteristika regulací hlasitosti

7. Určete vstupní odpor přípravku. Do přívodu mezi generátor a přípravek do série vložte cejchovaný proměnný odpor cca 100 k Ω . Při nastavené hodnotě odporu 0 Ω nastavte výstupní napětí na $U_2 = 300\text{mV}$. Pak zvyšujte vložený odpor, až výstupní napětí klesne na polovinu tj. na $U_2 = 150\text{mV}$. Pak na stupnici přímo odečtěte velikost vstupního odporu (pochopitelně pouze modulu vstupní impedance, nejsme schopni rozlišit případnou imaginární složku vstupní impedance). Měřte na kmitočtu $f = 1\text{kHz}$.

Vstupní odpor $R_{\text{vst}} = \dots\dots\dots \text{k}\Omega$.

POUŽITÉ MĚŘÍCÍ PŘÍSTROJE

GEN nízkofrekvenční funkční generátor Agilent 33220A

NMV nízkofrekvenční milivoltmetr Grundig MV100

OSC digitální osciloskop Agilent 54621A

NZ napájecí zdroj MCP M10-DP-305E (napájení přípravku $\pm 15\text{V}$)
měřený přípravek „Devítipásmový ekvalizér“

vstupní cejchovaný proměnný odpor $100\text{ k}\Omega$

propojovací vodiče 3 x BNC-BNC, propojovací vodiče 3 x „banánek“

ZÁVĚR

(Zde každý student čitelně doplní své individuální hodnocení výsledků měření a potvrdí jej svým podpisem. Je třeba podrobně komentovat každý bod měření, každou měřenou charakteristiku nebo jednotlivý výsledek. Závěr by měl vždy přehledně shrnovat technické parametry měřeného přípravku a jejich vyhodnocení.)

6 ZÁVĚR

Podle zadání byla navržena bloková a obvodová struktura korekčního zesilovače pro laboratorní výuku. Po domluvě s vedoucím práce bylo zvoleno standardní oktávové frekvenční spektrum pro devět pásem (63 Hz, 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz, 8 kHz a 16 kHz). Z nejběžnějších realizací korekčních zesilovačů byl zvolen filtr se sériovými rezonančními obvody RLC. Protože cívky L jsou nepraktické a drahé, byla potřeba navrhnout náhrada cívky L za syntetickou indukčnost s operačním zesilovačem. Zapojení obsahuje fyziologickou regulaci hlasitosti, která se dá pro názornost laboratorní úlohy zapnout a vypnout.

Pro naše účely byl vybrán obvod od firmy Texas Instruments NE5532, jedná se o nízkošumový a cenově dostupný duální operační zesilovač. Tento OZ se hojně využívá v běžné nízkofrekvenční technice.

Obvodová struktura byla následně odsimulována v programu LTspice. Ze simulací jde vidět, že korekční zesilovač umožňuje regulaci při parametrickém rozmítání všech pásem na kmitočtech 63 Hz až 16 kHz v rozsahu ± 12 dB. Při parametrickém rozmítání jednoho pásma např. 1 kHz je zdůraznění a potlačení ± 8 dB. Schéma a deska plošných spojů celého zařízení jsou umístěny v přílohách.

Důraz byl kladen zejména na návrh desky plošných spojů a také na výběr krabičky, do které se celé zařízení vložilo. Krabička byla vybrána černá, plastová s oddělitelným předním a zadním panelem (rozměry krabičky: 90 x 250 x 148 mm).

Dokončený výrobek bylo možné odměřit v laboratoři předmětu Nízkofrekvenční a audio elektronika. Měření prokázalo plně funkční přípravek s parametry blízkými se našemu teoretického návrhu. Maximální zesílení nebo potlačení všech pásem bylo v rozsahu kolem ± 12 až ± 13 dB. U jednoho pásma 1 kHz to bylo +9 dB (maximální zesílení) a -10 dB (maximální potlačení). Měřením šířky pásma 1 kHz se zjistilo, že nebyla správně zvolena hodnota činitele jakosti Q, tato hodnota byla zvolena příliš vysoká. Devítipásmový ekvalizér je velice selektivní, to znamená, že má malou šířku pásma propustnosti. Z měření šířky pásma a následném dopočítání činitele jakosti Q jsme zjistili, že $Q = 2,9$. Pro lepší názornost mohla být tato hodnota zvolena okolo 1.

LITERATURA

- [1] HÁJEK, K a SEDLÁČEK, J. *Kmitočtové filtry*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2002, 535 s. ISBN 80-7300-023-7.
- [2] KOTISA, Z. *NF zesilovače* 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2001, 95 s. ISBN 80-7300-030-x.
- [3] WIRSUM, S. *Abeceda nf techniky*. 1. čes. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 1998, 191 s. ISBN 80-86056-26-0.
- [4] VLČEK, J. *Konstrukční elektronika A Radio: Amatérské radio pro konstruktéry. Devítipísmový ekvalizér*. Praha: Amaro, V/2000. Číslo 2. ISSN 1211-3557.
- [5] BELZA, J. *Konstrukční elektronika A Radio. Zapojení s operačními zesilovači*. Praha: Amaro, I/1996. Číslo 3. ISSN 1211-3557.
- [6] KRATOCHVÍL, T. *Korekční zesilovače a nízkofrekvenční filtry*. Brno. Prezentace. VUT v Brně, FEKT Ústav radioelektroniky. Vedoucí práce prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.
- [7] TESLA AZS222. *Fyziologická regulace* [online]. [cit. 2016-11-07]. Dostupné z: <http://petrkr.net/a/AZS222.gif>

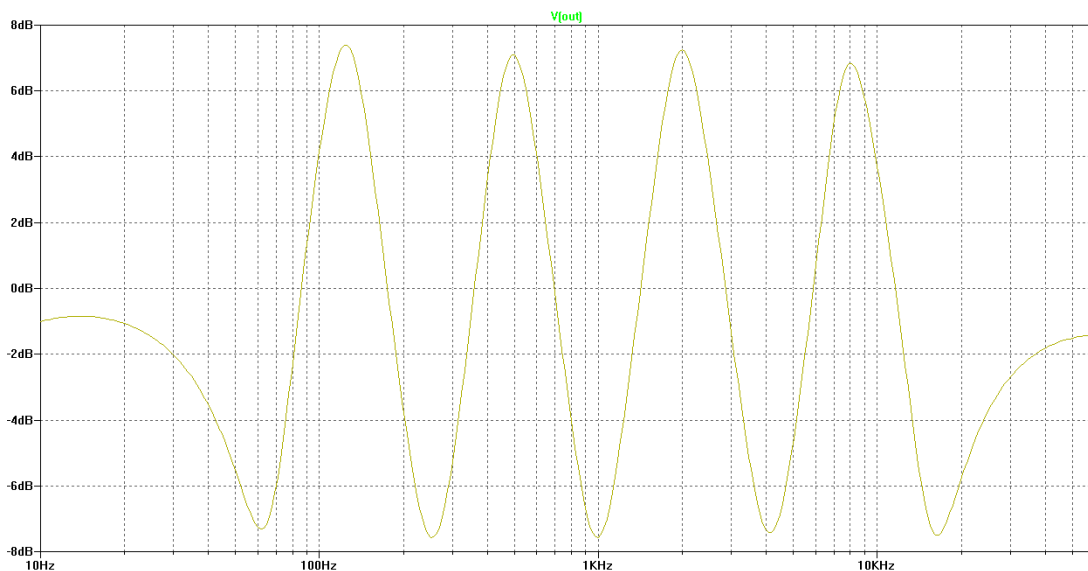
SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

Q	Činitel jakosti
B	Šířka pásma
f	Frekvence
EQ	Ekvalizér
DPS	Deska plošných spojů
DP	Dolní propust
HP	Horní propust
PP	Pásmová propust
PZ	Pásmová zadrž
L	Indukce (cívka)
C	Kapacita (kondenzátor)
R	Rezistor
OZ	Operační zesilovač

A PŘÍLOHA - OSTATNÍ SIMULACE

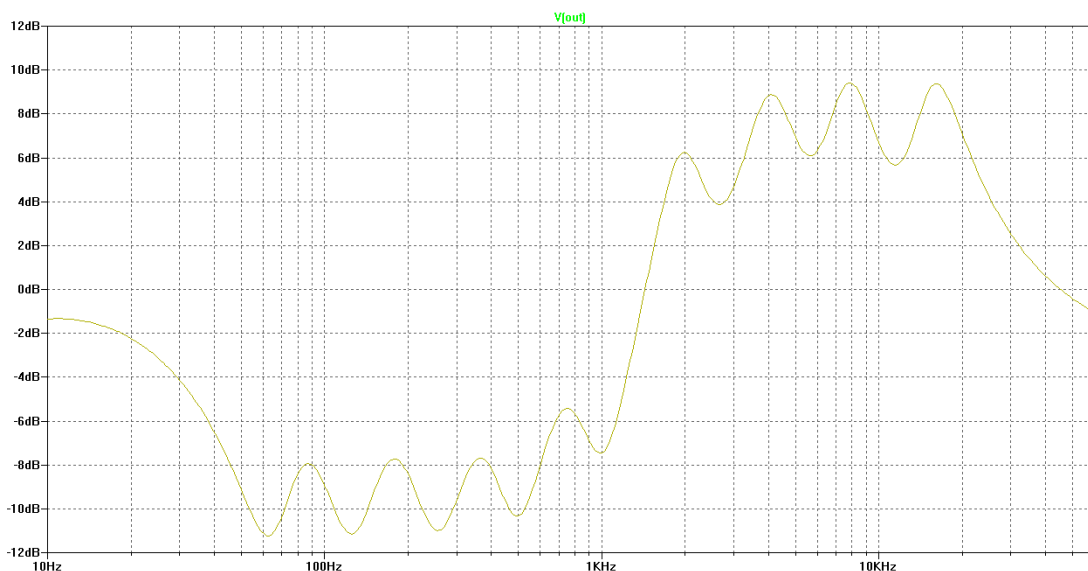
Pásmo: 63 Hz, 250 Hz, 1 kHz, 4 kHz, 16 kHz jsou potlačována

Pásmo: 125 Hz, 500 Hz, 2 kHz a 8 kHz jsou zdůrazňována



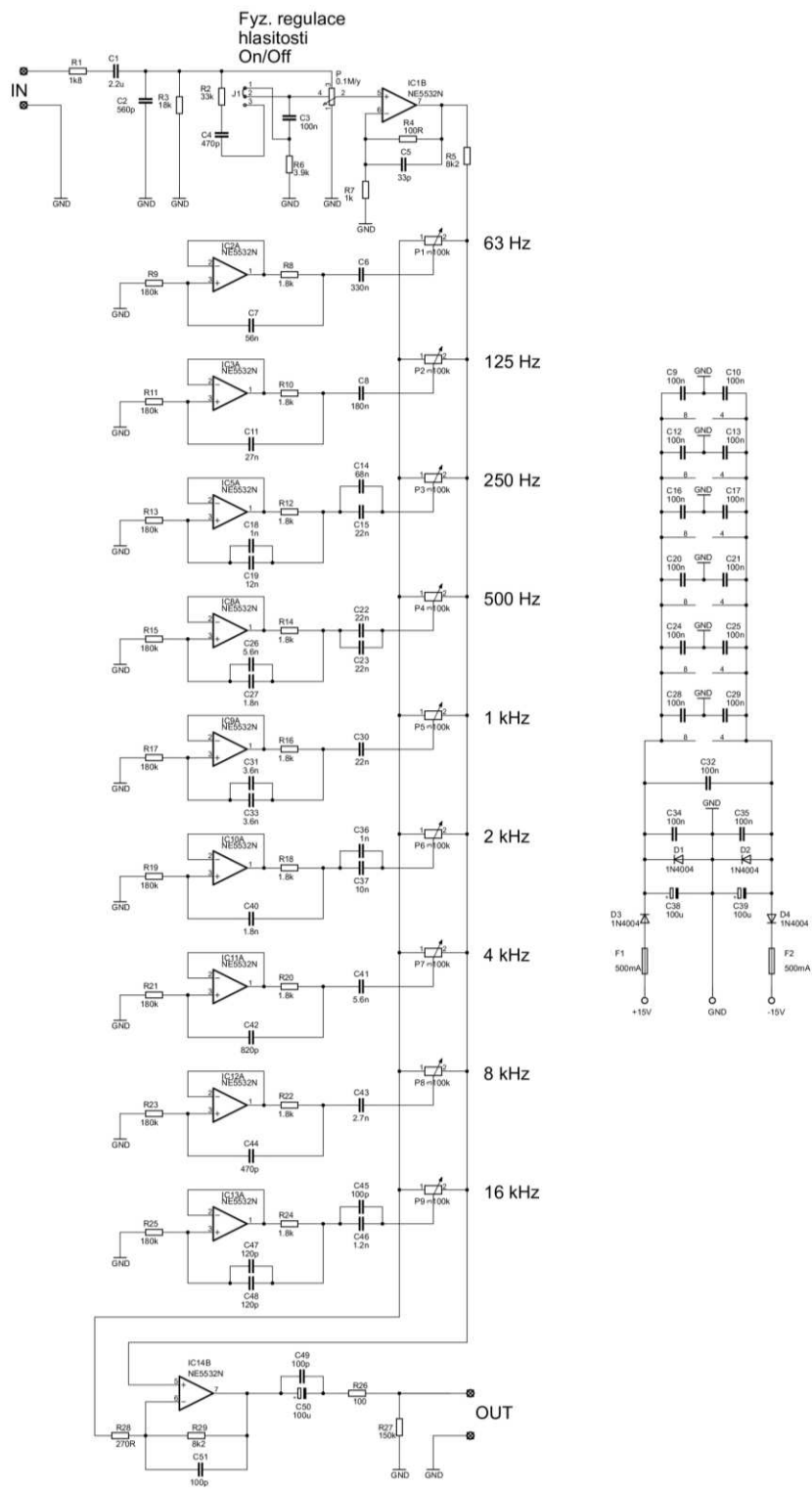
Pásmo: 63 Hz, 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz jsou potlačována

Pásmo: 2 kHz, 4 kHz, 8 kHz a 16 kHz jsou zdůrazňována

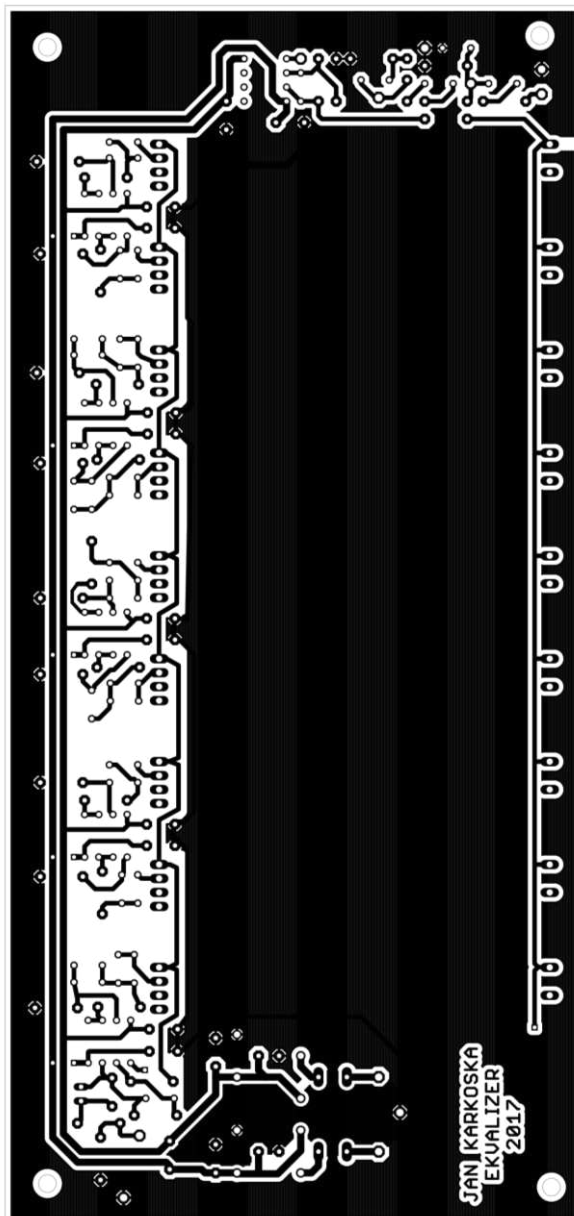


B PŘÍLOHA – NÁVRH EKVALIZÉRU

B.1 Schéma zapojení ekvalizéru

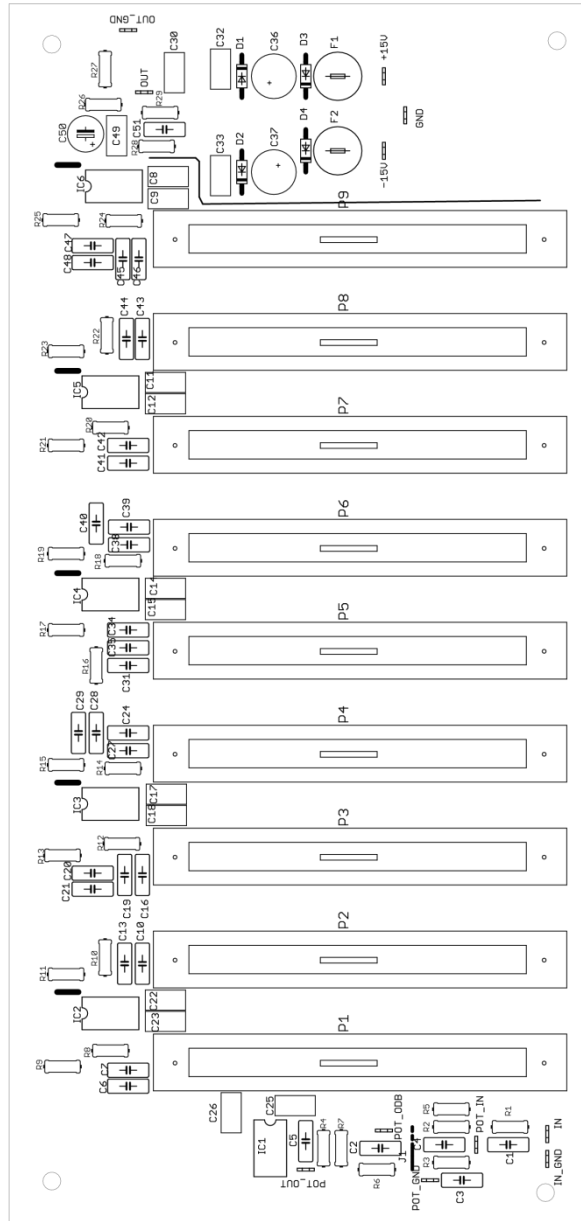


B.2 Deska plošných spojů ekvalizéru



Rozměry desky jsou 218 x 104 [mm], měřítko M1:1

B.3 Osazovací plán ekvalizéru



C PŘÍLOHA - SEZNAM SOUČÁSTEK

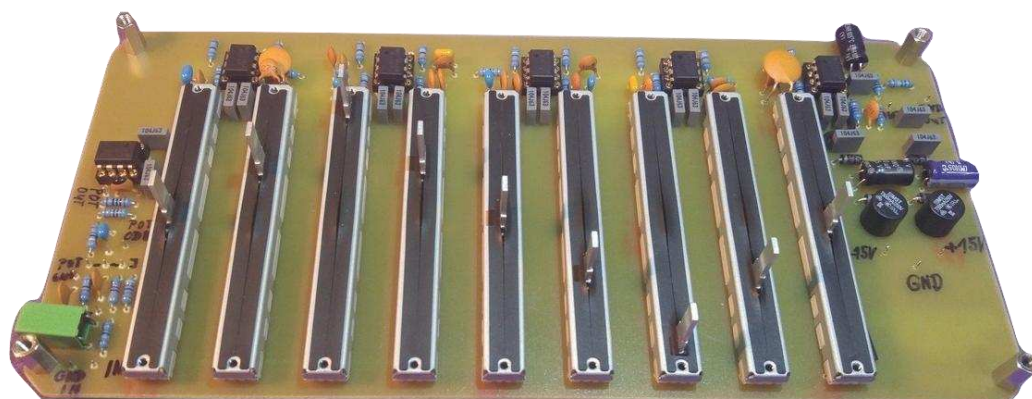
Seznam součástek je řazen podle počtu kusů dané součástky.

Počet	Popis	Hodnota	Název
16	Kondenzátor - foliový	100n	C28, C29, C30, C31, C32, C33, C34, C35, C36, C37, C38, C39, C40, C41, C42, C51
11	Násuvná vidlice - konektor	-	+15V, -15V, GND, IN, IN_GND, OUT, OUT_GND, POT_GND, POT_IN, POT_ODB, POT_OUT
10	Drátový rezistor - 0.6W	1k8	R1, R8, R10, R12, R14, R16, R18, R20, R22, R24
9	Potenciometr ALPS - tahový	100k/lin	P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10
9	Drátový rezistor - 0.6W	180k	R9, R11, R13, R15, R17, R19, R21, R23, R25
6	Operační zesilovač - duální - NE5532	-	IC1, IC2, IC3, IC4, IC5, IC6
4	Dioda - 1n4004	-	D1, D2, D3, D4
4	BNC konektor, do panelu	-	-
4	Kondenzátor - keramický	22n	C9, C11, C44, C46
3	Zdířka panelová - banánek	4mm	-
3	Kondenzátor - elektroický	100u/25V	C12, C20, C25
2	Kondenzátor - keramický	1.8n	C8, C13
2	Kondenzátor - keramický	100p	C23, C50
2	Kondenzátor - keramický	120p	C18, C49
2	Kondenzátor - keramický	1n	C16, C43
2	Kondenzátor - keramický	2.7n	C21, C47
2	Kondenzátor - keramický	470p	C2, C17
2	Kondenzátor - keramický	5.6n	C15, C45
2	Pojistka radiální SCHURTER MST 250 - 500mA	500mA	F1, F2
2	Kondenzátor - keramický	820p	C10, C14
2	Drátový rezistor - 0.6W	8k2	R7, R26
1	Jumper switch	-	J1
1	Potenciometr s odbočkou - TP289D	100k/y	P1
1	Kondenzátor - keramický	1.2n	C19
1	Kondenzátor - keramický	27n	C22
1	Kondenzátor - keramický	330n	C4
1	Kondenzátor - keramický	100n	C3

Počet	Popis	Hodnota	Název
1	Kondenzátor - keramický	10n	C48
1	Kondenzátor - keramický	12n	C6
1	Kondenzátor - keramický	33p	C5
1	Kondenzátor - keramický	180n	C24
1	Kondenzátor - keramický	560p	C27
1	Kondenzátor - keramický	56n	C1
1	Kondenzátor - keramický	68n	C7
1	Kondenzátor - foliový	2.2u	C26
1	Drátový rezistor - 0.6W	3k9	R4
1	Drátový rezistor - 0.6W	100	R27
1	Drátový rezistor - 0.6W	100R	R6
1	Drátový rezistor - 0.6W	150k	R28
1	Drátový rezistor - 0.6W	18k	R2
1	Drátový rezistor - 0.6W	1k	R5
1	Drátový rezistor - 0.6W	270R	R29
1	Drátový rezistor - 0.6W	33k	R3
1	Krabička plastová - KP13 - 250x149x90mm	-	-
1	Páčkový přepínač - P-KNX2	-	-

D PŘÍLOHA - KONSTRUKCE EKVALIZÉRU

D.1 Konstrukce desky plošných spojů



D.2 Devítipásmový ekvalizér - zepředu



D.3 Devítipásmový ekvalizér - zezadu

