

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2020

Michal Šimek



# 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

PRECISION AUDIO PREAMPLIFIER FOR HEADSET MEASUREMENT

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Michal Šimek

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Pavel Hanák, Ph.D.

BRNO 2020

# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Audio inženýrství**  
specializace Zvuková produkce a nahrávání  
Ústav telekomunikací

**Student:** Michal Šimek

**ID:** 203748

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2019/20

**NÁZEV TÉMATU:**

## Měřicí audio předzesilovač pro komunikátor

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte a realizujte mikrofonní a sluchátkové měřicí předzesilovače pro mikrotelefon a náhlavní sadu (komunikátor). Budou sloužit jako součást simulátoru hlavy Bruel&Kjar 4128D, proto se pokuste dosáhnout co nejnižšího šumu a vyrovnané kmitočtové charakteristiky. Předzesilovače musí také splňovat požadavky na elektrické rozhraní stanovené v doporučení ITU-T Rec. P.381 (08/2012). Předzesilovače musí být vybaveny konektory RJ11 a jack 3,5 mm pro připojení obou typů komunikátorů. Napájení musí být možné z baterie i z externího zdroje stejnosměrného napětí s ochranou proti přepólování. Signálové vstupy a výstupy opatřete ochranami a VF filtry. V systému Autodesk Eagle navrhněte desky plošného spoje, které pak zamontujte do vhodné kovové skříňky. Pomocí analyzátoru Audio Precision APx525 na všech zesilovačích proveďte měření reálně dosažených parametrů a porovnejte s požadavky normy. Nakonec vyrobte vhodné popisky pro čelní i zadní panel zesilovače.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] International Communication Union, Recommendation ITU-T P.381: Technical requirements and test methods for the universal wired headset or headphone interface of digital mobile terminals. Series P: Terminals and Subjective and Objective Assessment Methods, Voice Terminal Characteristics, 08/20012.

[2] SELF, D. Small Signal Audio Design. Focal Press, 2010. ISBN 978-0-240-52177-0.

**Termín zadání:** 3.2.2020

**Termín odevzdání:** 18.8.2020

**Vedoucí práce:** Ing. Pavel Hanák, Ph.D.

**doc. Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.**  
předseda rady studijního programu

### 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

Bakalářská práce řeší mikrofonní a sluchátkový předzesilovač pro mikrotelefon a náhlavní sadu. Návrh musí splňovat požadavky na elektrické rozhraní stanovené v doporučení ITU-T Rec. P.381(08/2012). Součástí návrhu je napěťový měnič, předpětí pro mikrotelefon a napájení (z baterie i z externího zdroje). V rámci práce je také popsán návrh plošného spoje a řešení nízkého šumu v celém obvodu. Cílem práce je navrhnout, sestavit a následně zasadit laboratorní přípravek do kovové krabičky. Nakonec přípravek změřit na analyzátoru audio precision APx525.

# Klíčová slova

Předzesilovač, šum, plošný spoj, operační zesilovač, napájení, nízkošumový návrh, Autodesk EAGLE

# Abstract

This thesis deals with microphone and headphone preamplifier for microtelephone and headset. The design shall meet the electrical interface requirements set out in ITU-T Rec. P.381(08/2012). The design includes a voltage converter, microtelephone bias and both a battery and an external power supply. In this work is also described the design of printed circuit board and the solution of a low noise in the whole circuit. The aim of this thesis is to design, built and embed the laboratory fixture into a metal box. Finally, measure the product on an APx525 audio precision analyzer.

# Keywords

Preamplifier, noise, printed circuit board, operational amplifier, power supply, low noise design, Autodesk EAGLE

## Bibliografická citace

ŠIMEK, Michal. *Měřicí audio předzesilovač pro komunikátor* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/125874>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce Pavel Hanák.

# Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Měřicí audio předzesilovač pro komunikátor“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s jejím vytvořením jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nepovoleným způsobem do cizích osobnostních autorských práv a jsem si 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.

V Brně dne: 17.8 2020

.....

podpis autora

# Poděkování

Děkuji vedoucímu semestrální práce Ing. Petru Hanákovi, Ph.D. za pevné nervy, odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: 17.8 2020

.....

podpis autora

# Obsah

1	Úvod.....	9
2	Rozbor zadání.....	10
2.1	Požadavky (ITU REC.P381 (08/2012)).....	11
3	Teoretický úvod.....	11
3.1	Předzesilovač a jeho parametry.....	11
3.2	Třídy zesilovačů.....	13
4	Šum.....	14
4.1	Druhy šumu.....	14
4.1.1	Tepelný Johnsonův šum.....	14
4.1.2	Výstřelový šum.....	15
4.1.3	Kmitavý šum.....	15
4.1.4	Praskavý šum (popcorn noise).....	15
4.1.5	Šum typu 1/f (blikavý šum).....	16
5	Operační zesilovač.....	16
5.1	Výpočet šumu v operačním zesilovači.....	19
6	Návrh zařízení a výběr součástek.....	20
6.1.1	Mikrofonní předzesilovač.....	20
6.1.2	THAT1512.....	21
6.1.3	Sluchátkový předzesilovač.....	22
6.1.4	TPA6120.....	23
6.2	Napájecí obvody.....	24
6.2.1	Inverzní měnič napětí.....	24
6.2.2	Předpětí pro mikrofon.....	25
6.2.3	Vstupní obvody.....	26
7	Praktická část.....	27
7.1	Návrh plošného spoje.....	27
7.1.1	Dolní patro.....	28
7.1.2	Horní patro.....	31
8	Měření na Audio Precision APx525.....	34
8.1	Měření sluchátkového předzesilovače.....	34
8.2	Měření mikrofonního předzesilovače.....	35
9	Vložení DPS do krabičky.....	37
10	Závěr.....	37



# Seznam obrázků

Obr. 1: Blokové schéma.....	10
Obr. 2: VA charakteristika zesilovače.....	13
Obr. 3: Náhradní schéma tepelného šumu odporu.....	15
Obr. 4: Operační zesilovač.....	16
Obr. 5: blokové schéma zpětné vazby.....	17
Obr. 6: Invertující zesilovač.....	17
Obr. 7: Neinvertující zapojení s operačním zesilovačem.....	18
Obr. 8: napěťový sledovač.....	18
Obr. 9: Výpočet šumového OZ.....	19
Obr. 10: Blokové schéma mikrofonní zesilovače.....	20
Obr. 11: Zapojení THAT1512.....	21
Obr. 12: sluchátkový zesilovač.....	22
Obr. 13: Zapojení sluchátkového zesilovače.....	23
Obr. 14: Inverzní měnič napětí.....	24
Obr. 15: LDO zapojení.....	25
Obr. 16: šumová charakteristika ADM7151 v závislosti na připojeném kondenzátoru [6].....	26
Obr. 17: Vstupní obvody.....	26
Obr. 18: Krabička Hammond.....	27
Obr. 19: Osazovací plán dolní patro TOP.....	29
Obr. 20: Dolní patro osazovací plán BOTTOM.....	29
Obr. 21: Dolní TOP.....	30
Obr. 22: dolní BOTTOM.....	30
Obr. 23: Horní patro osazovací plán TOP.....	31
Obr. 24: Horní patro osazovací plán BOTTOM.....	32
Obr. 25: Horní TOP.....	32
Obr. 26: Horní BOTTOM.....	33
Obr. 27: Zisk sluchátkového zesilovače.....	34
Obr. 28: Harmonické zkreslení sluchátkového zesilovače.....	35
Obr. 29: šum kanálů sluchátkového zesilovače.....	35
Obr. 30: zisk mikrofonního zesilovače.....	36
Obr. 31: Harmonické zkreslení mikrofonního zesilovače.....	36
Obr. 32: úroveň šumu mikrofonního předzesilovače.....	37
Obr. 33: Zadní osazená strana krabičky.....	37

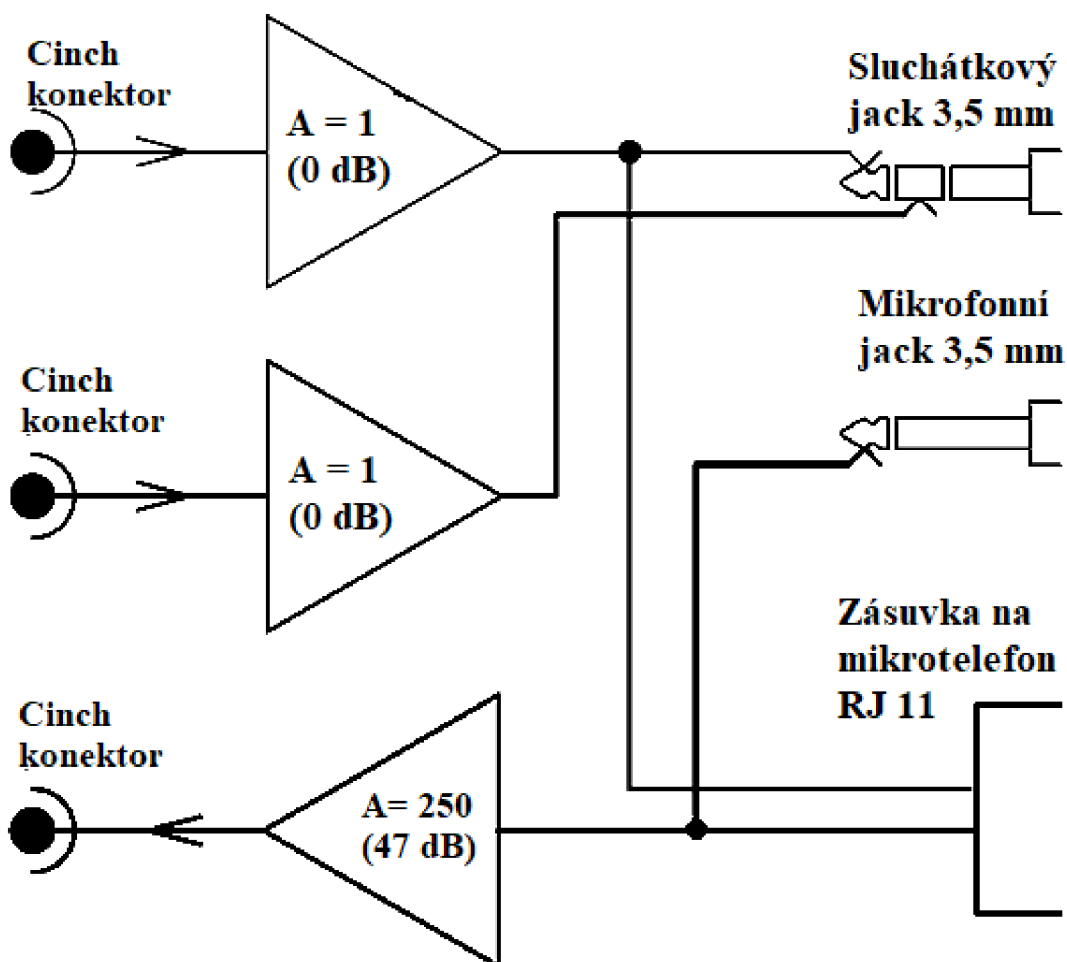
## 1 Úvod

Tématem této práce je návrh a zhotovení měřícího předzesilovače pro sluchátka a mikrofon. Celý přípravek bude používán v jedné z laboratorních úloh na zesílení signálů přijímaných z mikrofonu a přizpůsobení impedance a dodání dostatečného výkonu do sluchátkového zesilovače. Jelikož se jedná o měřící zařízení, musí oba předzesilovače dosahovat nízkého šumu, nízkého zkreslení a samotný návrh by měl být navržen tak, aby docházelo k co nejmenším přeslechům mezi jednotlivými kanály. Jako zdroj jednotlivých parametrů je pro mě doporučení ITU-T Rec. P.381 (08/2012).

V úvodu práce jsou teoreticky rozebrané možnosti a varianty všech sluchátkových a mikrofonních předzesilovačů. Jejich vlastností a parametry. Další kapitola je zaměřená na problematiku šumu v elektrických obvodech, jelikož výstupní šumové napětí je pro mě zásadní hodnotou při návrhu předzesilovačů. Následuje kapitola o návrhu samotného zařízení. Tato kapitola obsahuje jak blokové schéma celého zapojení, tak jednotlivé konkrétní součástky a jejich zapojení a je zde vysvětleno řešení, které jsem zvolil a následně realizoval. Předposlední kapitola je zaměřená na realizaci plošných spojů a problémy s tím spojené. Na konci bakalářské práce jsou změřené grafy na analyzátoru Audio Precision APx525 a porovnání dosažených výsledků s teoretickými hodnotami, které jsou napsány v doporučení ITU-T Rec. P.381 (08/2012).

## 2 Rozbor zadání

Cílem mojí bakalářské práce je navrhnout a realizovat mikrofonní a sluchátkové měřicí předzesilovače pro mikrotelefon a náhlavní sadu. Na Obr. 1 můžeme vidět blokové schéma tohoto zapojení. Tyto předzesilovače budou sloužit jako součást simulátoru hlavy Bruel&Kjar 4128D. Sluchátkový předzesilovač má mít zesílení  $A=1$  a mikrofonní  $A=250$ . Jelikož se bude jednat o měřicí zařízení musí mít předzesilovače co nejnižší šum a musí mít vyrovnanou kmitočtovou charakteristiku. Dále musí splňovat požadavky na elektrické rozhraní ITU-T Rec. P381 (08/2012), které rozeberu podrobněji v mojí práci. Přípravek musí být vybaven konektory jack 3,5mm a RJ11 pro připojení jak sluchátek, tak mikrofonu. Dalším požadavkem je, aby bylo možné přípravek napájet jak z konektoru, tak z baterie a tyto napájecí vstupy musí být ochráněné proti přepólování. Celý návrh by měl být v programu Autodesk Eagle. Celý plošný spoj má být vložen do kovové krabičky. Posledním bodem zadání bakalářské práce je změření výsledku na analyzátoru Audio Precision APx525 a porovnání reálných hodnot s těmi naměřenými.



Obr. 1: Blokové schéma

## 2.1 Požadavky (ITU REC.P381 (08/2012))

Tento dokument udává fyzikální a elektroakustické vlastnosti a specifikuje odpovídající zkušební metody pro analogový headset. Jeho účelem je zajistit odpovídající kompatibilitu mezi headsetem a digitálním terminálem a také univerzální možnost výběru libovolného analogového headsetu. Toto doporučení není určeno pro digitální headsety. Parametry na předzesilovače pro reproduktor a mikrofon jsou pro mě v tomto dokumentu důležité. Podle doporučení musí mít předzesilovač mikrofonu výstupní impedanci menší než  $2 \Omega$ . Mikrofon požaduje předpětí  $2,6 \text{ V} \pm 1 \%$ . Odpor tohoto předpětí musí být  $2,2 \text{ k}\Omega \pm 2 \%$ . Nominální citlivost musí být  $-60 \text{ dBV}$ , kdy je očekáváno že sluchátka budou mít nominální citlivost  $-55 \text{ dBV/Pa}$ . Předzesilovač pro reproduktor musí mít výstupní impedanci menší než  $1 \text{ k}\Omega$ . Maximální výstupní napětí  $150 \text{ mV} \pm 1 \text{ mV}$ , které musí být schopný dodávat do zátěže  $32 \Omega$ . Tato hodnota je definovaná jako  $0 \text{ dBFS}$ . Dynamický rozsah musí být dostatečný pro výstup mobilního terminálu. Celková úroveň výstupního šumu musí být menší než  $-90 \text{ dBV}$ . [1]

## 3 Teoretický úvod

V této kapitole jsou uvedeny základní znalosti potřebné k návrhu mikrofonního a sluchátkového předzesilovače.

### 3.1 Předzesilovač a jeho parametry

Předzesilovač je zařízení, které má za úkol zesílit vstupní signál na úroveň, která je požadována podle zadání. U předzesilovače jsou důležitými parametry šum, vstupní impedance a zkreslení signálu. Jelikož se jakákoli nedokonalost projeví na výstupu a ovlivní následující prvky, je téměř nemožné poté odstranit případné nedokonalosti. Jakákoliv úroveň šumu se v předzesilovači zesílí, proto musíme již při návrhu předzesilovače dbát na nízkou úroveň šumu na vstupu. Vstupní impedance by měla být co největší, protože když nebude dostatečně velká, bude zatěžovat zdroj signálu. Důležitým parametrem je také šířka přenášeného pásma. [2]

- **Vstupní citlivost**

Je vstupní napětí, které je potřeba k dosažení výstupního jmenovitého napětí či výkonu. Aby nedocházelo ke zhoršení poměru signál/šum není dobré používat zesilovač na menší hodnoty napětí, než je jeho vstupní citlivost.

- **Vstupní impedance**

Vstupní impedanci je vhodné zvolit 5 - 10x větší než zátěž předchozího bloku. V komerční sféře se volí různé hodnoty pohybující se kolem  $5 \text{ k}\Omega$  až stovky  $\text{k}\Omega$ .

- **Modulová frekvenční charakteristika**

Závislost velikosti přenosu na frekvenci. Ideálně by měla být hodnota konstantní v celém slyšitelném pásmu ( $f= 20\text{-}20\ 000\ \text{Hz}$ ).

- **Fázová frekvenční charakteristika**

Závislost fázového posuvu výstupního signálu oproti vstupního na frekvenci. U více kanálových zesilovačů by měl být posuv ve všech kanálech stejný. Například u sluchátkového zesilovače není možné, aby jeden kanál měl opačnou fázi. Taková změna fáze je slyšet lidským uchem.

- **Přeslechy**

Pronikání signálu z jednoho kanálu do ostatních. Tento jev je nežádoucí, dochází k tomu, že slyšíme zvuk z kanálu, který by vůbec neměl hrát. Tento jen vzniká kapacitní vazbou v konektorech v přepínačích vstupů a při souběžném vedení dvou nestíněných vodičů, či cest na desce plošného spoje. Proto při návrhu sluchátkového zesilovače je potřeba dbát na rozmístění součástek a na rozmístění jednotlivých cest.

- **Výstupní impedance**

Vstupní impedance bývá zpravidla co nejmenší pod  $1\ \Omega$ . Když je impedance co nejmenší pak nedochází k ovlivnění následujícího bloku.

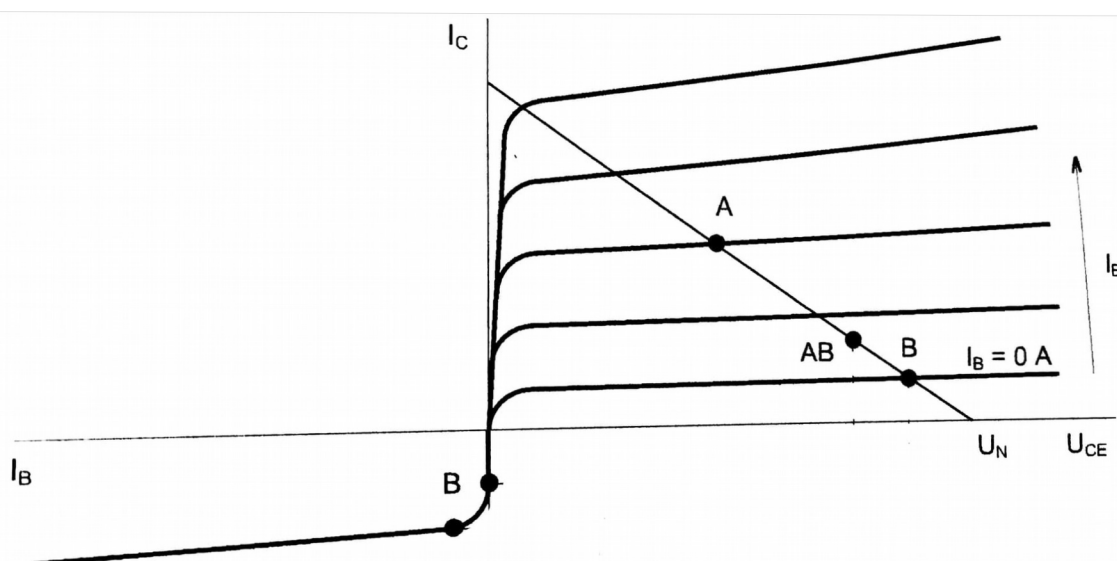
- **Činitel harmonického zkreslení**

Činitel harmonického zkreslení udává, kolik procent harmonického signálu představuje směs vyšších harmonických složek. Vypočítá se jako poměr efektivní hodnoty všech vyšších harmonických složek ku celkové efektivní hodnotě.

$$THD = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}{\sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}} \cdot 100 [\%]$$

## 3.2 Třídy zesilovačů

Rozdělení zesilovačů podle tříd je vlastně rozdělením podle umístění pracovního klidového bodu na zatěžovací přímce zesilovače. Existují například třídy A, B, AB a D. Tyto třídy se nejčastěji řeší, když navrhujete výkonové zesilovače z diskretních součástek. Já využívám integrované zesilovače, tudíž problematice tříd se ve svojí práci nezabývám do hloubky. Pouze můj integrovaný sluchátkový zesilovač pracuje ve třídě AB.



Obr. 2: VA charakteristika zesilovače

- **Třída A**

Klidový pracovní bod je ve třídě A je umístěn uprostřed zatěžovací přímky zesilovače, jak můžeme vidět na Obr. 2. Nevýhodou třídy A je malá účinnost, která ve třídě A dosahuje jen asi maximálně 25 %. Výhodou je malé nelineární zkreslení, protože pracovní bod se pohybuje v lineární části volt-ampérové charakteristiky. Tato třída se využívá pro jednočinné zapojení zesilovačů.

- **Třída B**

Klidový pracovní bod ve třídě B je umístěn v zániku kolektorového proudu, jak je vidět na Obr. 2. Tudíž v něm neteče žádný klidový proud. Má poměrně velké zkreslení, ale dosahuje lepší účinnosti než třída A, až 75 %. Vždy zesiluje jen jednu půlvlnu signálu, proto obvykle pracuje ve dvojčinném zapojení.

- **Třída AB**

Klidový pracovní bod je ve třídě AB nastaven za koleno vstupní charakteristiky zesilovače. Tím je omezené nelineární zkreslení při zesilování kladné půlvlny při malých signálech, která nastává v třídě B. Jedná se o kompromis mezi třídou A a B. Využívá kladné vlastnosti

obou tříd. Třidu AB můžeme vidět označenou na Obr. 2. Používá se ve většině výkonových zesilovačích ve dvojčinném zapojení.

- **Třída D**

Jedná se o zástupce speciální třídy, která pracuje v pulzním režimu. Funguje na principu pulzně šířkové modulace. Hlavní výhodou této třídy je vysoká účinnost oproti klasickým třídám. Na výstupu zesilovače jsou pravoúhlé impulsy o vysokém kmitočtu s proměnnou šířkou, která nese informaci o vstupním signálu.

## 4 Šum

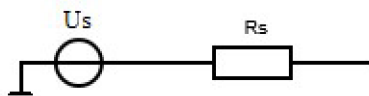
Šum je náhodný signál s náhodně měnící se amplitudou, který působí rušivě na užitečný signál. Tyto signály jsou v elektrických obvodech generovány pasivními a aktivními prvky, ale šum jako takový může vzniknout také působením vnějších vlivů nebo například při nedokonalém zpracování signálu, např. praskavý šum. Šumy jsou vzájemně nekorelovány, a tak se částečně sčítají a částečně ruší. Jejich součet je vlastně součet kvadrátů jejich efektivních hodnot pod odmocninou. Základní rozdělení šumu je rozdělení podle barev. Tyto barvy udávají přibližnou analogii mezi jejich frekvenčním spektrem a spektrem barevného světla. Různé barvy mají různé vlastnosti. Nejčastějším druhem šumu v elektrotechnice je bílý šum, který se vyznačuje svou konstantní výkonovou hustotou. To znamená, že má stejnou energii ve stejných frekvenčních pásmech. Další z nejčastějších je šum růžový, kterému na rozdíl od bílého klesá energie o 3 dB při každém zdvojnásobení frekvence. To znamená, že má stejnou energii ve všech pásmech. [2]

### 4.1 Druhy šumu

#### 4.1.1 Tepelný Johnsonův šum

Johnsonův šum (neboli tepelný šum) vzniká na všech odporech, jak na reálných, tak i například na vnitřních odporech tranzistorů. Tento šum je způsoben kmitáním elektronů v daném materiálu. Je to nejčastěji vyskytující se šum a generuje největší část šumového napětí. Efektivní hodnotu napětí tohoto šumu lze spočítat podle (4.4.1). Tento tepelný šum můžeme realizovat připojením zdroje napětí do série k danému odporu, jak můžeme vidět na Obr. 3. Čím větší rezistor máme, tím větší je tento tepelný šum. [2]

$$v_n = \sqrt{4kTRB} \quad (4.4.1)$$



Obr. 3: Náhradní schéma tepelného šumu odporu

Kde  $T$  je absolutní teplota v Kelvinech,  $R$  je hodnota odporu v Ohmech,  $B$  je šířka pásma v Hertzích a  $k$  je Boltzmanova konstanta ( $k = 1,380662 \times 10^{-23}$ ). Reálné součástky tento šum generují kromě součástek jako jsou induktory nebo kapacity. Šumový ekvivalentní obvod je zdroj napětí v sérii s daným rezistorem. Je samozřejmě možné převést toto šumové napětí na zdroj šumového proudu, lze to jednoduše uskutečnit pomocí Theveninovy-Nortonovy transformace zdroje napětí na zdroj proudu podle (4. 4 .2). [2]

$$i_n = \frac{v_n}{R} \quad (4.4.2)$$

#### 4.1.2 Výstřelový šum

Výstřelový šum vzniká vlivem náhodných změn proudu ve vodiči, jelikož proud je tok elektronů s diskrétním nábojem a náhodně fluktuuje. Má charakter bílého šumu. Je popsán (4. .3). [2]

$$i_n = \sqrt{2qI_{dc}B} \quad (4..3)$$

Kde  $q$  je náboj elektronu ( $q = 1,602 \times 10^{-19} C$ ),  $I_{dk}$  je střední hodnota proudu a  $B$  šířka pásma. Šum se zvyšuje proudem vodiče. Není závislý na teplotě, proto ho nemůžeme snižovat například pomocí chlazení, ale bývá obvykle nižší než Johnsonův šum, tudíž je ve většině případů zanedbatelný. [2]

#### 4.1.3 Kmitavý šum

Kmitavý šum získal svůj název proto, že s poklesem frekvence se úměrně zvyšuje amplituda. Na rozdíl od Johnsonova nebo výstřelového šumu je tento šum způsoben nedokonalostmi v zařízení. Objevuje se ve všech aktivních polovodičích a také v odporech. [2]

#### 4.1.4 Praskavý šum (popcorn noise)

Forma hluku praskavého šumu je pojmenována podle podobnosti tohoto zvuku šumu k praskání popcornu. Jedná se o typ nízkofrekvenčního šumu, který se projevuje jako nízko-úrovňové změny výstupního napětí vyskytující se v náhodných intervalech. Nejčastěji se objevují v integrovaných obvodech. [2]

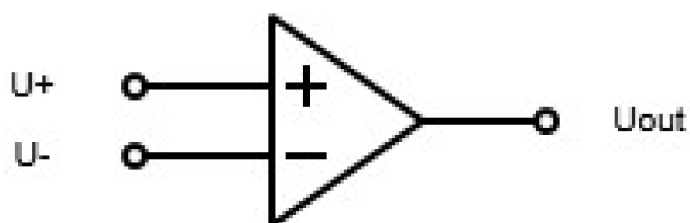


#### 4.1.5 Šum typu 1/f (blikavý šum)

Tento typ šumu vzniká zachycováním nosičů náboje tzv. pastmi vyskytujícími se v oxidové vrstvě u povrchu polovodiče. Toto se děje hlavně v aktivních součástkách a polovodičích. Hustota výkonu ve spektru klesá s rostoucím kmitočtem. [2]

### 5 Operační zesilovač

Ve svém návrhu používám operační zesilovač tak zde uvedu pár základních vlastností o operačním zesilovači. Operační zesilovač je polovodičová elektronická součástka, která se vyrábí v integrovaném provedení. Je to jedna z nejpoužívanějších součástek v analogových obvodech. Funguje jako diferenční napěťový zesilovač s velkým zesílením. Výstupní napětí je zde dáno rozdílem vstupních napětí vynásobeným zesílením. Zesilovač je na Obr. 4. [2]



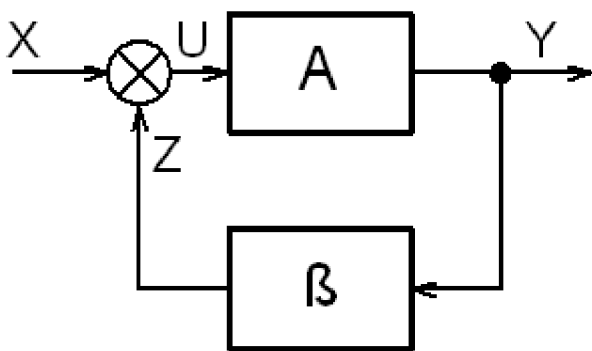
Obr. 4: Operační zesilovač

$$u_{out} = A(u_+ - u_-) \quad (5.1)$$

Pro výpočty a základní zapojení se používají ideální vlastnosti:

- **Vstupní impedance** je nekonečně velká, tím pádem jsou vstupní proudy rovny nule.
- **Vstupní napětí** je rovno nule a je nezávislé na vstupním proudem.
- **Zesílení** je rovno nekonečnu bez ohledu na kmitočet.
- **Výstupní impedance** je rovna nule, tudíž zesílení nezáleží na zátěži.

Reálný operační zesilovač ovšem nedosahuje těchto parametrů, proto je potřeba zavést zpětnou vazbu. V audiozařizích se nejčastěji používá záporná zpětná vazba. Tato vazba snižuje napěťové zesílení, zvyšuje šířku přenášeného pásma a vstupní impedanci, naopak snižuje výstupní impedanci a zkreslení. Na Obr. 5 vidíme blokové schéma.

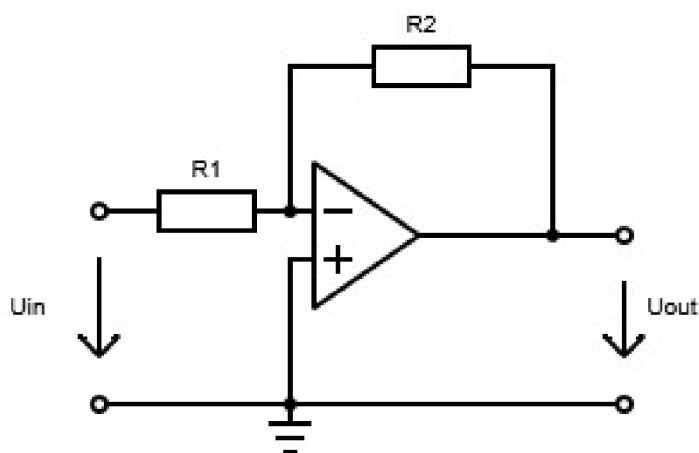


Obr. 5: blokové schéma zpětné vazby

$$\frac{Y}{X} = \frac{A}{1 - \beta A} \quad (5.2)$$

Operační zesilovač se používá v mnoha známých zapojeních, které tu zde nastíním. Já ve své práci budu používat neinvertující zapojení. [2]

- **Invertující zesilovač**

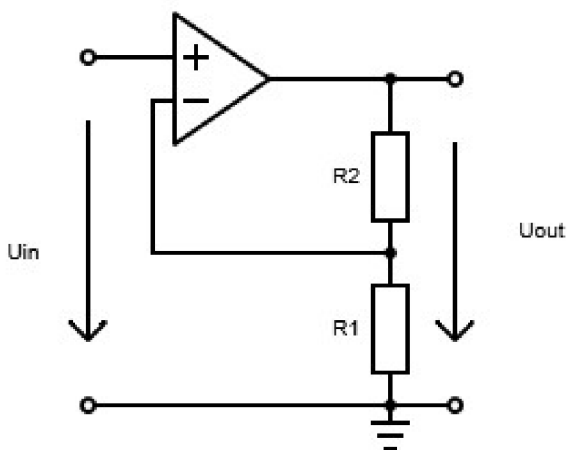


Obr. 6: Invertující zesilovač

Na Obr. 6 vidíme invertující zapojení s operačním zesilovačem. Je zde zavedena paralelní napěťová zpětná vazba přes odpor  $R_2$ . Vstupní odpor je roven odporu  $R_1$ . Zpětná vazba snižuje výstupní odpor, který se tím pádem blíží nule. V ideálním modelu by byl výstupní odpor roven nule. Napěťové zesílení je dáno vztahem (5.3)

$$A = - \frac{R_2}{R_1} \quad (5.3)$$

- **Neinvertující zesilovač**



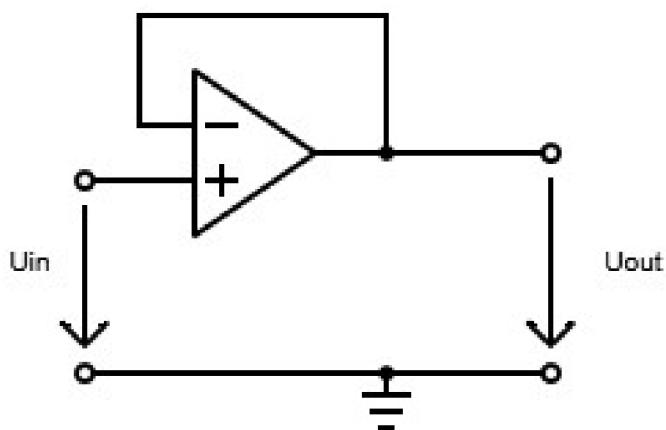
Obr. 7: Neinvertující zapojení s operačním zesilovačem

Na Obr. 7 vidíme neinvertující zapojení s operačním zesilovačem. Je zde zavedena sériová napěťová zpětná vazba. Vstupní odpor je roven vnitřnímu odporu operačního zesilovače, tudíž je teoreticky nekonečný. Když vezmeme v potaz reálné vlastnosti, je vstupní odpor v řádech mega ohmů. Výstupní odpor se blíží nule a stejně jako u invertujícího je snižován zpětnou vazbou. Napěťové zesílení je dáno vztahem (5.4).

$$A = 1 + \frac{R_2}{R_1} \tag{5.4}$$

- **Napěťový sledovač**

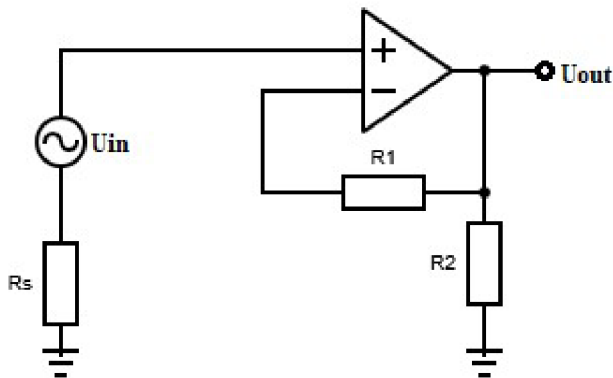
Napěťový sledovač je obdobou neinvertujícího zesilovače s tím rozdílem, že jeho záporná zpětná vazba je přivedena přímo na vstup. Toto zapojení má zesílení jedna, jeho výhodou je velký vstupní odpor a také schopnost výstupu dodávat poměrně velký výstupní výkon (W).



Obr. 8: napěťový sledovač

## 5.1 Výpočet šumu v operačním zesilovači

Pro nastínění výpočtu výstupního šumu operačního zesilovače jsem vybral neinvertující zapojení, jelikož ho využívám ve své práci. Výpočet celkového šumu přenášeného na výstup operačního zesilovače je závislý jak na zesilovači samotném, tak i na ostatních součástkách připojených na jeho vstup i výstup.



Obr. 9: Výpočet šumového OZ

Nejprve musíme spočítat šum na všech rezistorech, které jsou do obvodu zapojeny podle vzorce pro Johnsonův šum (4. 4 .1).

Následně si najdeme v katalogu napěťový šum daného operačního zesilovače, obvykle udávaného v  $nV / \sqrt{Hz}$ , a proudový šum, který se může lišit pro kladný a záporný vstup a je udáván v  $pA / \sqrt{Hz}$ . Tato čísla jsou většinou udávána pro 1 kHz. Je potřeba vše převést na potřebnou šířku pásma. Operační zesilovač zesiluje všechny signály přivedené na vstup, proto musíme vypočítat zesílení pro jednotlivé zdroje šumu. Pro  $R_1$  je toto zesílení 1, jelikož je přímo připojen na výstup. Pro  $R_2$  je toto zesílení dáno poměrem (5. 5). [2]

$$A_{u_{R2}} = \frac{R_1}{R_2} \quad (5. 5)$$

Napěťové zesílení je dáno vztahem (5. 6).

$$A_u = 1 + \frac{R_1}{R_2} \quad (5. 6)$$

Tudíž i napěťový šum bude zesílen o tuto hodnotu. Proudové zesílení neinvertujícího vstupu se rovná  $R_1$ . Pro invertující vstup, do kterého je připojena zpětná vazba je roven je napěťové zesílení dáno vztahem (5. 7).

$$A_{u_r} = 1 + \frac{R_1}{R_2} \times R_s \quad (5.7)$$

Poté všechny zdroje šumu, zesílené spočítanými zesíleními, můžeme sečíst jako součet efektivních hodnot pomocí vztahu, jelikož se jedná o nekorelované zdroje.

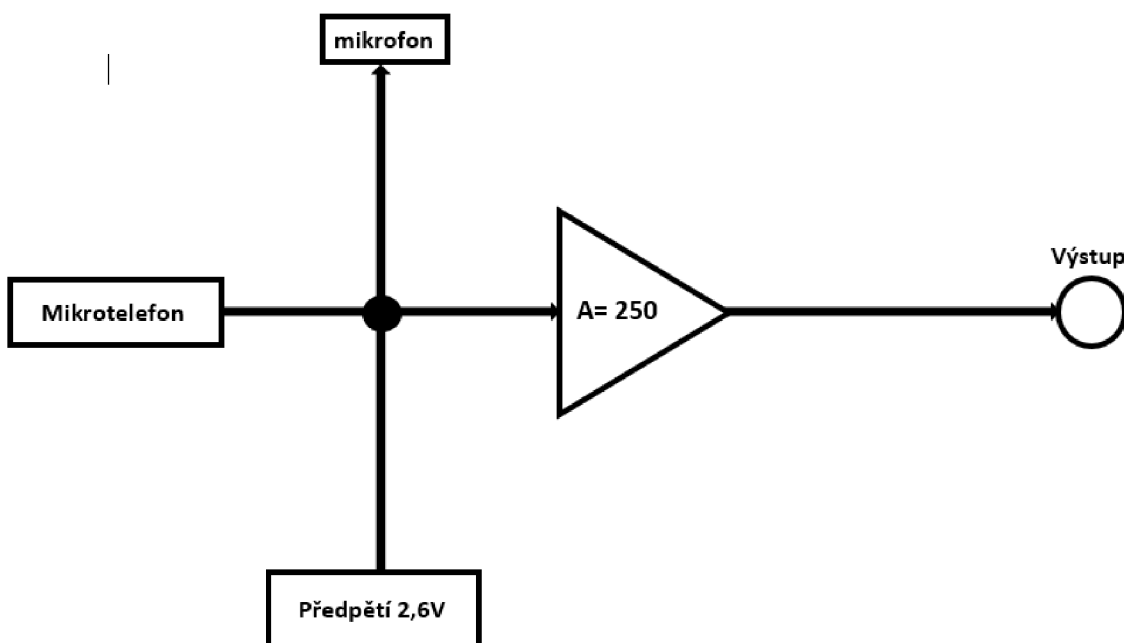
$$U_{tot} = \sqrt{U_{n1}^2 + U_{n2}^2 + \dots} \quad (5.8)$$

## 6 Návrh zařízení a výběr součástek

V této kapitole popisují, jak jsem postupoval při výběru jednotlivých součástek.

### 6.1.1 Mikrofonní předzesilovač

Při hledání vhodného předzesilovače jsem hledal různá řešení. Jeho zásadní vlastnosti by měli být možnosti velkého zesílení ( $A=250$ ), nízká úroveň výstupního šumového napětí ( $-90$  dBV). Jako první jsem vybral nízko šumový operační zesilovač AD797, který měl podle mých výpočtů dosahovat požadovaných hodnot, ale při bližším zkoumání se tento zesilovač stal méně vhodným. Jeho rozdílové napětí na kladném a záporném vstupu bylo příliš malé, a tudíž bych obvod náchylný na zničení. Na doporučení jsem vybral již integrované řešení v podobě mikrofonního integrovaného předzesilovače THAT 1512. Na Obr. 10 vidíte blokové schéma a zjednodušené zapojení mikrofonního předzesilovače.

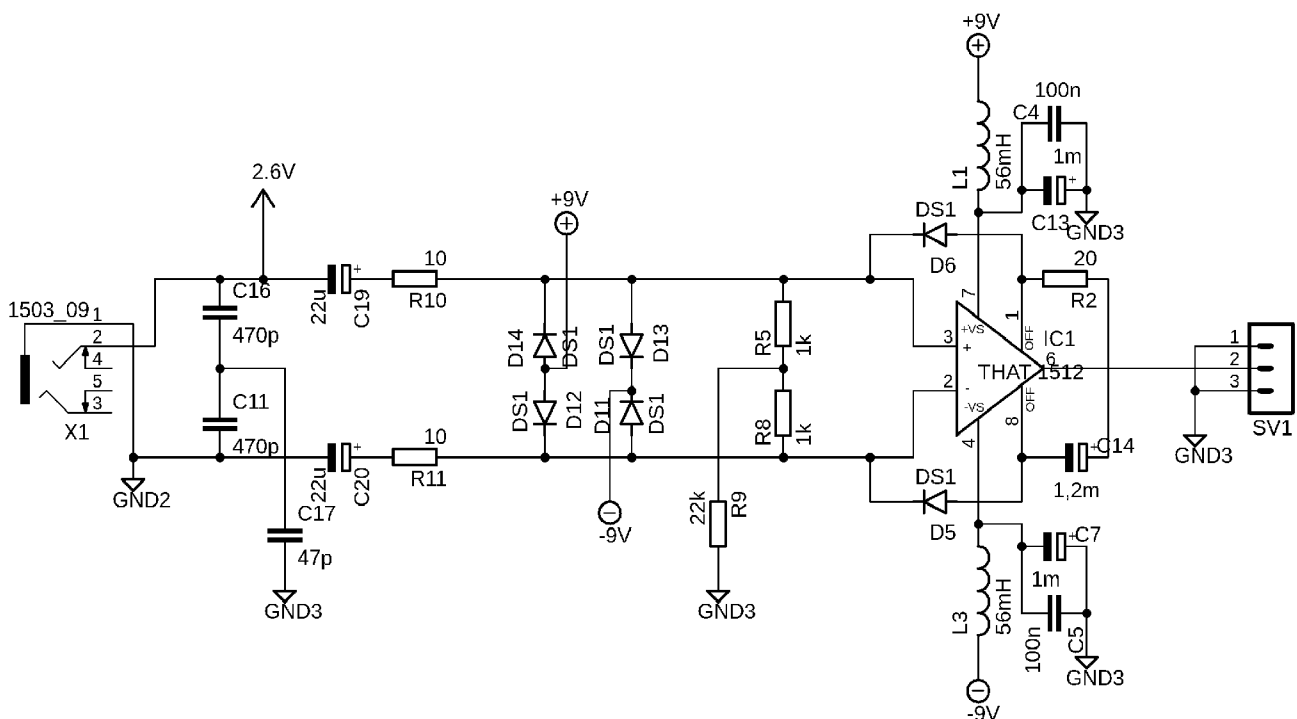


Obr. 10: Blokové schéma mikrofonní zesilovače

## 6.1.2 THAT1512

Je integrovaný zvukový předzesilovač vhodný pro mikrofon. Má při velkém zesílení malý napěťový šum  $1 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ . V našem případě při zisku 47 dB dosahuje a hodnotu  $1,2 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ . Podle katalogu by čím větší zisk má tím menší šum má tím pádem by měl bez problému dosáhnout hodnoty -90 dBV. Jeho napájecí napětí se pohybuje mezi  $\pm 5 \text{ V}$  až  $\pm 20 \text{ V}$ . Další výhodou pro mě je, že tento obvod odebírá pouze 6 mA, což nebude zatěžovat napěťový měnič. Rychlost přeběhu je  $19 \text{ V}/\mu\text{s}$ . Harmonické zkreslení se pohybuje mezi 0,001 % až 0,005 % podle zisku. Jeho výhodou je, že zisk se nastavuje pomocí jednoho externího rezistoru podle vzorce (6. 1).

$$A_v = 1 + \frac{5 \text{ k}\Omega}{R_{G_i}} \quad (6. 1)$$



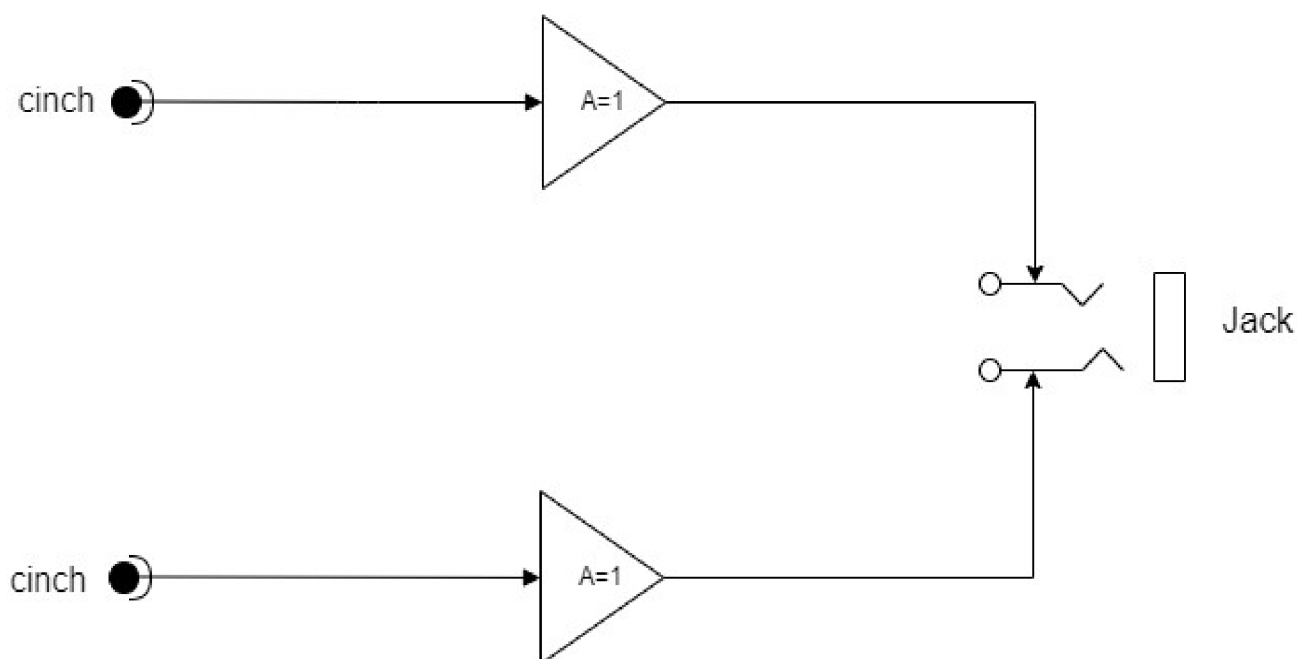
Obr. 11: Zapojení THAT1512

Na Obr. 11 můžeme vidět zapojení mikrofonního předzesilovače THAT 1512, kdy tento předzesilovač pracuje v symetrickém zapojení. Jedná se o doporučené zapojení, které udává výrobce. Pro moje účely stačí zapojení nesymetrické tudíž je jeden vstup připojený na zem. Na desce plošného spoje je také toto zapojení udělat co nejvíce symetrické, aby docházelo, co k nejmenším ztrátám a rušením. Rezistor R2 nastavuje velikost napěťového zesílení. Kondenzátor C14 je zde z důvodu stability zesílení a také, kvůli rušení stejnosměrné složky. Tento kondenzátor by měl být dostatečně velký, aby nerušil nízkofrekvenční odezvu obvodu. Diody v zapojení mají ochranný charakter, aby nedošlo ke zničení obvodu. Trojice rezistorů R8, R5 a R9 jsou zde v zapojení tzv. "T bias" a jejich funkcí je zvýšení impedance a zlepšení zisku na nízkých

frekvencích. Kondenzátory C19 a C17 jsou zde z důvodu oddělení stejnosměrné složky od střídavé. Na obrázku vidíme, že do zapojení přivádím 2,6 V stejnosměrných, není žádoucí, aby se tato hodnota dostala na vstup zesilovače. Při takovém to předpětí se doporučuje mít v zapojení také rezistory R10 a R11. Tyto rezistory omezují destruktivní proudy, které by se mohli dostat na vstup zesilovače například právě z předpětí pro mikrofon 2,6 V. Kondenzátory C11, C16, C17 jsou zde jako vysokofrekvenční filtry, aby do zesilovače nepřicházeli vysokofrekvenční signály. Jako poslední blok jsou napájecí obvody, kde můžeme vidět LC filtry, které jsou zde z důvodu pronikání rušivého signálu ze zdroje nebo měniče napětí. [3]

### 6.1.3 Sluchátkový předzesilovač

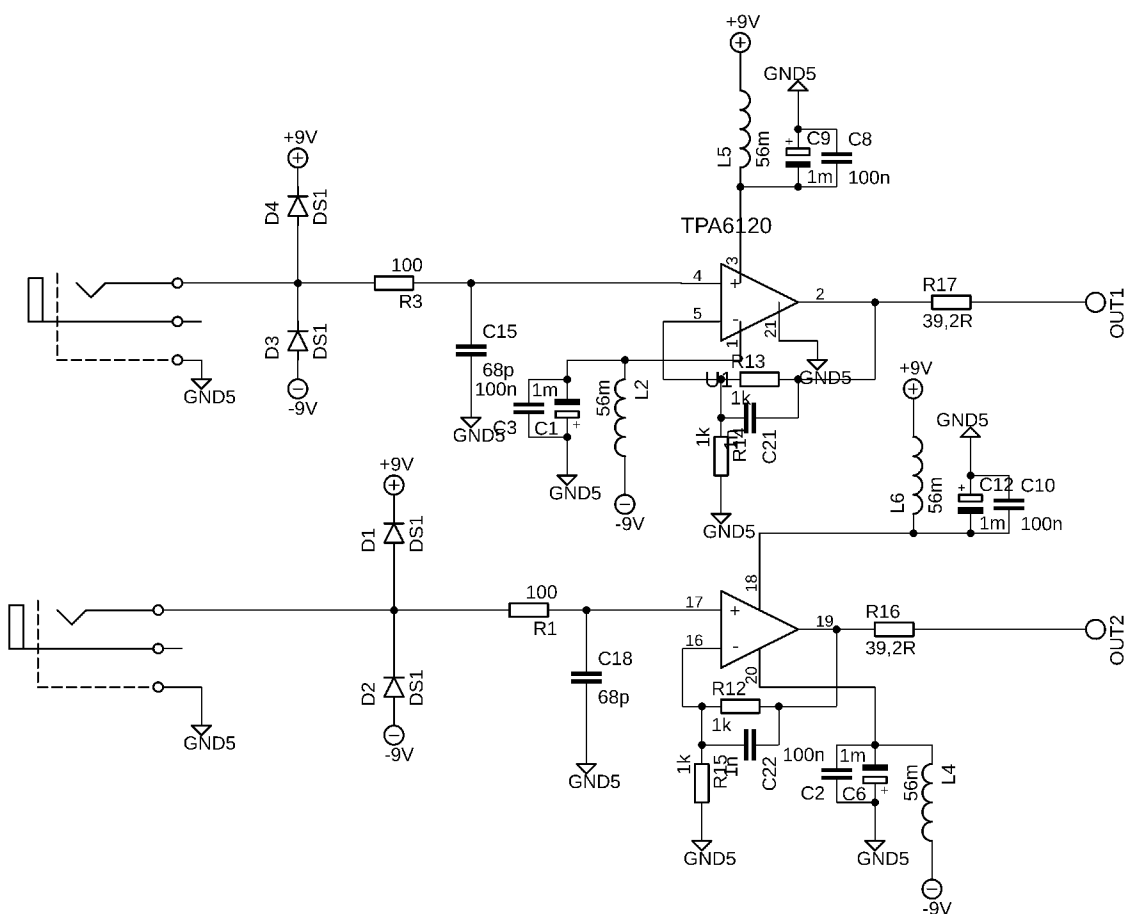
Při výběru sluchátkového zesilovače nebyla tak důležitá hodnota napěťového šumu, klíčová byla hodnota výstupního výkonu, který musí být dostatečně velký. Jedná se o dva zesilovače kvůli stereo přenosu se zesílením  $A = 1$ . Při hledání se mi naskytlo hodně možností, jak tento zesilovač řešit. Při hlubším zkoumání problému jsem dospěl k závěru, že nejvhodnější bude známý sluchátkový integrovaný předzesilovač TPA6120, který popíši v další kapitole.



Obr. 12: sluchátkový zesilovač

## 6.1.4 TPA6120

Jedná se výkonový zesilovač (1,5 W) určený primárně pro sluchátka a měl by jednoduše nahradit diskretní design při konstrukci sluchátkového zesilovače. Zesilovače uvnitř fungují ve třídě AB s proudovou zpětnou vazbou. Toto zapojení poskytuje velkou šířku pásma a nízký šum, při vhodném zapojení až 128 dB dynamického rozsahu. Tento zesilovač má vysokou rychlost přeběhu 1300 V/  $\mu$ s. Rozsah napájecího napětí má  $\pm 5$  V až  $\pm 15$  V. Zesilovač má nízké zkreslení a lineárně dokáže reagovat na změnu. Podle katalogu by měl mít nezávislé zesílení na frekvenci až 10 MHz. Pro mě stěžejní vlastnost byla, že dokáže dodávat bez problému do zátěže 32 $\Omega$ .



Obr. 13: Zapojení sluchátkového zesilovače

Na obrázku výše vidíte pojení sluchátkového předzesilovače TPA610. Nastavil jsem zesílení zesilovačů podle katalogu na hodnotu jedna a to zapojením dvou rezistorů do zpětné vazby a přidal kondenzátor C22 (1n). Tato kombinace s rezistorem vytváří filtr na vysoké frekvence, pro lepší stabilitu zesílení a k ořezání spektra. Na vstupu můžeme vidět RC článek R3 a C15 jedná se o filtr dolní proti případnému pronikání frekvenčních špiček do zesilovače. I když se jedná o jeden integrovaný obvod zvolil jsem dvojí napájení pro každý zesilovač a to z důvodu menších přeslechů mezi jednotlivými kanály. Výstupní rezistory R16 a R17 jsou zde podle katalogu přidány kvůli větší



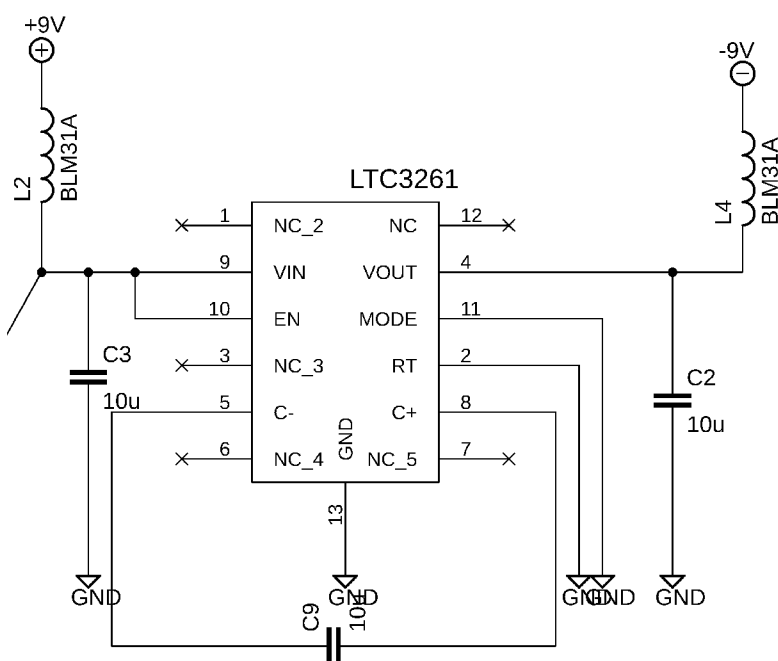
stabilitě a proti kapacitnímu pronikání zpět do zesilovače. Posledním prvkem jsou ochranné diody na vstupu proti přepětí.[4]

## 6.2 Napájecí obvody

Podle zadání musí mít přípravek napájení pomocí jak baterie, tak i pomocí stejnosměrného konektoru, tudíž se jedná jen o jednu polaritu napětí. Abych mohl napájet zesilovače symetrickým napětím, zařadil jsem do svého zapojení měnič napětí, který vytváří záporné stejnosměrné napětí. Dále je v zadání uvedeno, že vstupní 3 mm jack mikrofonního zesilovače má mít předpětí 2,6 V při 2,2 k $\Omega$ . Toto řeším nízko šumovým regulátorem, který by měl do obvodu vnést minimální šum a zároveň udělat tvrdý zdroj požadovaného napětí.

### 6.2.1 Inverzní měnič napětí

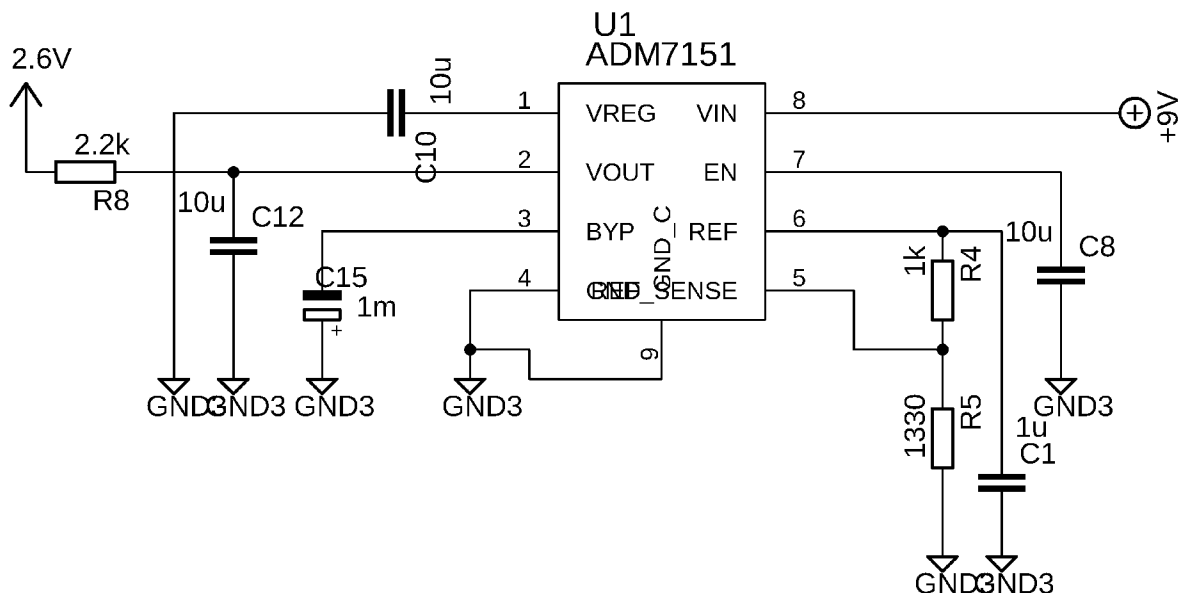
Tento měnič nám v obvodu slouží jako zdroj záporného napětí pro napájení operačních zesilovačů. Vybral jsem typ TLC3261. Tento měnič v rozsahu 4,5 V až 32 V je schopen dodávat až 100 mA. Obvod může fungovat v několika módech a má nastavitelný oscilátor od 50 kHz do 500 kHz. Pro naše potřeby je vhodné použít takzvaný Burst mode s nejvyšší možnou frekvencí oscilátoru, kdy má klidovou spotřebu pouze 60 uA. Toto opatření je nutné, protože při nižší frekvenci by nám mohl měnič pouštět rušení do slyšitelného spektra a tím rušit signál. Na obrázku můžeme vidět zapojení tohoto měniče. Obvod je zapojený podle doporučení v katalogu. Uzemnění vývodu RT je nastavena frekvence na 500 kHz. Na vstupu a výstupu jsou připraveny pájecí plošky pro feritové korálky L2 a L4 proti případnému pronikání vysokofrekvenčního rušení do zesilovačů.[5]



Obr. 14: Inverzní měnič napětí

## 6.2.2 Předpětí pro mikrofon

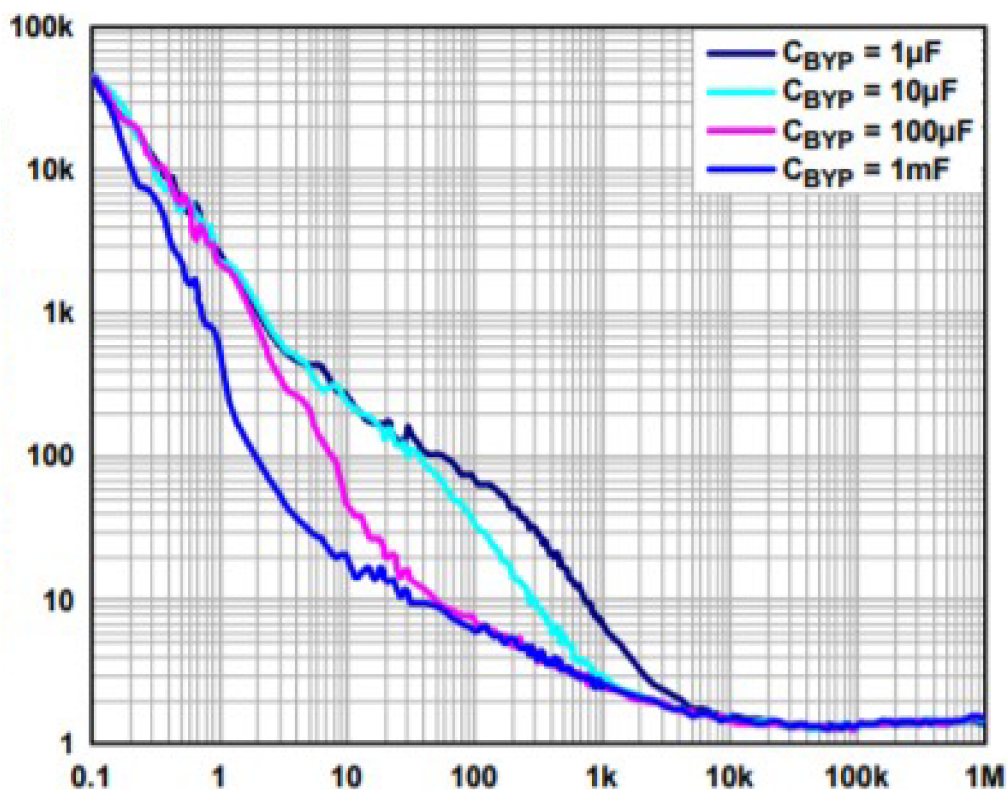
Jak už jsem uvedl výše, je nutné podle doporučení ITU-T Rec. P.381 (08/2012), aby měl mikrofonní vstup předpětí 2,6 V při hodnotě 2,2 k $\Omega$ . To řeším integrovaným obvodem ADM7151. Jedná se o nízko šumový lineární regulátor s nízkým úbytkem, který pracuje v rozsahu 5 až 16 V a poskytuje výstupní proud až 800 mA. Má nízký šum až 1,7 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$  v pásmu od 10 kHz do 1 MHz. Výstupní napětí lze nastavit od 1,5 do 5,1 V podle hodnoty 2 rezistorů.



Obr. 15: LDO zapojení

Na obrázku můžeme vidět zapojení LDO AMD7151. Kdy velikosti rezistorů R4 a R5 jsou vypočítány podle vzorce (6. 2). V zapojení můžeme vidět rezistor C15, kterým nastavíme výstupní úroveň šumu, kdy jsem použil kondenzátor o velikosti 1 mF. Tato velikost ovšem také určuje za jak dlouho se nám naše požadovaná hodnota nastaví na výstupu. Po testování bych případně kapacitu zmenšil například na 100  $\mu\text{F}$ , aby nedocházelo ke zbytečné prodlevě. Rozdíl ve výstupním šumu už není takový. Tato vlastnost s nastavitelným šumem je vhodná pro moje zapojení, jelikož si můžu nastavit co nejmenší šum. Na Obr. 16 můžete vidět graf s šumovými vlastnostmi vybraných kapacit. V katalogu je doporučeno použít na vstup i výstup kondenzátory o velikosti 10  $\mu\text{F}$ , kdy má integrovaný obvod nejlepší přechodovou odezvu.[6]

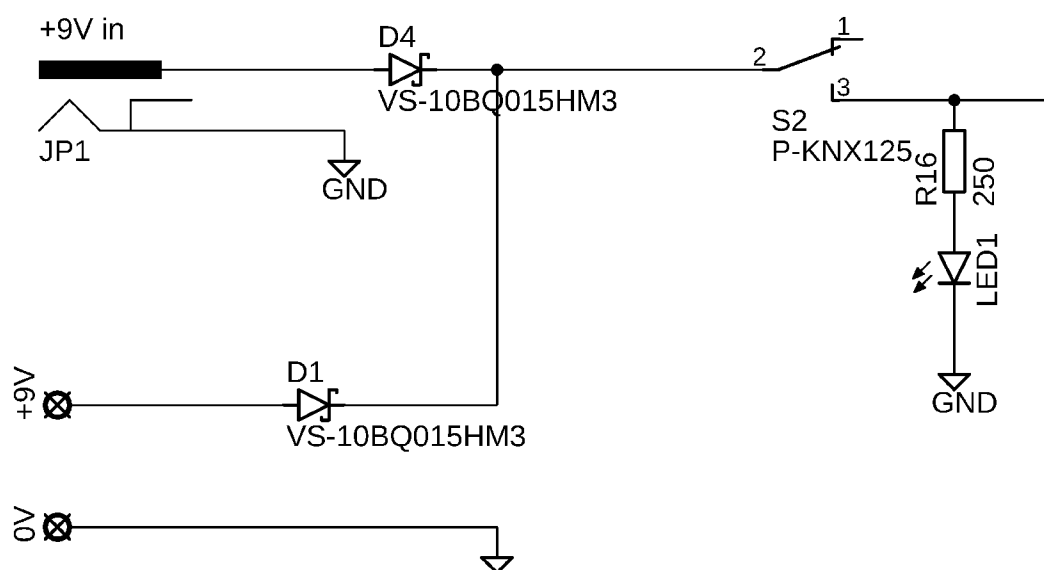
$$U_{out} = 1,5 V \times \left(1 + \frac{R_4}{R_5}\right) \quad (6. 2)$$



Obr. 16: šumová charakteristika ADM7151 v závislosti na připojeném kondenzátoru [6]

### 6.2.3 Vstupní obvody

Poslední obvodovou částí jsou vstupní obvody mého zapojení. Vidíme vstup ze stejnosměrného konektoru a vstup z bateriového pouzdra. Podle zadání jsem měl vstupy ošetřit před zpětným proudem. To jsem udělal Schotkyho diodami D4 a D5. Jako poslední zde vidíme vypínač a led dioda pro signalizaci aktivního zařízení.



Obr. 17: Vstupní obvody

## 7 Praktická část

V této kapitole popíšu návrh v prostředí Autodesk Eagle, kdy jsem celý návrh plošného spoje podřídil vybrané krabičce. Krabička má být podle zadání kovová. Na velikost krabičky nebyl udán parametr zadání, tudíž jsem zvolil větší krabičku od společnosti Hammond s rozměry 120 mm × 78 mm × 43 mm, kterou můžete vidět na Obr. 18. Výška 43 mm je zásadní, jelikož jsme rozdělili plošný spoj do dvou desek, které se vloží do krabičky. Krabička tedy musí být dostatečně vysoká, aby se všechny vstupní a výstupní konektory mohly dát na jednu stranu a na druhou napájecí konektor, vypínací tlačítko a vedle pouzdro na baterii. Jako pouzdro na baterii jsem vybral MP000382, které je na jednu 9 V baterii. Vybral jsem ho z důvodu, že je možné vyměnit baterii z venku a není nutné rozebírat celou krabičku.



Obr. 18: Krabička Hammond

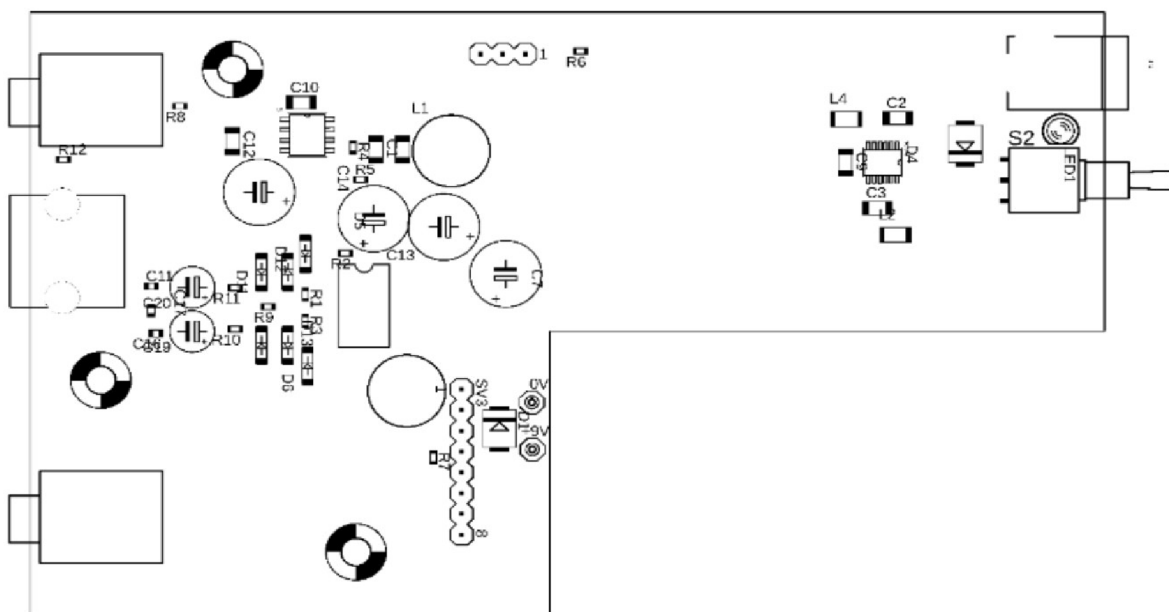
### 7.1 Návrh plošného spoje

Při návrhu s ultra nízkým šumem je zapojení stejně důležité jako následný návrh desky plošného spoje. V této kapitole se proto zaměřím na jednotlivé náležitosti, co by měl obsahovat takovýto nízkošumový návrh a popíši, jak jsem tyto věci řešil já. Návrh jsem rozdělil na dva plošné spoje, které jsou propojené mezi sebou kolíkovou a dutinkovou lištou SV1 a SV3. Toto rozdělení mi

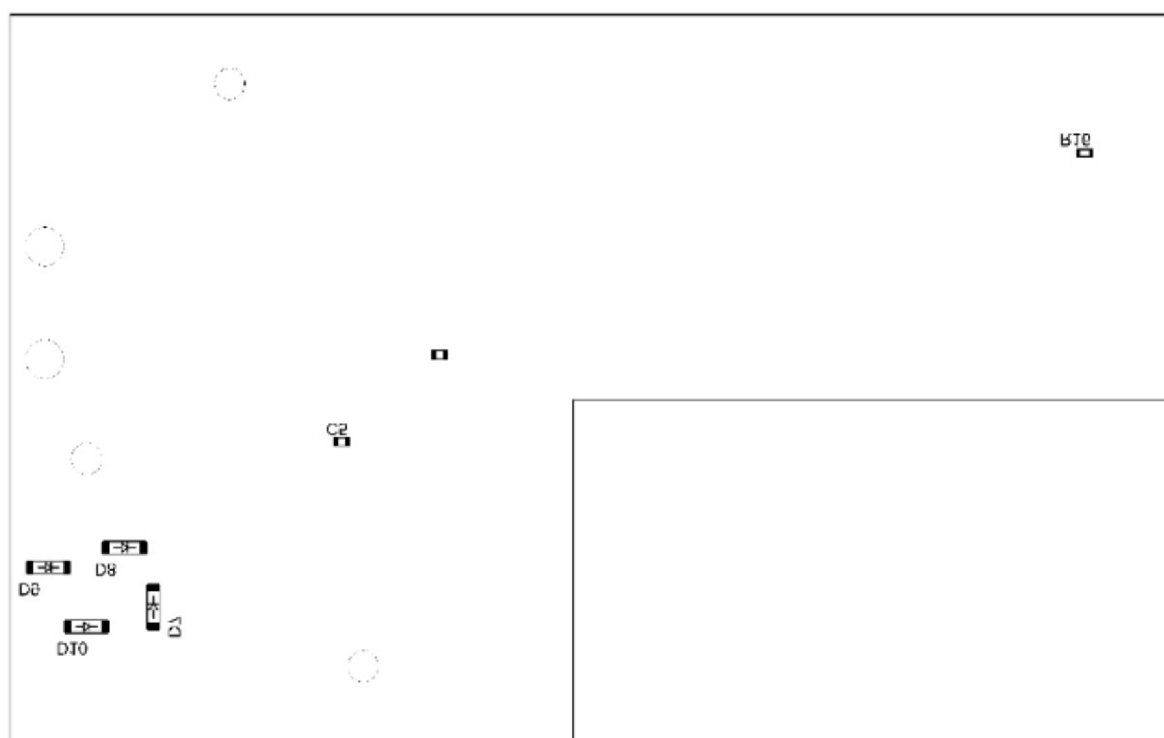
umožnilo dát od sebe co nejdále sluchátkový a mikrofonní předzesilovač a tím snížit přeslechy mezi jednotlivými kanály. Obě desky drží pohromadě pomocí distančními sloupky.

### 7.1.1 Dolní patro

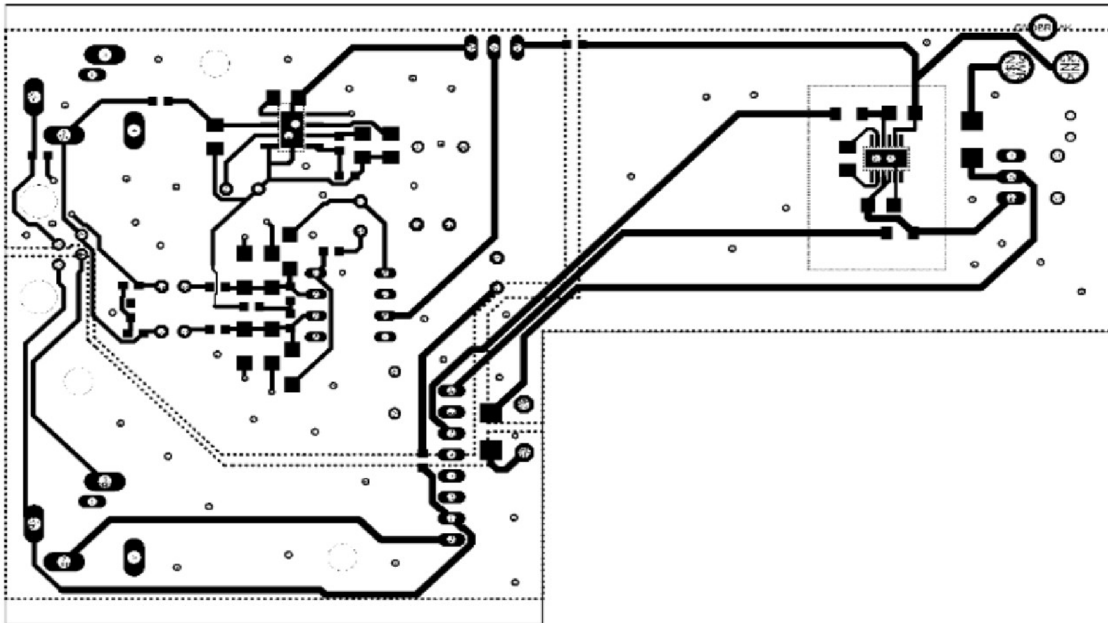
V této kapitole popíšu celé zapojení dolního patra, které můžeme vidět na Obr. 19, Obr. 21, Obr. 22. Na osazovacím plánu můžeme vidět na čelní straně 2 jack konektory a zásuvku na RJ11 konektor. Na zadní straně můžeme vidět stejnosměrný konektor a vypínací páčku. Deska samotná je vyříznutá na bateriové pouzdro. Na straně TOP vedou signálové cesty a nachází se zde i většina SMD součástek. Na straně BOTTOM vedou napájecí rozvody tažené silnějšími cestami. Umístění jednotlivých součástek není náhodné, měnič LTC3261 leží dál od dalších obvodů z důvodu odstínění rušivých signálů z měniče. U dutinkové lišty SV1 je lineární regulátor s nízkým úbytkem a vedle něj mikrofonní zesilovač, jelikož tyto dva bloky mají stejnou zem a vedou od nich cesty ke stejnému jack konektoru. Přes dutinkovou lištu SV1 jde na horní desku signál z mikrofonního zesilovače a zem tohoto zesilovače. Rozmístění součástek u mikrofonního zesilovače bylo potřeba udělat co nejvíce symetrické, abych dosáhl požadovaných parametrů. Dolní sluchátkový jack konektor jsem umístil co nejdále od mikrofonního jack konektoru z důvodu co nejnižších přeslechů. Dutinkovou lištou SV3 do horního patra prochází napájení a také sluchátkové kanály a jejich země. Jeden sluchátkový kanál vedu v hladině TOP a jeden v hladině BOTTOM a to z důvodu zamezení přeslechů mezi sluchátkovými kanály. Na obrázcích můžeme vidět rozdělení jednotlivých zemí, které jsou namalované přerušovanou čarou. Každý zesilovač má svoji zem a napájecí obvody také. Pak jsou tyto země propojeny nulovými rezistory jen v jednom místě. Tímto opatřením se zamezí vytváření zemních smyšek. V jednotlivých vrstvách země jsou udělané prokovy z jedné hladiny do druhé toto je z důvodu, aby se zvýšila vodivost celé desky.



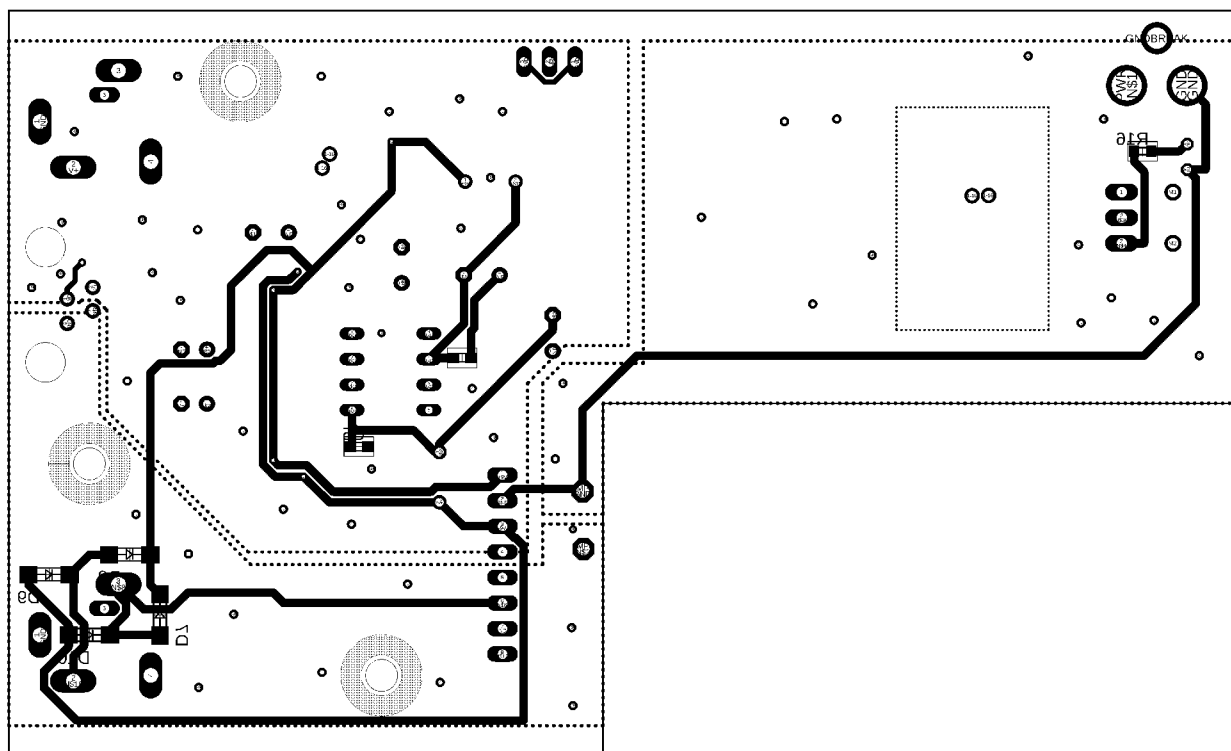
Obr. 19: Osazovací plán dolní patro TOP



Obr. 20: Dolní patro osazovací plán BOTTOM



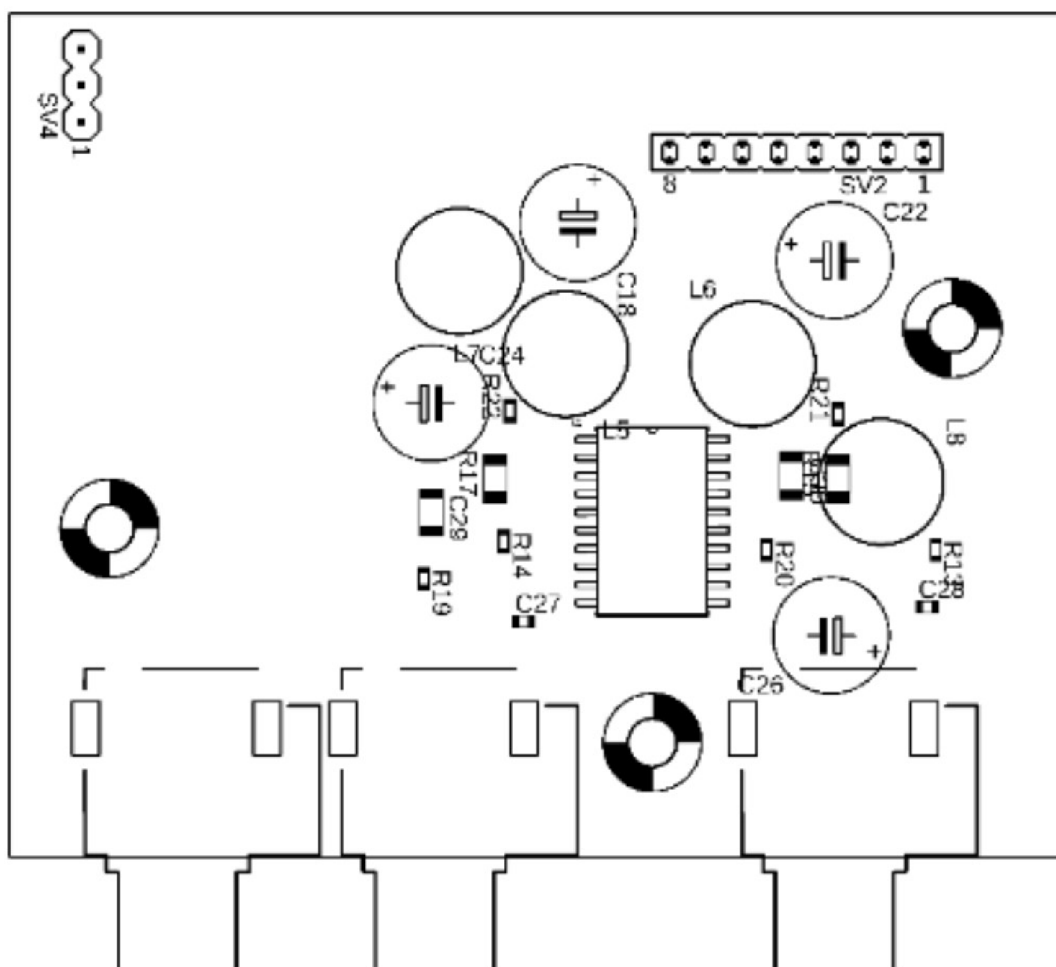
Obr. 21: Dolní TOP



Obr. 22: dolní BOTTOM

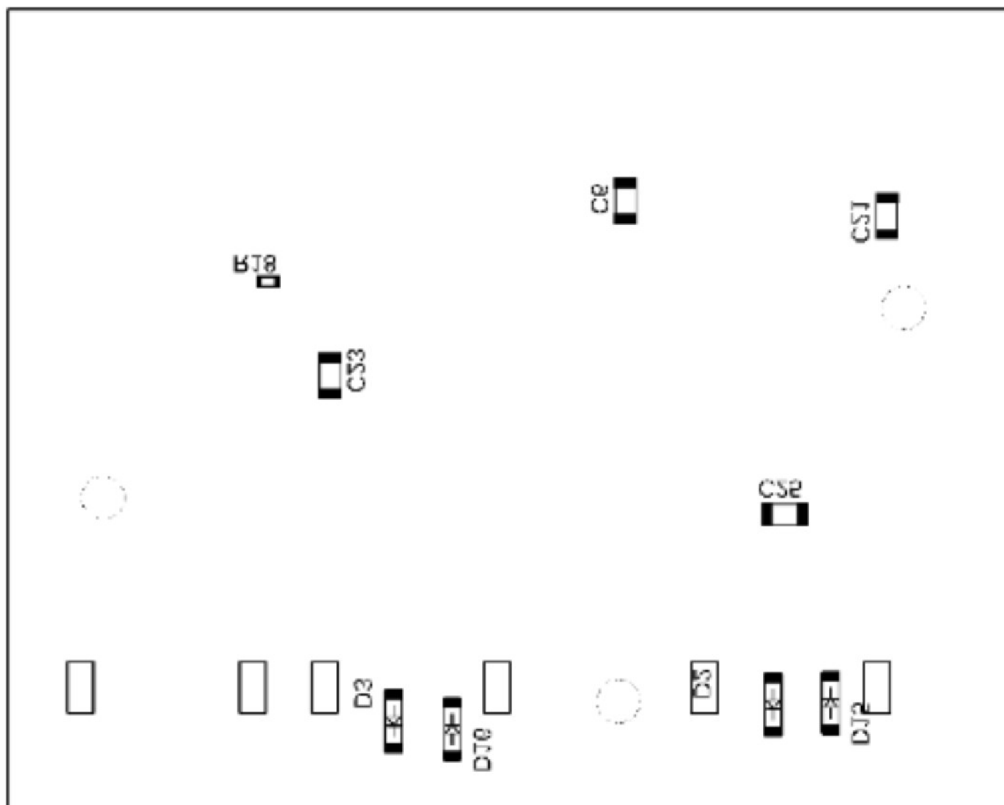
### 7.1.2 Horní patro

V této kapitole popíšu celé zapojení horního patra, které můžeme vidět na obrázcích níže. Na osazovacím plánu vidíme, že hornímu patru dominuje sluchátkový zesilovač a tři Cinch konektory. Dva Cinch konektory jsou pro pravý a levý kanál sluchátkového zesilovače a třetí Cinch konektor je mikrofonní výstup již zesíleného signálu. Mikrofonní kanál má vlastní standardní kolíkovou a dutinkovou lištu s roztečí 2,54 mm SV2, kde vede zesílený mikrofonní signál ze spodní desky a co nejkratší cestou je připojen na Cinch, aby nedocházelo k rušení či přeslechům. Kolíkovou a dutinkovou lištou SV1 vede sluchátkový signál z každého kanálu a napájení. Stejně jako u dolního patra je v hladině TOP většina užitečných signálů a v hladině BOTTOM napájení.

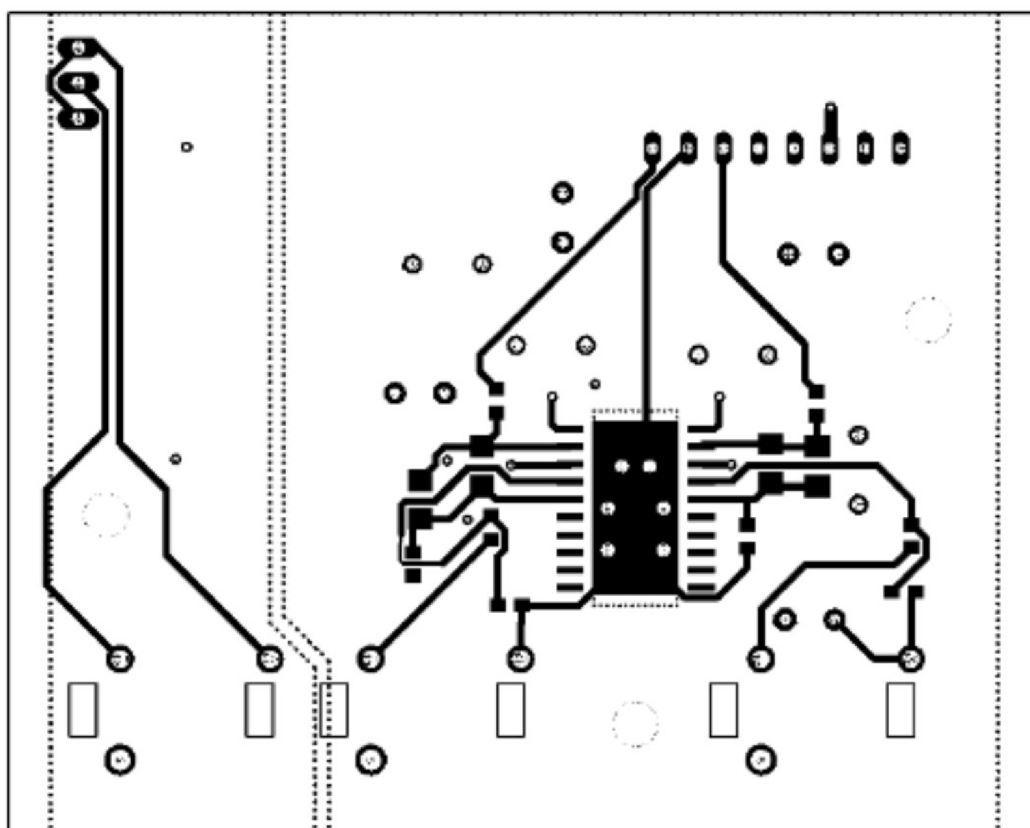


Obr. 23: Horní patro osazovací plán TOP

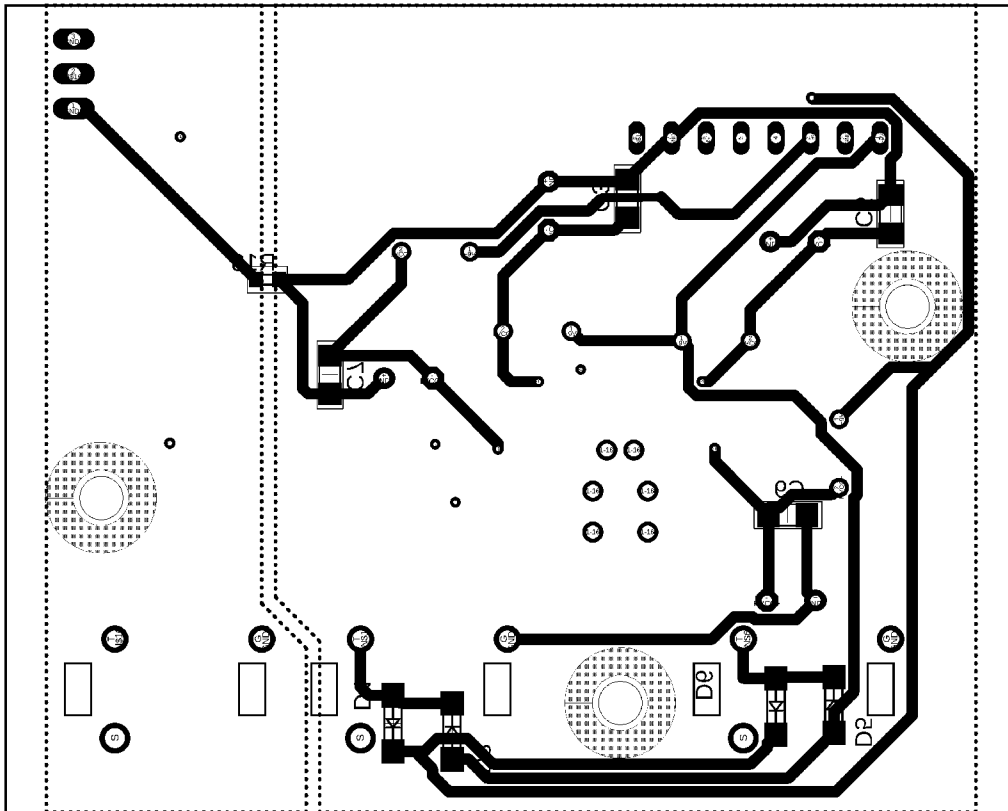




Obr. 24: Horní patro osazovací plán BOTTOM



Obr. 25: Horní TOP



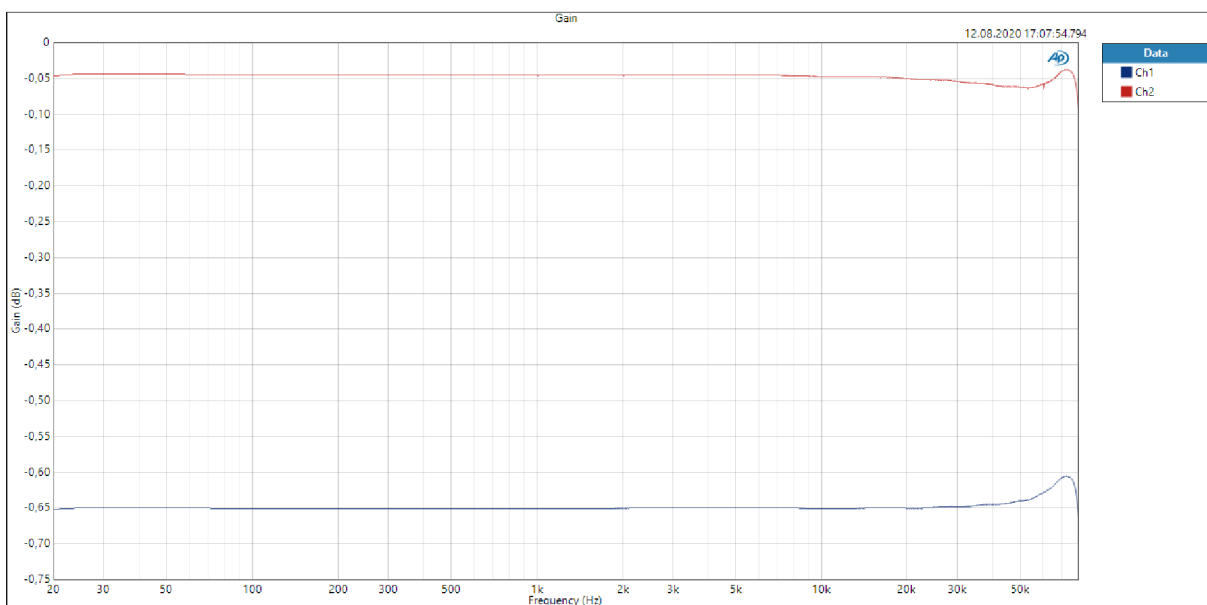
Obr. 26: Horní BOTTOM

## 8 Měření na Audio Precision APx525.

V této kapitole jsou popsány naměřené charakteristiky obou předzesilovačů na analyzátoru Audio Precision APx515. APx525 byl zabraný na celý týden.

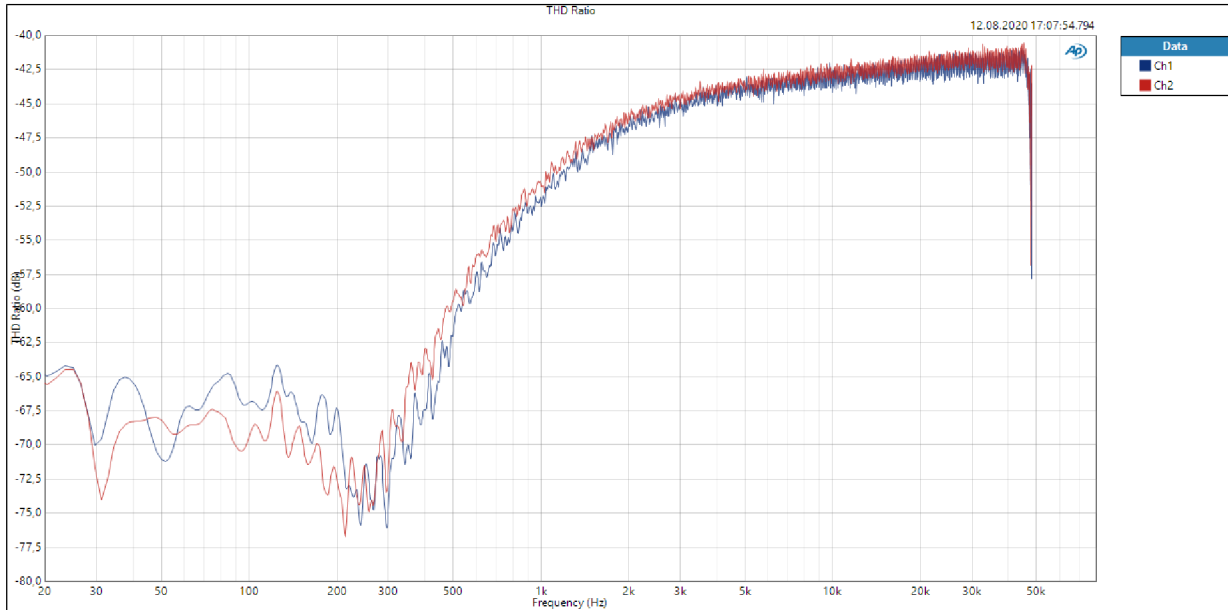
### 8.1 Měření sluchátkového předzesilovače

Bylo měřeno při hodnotě 100mVrms a zátěži 32Ω s připojeným drátovým rezistorem, v rozsahu 20 Hz do 80kHz a čas frekvenčního sweepu byl 350 ms. Na grafu níže můžeme vidět oba kanály mírně od sebe jedná o chybu tolerance součástek, jinak je charakteristika vyrovnaná a má zvlnění minimální.



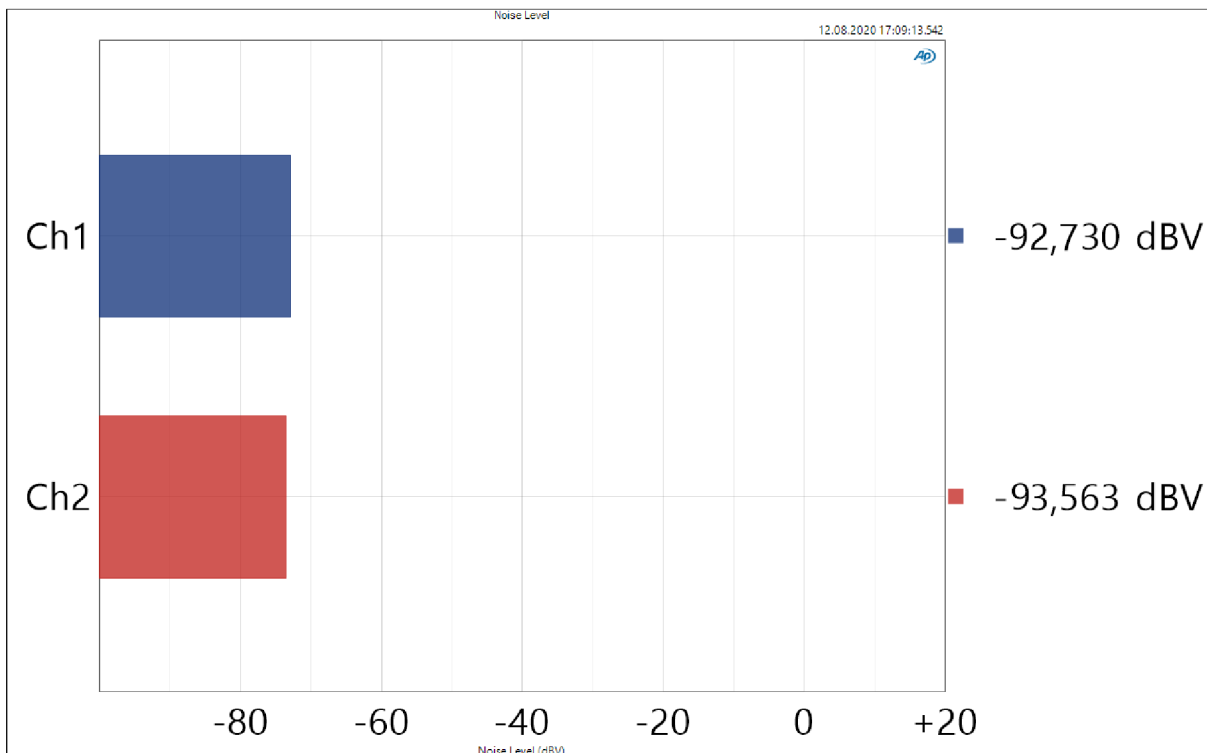
Obr. 27: Zisk sluchátkového zesilovače

Jako další graf můžeme vidět harmonické zkreslení.



Obr. 28: Harmonické zkreslení sluchátkového zesilovače

Jako poslední měření je výstupní šum sluchátkového zesilovače. Hodnota každého kanálu je pod -90 dBV což je hodnota, která je podle zadání.

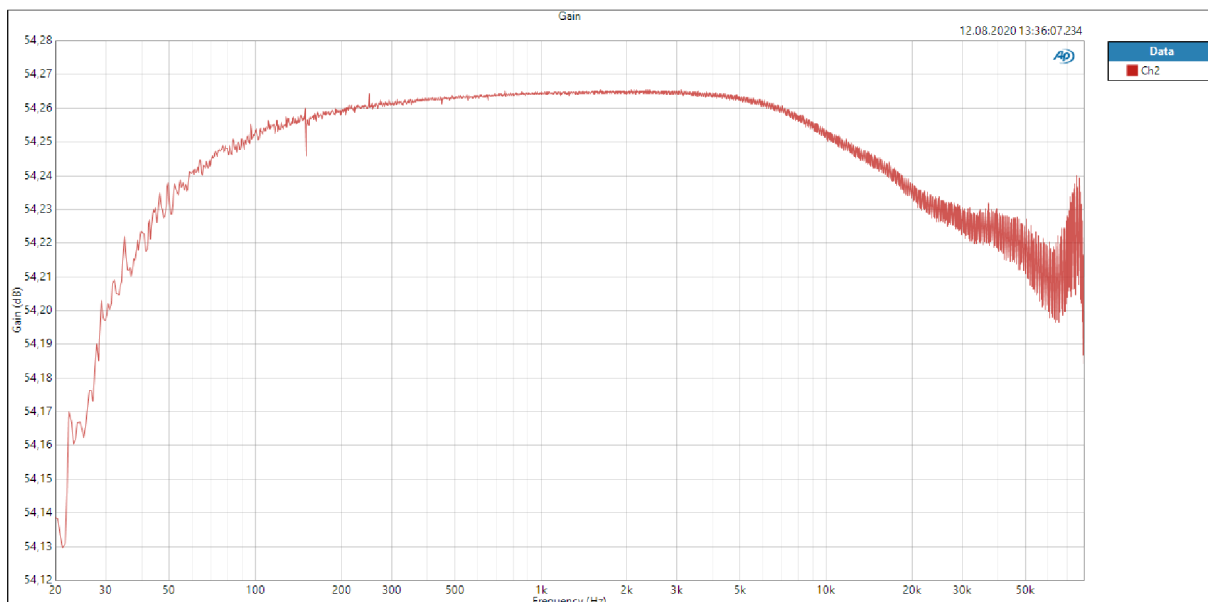


Obr. 29: šum kanálů sluchátkového zesilovače

## 8.2 Měření mikrofonního předzesilovače

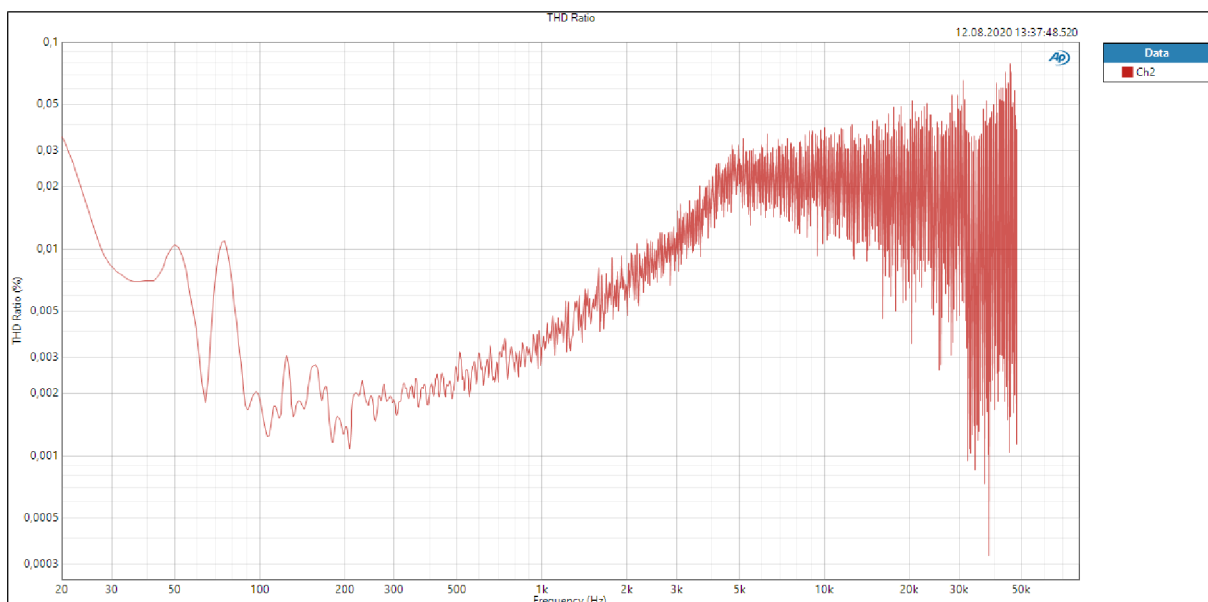
Všechna měření proběhla při napětí 3,150 mV v rozsahu 20 Hz až 80 kHz.

Na obrázku můžeme vidět vyrovnanou frekvenční charakteristiku zisku. Vidíme, že i přes nastavení zesílení rezistorem na 47 dB je zesílení 54 dB. Je to nepatrná odchylka, která je způsobená tolerancí rezistoru nebo jeho velikostí a její oprava je snadná, vyměnit rezistor za jiný, po případě o něco větší. Jinak je charakteristika vyrovnaná v celém frekvenčním pásmu a má zvlnění menší než 1 dB.



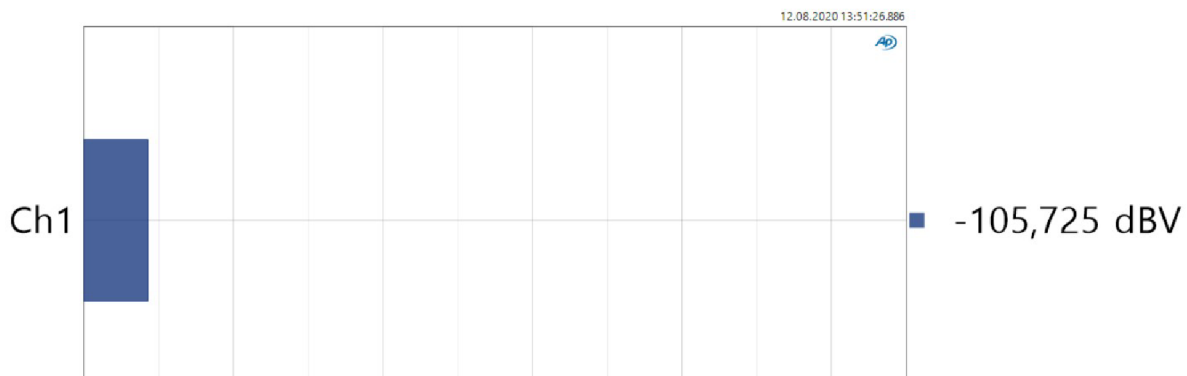
Obr. 30: zisk mikrofonního zesilovače

Na obrázku níže vidíme graf změřeného harmonického zkreslení.



Obr. 31: Harmonické zkreslení mikrofonního zesilovače

Jako poslední graf nám ukazuje úroveň šumu mikrofonního zesilovače. Tato hodnota je -105 dBV. Tato hodnota je velice nízká a shoduje se s doporučením.



Obr. 32: úroveň šumu mikrofonního předzesilovače

## 9 Vložení DPS do krabičky

V této kapitole jsou fotky DPS plošného spoje a samotná krabička. Vyvrtané díry v předním a zadním panelu. Na Obr. 33 můžeme vidět osazenou zadní část krabičky stejnosměrným konektorem, signalizační LED diodou a bateriovým držákem, do kterého je možné se dostat zvenčí aniž by se musela rozebrat krabička. Na Obr. 34 vidíme osazenou přední část krabičky třemi Cinch konektory, zásuvku pro mikrotelefon s konektorem RJ11 a jako poslední jsou zde dvě jack 3,5 mm zásuvky pro mikrofon a sluchátka.



Obr. 33: Zadní osazená strana krabičky



Obr. 34: přední osazená strana krabičky

## 10 Závěr

Cílem bakalářské práce bylo navrhnout měřící audio předzesilovač pro komunikátor. Zařízení má sloužit při laboratorní výuce. V první části bakalářské práce je rozebrána teorie zesilovačů a předzesilovačů a všechny možné známé varianty a zapojení. Je zde vysvětlena teorie šumů a jejich vlivu na předzesilovače.

V další části bakalářské práce se zaměřuji na samotný návrh předzesilovačů a výběr vhodných součástek na základě teoretických znalostí. Navrhl jsem jeden předzesilovač pro mikrofon se zesílením  $A=250$ , kdy jsem vybral přístrojový předzesilovač THAT1512, který je často používaný pro tuto aplikaci. Druhý zesilovač, který jsem sestrojil, je pro sluchátka. Na ten jsem vybral integrovaný zesilovač se zápornou zpětnou vazbou TPA6120. Ten je vhodný pro tuto aplikaci a bez problému dokáže dodávat do  $32\Omega$  150 mV. Oba zesilovače by měli dosáhnout výstupního šumu -90 dBV. Jako další části zapojení jsem navrhl měnič napětí pro symetrické napájení zesilovačů a také předpětí pro mikrofon v podobně lineárního regulátoru ADM7151 s nastavitelným výstupním šumem, který mi umožnil nastavit na regulátoru co nejnižší šum. Ošetřil jsem vstupy diodami a vysokofrekvenčními filtry podle zadání. Desku plošného spoje jsem navrhl v Prostředí Autodesk Eagle.

V další kapitole popisují princip nízkošumového návrhu DPS a jaké zásady by měli být dodrženy, aby docházelo k co nejmenším přeslechům a rušením z napájecích prvků.

Poslední kapitola je věnována měření již funkčních zesilovačů a následné vložení do krabičky, vyvrtání čelního a zadního panelu. Při měření můžeme vidět, že mají oba zesilovače vyrovnanou frekvenční charakteristiku, malé zvlnění a nízký šum dostačující zadání.

Při samotné konstrukci jsem zápolil s mnohými problémy, které jsem se ale snažil co nejrychleji řešit. Při testování jsem nejen měřil charakteristiky, ale také jsem zkoušel, zda bude fungovat připojený mikrofon na předpětí a zda bude slyšet ze sluchátek zvuk, pokud pustíme z generátoru sinusový signál. Všechny tyto věci fungují. Jako poslední bych rád okomentoval, že mechanická stránka celého přípravku je velice dobrá a krabička je bytelná. Konektory sedí pěkně v deskách. Drobou vadou na kráse jsou občas neuměle zabroušené otvory na konektory nebo je díra o něco větší. Myslím že v tomto stavu, ve kterém odevzdávám bakalářskou práci jsem splnil zadání.



## Seznam použité literatury

- [1] P.381: Technical requirements and test methods for the universal wired headset or headphone interface of digital mobile terminals [online]. [cit. 2019-12-15]. Dostupné z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-P.381-201208-S/en>
- [2] SELF, D. Small Signal Audio Design. Focal Press, 2010. ISBN 978-0-240-52177
- [3] *THAT Corporation 1510/1512 Datasheet: Low-Noise, High Performance Audio Preamplifier IC* [online]. 2009 [cit. 2020-08-06]. Dostupné z: <http://www.thatcorp.com/datashts/1500data.pdf>
- [4] *TPA6120A2 High Fidelity Headphone Amplifier datasheet: TPA6120A2 High Fidelity Headphone Amplifier* [online]. 2015 [cit. 2020-08-06]. Dostupné z: [https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tpa6120a2.pdf?ts=1596698718640&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tpa6120a2.pdf?ts=1596698718640&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F)
- [5] *LTC3261 – High Voltage, Low Quiescent Current Inverting Charge Pump: High Voltage, Low Quiescent Current Inverting Charge Pump* [online]. 2012 [cit. 2020-08-06]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/3261fb.pdf>
- [6] *ADM7151: 800 mA Ultralow Noise, High PSRR, RF Linear Regulator* [online]. 2013 [cit. 2020-08-06]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADM7151.pdf>

