



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY

A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

MĚŘICÍ AUDIO PŘEDZESILOVAČ PRO KOMUNIKÁTOR

INSTRUMENTATION AUDIO PREAMPLIFIER FOR HEADSET

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Václav Zemánek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Pavel Hanák, Ph.D.

BRNO 2016

ABSTRAKT

Předzesilovač je elektrický obvod, který zpracovává malé signály pro další zesílení či zpracování. Šumový výkon předzesilovače je klíčový; musí být co nejmenší. V řetězci, kde se signál vícekrát zesiluje nebo zpracovává, má největší podíl na výsledný šum právě první blok.

KLÍČOVÁ SLOVA

předzesilovač, operační zesilovač, šum

ABSTRACT

A preamplifier is an electrical circuit, which prepared small signals for further amplification or processing. A noise performance of the preamplifier is most important; it has to be small, as it can. The biggest part on the output noise have the first block, if it is a more processing in a string.

KEYWORDS

preamplifier, operational amplifier, noise

ZEMÁNEK, Václav *Měřící audio předzesilovač pro komunikátor*: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2015. 33 s. Vedoucí práce byl Ing. Pavel Hanák, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Měřicí audio předzesilovač pro komunikátor“ 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 autorského 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.

Brno

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Pavlu Hanákovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno

.....

podpis autora



Faculty of Electrical Engineering
and Communication
Brno University of Technology
Purkynova 118, CZ-61200 Brno
Czech Republic
<http://www.six.feec.vutbr.cz>

PODĚKOVÁNÍ

Výzkum popsany v této bakalářské práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

Brno

.....

podpis autora



EVROPSKÁ UNIE
EVROPSKÝ FOND PRO REGIONÁLNÍ ROZVOJ
INVESTICE DO VAŠÍ BUDOUCNOSTI



OBSAH

Úvod	1
1 Předzesilovač	2
2 Rozbor problematiky	3
2.1 Požadavky na elektrické rozhraní stanovené v doporučení ITU-T Rec. P.381 (08/2012).	3
2.1.1 Požadavky pro reproduktor	3
2.1.2 Požadavky pro mikrofon	3
2.2 Operační zesilovač	3
2.3 Ideální OZ	4
2.3.1 Vlastnosti ideálního OZ	4
2.4 Zpětná vazba	5
2.5 Invertující OZ	5
2.6 Neinvertující OZ	6
3 Šum	8
3.1 Barvy šumů	8
3.1.1 Bílý šum (white noise)	8
3.1.2 Růžový šum (pink noise)	8
3.1.3 Hnědý šum (Brown noise)	9
3.1.4 Černý šum (dark noise)	9
3.2 Šumy operačních zesilovačů	9
3.2.1 Napěťový šum	9
3.2.2 Proudový šum	10
3.2.3 Odporový šum	10
3.3 Příspěvky šumu	11
3.4 Dominantní šum	12
3.5 Typy rezistorů	12
4 Výsledky studentské práce	14
4.1 Zesilovač pro reproduktor sluchátka	14
4.1.1 TPA 6120	14
4.1.2 Nastavení zesílení	15
4.2 Mikrofonní zesilovač	15
4.2.1 OPA 827	16
4.2.2 Zesílení(2.5)	16
4.3 Zdroj pro napájení obvodů	17

4.3.1	LTC3261	17
4.3.2	Účinnost	18
4.4	ADM7151	19
5	Závěr	20
	Literatura	21
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	22
	Seznam příloh	23
A	Obsah přiloženého CD	24
B	Obvody předzesilovače	25
B.1	Schéma zapojení předzesilovače	25
B.2	Deska plošného spoje-bottom(strana spojů)	26
B.3	Deska plošného spoje-top(strana spojů)	26
B.4	Osazovací plán-top(strana součástek)	27
B.5	Osazovací plán-bottom(strana součástek)	27
B.6	Seznam použitých součástek	28
C	Měření předzesilovače	29
C.1	Měření zesilovače pro reproduktor	29
C.1.1	Zesílení	29
C.1.2	THD Ratio	30
C.1.3	Přeslech mezi kanály	30
C.1.4	THD+N Ratio	31
C.2	Měření zesilovače pro mikrofon	32
C.2.1	Zesílení	32
C.2.2	THD Ratio	33
C.2.3	THD+N Ratio	33

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Blokové schéma laboratorního prvku	2
2.1	Ideální OZ	4
2.2	(a)Kladná zpětná vazba a (b)záporná zpětná vazba	5
2.3	Invertující zapojení OZ	6
2.4	Neinvertující zapojení OZ	7
3.1	Napěťový šum	9
3.2	Proudový šum	10
3.3	Odporový šum	10
3.4	Zapojení	11
4.1	Schéma zapojení TPA6120	15
4.2	Schéma OPA827	16
4.3	Schéma LTC3261	17
4.4	Schéma ADM7151	19
B.1	Schéma předzesilovače	25
B.2	Deska plošného spoje předzesilovače	26
B.3	Deska plošného spoje předzesilovače	26
B.4	Osazovací plán předzesilovače-vrstva top	27
B.5	Osazovací plán předzesilovače-vrstva bottom	27
C.1	Zesílení	29
C.2	THD Ratio	30
C.3	Přeslech mezi kanály	30
C.4	Přeslech mezi kanály	31
C.5	THD+N	31
C.6	Zesílení	32
C.7	THD Ratio	33
C.8	THD+N	33

SEZNAM TABULEK

3.1	příspěvky šumů	12
3.2	Proudový šum v rezistorech s nominální hodnotou $1k\Omega$	13
4.1	Headphone zesilovače	14
4.2	Mikrofonní zesilovače	15
4.3	Účinnost	18
B.1	Seznam součástek	28

ÚVOD

Tématem této bakalářské práce je návrh předzesilovače pro komunikátor. Toto zapojení slouží v laboratoři pro měřicí účely. Jedná se o zařízení, které zpracovává a zesiluje signály vedoucí do a z telefonního sluchátka, které obsahuje mikrofon a reproduktor. Hlavním parametrem pro obvod je nízký šum výsledného signálu. Tedy aby odstup signálu od šumu byl co možná největší.

Úkolem této práce je vytvořit v prostředí návrhového systému Eagle schéma zesilovače pro mikrofon a reproduktor ve sluchátku a navrhnout desku pro realizaci. Výslednou desku poté osadit a uvést do funkčního stavu a provést měření.

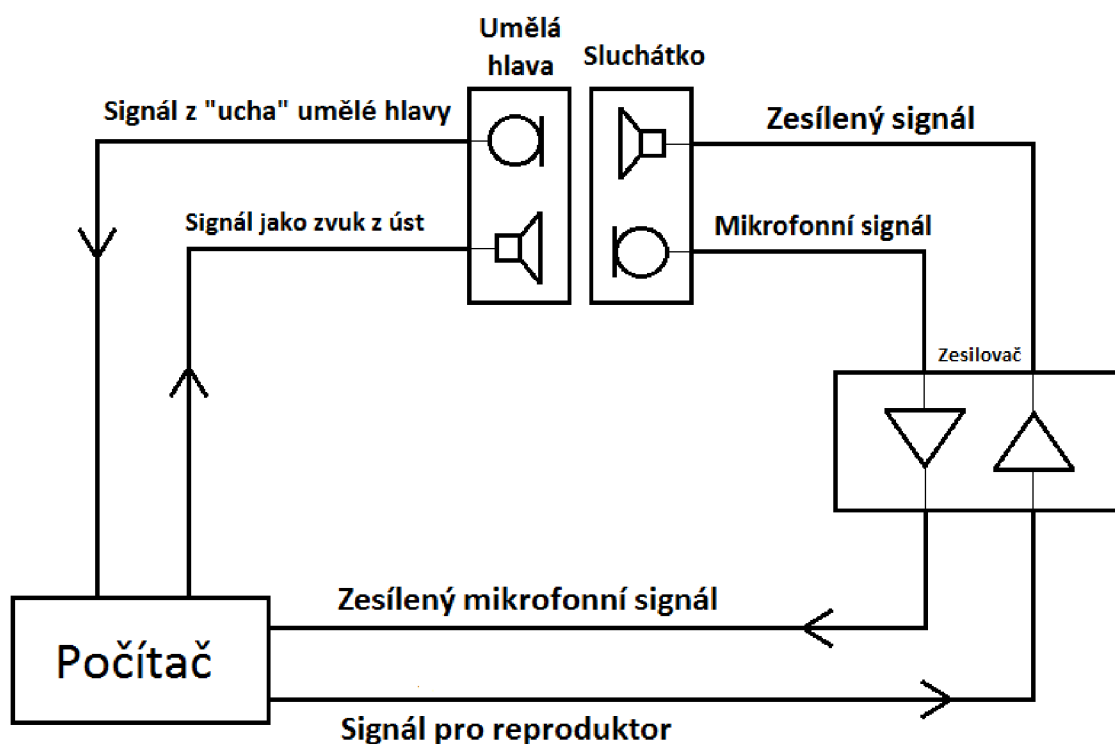
Úvodní část se zabývá operačními zesilovači obecně. Jedná se o základní a hlavní prvek pro návrh a realizaci předzesilovače. Pojednává o typech OZ a o jejich vlastnostech. Na tuto část navazuje kapitola o šumu, která obsahuje druhy šumů, kde všude se vyskytuje a jaký vliv má na signál.

Poslední kapitola je zaměřena na cílový návrh předzesilovače. Zde je uvedeno a vysvětleno, jak jsem postupoval při výběru OZ, jaké důležité parametry jsem musel zohlednit a je podrobně popsáno schéma, které jsem navrhl.

V příloze jsou poté uvedeny grafy a informace z konečného měření předzesilovače.

1 PŘEDZESILOVAČ

Účelem mé bakalářské práce je navrhnout předzesilovač pro komunikátor, což v praxi znamená, zesílit mikrofonní a reproduktorový signál ze sluchátka. Toto zapojení bude fungovat jako součást měřícího prvku v laboratoři, konkrétně jako součást simulátoru hlavy Bruel&Kjar 4128D. Zařízení jako takové musí mít vyrovnanou kmitočtovou charakteristiku, co nejnižší šum a musí splňovat požadavky na elektrické rozhrané stanovené v doporučení ITU-T Rec. P.381 (08/2012).



Obr. 1.1: Blokové schéma laboratorního prvku

První signál, který je přiveden na reproduktor umělé hlavy (představující ústa) je snímán mikrofonom ve sluchátku. Tento nasnímaný signál je přiveden do předzesilovače kde je zesílen $1000\times$ a vede zpátky do počítače, kde jsou jeho hodnoty zaznamenány.

Druhý signál z počítače je přiveden do předzesilovače, kde je jeho zesílení jedna. Tento nezesílený signál pokračuje do reproduktoru sluchátka. Mikrofon v hlavě, představující ucho, ho snímá a posílá dál do počítače k zapsání hodnot.

2 ROZBOR PROBLEMATIKY

2.1 Požadavky na elektrické rozhraní stanovené v doporučení ITU-T Rec. P.381 (08/2012).

Princip tohoto dokumentu je v zajištění adekvátní kompatibility mezi mobilním digitálním terminálem a kabelovém analogovém headsetu. Jednou z výhod je, že uživatel si může vybrat jakýkoliv jeho oblíbený typ headsetu. Toto doporučení není aplikovatelné na terminály určené výhradně pro digitální headsety.

ITU-T doporučení se skládá z dalších odkazů obsahujících ustanovení, která prostřednictvím odkazů v tomto textu tvoří ustanovení tohoto doporučení.

Ve stručnosti tento dokument obsahuje sadu testů a nastavení pro správné fungování celého zapojení. [8]

2.1.1 Požadavky pro reproduktor

Výstup předzesilovače připojeného na vstup konektoru sluchátka musí obsahovat DC svorku. Výstupní impedance musí být menší jak $1\text{ k}\Omega$.

Vstup předzesilovače připojeného na výstup počítače musí mít vstupní impedanci 32Ω . Dynamický rozsah musí být v souladu s rozsahem výstupní úrovně poskytované z výstupu digitálního mobilního terminálu.[8]

2.1.2 Požadavky pro mikrofon

Vstupní mikrofonního předzesilovače musí splňovat podmínky. Výstupní impedance je menší jak 2Ω . Maximální výstupní napětí musí být $150\text{mV} \pm 1\text{mV}$ při zatížení $32\text{k}\Omega$ odporem.

Předpětí mikrofону musí být $2,6\text{V} \pm 1\%$. R_{bias} je odpor uvnitř vstupu předzesilovače. Tento odpor musí mít hodnotu $2,2\text{k}\Omega \pm 2\%$. Nominální citlivost musí být -60dBV . [8]

2.2 Operační zesilovač

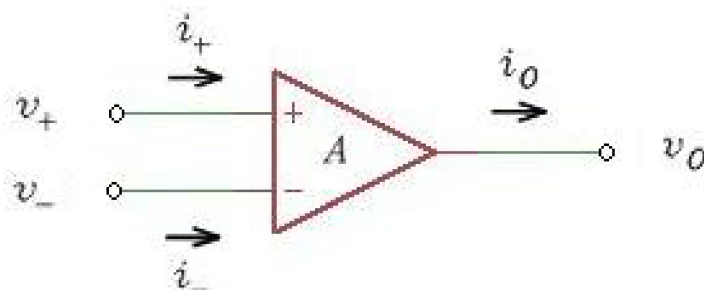
Operační zesilovač je základním prvkem pro návrh analogových obvodů. Je nejvíce používaný v zesilovačích a v analogovém zpracování signálu v rozsahu 0 až 100 kHz. Vysokofrekvenční operační zesilovače jsou používány v obvodech, kde je šířka pásma do MHz. První OZ byly konstruovány z elektronek a byly používány v analogových počítačích. Moderní OZ jsou vyráběny jako integrované obvody, přičemž jeden takový obvod se často sestává z více OZ. [1]

2.3 Ideální OZ

Ideální OZ je polovodičová součástka se dvěma vstupy a jedním výstupem, která je modelována jako napětím řízený zdroj napětí. To znamená, že jeho výstupní napětí je zisk vynásobený jeho vstupním napětím. Obvod je zobrazen na obrázku(2.1) níže. Vstupní napětí je rozdíl napětí mezi dvěma vstupními svorkami. Výstupní napětí se měří vzhledem k zemi obvodu a je dáno jako [7]

$$v_o = A(v_+ - v_-) \quad (2.1)$$

kde A je napětové zesílení, v_+ je napětí na neinvertujícím vstupu a v_- je napětí na invertujícím vstupu. [7]



Obr. 2.1: Ideální OZ

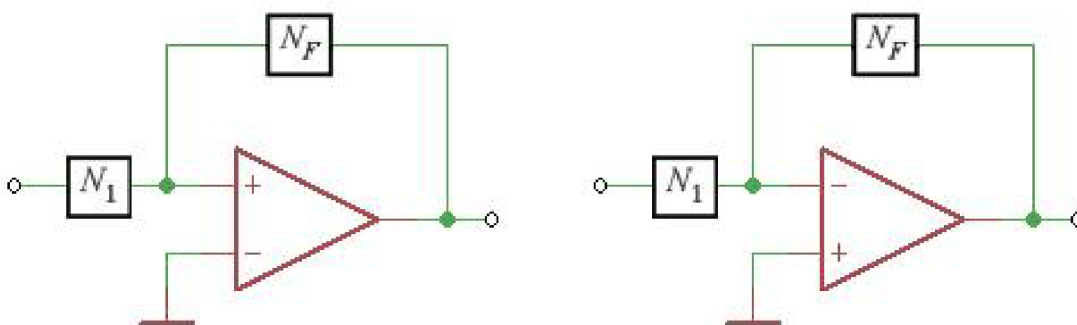
2.3.1 Vlastnosti ideálního OZ

- proud v každém vstupu OZ je roven nule. To znamená, že vstupní odpor je nekonečně velký.
- výstupní napětí je nezávislé na výstupním proudu. To znamená, že výstupní odpor je nulový.
- napětové zesílení je nekonečně velké, čili zesiluje nekonečně velkou šířku pásma.
- každý z těchto parametrů není závislý na teplotě
- protože jsou všechny součástky ideální a bez šumu, tak i výsledný šum OZ se rovná nule
- má nekonečnou vstupní a nulovou výstupní impedanci
- vstupní fázový posun ku výstupnímu je π

2.4 Zpětná vazba

Aby mohl OZ pracovat jako zesilovač, musí se zavést zpětná vazba. To znamená, že část výstupního napětí se pošle zpátky zpětnou vazbou na vstup. Touto zpětnou vazbou se nastavuje konečné zesílení OZ. [7]

Pro ilustraci zpětné vazby se podívejme na obrázky níže (2.2). Signál označený jako N_1 je signál vedoucí na vstup OZ a signál označený jako N_F je zpětnovazební signál. OZ na obrázku (2.2a) má kladnou zpětnou vazbu a OZ na obrázku (2.2b) má zápornou zpětnou vazbu. [7]



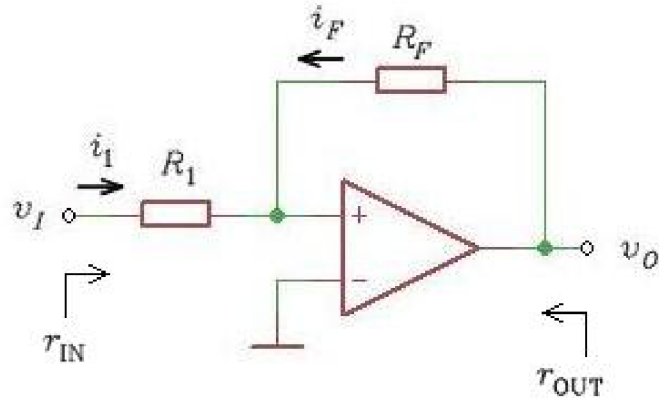
Obr. 2.2: (a)Kladná zpětná vazba a (b)záporná zpětná vazba

- je-li signál přiveden na invertující vstup a neinvertující je uzemněn, pak je signál na výstupu fázově posunut o 180° vzhledem ke vstupnímu signálu
- je-li signál přiveden na neinvertující vstup, signál je zesílen, avšak fázový posun mezi vstupním a výstupním signálem je nulový, t.j. fáze se nemění
- zpětnou vazbou se nastavuje konečné zesílení OZ

2.5 Invertující OZ

Na obrázku (2.3) je zobrazeno zapojení invertujícího OZ. Vstupní signál prochází rezistorem R_1 do vstupu v_- OZ. Rezistor R_F je zpětnovazební rezistor který je zapojen z výstupu na invertující vstup. Napětové zesílení je záporné. To je také důvod, proč se tomuto zapojení říká invertující operační zesilovač. Na obrázku je tento vstup uzemněn. [7]

Napětí z invertujícího vstupu je dáno z $v_- = -v_0/A$. Pokud je v_0 konečné a $A \rightarrow \infty$, znamená to, že $v_- \rightarrow 0$. I přes to, že vstup v_- není uzemněn, napětí je nulové, tedy virtuální zem. Protože $i_- = 0$, součet proudů v uzlu v_- musí být nula, to znamená $i_1 + i_F = 0$, kde $i_1 = v_1/R_1$ a $i_F = v_0/R_F$. [7]



Obr. 2.3: Invertující zapojení OZ

$$i_1 + i_F = 0 \Rightarrow \frac{v_I}{R_1} + \frac{v_O}{R_F} = 0$$

po úpravě můžeme dostat vzorec pro napěťové zesílení

$$\frac{v_O}{v_I} = -\frac{R_F}{R_1} \quad (2.2)$$

vstupní odpor je dán jako $r_{IN} = v_1/i_1$. Protože $v_- = 0$, znamená to, že

$$r_{IN} = R_1 \quad (2.3)$$

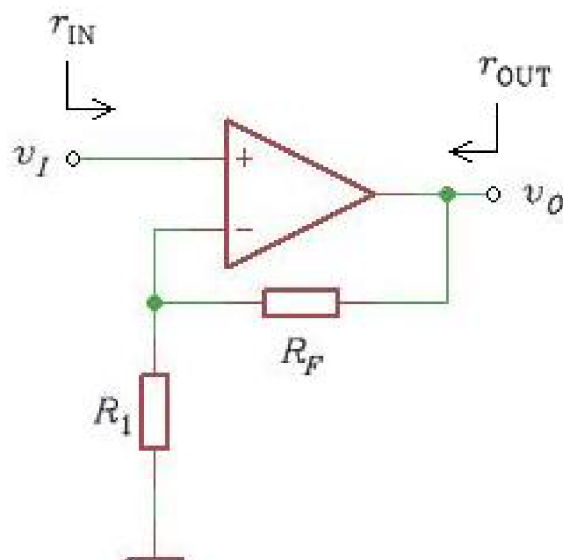
výstupní odpor se rovná výstupnímu odporu operačního zesilovače, takže [7]

$$r_{OUT} = 0 \quad (2.4)$$

2.6 Neinvertující OZ

Na obrázku (2.4) je zapojení neinvertujícího OZ. Do neinvertujícího vstupu je přiveden signál v_I . Napěťový dělič se sestává z odporů R_F a R_1 , připojených z výstupního uzlu na invertující vstup. Obvod je nazýván neinvertující z toho důvodu, že jeho napěťové zesílení je kladné. Pokud porovnáme invertující a neinvertující zesilovač, může se zdát, že jsou shodné, pokud je splněna podmínka $v_I=0$. Tedy jediný rozdíl mezi těmito zesilovači je uzel, do kterého přivádíme vstupní napětí. [7]

Napěťový rozdíl mezi dvěma vstupy OZ je $v_+ - v_- = v_O/A$, jak je vidět z obrázku (2.4). Jestliže je v_0 konečné a $A \rightarrow \infty$, znamená to, že $v_+ \rightarrow v_-$. Protože zde není napěťový rozdíl mezi dvěma vstupy, je mezi nimi „virtuální zkrat“. Pro $i_- = 0$ za podmínky, že $v_+ = v_-$ vyžaduje v_I a v_0 ke splnění rovnice [7]



Obr. 2.4: Neinvertující zapojení OZ

$$v_+ = v_- \Rightarrow v_I = v_O \frac{R_1}{R_F + R_1}$$

kde napěťové dělení bylo použito pro v_- . Převedením získáme zesílení

$$\frac{v_O}{v_I} = 1 + \frac{R_F}{R_1}. \quad (2.5)$$

Vstupní a výstupní odpor je dán vztahem [?]

$$r_{IN} = \infty \quad (2.6)$$

3 ŠUM

Výstup operačních zesilovačů vždy obsahuje signály, které není možné předpovědět ze vstupu a přesně známých přenosových funkcí a se zohledněním všech impedancí známých i neznámých. Těmto nechtěným signálům se říká šum. Šum může být zaveden ve smyčce samotného zesilovače, komponenty použitých ve zpětné vazbě a napájení; nebo může být přivedený nebo naindukovaný na vstupu, výstupu, zemi, nebo z blízkých zdrojů. [2]

Šum je stochastický signál a je frekvenčně závislý.

3.1 Barvy šumů

V audioinženýrství, elektronice, fyzice a v dalších odvětvích, je barva šumového signálu obecně chápána jako určitá charakteristika spektra. Různé barvy šumů mají vyjadřovat různé vlastnosti. Toto přirovnání barvy k šumovému signálu je podobné jako přirovnání barvy v muzice, třeba barvy tónu. Toto se velmi často používá pro vyjádření zvuku.[3]

3.1.1 Bílý šum (white noise)

- tak jako bílé světlo obsahuje všechny frekvence, tak bílý šum má taky, tedy pouze teoreticky, nekonečný frekvenční rozsah.
- je to stochastický signál který má rovnoměrnou výkonovou spektrální hustotu. Takže mezi 100 Hz a 150 Hz, což je šířka pásma 50 Hz, je stejný výkon jako mezi 1000 Hz a 1050 Hz. Čili výkon signálu je stejný v jakémkoli pásmu shodné šířky.
- je používán v oblasti architektonické akustiky, kde slouží jako podkladový zvuk. Taktéž je používán v sirénách pohotovostních vozidel, protože nezpůsobuje ozvěnu a je snadnější určit směr signálu.[3]

3.1.2 Růžový šum (pink noise)

- frekvenční spektrum je lineární v logaritmickém prostředí. To znamená, že mezi frekvencemi 100 a 150 Hz je šířka pásma růžového šumu stejná, jako mezi frekvencemi 10000 a 15000 Hz.
- Spektrální hustota výkonu klesá o tři decibely na oktávu (hustota je úměrná $1/f$) se zvyšující se frekvencí. Z toho důvodu se mu často říká „ $1/f$ šum“. [3]

3.1.3 Hnědý šum (Brown noise)

- hnědý, nebo taky někdy nazývaný červený, šum je podobný šumu růžovému. Hnědému šumu ale klesá spektrální hustota výkonu o šest decibel na oktávu se zvyšující se frekvencí (hustota je úměrná $1/f^2$). Je pojmenován podle zkomození Brownova pohybu. Nemá nic společného s tím, že by výkonové spektrum naznačovalo hnědou barvu.
- Hnědý šum může být generován integrováním bílého šumu. [3]

3.1.4 Černý šum (dark noise)

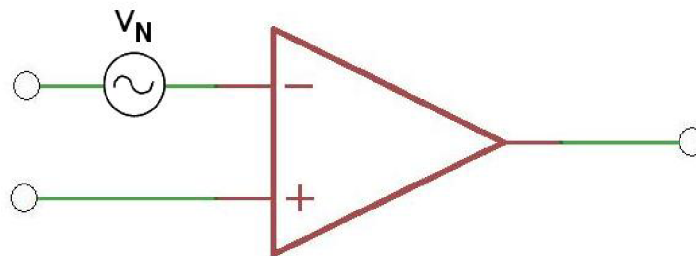
- spektrální hustota výkonu je nulová ve všech frekvenčních pásmech, až na několik náhodných úzkých pásem nebo špiček. Jedná se tedy o ticho.
- hustota je úměrná $1/f^x$, kde $x > 2$ [3]

3.2 Šumy operačních zesilovačů

- operační zesilovač obsahuje několik vnitřních zdrojů šumu, jako například napěťový šum, proudový šum, odporový šum, KT/C šum a.j. a je obvyklé je modelovat jako externí zdroje šumu. [1]

3.2.1 Napěťový šum

Model jednoduchého napěťového šumu je ukázán na obrázku (3.1) níže. Napěťový šum různých operačních zesilovačů může kolísat od $1\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ do $20\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ ale někdy může i víc. Bipolární operační zesilovače mívají nižší napěťový šum jak JFET, nicméně je možné navrhnu JFET operační zesilovač s nízkým napěťovým šumem, ale za cenu velké vstupní kapacity. Napěťový šum je uveden v datasheetu a není možné ho předpovědět z jiných parametrů. [1]

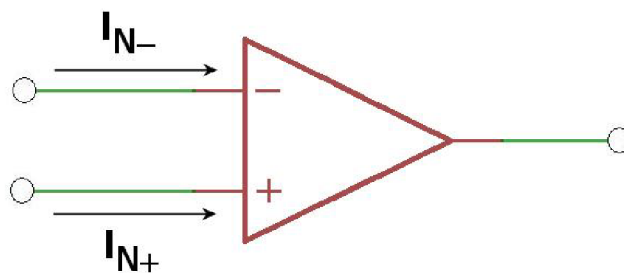


Obr. 3.1: Napěťový šum

3.2.2 Proudový šum

Proudový šum (obrázek (3.2)) může kolísat mnohem více jak napěťový šum, v závislosti na vstupní struktuře. Rozsah je od $0,1 \text{ fA}/\sqrt{\text{Hz}}$ do jednotek $\text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$. Není to vždycky uvedeno v datasheetu, ale může být vypočítán v případech jako jednoduchých BJT nebo JFET, kde veškerý klidový proud teče do vstupu, protože v těchto případech je to zjednodušeně Schottkyho šum z klidového proudu.

Proudový šum je důležitý jenom v případě, kdy teče vstupní impedancí a tím generuje napěťový šum. Udržování relativně nízké impedance na vstupu operačního zesilovače přispívá k minimalizaci proudového šumu[1]



Obr. 3.2: Proudový šum

3.2.3 Odporový šum

Je potřeba taky vědět, že zapojení s operačním zesilovačem vyžaduje externí odpor a všechny odpory mají Johnsonův šum.

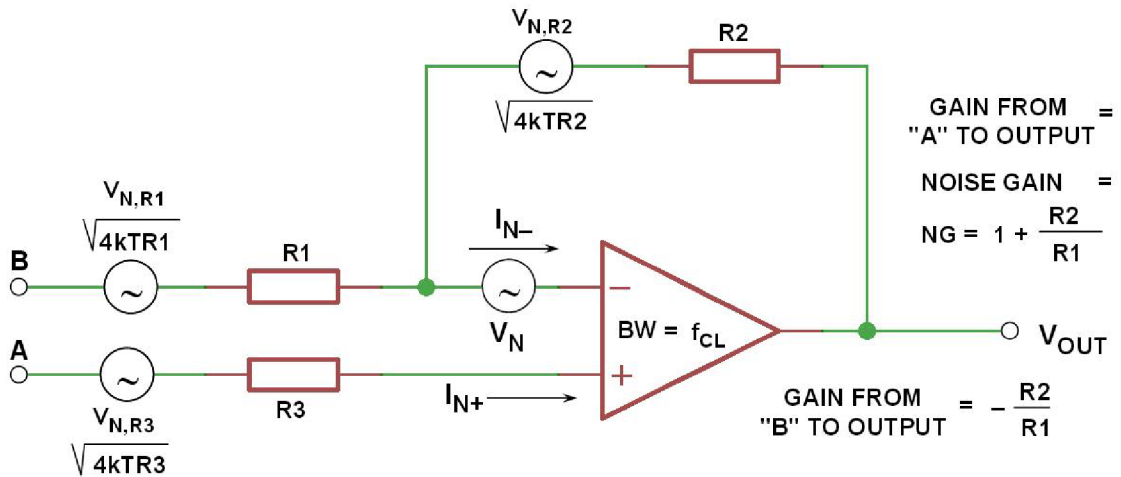
Vzorec je $\sqrt{4kTB\overline{R}}$, kde k je Boltzmanova konstanta ($1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$), T je absolutní teplota, B je šířka pásma a R je hodnota odporu. Tohle ovšem je vnitřní vlastnost, není možné získat odpor bez Johnsonova šumu. [1]



Obr. 3.3: Odporový šum

3.3 Příspěvky šumu

Když se podíváme na obrázek (3.4), který se skládá z operačního zesilovače a tří odporů, tak najdeme šest separátních zdrojů šumu: Johnsonův šum ze tří odporů, napěťový šum operačního zesilovače a proudový šum v každém vstupu operačního zesilovače. Každý z těchto šumů má příspěvek na celkovém výstupním šumu. Šum je obecně specifikován jako RTI (referred to the input), ale k získání výsledného šumu se musí vypočítat RTO (referred to the output), což je šum na výstupu.[1]



Obr. 3.4: Zapojení

$$RTI = \sqrt{BW} \cdot \sqrt{V_N^2 + 4kTR_3 + 4kTR_1 \left[\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right]^2 + I_{N+}^2 + \sqrt{+I_{N-}^2 \left[\frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \right]^2 + 4kTR_2 \left[\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right]^2}} \quad (3.1)$$

- $BW = 1,57f_{CL}$

Díky rovnici 4.1 můžeme vypočítat šum na výstupu

$$RTO = N_G \times RTI \quad (3.2)$$

Při vybírání vhodného operačního zesilovače pro mikrofon mě zajímalo, který příspěvek šumu má největší podíl na výsledném šumu. Vložil jsem proto vzorec (RTI) do excelu a měnil hodnoty u V_N^2 , I_{N+}^2 a I_{N-}^2 a pozoroval, jaký vliv má změněná hodnota na výsledek. Z toho „pokusu“ jsem zjistil, že proudový šum má příspěvek asi 50× menší oproti napěťovému šumu. Proto jsem OZ vybíral s co možná nejmenším napěťovým šumem.[1]

3.4 Dominantní šum

Přesné identifikování dominantního šumu je důležité ke správnému návrhu. Zvažme například OP27, operační zesilovač s nízkým napětovým šumem ($3\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$), ale s poměrně vysokým proudovým šumem ($1\text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$). S nulovou zátěží na vstupu bude dominantní napětový šum, jak je ukázáno v tabulce 3.1 (levý sloupec), protože jak proudový, tak Johnsonův šum je rovný nule.

Vstupní zátěž $3\text{ k}\Omega$ (prostřední sloupec) ve které teče proud $1\text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ se rovná napětovému šumu. Ale Johnsonův šum ze $3\text{ k}\Omega$ rezistoru je $7\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ a stává se dominantním.

Se zátěží $300\text{ k}\Omega$ na vstupu se proudový šum zvyšuje $100\times$ na $300\text{ nA}/\sqrt{\text{Hz}}$, napětový šum se stále nemění a Johnsonův šum vzroste na desetinásobek. V tomto případě je dominantní proudový šum.[1]

Tab. 3.1: příspěvky šumů

Hodnoty R	0	$3\text{ k}\Omega$	$300\text{ k}\Omega$
Napětový šum	3	3	3
Proudový šum	0	3	300
Johnsonův šum	0	7	70
	RTI šum($\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$)		

3.5 Typy rezistorů

V praxi se obvykle používá několik typů odporů, takzvané: uhlíkové (carbon), tenkovrstvé (thin film), tlustovrstvé (thick film) a hliníkové (metal foil) nebo drátové (firewound). Každý typ má svoji specifickou charakteristiku pro rozdílné použití s různými parametry. [6]

Uhlíkové odpory byly nejvíce používané odpory v elektronice. Ale od doby, kdy jsou na trhu SMD součástky a všechno se zmenšuje, jejich použitelnost klesá. Jsou velké a nepraktické. Vyrábějí se v různých velikostech podle jejich výkonu. Hodnota daného odporu a tolerance se dá vyčíst z odporového barevného kódu.[5]

Tlustovrstvé odpory jsou vyrobené ze směsi vodivých částic (kovových zrn) se skelným pojivem a organickou tekutinou. Tato „směs“ je nanášena na keramický substrát a vypálena v troubě. Během tohoto procesu se vodivé částice spojí se substrátem a vzniká tlustovrstvý odpor. Jsou nejvíce používané v obvodech s vysokou stabilitou a přesností a s nízkým šumem. [6]

Tenkvrstvé odpory jsou vyrobeny rozprašováním kovu nebo slitiny na izolační substrát. Tyto odpory jsou používány doslova v každém typu elektrického zařízení; pokud má baterku nebo AC zástrčku, obsahuje pravděpodobně tyto odpory. [4]

Hliníkové nebo drátové odpory jsou vyrobeny z fólií a drátů z různých kovových slitin připevněných k izolačnímu substrátu.

Pro moji práci použiji odpory tlustovrstvé. Nejsou tak drahé jako tenkovrstvé a pro mé podmínky jsou dostačující. [6]

Tab. 3.2: Proudový šum v rezistorech s nominální hodnotou $1k\Omega$

Frekvence	thick film	thin film	carbon(Hz)
1	500	80	2
10	180	11	1
100	60	7	1
1000	19	1	1
10000	7	1	1
(Hz)	(nA/ \sqrt{Hz})		

4 VÝSLEDKY STUDENTSKÉ PRÁCE

Předzesilovač bude sloužit jako součást simulátoru hlavy Bruel&Kjar 4128D, takže musí mít co nejmenší šum, vyrovnanou kmitočtovou charakteristiku a musí splňovat požadavky na elektrické rozhraní stanovené v doporučení ITU-T Rec. P.381 (08/2012)(2.1). Úkol, který bude předzesilovač plnit, je zesílit signály z mikrofonu a do reproduktoru sluchátka, které bude umístěné na umělé hlavě v laboratoři, a posílat informace dál do počítače, kde budou zpracovány.

4.1 Zesilovač pro reproduktor sluchátka

Při výběru OZ pro reproduktor jsem našel jenom jediný, který by měl dostatečný výstupní výkon. U všech ostatním se tato hodnota pohybovala v jednotkách desetinných wattů, což bylo pro mé účely málo. Další jeho velkou výhodou je velmi nízké zkreslení.

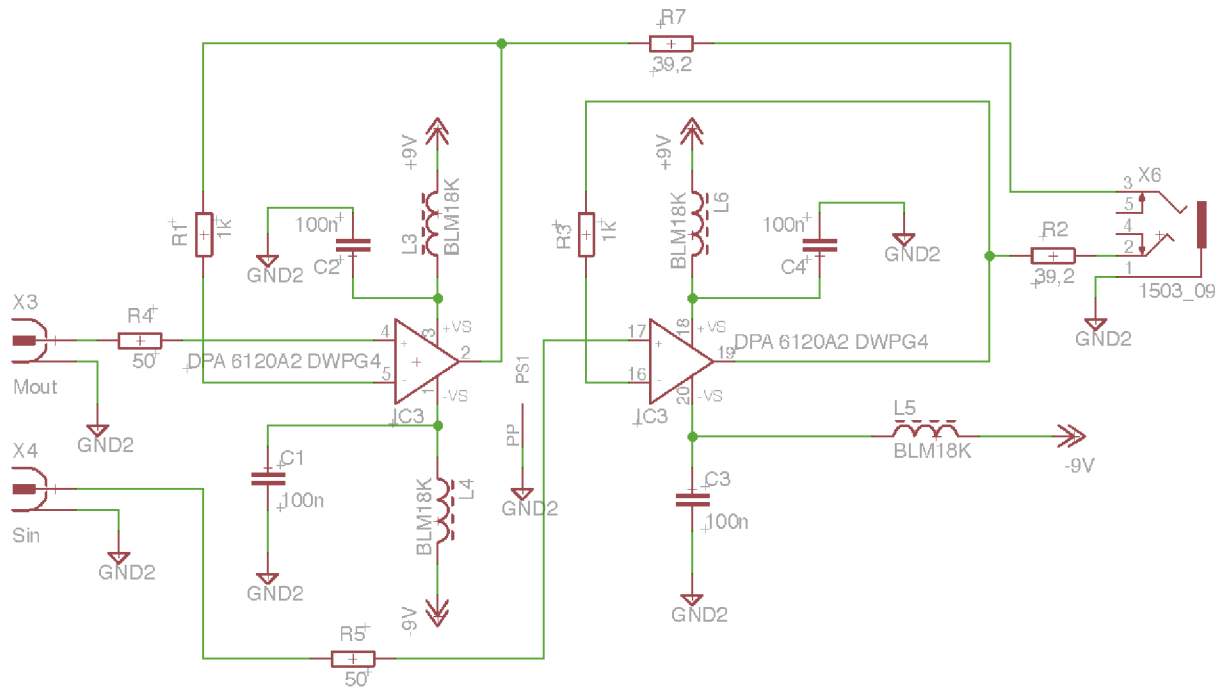
Tab. 4.1: Headphone zesilovače

OZ	Výstupní výkon (W)	Zkreslení (%)	PSRR (dB)	Kanály
TPA6120	1,5	0.000635	75	Stereo
TPA6133	0,138	0,008	109	Stereo
LM4911	0,145	0,1	65	Stereo

4.1.1 TPA 6120

Jedná se o dva výkonové OZ v jednom pouzdře s velkým odstupem signálu od šumu a velice nízkým zkreslením. Napájecí rozsah je od 5 do 15V symetrického napětí. Díky proudové zpětné vazbě poskytuje TPA6121 velkou šířku pásma, extrémě nízký šum a navíc dynamický rozsah 128dB. Další výhodou je velmi malý přeslech mezi kanály. Mojí prvotní úvahou bylo zvolit dva samostatné jednokanálové zesilovače, abych eliminoval tento parametr. TPA6120 je ale velmi dobře řešený a přeslech mezi kanály je -106dB, což můžu v mém případě zanedbat. Navíc ušetřím místo na DPS.

Přes odpory R_4 a R_5 je přiveden signál na neinvertující vstup. Zesílení je realizováno zpětnou vazbou, která se sestává z odporů R_1 , případně R_3 a je připojena z výstupů na invertující vstupy zesilovačů. Na výstupu zesilovače jsou zapojeny odpory R_7 a R_2 kvůli oddělení zesilovače od kapacitní zátěže. To zabrání oscilaci. Stabilitu zesilovače zajišťují kondenzátory C_1 až C_4 . Induktory L_3 až L_6 souží k odrušení nechtěného signálu z napájení a s kondenzátory C_1 až C_4 tvoří LC filtr, kde kondenzátory uzemní vysoké frekvence.



Obr. 4.1: Schéma zapojení TPA6120

4.1.2 Nastavení zesílení

Protože se jedná o OZ s proudovou zpětnou vazbou, nejde nastavit zesílení $1\times$ stejným způsobem jako u napěťového OZ. Z datasheetu jsem vyčetl, že zesílení $1\times$ se realizuje zpětnou vazbou z invertujícího vstupu na výstup zesilovače, rezistorem o hodnotě $1k\Omega$.

4.2 Mikrofonní zesilovač

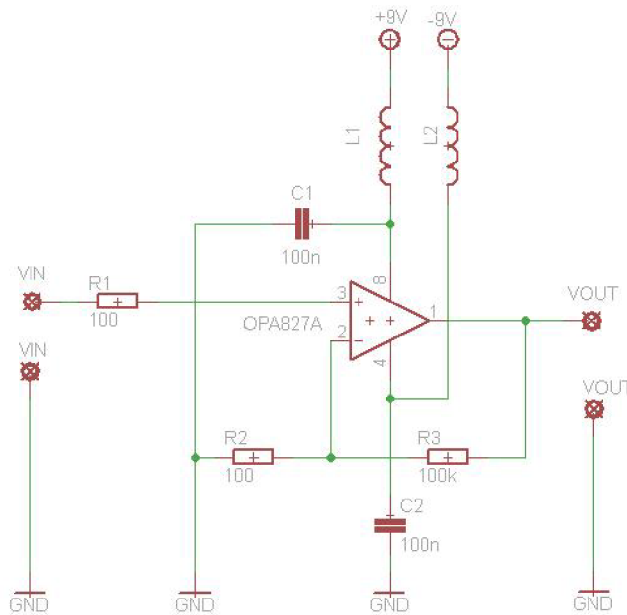
Zvolení správného zesilovače pro mikrofonní signál bylo opravdu náročné. Kvůli velkému zesílení ($A_U=1000$) bylo zapotřebí velmi nízkého šumu, ale zároveň dostatečného zesílení v šířce pásma $20kHz$, což je zhruba šířka pásma lidského slyšení.

Tab. 4.2: Mikrofonní zesilovače

OZ	I_n at 1kHz (fA/ \sqrt{Hz})	V_n at 1kHz (nV/ \sqrt{Hz})	A_U at 20kHz
AD 795	0,6	11	40
OPA 134	3	8	52
OPA 627	3	5,6	58
OPA 827	2,2	4	60

4.2.1 OPA 827

O zesílení mikrofonního signálu se stará OPA827. Vybral jsem ho kvůli jeho velmi nízkému výstupnímu šumu. Jedná se o JFET operační zesilovač, s nízkým offset napětím, nízkým klidovým proudem a velmi nízkým šumem (3.3). Takto nízký šum je důležitý kvůli zesílení, které bude poměrně velké ($A_U=1000$). Společně s užitečným signálem bude totiž v zesilovači zesíleno i rušivé napětí, které je nežádoucí. Tento problém se dá eliminovat díky právě malému výstupnímu šumu zesilovače.



Obr. 4.2: Schéma OPA827

Signál je přiveden přes odpor R_1 do neinvertujícího vstupu. Odpor R_2 (100Ω) a R_3 ($100k\Omega$) je zavedená zpětná vazba která je připojena z výstupu na neinvertující vstup. Hodnoty jsou navrženy tak, aby zesílení dosahovalo hodnoty 1000. Cívky L_1 a L_2 tvoří společně s kondenzátory C_1 a C_2 LC filtr, který zabrání rušivého signálu z napájení. Obvod je napájen symetrickým napětím $\pm 9V$.

4.2.2 Zesílení(2.5)

$$A_U = \frac{v_{Out}}{v_{In}} = -\frac{R_3}{R_2} \quad (4.1)$$

$$A_U = \frac{10^5}{100} \quad (4.2)$$

4.3 Zdroj pro napájení obvodů

Kvůli symetrickému napájení jsem musel vytvořit záporné napětí, protože obvod bude napájen baterií, nebo externím zdrojem stejnosměrného napětí.

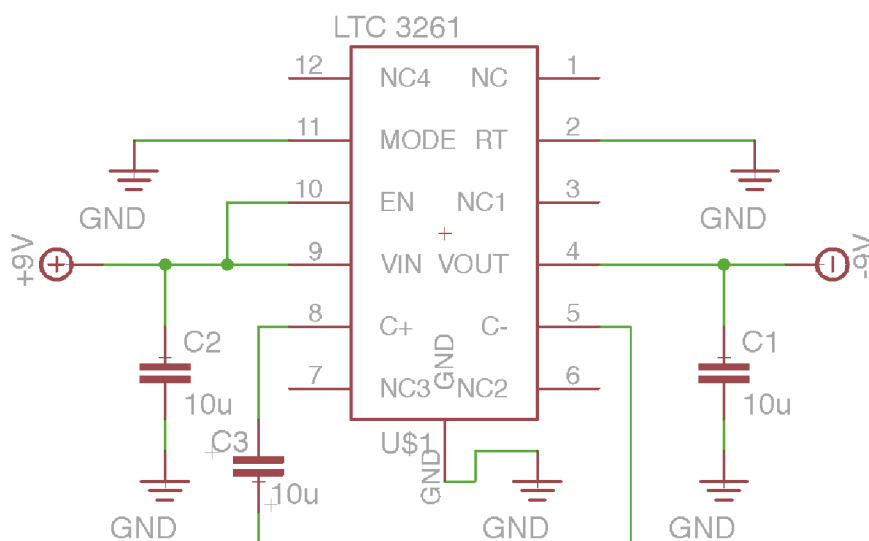
Nejideálnějším způsobem by bylo vybrat nějaký DC/DC měnič se symetrickým výstupem, protože se jednoduše pájí, jsou celkem malé a všechny výstupní parametry jsou již nastavené. Bohužel tyto měniče nemají rozsah který jsem potřeboval. Buď pracují od nebo do hodnoty 9V, což při napájení zesilovače 9V baterií by byl velký problém.

Další možnost, kterou jsem zvažoval bylo vybrat měnič s externí indukčností. Tady jsem zase řešil problém s účinností. Když byla dostatečná (kolem 90%), tak zase klidový proud byl tak velký, že by případnou napájecí baterii za chvíli vybil. S malým klidovým proudem zase byla malá účinnost, nebo nebyl dostačující výstupní proud.

Problém jsem nakonec vyřešil tím způsobem, že všechny části obvodu, kde bude potřeba symetrické napětí, budu napájet kladnou větví rovnou ze zdroje a k vytvoření záporné použiji invertor, který vytváří z kladného napětí záporné.

4.3.1 LTC3261

Jedná se o vysokonapěťový invertující měnič, s širokým vstupním rozsahem, a to od 4,5V do 32V a s maximálním výstupním proudem 100mA. Pracuje buď v takzvaném režimu „Burst Mode“, kdy je napájen pouze $60\mu\text{A}$, nebo v nízkošumovém režimu s konstantí frekvencí. Ta se dá nastavit pomocí externího odporu. Já jsem uzemněním pinu RT dosáhl frekvence 500kHz.



Obr. 4.3: Schéma LTC3261

Toto zapojení má pro mé účely velkou výhodu v jeho výstupním napětí. Na příklad při napájení baterií nebude vstupní napětí konstantní, jako při napájení ze zdroje, ale bude postupem času klesat důsledkem vybíjení baterie. Kdyby výstup byl nastavitelný na -9V, vznikl by nám při vybíjení baterie rozdíl napětí. Tento inverter akorát mění vstupní napětí na záporné, čímž dostaneme symetrické napětí i při vybíjení baterie.

4.3.2 Účinnost

Nejdůležitější parametr, který mne u tohoto obvodu zajímal byla účinnost. Kvůli napájení z baterie jsem se snažil dosáhnout co nejvyšší účinnosti, aby byla co nejméně zatížena a její kapacita vydržela co nejdéle. Provedl jsem několik měření v systému LTspice a úpravou hodnot kondenzátorů a vstupního napětí jsem hledal nejvhodnější účinnost. C_1 je kondenzátor na vstupu a C_2 kondenzátor na výstupu.

Tab. 4.3: Účinnost

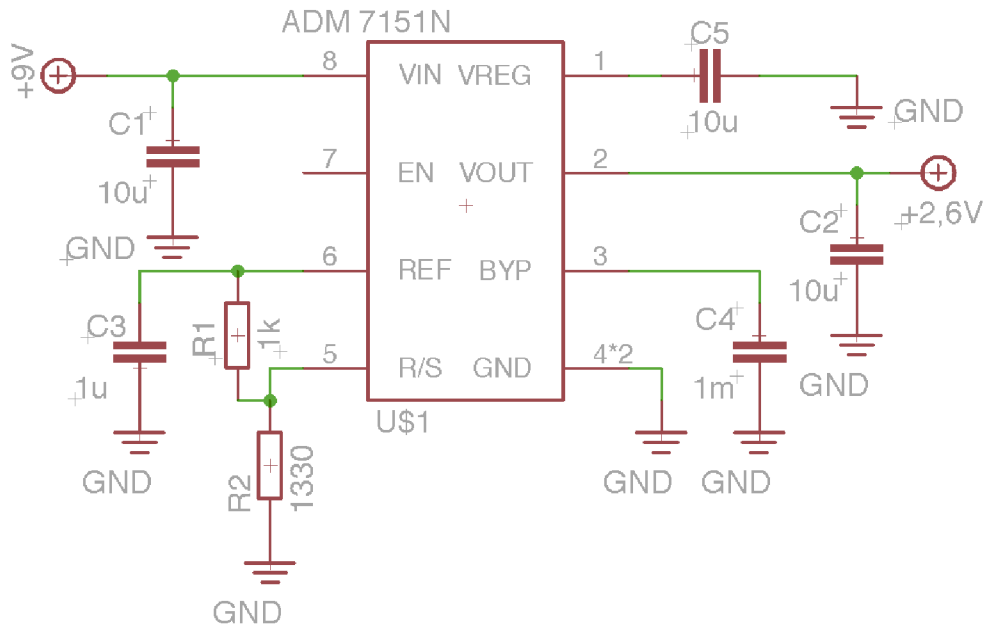
U	6V					9V				
C_1	22 μ F	22 μ F	22 μ F	22 μ F		22 μ F	22 μ F	22 μ F	22 μ F	22 μ F
C_2	22 μ F	15 μ F	4,7 μ F	1 μ F		22 μ F	15 μ F	4,7 μ F	1 μ F	470nF
%	75,57	79,58	79,01	78,99		80,77	81,83	82,57	80,80	44,10
C_1	22 μ F	15 μ F	4,7 μ F	1 μ F		22 μ F	15 μ F	4,7 μ F	1 μ F	470nF
C_2	22 μ F	22 μ F	22 μ F	22 μ F		22 μ F	22 μ F	22 μ F	22 μ F	22 μ F
%	75,57	77,83	78,01	78,08		80,77	79,78	79,81	79,66	79,67
C_1	1 μ F	1 μ F	1 μ F	1 μ F		1 μ F	1 μ F	1 μ F	1 μ F	1 μ F
C_2	22 μ F	15 μ F	4,7 μ F	1 μ F		22 μ F	15 μ F	4,7 μ F	1 μ F	470nF
%	77,7	78,98	79,22	78,44		79,54	81,59	81,49	82,05	43,48
C_1	22 μ F	15 μ F	4,7 μ F	1 μ F		22 μ F	15 μ F	4,7 μ F	1 μ F	470nF
C_2	1 μ F	1 μ F	1 μ F	1 μ F		1 μ F	1 μ F	1 μ F	1 μ F	1 μ F
%	78,98	79,32	78,88	79,05		81,23	81,57	82,03	82,05	81,37

Toto měření jsem prováděl hlavně z toho důvodu, abych zjistil, jaké napájecí napětí bude nejvhodnější. Z tabulky 4.3 je patrné, že při napětí 9V jsou všechny hodnoty vyšší, než při napětí 6V. Díky tomu jsem se rozhodl pro napájení z devítivoltového zdroje.

Nejvhodnější teoretickou kombinací kondenzátorů pro nejvyšší účinnost je $22\mu\text{F}$ na vstupu a $4,7\mu\text{F}$ na výstupu. V praxi jsem použil $20\mu\text{F}$ na vstupu a $10\mu\text{F}$ na výstupu.

4.4 ADM7151

Pro injektování napětí do mikrofonu, z požadavků na elektrické rozhraní stanovné v doporučení ITU-T Rec. P.381 (08/2012), je zapotřebí vstupní odpor $2,2\text{k}\Omega$ a napětí $2,6\text{V}$. Pro toto dané napětí jsem použil nízkonapěťový regulátor se vstupním napětím $4,5\text{V}$ do 16V a s nastavitelným výstupním napětím. Velkou výhodou tohoto obvodu je jeho velmi nízký výstupní šum a to $1,7\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$. Dosáhnout tak malého čísla bylo pro mě prioritní, kvůli jeho rušivému signálu, který se v mikrofoním zesilovači zesiluje společně s užitečným signálem.



Obr. 4.4: Schéma ADM7151

Regulátor je napájen 9 volty ze stejného zdroje, jako celý přezesilovač. Kondenzátor C_{IN} vyfiltrává rušení na vstupu a kondenzátorem C_{BYP} se „nastavuje“ výstupní šum celého zapojení. V mém zapojení jsem použil vysokou hodnotu 1mF , kvůli co největšímu eliminování výstupního šumu. Odpor R_1 a R_2 jsem nastavil výstupní napětí na hodnotu $2,6\text{V}$.

$$V_{out} = 1,5\text{V} * (R_1 + R_2)/R_2 \quad (4.3)$$

$$1\text{k}\Omega < R_2 < 200\text{k}\Omega \quad (4.4)$$

5 ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo navrhnout schéma pro předzesilovač pro komunikátor. Hlavním prvkem tohoto zapojení je operační zesilovač, který je základní jednotkou pro návrh analogových zařízení.

Jedním z hlavních požadavků bylo, aby měl obvod nízký šum. Proto jsem v práci pojednal o výskytu šumu, jaký vliv má na signál a jaké druhy známe. Všechny tyto důležité parametry ohledně šumu jsem také zohlednil při výběru vhodného OZ a jsou popsány ve třetí kapitole.

Poslední kapitola se věnuje konečným návrhem předzesilovače. Pro mikrofon byl vybrán OZ OPA827 a pro reproduktor TPA6120a2. Je zde popsáno, proč jsem tyto OZ vybral, s jakými parametry jsem počítal a proč jsem je použil. Pro tyto OZ je následně navržené schéma, kde je podrobný popis, jak celé schéma funguje.

Po osazení a „oživení“ desky jsem celý výrobek vložil do vhodné krabičky a provedl měření. Informace a grafy jsem vložil do přílohy za celou bakalářskou práci.

LITERATURA

- [1] ANALOG DEVICES *Ahead of what's possible* [online]. 1995, [cit. 12. 12. 2015]. Dostupné z URL: <<http://www.analog.com/en/index.html>>.
- [2] ANALOG DEVICES *Technical documentation* [online]. 1995, [cit. 12. 12. 2015]. Dostupné z URL: <<http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/AN-358.pdf>>.
- [3] NOISE *color's of noise* [online]. 2001, poslední aktualizace 4. 11. 2015 [cit. 12. 12. 2015]. Dostupné z URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Colors_of_noise>.
- [4] DIGI-KEY *World's largest selection of electronic components Available for Immediate Shipment* [online]. 1995, [cit. 12. 12. 2015]. Dostupné z URL: <https://www.digikey.com/Web%20Export/Supplier%20Content/Stackpole_738/PDF/Stackpole_ThickFilmXThinFilm.pdf?redirected=1>.
- [5] HYPER PHYSICS *Georgia State University* [online]. 2000, [cit. 12. 12. 2015]. Dostupné z URL: <<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/electronic/rescarb.html>>.
- [6] SEIFERT, F. *Resistor current noise measurements* [online]. 2001, poslední aktualizace 14. 4. 2009 [cit. 12. 12. 2015]. Dostupné z URL: <https://dcc.ligo.org/public/0002/T0900200/001/current_noise.pdf>.
- [7] MALIK, NORBERT R. *Eledtronic circuits: analysis, simulation, and design* 1995 by Prentice-Hall, ISBN-0-02-374910-5
- [8] ITU-T. *Telecommunication standardization sector of ITU* 2013 Geneva,

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

OZ	Operační zesilovač
RTI	Vstupní šum OZ
RTO	Výstupní šum OZ
NG	Šumové zesílení
JFET	Unipolární tranzistor
BJT	Bipolární tranzistor
OP27	Operační zesilovač OP27
SMD	Součástky určené pro povrchovou montáž
AC	Střídavý proud
V_n	Napěťový šum
I_{n+}	Proudový šum v neincertujícím vstupu
I_{n-}	Proudový šum v invertujícím vstupu
v_+	Napětí na neinvertujícím vstupu
v_-	Napětí na invertujícím vstupu
A	Zesílení
N_1	Vstupní signál
N_F	Vstupní signál
i_1	Proud na vstupu
i_F	Zpětnovazební proud
v_0	Výstupní napětí
v_1	Vstupní napětí
r_{IN}	Vstupní zátěž
r_{OUT}	Výstupní zátěž
DPS	Deska plošných spojů

SEZNAM PŘÍLOH

A	Obsah přiloženého CD	24
B	Obvody předzesilovače	25
B.1	Schéma zapojení předzesilovače	25
B.2	Deska plošného spoje-bottom(strana spojů)	26
B.3	Deska plošného spoje-top(strana spojů)	26
B.4	Osazovací plán-top(strana součástek)	27
B.5	Osazovací plán-bottom(strana součástek)	27
B.6	Seznam použitých součástek	28
C	Měření předzesilovače	29
C.1	Měření zesilovače pro reproduktor	29
C.1.1	Zesílení	29
C.1.2	THD Ratio	30
C.1.3	Přeslech mezi kanály	30
C.1.4	THD+N Ratio	31
C.2	Měření zesilovače pro mikrofón	32
C.2.1	Zesílení	32
C.2.2	THD Ratio	33
C.2.3	THD+N Ratio	33

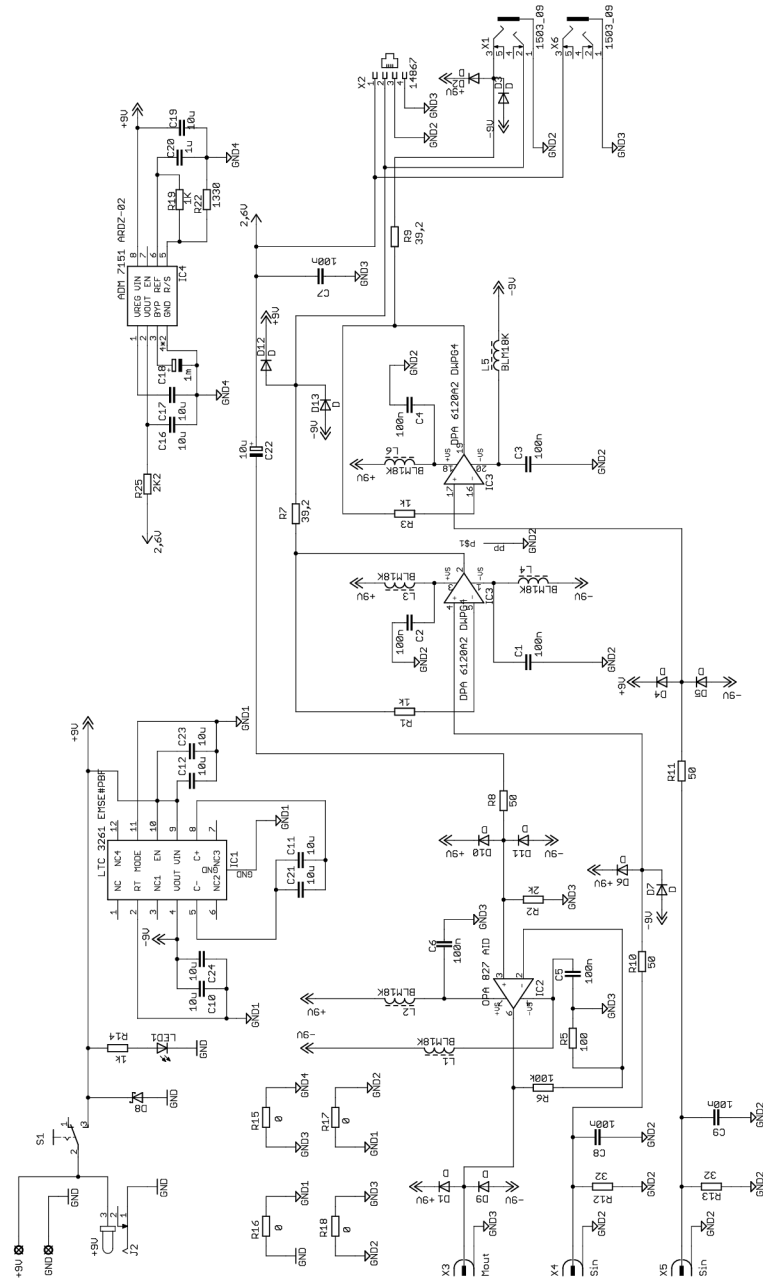
A OBSAH PŘILOŽENÉHO CD

V přiloženém CD nalezneme kompletní složku s vypracovaným textem bakalářské práce. Protože byla práce psána v sázecím program Latex, je k ní i přiložené výsledné PDF.

Také je zde přiložené schéma a navržená deska předzesilovače. Ty jsem navrhl v programu Eagl 7.5.0 light.

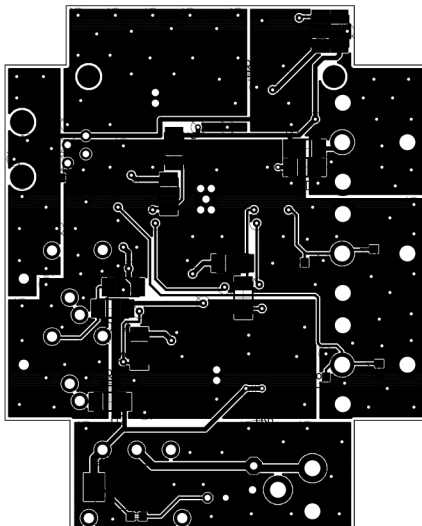
B OBVODY PŘEDZESILOVAČE

B.1 Schéma zapojení předzesilovače



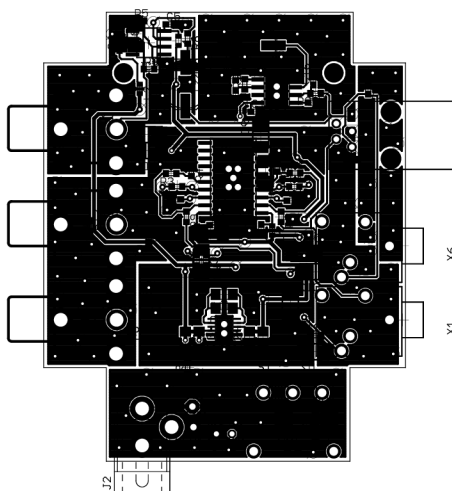
Obr. B.1: Schéma předzesilovače

B.2 Deska plošného spoje-bottom(strana spojů)



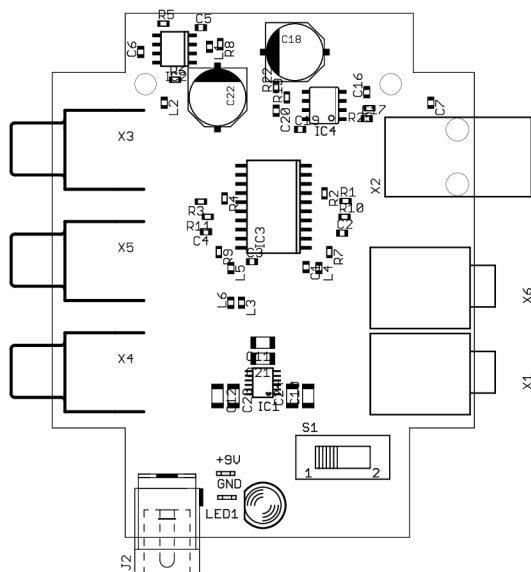
Obr. B.2: Deska plošného spoje předzesilovače

B.3 Deska plošného spoje-top(strana spojů)



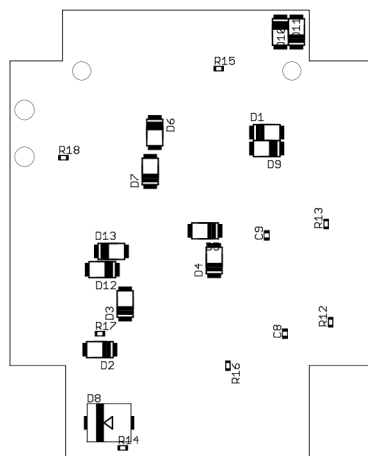
Obr. B.3: Deska plošného spoje předzesilovače

B.4 Osazovací plán-top(strana součástek)



Obr. B.4: Osazovací plán předzesilovače-vrstva top

B.5 Osazovací plán-bottom(strana součástek)



Obr. B.5: Osazovací plán předzesilovače-vrstva bottom

B.6 Seznam použitých součástek

Tab. B.1: Seznam součástek

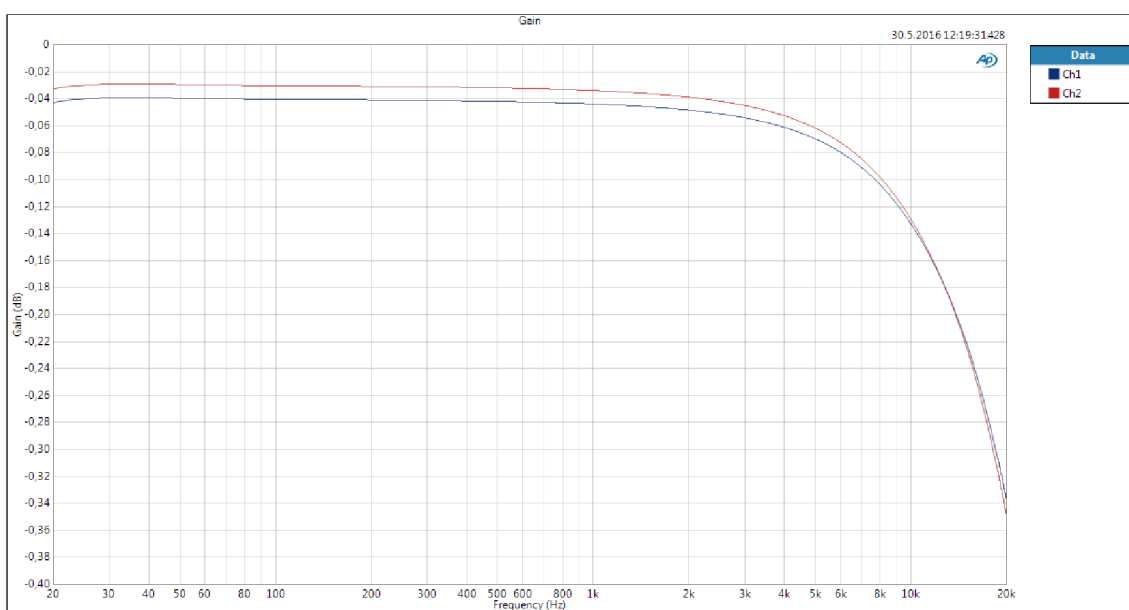
Č.	Počet	Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
1.	9	C_1-C_9	100n	C0603	Kondenzátor
2.	10	$C_{10}-C_{12}, C_{16}$ $C_{17}, C_{19}, C_{21}-C_{24}$	10μ	C1206	Kondenzátor
3.	1	C_{18}	1m	Panasonic-F	Kondenzátor
4.	1	C_{20}	1μ	C0603	Kondenzátor
5.	12	D_1-D_7, D_9-D_{13}	1A	DO-214AC	Dioda
6.	1	D_8	5A	SMC	Dioda
7.	1	IC1	LTC 3261	MSOP08	invertor
8.	1	IC2	OPA 827	SO8	zesilovač
9.	1	IC3	DPA 6120	SO20	zesilovač
10.	1	IC4	ADM 7151	SOIC08	regulator
11.	6	L_1-L_2	600m	0603	Tlumivka
12.	1	LED1	–	LED5MM	LED dioda
13.	4	R_2, R_4, R_{14}, R_{19}	1k	R0603	Odpor
14.	1	R_5	100	R0603	Odpor
15.	1	R_6	100k	R0603	Odpor
16.	2	R_7, R_9	39,2	R0603	Odpor
17.	3	R_8, R_{10}, R_{11}	50	R0603	Odpor
18.	2	R_{12}, R_{13}	32	R0603	Odpor
19.	4	$R_{15}-R_{18}$	0	R0603	Odpor
20.	1	R_{22}	1330	R0603	Odpor
21.	1	R_{25}	2k2	R0603	Odpor
22.	2	X1, X6	–	1503-09	Jack konektor
23.	1	X2	–	14867	RJ11 konektor
24.	3	X3, X4, X5	–	736880	Cinch
25.	1	S1	–	255SB	Vypínač

C MĚŘENÍ PŘEDZESILOVAČE

Měření jsem prováděl v laboratoři na počítači v programu Audio Precision. Měřil jsem pravý i levý kanál zároveň s výstupní impedancí počítače 20Ω a vstupní impedancí počítače $100k\Omega$. Při každém měření byla nastavena frekvence na 1kHz s amplitudou $1,6\text{V}$.

C.1 Měření zesilovače pro reproduktor

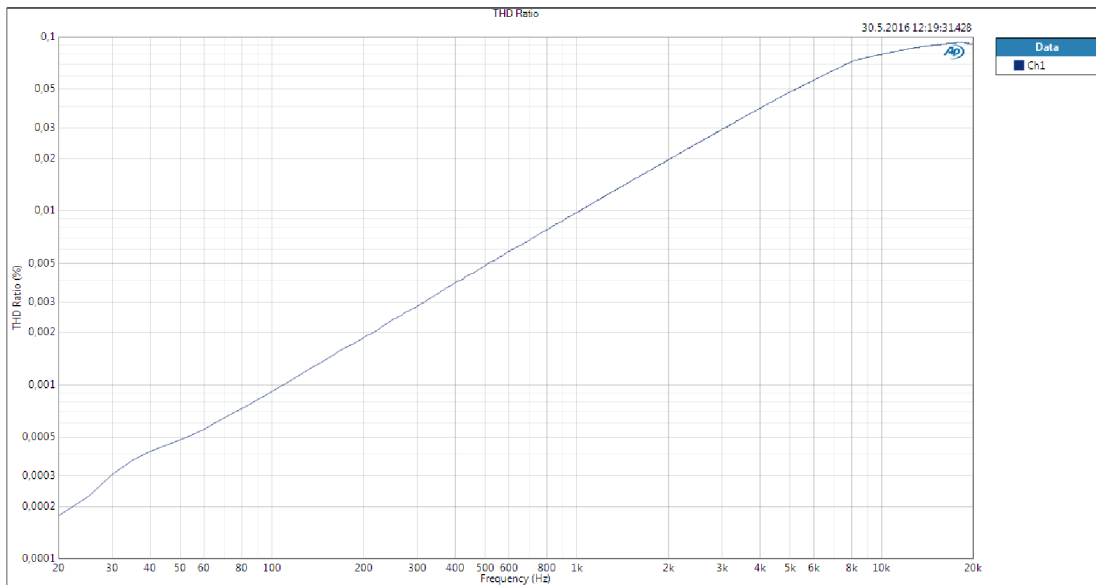
C.1.1 Zesílení



Obr. C.1: Zesílení

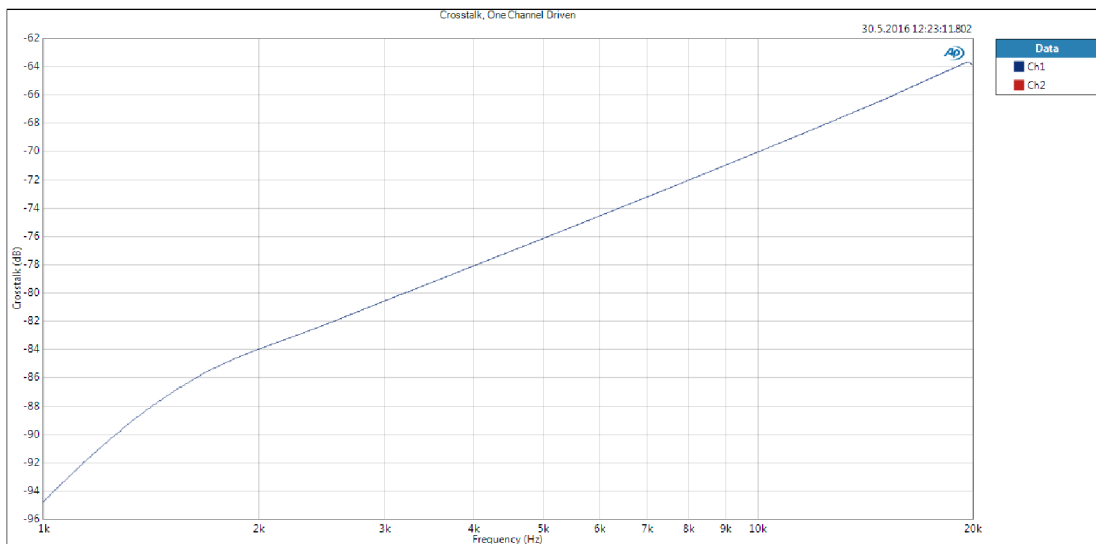
Odpory, kterými se nastavuje zesílení mají přesnost pouze $0,1\%$. To způsobuje rozdílné zesílení každého kanálu.

C.1.2 THD Ratio

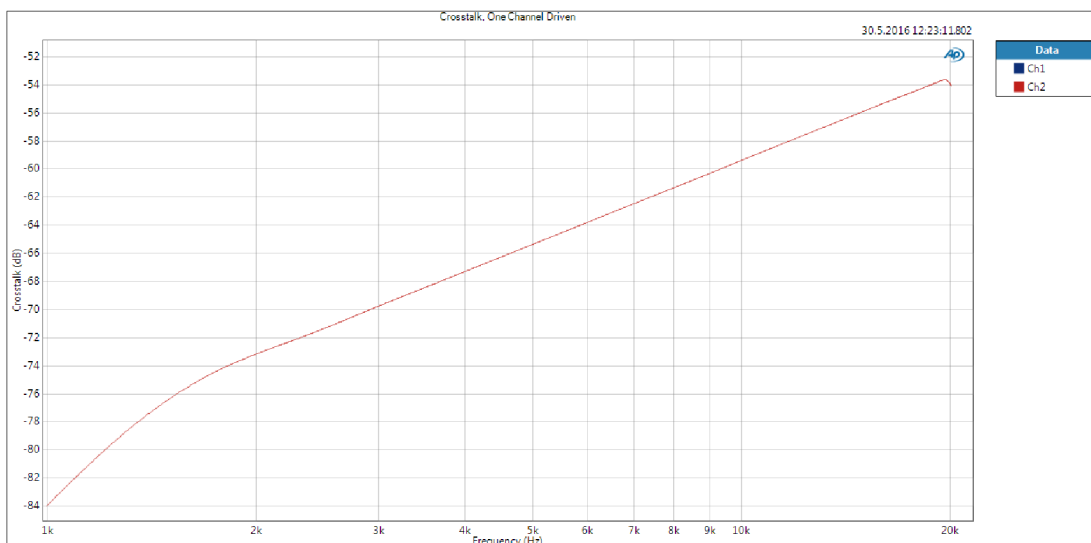


Obr. C.2: THD Ratio

C.1.3 Přeslech mezi kanály



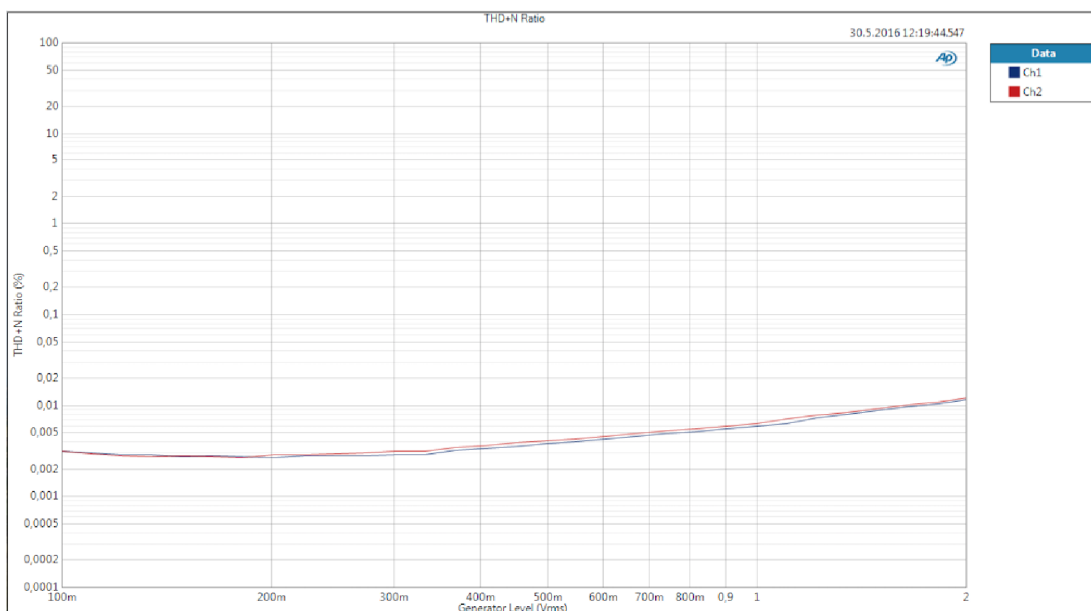
Obr. C.3: Přeslech mezi kanály



Obr. C.4: Přeslech mezi kanály

Kvůli chybě v programu se nevykreslili křivky do jednoho grafu, ale vyobrazili se zvlášť.

C.1.4 THD+N Ratio



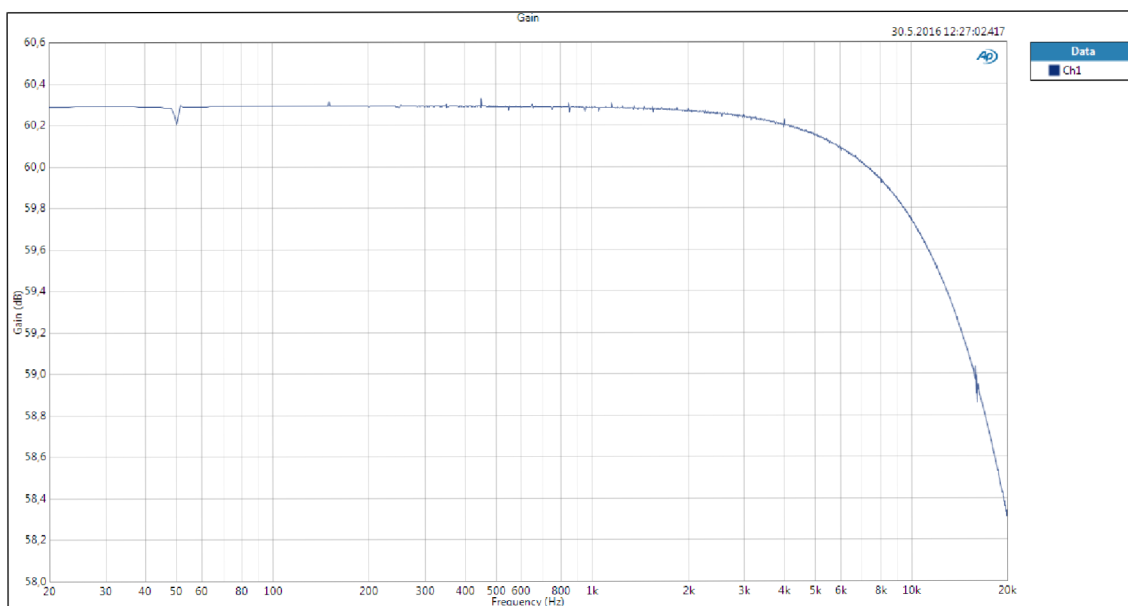
Obr. C.5: THD+N

Při tomto měření bylo použito Stepped level sweep measure. To znamená, že se hodnoty napětí měnily po skocích a to od 100mV až do 2V a bylo nastaveno 31 vzorků. Frekvence zůstala na 1kHz.

C.2 Měření zesilovače pro mikrofon

Při měření zesilovače pro mikrofon byla výstupní impedance počítače nastavena na 20Ω a vstupní impedancí počítače $100k\Omega$. Při měření byla nastavená frekvence na $1kHz$ a amplituda na $2mV$.

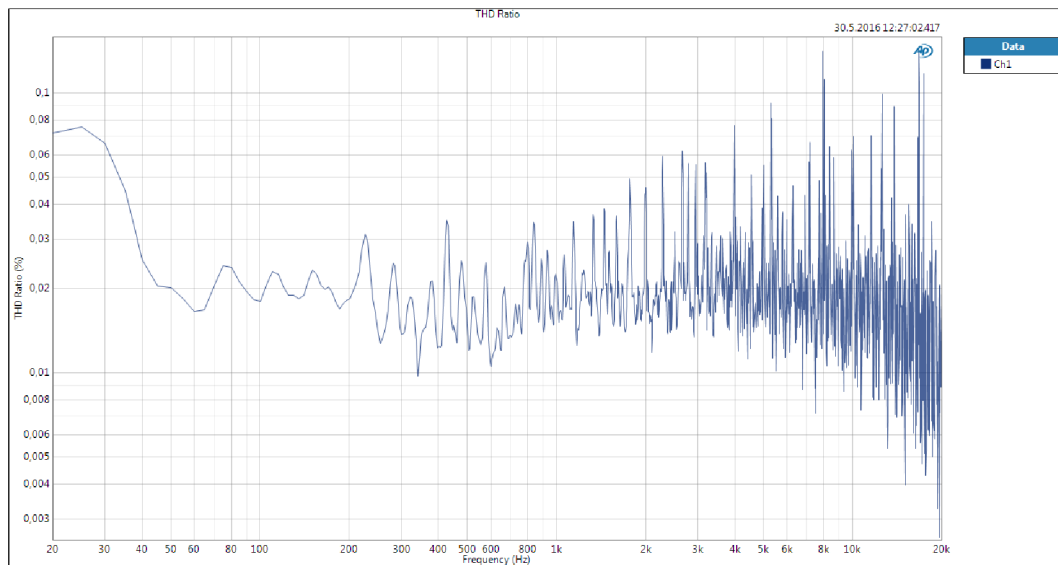
C.2.1 Zesílení



Obr. C.6: Zesílení

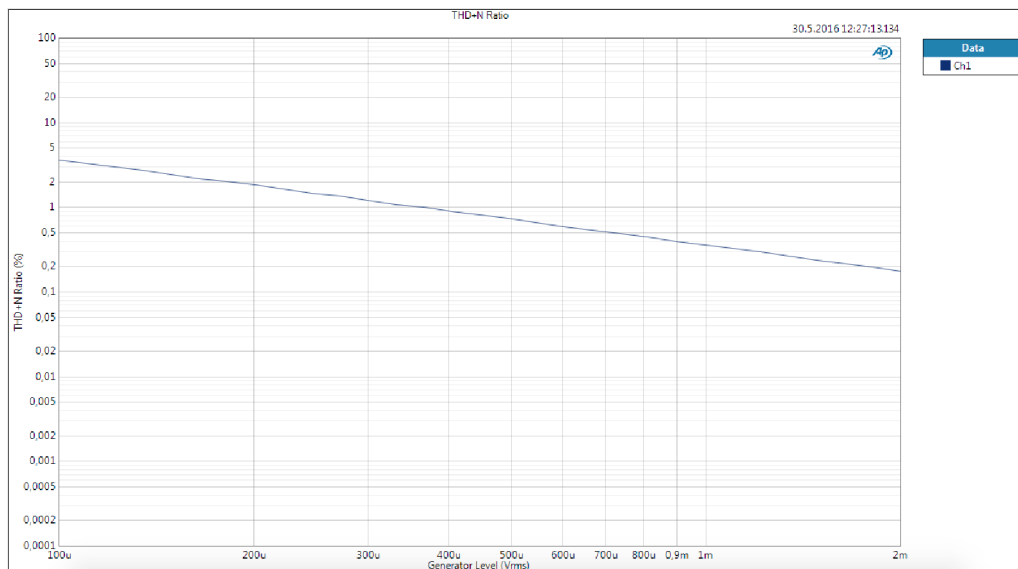
Nepatrně větší zesílení je dáno odpory, které mají přesnost $0,1\%$.

C.2.2 THD Ratio



Obr. C.7: THD Ratio

C.2.3 THD+N Ratio



Obr. C.8: THD+N

Při tomto měření Stepped level sweep measure byla frekvence nastavena na 1kHz a amplituda od 100μ do 2mV.