



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

## NÁVRH A REALIZACE VSTUPNÍCH A VÝSTUPNÍCH OBVODŮ A/D A D/A PŘEVODNÍKU PRO ZPRACOVÁNÍ ZVUKOVÝCH SIGNÁLŮ

DESIGN AND REALIZATION OF INPUT AND OUTPUT CIRCUITS OF AD AND DA CONVERTERS  
FOR AUDIO SIGNAL PROCESSING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

TOMÁŠ STEJSKAL

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JIŘÍ SCHIMMEL, Ph.D.

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
**Teleinformatika**

**Student:** Tomáš Stejskal

**ID:** 45298

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2010/2011

## NÁZEV TÉMATU:

**Návrh a realizace vstupních a výstupních obvodů A/D a D/A převodníku pro zpracování zvukových signálů**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte a ve formě prototypu realizujte vstupní a výstupní obvod A/D a D/A převodníků určených pro zpracování zvukových signálů se vzorkovacím kmitočtem 96 kHz a vysokým odstupem signálu od šumu. Vstupní mikrofonní a linkový zesilovač bude umožňovat digitálně řízené zapínání funkce mute, otočení fáze vstupního článku, aktivaci útlumového článku 20 dB a regulaci zesílení mikrofonního vstupu. Vstupní i výstupní obvod bude umožňovat symetrické i nesymetrické připojení pomocí konektorů XLR. Při návrhu se snažte dodržet všechny zásady nutné k dosažení co největšího odstupu signálu od šumu, minimálních přeslechů a nelineárního zkreslení a přenosu pásma 20 Hz - 20 kHz pro pokles maximálně 1 dB. Provedte ověření těchto parametrů měření.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Kotisa, Z., NF zesilovače a jejich amatérská stavba - 1. díl předzesilovače. BEN - technická literatura, Praha 2001. ISBN 80-7300-030-X

[2] Vrba, K., Herman, I., Kubánek, D.: Konstrukce elektronických zařízení. Skriptum VUT v Brně, Brno 2010.

[3] Vrba, R.: Převodníky A/D a D/A. Učební text, Brno 2000.

**Termín zadání:** 7.2.2011

**Termín odevzdání:** 2.6.2011

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

**prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.**

*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

Cílem bakalářské práce je návrh obvodového schématu vstupních a výstupních obvodů analogově – digitálních a digitálně – analogových převodníků určených ke zpracování nízkofrekvenčních signálů a jejich realizace. Po teoretickém úvodu do problematiky souvisejícím s kvalitativními požadavky na zpracování audiosignálu nízkofrekvenčními zesilovači následuje výběr aktivní součástkové základny s ohledem k dosažení požadované kvality a parametrů definovaných v zadání. Posléze následuje návrh obvodového schématu vlastního řešení vstupního a výstupního zesilovače a realizace jejich funkčních vzorků. Vstupní zesilovač umožňuje některé z funkcí, které jsou běžné u profesionálně zpracovávaného zvuku, což jsou aktivace útlumového článku, obrácení fáze vstupního signálu a funkce MUTE. Tento zesilovač je tvořen třemi logickými bloky. Prvním blokem je předzesilovač o velkém zesílení cca 60dB a velkým odstupem užitečného signálu od šumu. Následuje blok tvořený filtrem horní propusti potlačující rušivé signály tzv. brum. Posledním blokem je výstupní zesilovač, který zajišťuje symetrický výstup pro připojení A/D převodníku. Výstupní zesilovač, ke kterému je připojen D/A převodník se skládá ze dvou logických bloků. Vstupní zesilovač je prvním blokem, který vstupující symetrický signál mění na nesymetrický. Druhý blok je tvořen výstupním zesilovačem majícím symetrický výstup o linkové úrovni.

## Klíčová slova

Vstupní obvod, výstupní obvod, analogově-digitální převodník, digitálně-analogový převodník, zesilovač, logický blok.

## Abstract

This bachelor's thesis aims at designing the circuit diagram of input and output circuits of analog to digital and, simultaneously, digital to analog convertors intended to process audio signals and their realization. The introductory theoretical part deals with the qualitative requirements concerning the way low-frequency audio amplifiers process audio signal. The following part focuses on the active component base selection with respect to the achievement of the required quality and parameters as defined in the task description. The next part comprises the design of the input and output amplifier circuit diagram itself and then the realization of their functional samples. The input amplifier provides some of the functions which are common with high quality sound production; such as attenuator activation, input signal phase inversion, and MUTE function. This amplifier consists of three logically sequenced parts. A preamplifier with approximately 60 dB amplification and with high separation between a useful signal and noise stands for the first part; a high-pass filter that suppresses interfering signals stands for the second part; and an output amplifier ensuring the balanced output for the analog to digital convertor stands for the last part.

The output amplifier, which is connected to the digital to analog convertor, is also embraced of three logically sequenced parts. The first one includes the input amplifier which transforms the input balanced signal to the unbalanced one. The second part is created of an output amplifier that has the line level balanced output.

## Keywords

Input circuit, output circuits, analog-digital convertor, digital-analog convertor, amplifier, logical block.

## Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Návrh a realizace vstupních a výstupních obvodů A/D a D/A převodníku pro zpracování zvukových signálů“ 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 semestrální práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne .....

.....  
podpis autora

## Poděkování

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

V Brně dne .....

.....  
podpis autora

STEJSKAL, T. *Návrh a realizace vstupních a výstupních obvodů A/D a D/A převodníku pro zpracování zvukových signálů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 55 s., 8 s. příloh. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.

# OBSAH

Úvod.....	1
<b>1 Teoretický úvod .....</b>	<b>2</b>
1.1 Úvod do problematiky .....	2
1.2 Charakteristické parametry zesilovačů v nf technice .....	3
1.2.1 Vstupní citlivost .....	3
1.2.2 Vstupní impedance .....	4
1.2.3 Zisk zesilovače .....	5
1.2.4 Výstupní impedance .....	5
1.2.5 Kmitočtová a fázová charakteristika .....	6
1.2.6 Odstup signálu od šumu .....	6
1.2.7 Přeslech mezi kanály .....	7
1.2.8 Nelineární zkreslení a činitel nelineárního zkreslení .....	7
1.2.9 Dynamika .....	9
1.3 Rozbor zadání .....	9
1.3.1 Vstupní mikrofon/linkový zesilovač .....	9
1.3.2 Výstupní linkový zesilovač .....	11
<b>2 Problematika výběru součástkové základny .....</b>	<b>12</b>
2.1 Vstupní impedance .....	12
2.2 Kmitočtová charakteristika .....	12
2.3 Fázová charakteristika .....	12
2.4 Odstup signálu od šumu .....	13
2.4.1 Šum operačních zesilovačů .....	13
2.4.2 Šum pasivních součástek .....	14
2.5 Nelineární zkreslení a činitel nelineárního zkreslení .....	15
2.5.1 Konečná rychlost přeběhu .....	15
2.6 Srovnání operačních zesilovačů .....	16
<b>3 Návrh vlastního řešení .....</b>	<b>17</b>
3.1 Návrh vstupního mikrofon/linkového zesilovače .....	17
3.1.1 Blok předzesilovače .....	17
3.1.2 Blok filtru horní propusti .....	20
3.1.3 Blok výstupního zesilovače .....	24
3.2 Návrh výstupního linkového zesilovače .....	25
3.2.1 Vstupní blok zesilovače .....	26
3.2.2 Blok výstupního zesilovače .....	26
<b>4 Softwarové simulace .....</b>	<b>27</b>
4.1 Simulace vstupního mikrofon/linkového zesilovače .....	27
4.2 Simulace výstupního linkového zesilovače .....	33
<b>5 Návrh desek plošných spojů .....</b>	<b>34</b>
5.1 Návrh DPS č.1 – Vstupního mikrofon/linkového zesilovače č.1 a č.2 .....	34
5.2 Návrh DPS č.2 – Výstupního linkového zesilovače .....	37
<b>6 Naměřené výsledky .....</b>	<b>39</b>
6.1 Měření vstupního mikrofon/linkového zesilovače .....	39
6.1.1 Kmitočtová a fázová charakteristika .....	39
6.1.2 Harmonického zkreslení THD + N .....	45
6.1.3 Intermodulační zkreslení IMD .....	46
6.1.4 Přeslech mezi kanály č. 1 a č. 2 .....	47
6.2 Měření výstupního linkového zesilovače .....	47
6.2.1 Kmitočtová a fázová charakteristika .....	48

6.2.1	Harmonického zkreslení THD + N .....	49
6.2.1	Intermodulační zkreslení IMD .....	49
<b>Závěr</b>	.....	<b>50</b>
<b>Použitá literatura</b>	.....	<b>52</b>
<b>Seznam zkratk</b>	.....	<b>54</b>
<b>Seznam příloh</b>	.....	<b>55</b>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Zapojení vstupního a výstupního obvodu s A/D a D/A převodníkem.....	3
Obr. 2: Příklad kmitočtové charakteristiky s definovaným poklesem .....	6
Obr. 3: Vstupní a výstupní charakteristika zesilovače bez zkreslení .....	7
Obr. 4: Deformace výstupního signálu zesilovače vlivem přechodového zkreslení.....	8
Obr. 5: Deformace výstupního signálu zesilovače vlivem intermodulačního zkreslení .....	9
Obr. 6: Blokové schéma vstupního mikrofon/linkového zesilovače.....	10
Obr. 7: Blokové schéma výstupního linkového zesilovače.....	11
Obr. 8: Šumový model operačního zesilovače.....	13
Obr. 9: Vstupní část předzesilovače s obvodou MAX333 .....	17
Obr. 10: Schéma zapojení integrovaného obvodu SSM2019 .....	18
Obr. 11: Schéma bloku filtru horní propusti .....	20
Obr. 12: Kmitočtová a fázová charakteristika HPF pro $P_2 = P_3 = 0\Omega$ .....	22
Obr. 13: Kmitočtová a fázová charakteristika HPF pro $P_2 = P_3 = 50k\Omega$ .....	22
Obr. 14: Schéma bloku výstupního zesilovače. ....	24
Obr. 15: Kmitočtová a fázová charakteristika vstupního mikrofon/linkového zesilovače pro různá zesílení.....	28
Obr. 16: Průběh výstupního signálu vstupního mikrofon/linkového zesilovače při limitaci..	29
Obr. 17: Kmitočtová a fázová charakteristika vst. mikrofon/linkového zesilovače při zesílení 35,1dB .....	29
Obr. 18: Kmitočtová a fázová charakteristika vst. mikrofon/linkového při zesílení 35,1 dB s aktivovaným útlumovým článkem 20dB .....	30
Obr. 19: Průběh výstupního signálu vstupního mikrofon/linkového zesilovače při aktivaci funkce pro obrácení fáze .....	31
Obr. 20: Průběh výstupního signálu vstupního mikrofon/linkového zesilovače při aktivaci funkce MUTE.....	32
Obr. 21: Kmitočtová a fázová charakteristika s aktivním blokem filtru horní propusti pro různá nastavení trimrů.....	32
Obr. 22: Kmitočtová a fázová charakteristika výstupního linkového zesilovače při nominální úrovni zesílení +4 dBu .....	33
Obr. 23: DPS č. 1, strana TOP, 160x100 mm, měřítko 1:1.....	35
Obr. 24: DPS č. 1, strana BOTTOM, 160x100 mm, měřítko 1:1 .....	35
Obr. 25: DPS č. 1, osazovací plán pro vstupní mikrofon/linkový zesilovač strana TOP .....	36
Obr. 26: DPS č. 1, osazovací plán pro vstupní mikrofon/linkový zesilovač strana BOTTOM.....	36
Obr. 27: DPS č.2, strana TOP, 100x43 mm, měřítko 1:1.....	37
Obr. 28: DPS č.2, strana BOTTOM, 100x43 mm, měřítko 1:1 .....	37
Obr. 29: DPS č.2, osazovací plán, měřítko 1:1 .....	38
Obr. 30: Kmitočtová charakteristika kanálu č. 1 pro minimální zesílení.....	40
Obr. 31: Kmitočtová charakteristika kanálu č. 1 pro maximální zesílení .....	40
Obr. 32: Kmitočtová charakteristika kanálu č. 1 při zesílení 35 dB .....	41
Obr. 33: Kmitočtová charakteristika kanálu č. 1 při zesílení 35 dB a aktivním útlumovém článku .....	41
Obr. 34: Kmitočtová charakteristika kanálu č. 1 při zesílení 35 dB a aktivní funkcí MUTE..	42
Obr. 35: Kmitočtová charakteristika kanálu č. 1 při zesílení 35 dB a aktivní HPF .....	42
Obr. 36: Fázová charakteristika kanálu č. 1 při zesílení 35 dB před obrácením fáze vstupního signálu .....	43



Obr. 37: Fázová charakteristika kanálu č. 1 při zesílení 35 dB po obracení fáze vstupního signálu .....	43
Obr. 38: Kmitočtová charakteristika kanálu č. 1 při zesílení 35 dB při nesymetrické zátěži ..	44
Obr. 39: Fázová charakteristika kanálu č. 1 při zesílení 35 dB při nesymetrické zátěži.....	44
Obr. 40: Průběh harmonického zkreslení THD + N kanálu č. 1 při minimálním zesílení.....	45
Obr. 41: Průběh harmonického zkreslení THD + N kanálu č. 1 při zesílení 35 dB.....	45
Obr. 42: Průběh intermodulačního zkreslení kanálu č.1 při minimálním zesílení.....	46
Obr. 43: Průběh intermodulačního zkreslení kanálu č. 1 při zesílení 35 dB.....	46
Obr. 44: Průběh měření přeslechů mezi kanály vst mikrofon/linkového zesilovače .....	47
Obr. 45: Kmitočtová charakteristika výstupního linkového zesilovače.....	48
Obr. 46: Fázová charakteristika výstupního linkového zesilovače .....	48
Obr. 47: Průběh intermodulačního zkreslení výstupního linkového zesilovače .....	49
Obr. 48: Průběh intermodulačního zkreslení výstupního linkového zesilovače .....	49
Obr. B1: Schéma zapojení vstupního mikrofon/linkového zesilovače č. 1. ....	58
Obr. B2: Schéma zapojení vstupního mikrofon/linkového zesilovače č. 2 .....	59
Obr. B3: Schéma zapojení výstupního linkového zesilovače. ....	60
Obr. D1: Pohled na osazenou na DPS č. 1 ze strany TOP .....	63
Obr. D2: Pohled na osazenou na DPS č. 2 ze strany TOP .....	63

## SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Vstupní citlivost zesilovače pro různé elektroakustické zdroje .....	4
Tab. 2: Souvislost mezi výstupní a vstupní impedancí zesilovače pro různé druhy elektroakustických zdrojů .....	5
Tab. 3: Tabulka parametrů HPF v závislosti na nastavení trimrů P2 a P3.....	21
Tab. A1: Porovnání parametrů operačních zesilovačů pro realizaci bloku předzesilovače.....	56
Tab. A2: Porovnání parametrů operačních zesilovačů pro realizaci vstupního bloku.....	56
Tab. A3: Porovnání parametrů operačních zesilovačů pro realizaci bloku filtru horní propusti a bloku přepínání nominální úrovně.....	57
Tab. A4: Porovnání parametrů operačních zesilovačů pro realizaci výstupního bloku.....	57

# ÚVOD

V nízkofrekvenční (dále jen nf) technice se setkáváme s různými nároky na úpravu elektroakustického signálu o kmitočtech v pásmu o rozsahu cca 20Hz – 20 000Hz. Této potřebě v dnešní době nejlépe vyhovuje digitální zpracování. Důvodem je snadnější realizace specifických požadavků po převodu nf signálu do digitální podoby (např. různé druhy efektů, komprimace analogového signálu, atd.), které by byly těžko uskutečnitelné v analogové oblasti. Elektronická zařízení, která umožňují převod nf signálu z analogové oblasti do digitální se nazývají analogově-digitální převodníky, nebo zkráceně A/D převodníky. A naopak převod digitálního signálu do analogové oblasti je provedeno digitálně-analogovými převodníky, nebo D/A převodníky.

Signály určené pro A/D převodníky mohou být z různých elektroakustických zdrojů (např. mikrofony, linkové vstupy, efektová zařízení, atd.), které mají různé výstupní parametry. Tyto parametry nemusejí korespondovat se vstupními parametry A/D převodníků a také může být specifikován požadavek na korekci signálu před vstupem do tohoto převodníku. Proto je před tímto A/D převodníkem zařazen vstupní obvod. Tento vstupní obvod má za úkol zpracovat elektroakustické signály z různých zdrojů na požadované parametry vstupu, popřípadě umožnit měnit parametry dle požadavků uživatele.

Stejně tak i výstupní signály D/A převodníků jsou většinou dále zpracovávány různými nf zařízeními (např. mixážní pulty, koncových zesilovačů, atd.). Opět jako v případě vstupu A/D převodníků musí být výstupy D/A převodníků připojeny k výstupnímu obvodu, který harmonizuje parametry pro připojení obvodu dále zpracovávajících signály z D/A převodníků. Řešením těchto vstupních a výstupních obvodů se zabývá tato semestrální práce.

První kapitola semestrální práce uvádí do problematiky související s všeobecnými požadavky na zařízení zpracovávající nf signál, kde jsou probírány hlavně kvalitativní požadavky. Dále následuje obecný rozbor zadání semestrální práce.

Ve druhé kapitole této práce je nastíněna problematika týkající se součástkové základny, která v největší míře ovlivňuje výslednou kvalitu zpracování signálu vstupními a výstupními obvody pro A/D a D/A převodníky. Posléze bude proveden výběr součástkové základny, kterou bude realizován vstupní a výstupní obvod pro tyto převodníky.

Ve třetí kapitole bude navrženo vlastní obvodové řešení z hlediska logických bloků a poté v následující kapitole, uskutečněna softwarová simulace tohoto návrhu.

Pátá kapitola se zabývá konkrétním návrhem desek plošných spojů pro vstupní a výstupní obvod.

V poslední kapitole jsou obsaženy zpracované výsledky získané měřením na funkčních vzorcích navrženého vstupního a výstupního obvodu pro A/D a D/A převodníky.

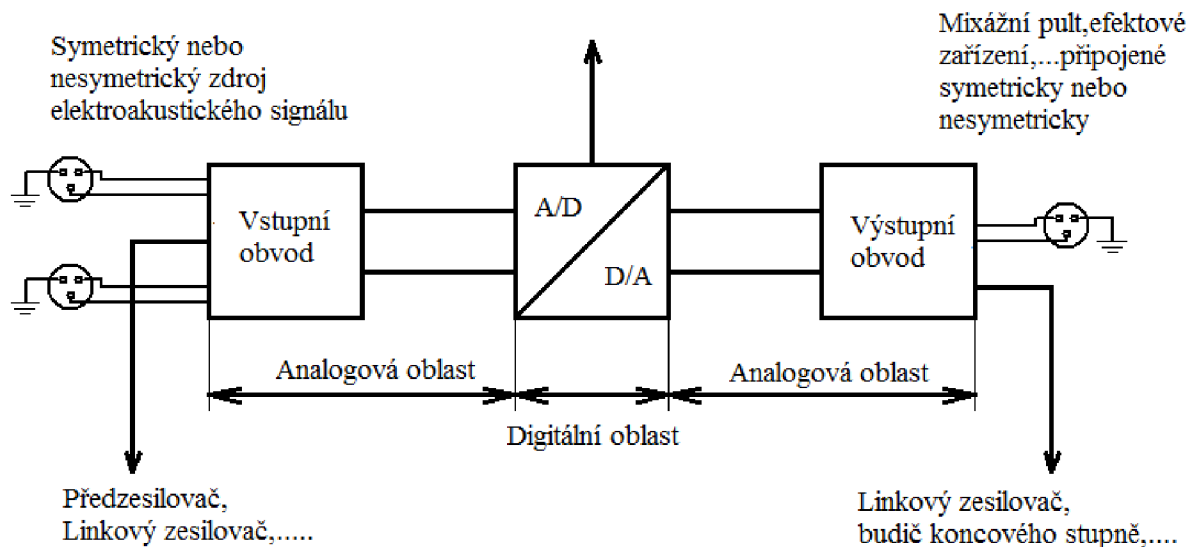
# 1 TEORETICKÝ ÚVOD

## 1.1 Úvod do problematiky

Vstupní obvody pro A/D převodníky jsou realizovány většinou napěťovými zesilovači. Jsou to zesilovače, pracující s napěťovou amplitudou signálu. Do této skupiny patří různé předzesilovače, mezilehlé zesilovače, linkové zesilovače, budící zesilovače koncových stupňů apod. Z hlediska vstupních obvodů A/D převodníků musí být stanoveny konkrétní požadavky na druh vstupního obvodu, které korespondují s účelem použití A/D převodníku. Hlavním úlohou těchto zesilovačů je kvalitně zpracovat signál ze zdrojů elektroakustického signálu tj. s minimálním šumem, zkreslením a definovanou vstupní a výstupní impedancí a požadovaným ziskem. Dále musíme uvažovat o způsobu připojení dle kategorie použití A/D převodníku. Tím je myšleno použití v low-end, high end technice popřípadě profesionální zpracování zvuku. Vstupní brána zesilovače může být v provedení nesymetrickém nebo symetrickém. První způsob je běžný u komerčních výrobků a druhý způsob se používá v profesionální praxi a u špičkových (high end) produktů. Zesilovače mohou být konstruovány v diskrétní nebo integrované formě.

Výstupní obvody připojené k D/A převodníku jsou realizovány také pomocí zesilovačů napětí. Na rozdíl od vstupních typů zesilovačů pro A/D převodníky, zejména předzesilovače zde není kladen až takový „důraz“ na šum. Je to dáno tím, že výstupní úroveň D/A převodníků je větší než úroveň na vstupu obvodu pro A/D převodník (např. mikrofon, apod.). Opět se řeší otázka jak kvalitně zpracovat signál s malým šumem, zkreslením a definovanou vstupními a výstupními parametry a požadovaným ziskem. Stejně jako u vstupního zesilovače i zde musíme uvažovat, zda bude realizována výstupní brána v provedení symetrickém nebo nesymetrickém.

Základní koncepce digitálního zpracování elektroakustického signálu s využitím poznatků uvedených v předchozím textu je uvedena na Obr. 1.



Obr. 1: Zapojení vstupního a výstupního obvodu s A/D a D/A převodníkem

## 1.2 Charakteristické parametry zesilovačů v nf technice

K důležitým parametrům uváděných u nf zesilovačů patří (jsou vybrány především parametry korespondující s problematikou zmiňovanou v teoretickém úvodu) [1], [2]:

- Vstupní citlivost
- Vstupní impedance
- Výstupní impedance
- Zisk zesilovače
- Kmitočtová a fázová charakteristika
- Odstup signálu od šumu
- Přeslechy mezi kanály
- Nelineární zkreslení a činitel nelineárního zkreslení
- Dynamika

Rozborem těchto parametrů lze získat ucelenější náhled na problematiku související s kvalitativními požadavky na vlastnosti zesilovačů v nf technice a jejich aplikací pro různé účely (předzesilovače, mezilehlé zesilovače, linkové zesilovače a budící zesilovače koncových stupňů, atd.)

### 1.2.1 Vstupní citlivost

Nf zesilovač vyžaduje přivedení vstupního signálu o dané velikosti, proto aby bylo dosaženo požadované velikosti výstupního signálu. Citlivost zesilovače udává velikost napětí, které je nutné k docílení jmenovitého napětí na výstupu. Pokud by byla hodnota signálu menší, než hodnota vstupní citlivosti dochází ke zhoršení šumových vlastností. Příklad vstupní citlivosti zesilovače pro různé elektroakustické zdroje zobrazuje Tab. 1[1].

**Tab. 1: Vstupní citlivost zesilovače pro různé elektroakustické zdroje**

Zdroj elektroakustického signálu		Nf Zesilovač
Druh	Maximální výstupní napětí	Doporučená vstupní citlivost
Dynamický mikrofon 200 Ω	25 mV	0,5 mV
Dynamický mikrofon středoohmový	50 mV	3 mV
Dynamický mikrofon vysokoohmový	100 mV	5 mV
Elektretový mikrofon	100 mV	0,5 - 5 mV
Elektrostatický mikrofon	2,5 V	10 mV
Směšovací pult	200 - 775 mV	250 - 775 mV
Studiový magnetofon	775 mV - 1,55 V	775 mV
DAT - Rekordér	0,775V	775 mV

### 1.2.2 Vstupní impedance

Ke vstupu nf zesilovače můžeme připojit různé zdroje elektroakustického signálu, jak bylo zmíněno v kapitole 1.1. Jelikož vstup nf zesilovače se chová pro tyto zdroje jako zátěž, je nutno brát v potaz jejich elektrické vlastnosti (výstupní impedanci a napětí).

Aby bylo ovlivnění těchto zdrojů signálu minimální, využívá se tzv. připojení naprázdno. U kterého je velikost vstupní impedance nf zesilovače volena minimálně 5krát – 10krát větší než výstupní impedance zdroje. Souvislost mezi výstupní impedancí zdroje a vstupní impedancí zesilovače pro různé druhy elektroakustických zdrojů je uvedena v Tab. 2 [1].

Při nedodržení této zásady (převážně v případě předzesilovačů) se snižuje napětí zdroje signálu, čímž dochází ke zhoršení šumových poměrů, kromě toho přetížení výstupu signálu může deformovat jeho kmitočtovou charakteristiku a zvětšovat zkreslení signálu tohoto zdroje.

**Tab. 2: Souvislost mezi výstupní a vstupní impedancí zesilovače pro různé druhy elektroakustických zdrojů**

Zdroj elektroakustického signálu		Nf Zesilovač
Druh	Minimální výstupní impedance	Doporučená minimální vstupní impedance
Dynamický mikrofon 200 Ω	200 Ω	1 kΩ
Dynamický mikrofon středohmový	600 Ω - 5 kΩ	4 - 25 kΩ
Dynamický mikrofon vysokoohmový	47 kΩ	100 kΩ
Elektretový mikrofon	600 Ω - 3 kΩ	4,7 - 15 kΩ
Elektrostatický mikrofon	150 Ω	1 kΩ
Směšovací pult	1 kΩ	10 - 100 kΩ
Studiový magnetofon	60 Ω - 200 Ω	> 60 - 200 Ω
DAT - Rekordér	1 kΩ	10 - 100 kΩ

### 1.2.3 Zisk zesilovače

Zisk zesilovače nám udává jak je schopen zesilovač zesílit vstupní signál. Je definován poměrem výstupního signálu zesilovače k signálu na vstupu. Většinou je udáván napěťový zisk zesilovače, pro který platí [1],

$$A_u = 20 \log \left( \frac{U_2}{U_1} \right), \quad (1.1)$$

kde  $A_u$  (dB) ..... je poměr užitečný signál/šum,  
 $U_2$  (V) ..... je velikost napětí na výstupu zesilovače,  
 $U_1$  (V) ..... je velikost napětí na vstupu zesilovače.

### 1.2.4 Výstupní impedance

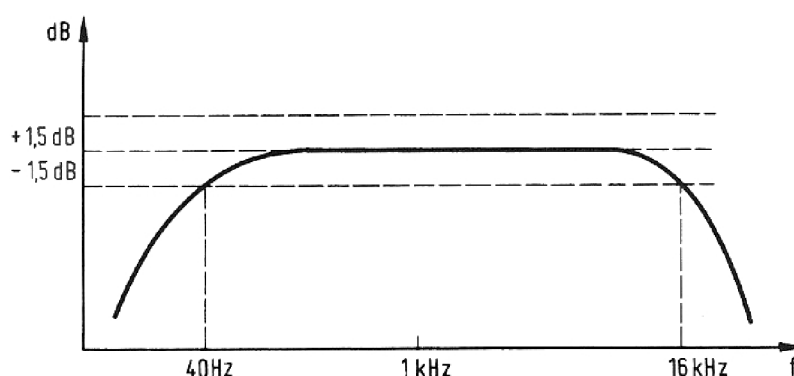
Velikost výstupní impedance nf zesilovače by měla korespondovat se vstupní impedancí zátěže. Při nedodržení této podmínky může docházet v případě nepřizpůsobené impedance zátěže k problémům na výstupu nf zesilovače (nutno uvažovat odporovou tak i kapacitní

složku zátěže), což může vést ke zhoršení šumových poměrů. Výstupní impedance je kmitočtově závislá a směrem k vyšším kmitočtům se zvětšuje.

## 1.2.5 Kmitočtová a fázová charakteristika

Fázová charakteristika vyjadřuje závislost rozdílu fáze vstupního a výstupního signálu nf zesilovače na kmitočtu. Tato charakteristika je důležitá zejména při zpracování signálů z více kanálů a je třeba dbát na to, aby výsledný posuv signálu byl ve všech kanálech na výstupu zesilovače stejný.

Kmitočtová charakteristika vyjadřuje schopnost nf zesilovače přenést signály v kmitočtovém pásmu o rozsahu cca 20Hz – 20000Hz při definovaném rozdílu (poklesu zesílení) mezi reálným a ideálním zesílením (je stejné pro celý kmitočtový rozsah), které je vyjádřeno v dB. Příklad kmitočtové charakteristiky pro rozsah 40Hz – 16 000Hz a pokles zesílení  $\pm 1,5$ dB je uveden na Obr. 2 [1].



Obr. 2: Příklad kmitočtové charakteristiky s definovaným poklesem

## 1.2.6 Odstup signálu od šumu

Všechny zesilovače generují šumové (případně jiné rušivé) signály. Užitečný signál je těmito šumovými signály znehodnocován, proto se snažíme zajistit u zesilovačů co nejmenší hladinu těchto signálů. Jakostní parametr, který nám udává, jak je na tom daný zesilovač z hlediska šumových signálů, se nazývá odstup užitečného signálu od šumu. Odstup užitečného signálu (tzv. SNR – signal noise ratio), je definován jako poměr mezi užitečným signálem a šumovým signálem, platí dle [3]

$$SNR = 20 \log \left( \frac{U_2}{U_{N2}} \right), \quad (1.2)$$

kde  $SNR$  (dB).....je poměr užitečný signál/šum,  
 $U_2$  (V) .....je velikost napětí na výstupu zesilovače,  
 $U_{N2}$  (V) .....je velikost šumového napětí na výstupu zesilovače.

Šumové signály jsou v zesilovačích způsobeny různými zdroji (např. pasivní a aktivní součástky, rušení externími zdroji, a jiné). Mezi základní typy šumu patří následující: tepelný šum, výstřelový šum, blikavý šum a praskavý šum [4], [5].

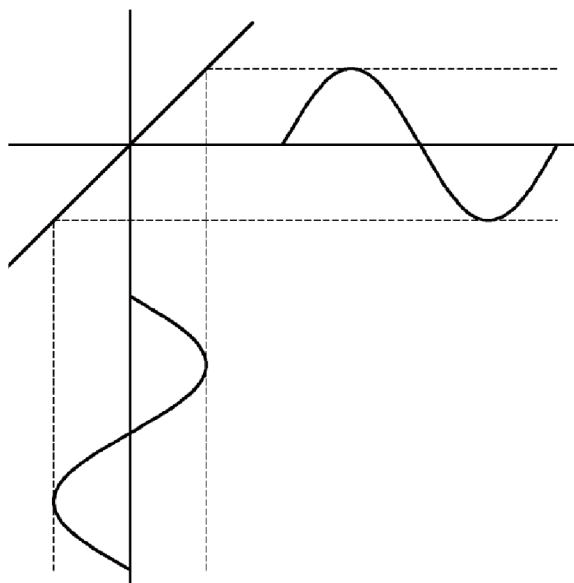


## 1.2.7 Přeslech mezi kanály

Nf zesilovače obsahují zpravidla více kanálů. Pokud dochází k vzájemnému ovlivňování mezi těmito kanály, je toto ovlivňování označováno jako přeslech. Přeslech mezi kanály je vyjádřen poměrem napětí plně vybuzeného a nevybuzeného kanálu a je udáván v dB. Přeslechy vznikají na různých místech např. na vstupních konektorech, na vstupních přepínačích, při paralelním vedení nestíněných vodičů, vlivem špatně rozmístěných součástek na desce plošných spojů, atd. Přeslech mezi kanály se zvětšuje s rostoucím kmitočtem důsledkem nežádoucích kapacitních vazeb.

## 1.2.8 Nelineární zkreslení a činitel nelineárního zkreslení

U nf zařízení tedy i zesilovačů požadujeme, aby vstupní signál byl tvarově shodný s výstupním signálem (viz Obr. 3) Pokud je výstupní signál tvarově odlišný od vstupního, došlo ke zkreslení. Nf signál může být v zásadě degradován dvěma způsoby. Prvním z nich je lineární zkreslení někdy též nazývané kmitočtové zkreslení, které způsobuje, že různé kmitočty jsou přenášeny s různou velikostí a fází. Druhým faktorem způsobujícím degradaci nf signálu je nelineární zkreslení. O obou druhích zkreslení vypovídá kmitočtová a fázová charakteristika (viz kapitola 1.2.5).



**Obr. 3: Vstupní a výstupní charakteristika zesilovače bez zkreslení**

Při nelineárním zkreslení dochází k ovlivňování spektra signálu, což se projeví vznikem nových harmonických složek ve výstupním signálu, které v původním signálu obsaženy nebyly. Tyto složky jsou vždy celistvým násobkem kmitočtu základního signálu. Nelineární zkreslení je způsobeno převážně nelineární charakteristikou zesilovacích prvků (tranzistory, integrované obvody), špatným nastavením pracovních bodů tranzistorů nebo přebuzením vstupů zesilovače.

K posouzení míry velikosti nelineárního zkreslení slouží činitel harmonického zkreslení (THD – Total Harmonic Distortion). Tento činitel se vyjadřuje v procentech a říká nám, kolik procent užitečného harmonického signálu představuje směs vyšších harmonických složek, generovaných zesilovačem. Činitel harmonického zkreslení je dán rovnicí [1], [3]:

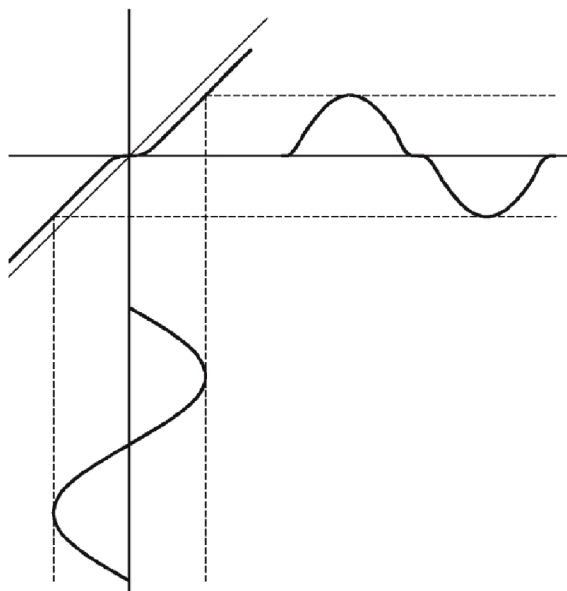
$$\text{THD} = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}{\sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}, \quad (1.3)$$

kde THD (%).....je činitel harmonického zkreslení,  
 $U_1$  (V) .....je efektivní hodnota vstupního harmonického signálu,  
 $U_n$  (V) .....jsou efektivní hodnoty vyšších harmonických složek.

Činitel harmonického zkreslení závisí na velikosti výstupního napětí a na kmitočtu.

Mezi druhy nelineárního zkreslení patří přechodové zkreslení, intermodulační zkreslení a tzv. SID (slew induced distortion) zkreslení [3], [4], [8].

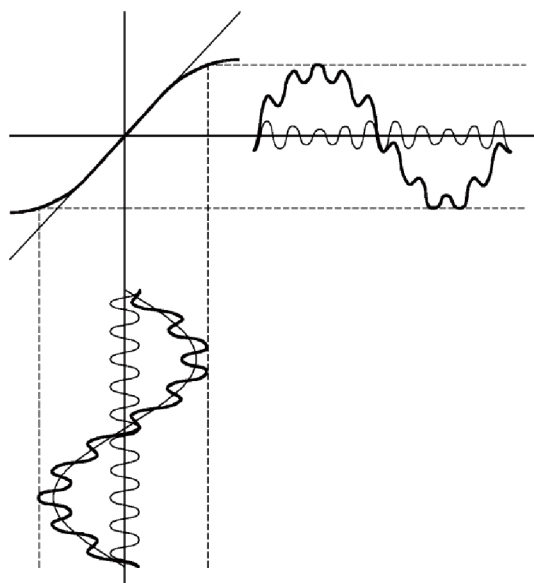
Přechodové zkreslení (viz Obr. 4) je způsobeno nelinearitou převodní charakteristiky zesilovače v počátku jeho charakteristiky. Tento druh zkreslení se nejvíce projevuje u slabých signálů, jelikož využívají již zmiňovanou část převodní charakteristiky [6], [7].



**Obr. 4: Deformace výstupního signálu zesilovače vlivem přechodového zkreslení**

Intermodulační zkreslení (viz Obr. 5) vzniká přivedením dvou harmonických signálů o různém kmitočtu  $f_1$ ,  $f_2$  na vstup zesilovače. Díky nelineární převodní charakteristice zesilovacího prvku se na výstupu objeví mimo harmonických násobků signálů  $f_1$ ,  $f_2$  i jejich součtové a rozdílové složky ( $f_1 + f_2$ ,  $f_1 - f_2$ , a to samé platí i pro další harmonické), které v původních signálech obsaženy nebyly [1], [6], [7].

SID zkreslení se projevuje neschopností zesilovače sledovat vstupní signál. Nastává hlavně při skokovém buzení směrem k maximálním úrovním výstupního signálu při vysokých kmitočtech. Toto zkreslení má příčinu v nízké rychlosti přeběhu (bude vysvětleno dále) [3], [8].



**Obr. 5: Deformace výstupního signálu zesilovače vlivem intermodulačního zkreslení**

### 1.2.9 Dynamika

Dynamika je bezrozměrná veličina, definována jako poměr mezi maximální a minimální hodnotou signálu zesilovače, případně elektroakustického zdroje signálu. U malých signálů omezuje dynamiku šum, případně brum, u velkých signálů pak velikost maximálně dosažitelného výstupního napětí zesilovače.

## 1.3 Rozbor zadání

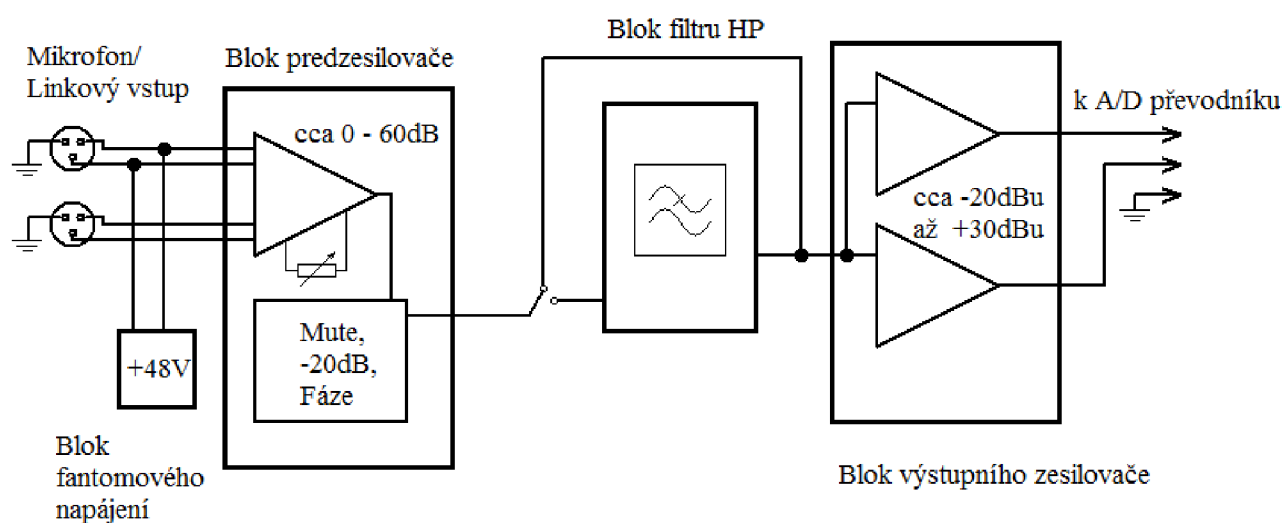
Tato kapitola je zaměřena na požadavky vstupního a výstupního zesilovače pro A/D a D/A převodník, které jsou specifikovány v zadání. Tyto požadavky budou konkretizovány, jak pro vstupní zesilovač A/D převodníku (dále jen jako vstupní mikrofon/linkový zesilovač), tak i pro výstupní zesilovač D/A převodníku (dále jen jako výstupní linkový zesilovač) zvlášť, jelikož priorita kvalitativních parametrů se u těchto obvodů částečně liší.

Nejdříve je proveden rozbor vlastností vstupního dílu, jak ty ze zadání, tak i ty, které souvisí s požadavky na kvalitu zpracování nf signálu zmiňované v kapitole 1.2. Následně provedeme stejný rozbor i u výstupního linkového zesilovače.

### 1.3.1 Vstupní mikrofon/linkový zesilovač

Dle zadání jsou u vstupního zesilovače požadovány dva vstupy. Oba z těchto vstupů jsou určeny zejména pro připojení mikrofonů, tj. budou zpracovávat nf signály pod úrovní -20dBu (mikrofonní úroveň). Dále by měli tyto vstupy umožnit připojení nf signálů v rozsahu cca -20dBu až +30dBu (linková úroveň) při aktivovaném útlumovém článku 20dB. U obou vstupů musíme brát v potaz připojení různých druhů mikrofonů. Např. elektrostatický a elektretový mikrofon vyžadují externí napájení o velikosti 48V, nazývané fantomové. To znamená zahrnout tuto možnost do řešení vstupní části. Zesilovač by měl být schopen realizovat následující funkce: MUTE, aktivaci útlumového článku o velikosti 20dB (tzv. PAD), obrácení fáze vstupního signálu a regulaci zesílení mikrofonního vstupu.

Tento zesilovač bude složen z následujících funkčních bloků: blok předzesilovače, blok fantomového napájení, blok filtru horní propusti a blok výstupního zesilovače. Blokové schéma je zobrazeno na Obr. 6.



**Obr. 6: Blokové schéma vstupního mikrofon/linkového zesilovače**

Blok předzesilovače (nebo také předzesilovač) nesmí ovlivňovat zdroj signálu, musí mít minimální šum, tím pádem velký odstup od rušivého napětí. Je to dáno primární funkcí předzesilovače zesilovat velmi slabé signály (pod úrovní  $-20\text{dBu}$ ). Musí být odolný vůči přebuzení a mít dobrou linearitu. V tomto bloku budou realizovány funkce definované v zadání (MUTE, PAD 20dB, obrácení fáze vstupního signálu a regulace zesílení mikrofonního vstupu). Tyto funkce budou řešeny v rámci kapitoly týkající se návrhu vlastního řešení.

Blok filtru horní propusti se primárně používá při zesilování mikrofonního signálu a redukuje množství různých rušivých signálů o nízkých kmitočtech obsažených v tomto signálu. Filtrované rušivé kmitočty pocházejí převážně z okolního prostředí (různé druhy vibrací, atd.) Slouží také k filtraci superponované složky střídavého napětí (100Hz, 150Hz, 200Hz,...).

Blok fantomového napájení jak bylo zmíněno už výše, zprostředkovává napájení elektrostatických a elektretových mikrofonů.

Blok výstupního zesilovače má za úkol přizpůsobit signál předzesilovače na linkovou úroveň a zajistit symetrický i nesymetrický výstup pro připojení A/D převodníku.

Nejdůležitější kvalitativní parametry týkající se vstupního mikrofon/linkového zesilovače jsou:

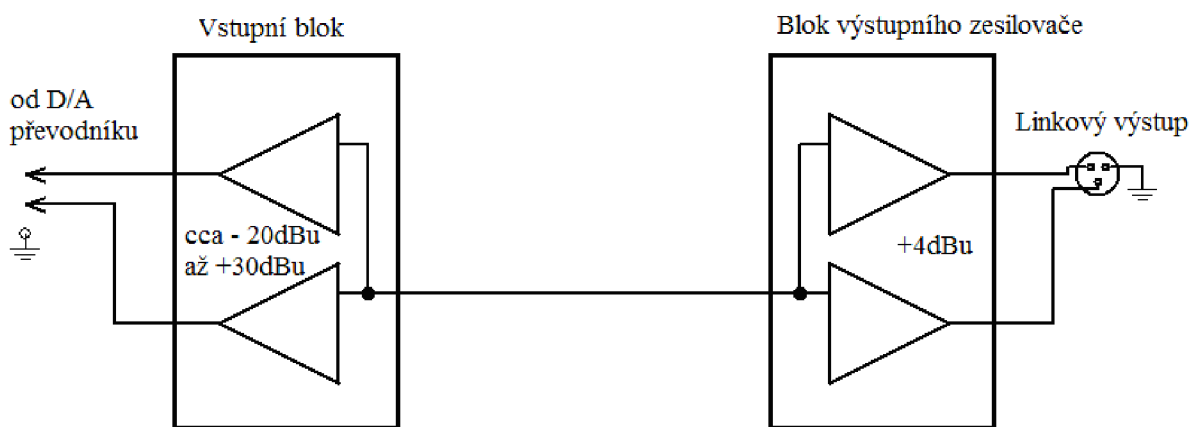
- velká vstupní citlivost,
- velká výstupní impedance,
- velký zisk (úkol zesílit signály pod úrovní  $-20\text{dBu}$ ),
- velmi dobrá linearita (dobrá kmitočtová charakteristika v přenášeném pásmu),
- velký odstup signálu od šumu,
- minimální přeslechy mezi kanály,
- velmi malý činitel zkreslení
- velká dynamika.

Jelikož A/D převodník je řešen integrovaným obvodem firmy Texas Instrument PCM4202 (mající symetricky řešenou dvojici vstupů viz [9]).

### 1.3.2 Výstupní linkový zesilovač

V zadání semestrálního projektu měl umožňovat výstupní linkový zesilovač přepínání nominální úrovně na výstupu  $-10/+4\text{dBu}$ . V rámci bakalářské práce bylo zadání upraveno, takže výstupní linkový zesilovač má pevně definované zesílení s nominální úrovní na výstupu  $+4\text{dBu}$  (při vstupní linkové úrovni  $0\text{dBu}$ ).

Tento zesilovač bude mít symetrický vstup pro připojení D/A převodníku (D/A převodník je řešen integrovaným obvodem od firmy Texas Instrument PCM1796, mající symetricky řešené výstupy viz [10]). Výstupní linkový zesilovač bude složen z následujících funkčních bloků: vstupní blok, a blok výstupního zesilovače. Blokové schéma výstupního zesilovače je uvedeno na Obr. 7.



Obr. 7: Blokové schéma výstupního linkového zesilovače

Vstupní blok má za úkol zesílit vstupní signál na požadovanou nominální úroveň na výstupu tedy  $+4\text{dBu}$ .

Druhým blokem výstupního linkového zesilovače je blok výstupního zesilovače, který zprostředkovává výstupní symetrický signál. Jeho výstup umožňuje připojení jak symetrické tak i nesymetrické zátěže.

Nejdůležitější kvalitativní parametry týkající se vstupního zesilovače jsou:

- definovaný zisk v daném kmitočtovém rozsahu (definováno v zadání),
- velký odstup signálu od šumu,
- minimální přeslechy mezi kanály,
- velmi malý činitel zkreslení.

Všechny požadavky na parametry zmiňované v kapitolách 1.3.1 a 1.3.2 souvisí s výběrem součástkové základny a návrhem desky plošných spojů.

## 2 PROBLEMATIKA VÝBĚRU SOUČÁSTKOVÉ ZÁKLADNY

Před vlastním návrhem obvodového schématu vstupního a výstupního zesilovače probereme výběr součástkové základny. Výběr součástek musí proběhnout v souladu s definovanými parametry pro vstupní a výstupní obvody. Před vlastním výběrem součástkové základny je nutné vyřešit otázku, zda jednotlivé bloky vstupního a výstupního zesilovače budou řešeny pomocí tranzistorů nebo s využitím integrovaných obvodů. Osobně se přikláním k variantě řešení zadání pomocí integrovaných obvodů složených z operačních zesilovačů z následujících důvodů:

- velký výběr integrovaných obvodů přizpůsobených na konkrétní aplikace,
- jednodušší návrh obvodového schématu,
- menší nároky na plochu na desce plošných spojů,
- menší rozptyl parametrů tranzistorů v rámci integrovaného obvodu,
- a jiné.

Nyní se jednotlivě zaměříme na námi sledované parametry.

### 2.1 Vstupní impedance

Vstupní impedance je měřena na vstupní bráně operačního zesilovače dvěma způsoby. První způsob měření udává diferenční vstupní impedanci  $Z_i$ , což je impedance mezi jednotlivými vstupy operačního zesilovače. Druhý způsob udává tzv. souhlasnou vstupní impedanci  $Z_{cm-}$  a  $Z_{cm+}$ , což je impedance jednotlivých vstupů vůči společnému vodiči. Často se v katalogích výrobců operačních zesilovačů udává následující údaj  $Z_{cm}$ , pro který platí  $Z_{cm} = Z_{cm-} = Z_{cm+}$  nebo  $Z_{cm}$  je rovna paralelní kombinaci  $Z_{cm-}$  a  $Z_{cm+}$ .

Oba druhy impedance se skládají z reaktivní a činné složky. Jelikož činná složka převládá nad reaktivní, je uvedena některými výrobci operačních zesilovačů jen hodnota činné složky  $R_i$ . Sledovaný údaj je důležitý pro vstupní impedanci bloku předzesilovače. Velikost vstupní impedance je pro činnou složku většinou v rozmezí  $10^5 - 10^{12} \Omega$  a pro reaktivní složku v řádu několika pF. Obecně můžeme říci, že podmínka vstupní impedance je při výběru operačního zesilovače splněna [3], [4].

### 2.2 Kmitočtová charakteristika

Kmitočtová charakteristika operačního zesilovače je reprezentována grafem a udává závislost napěťového zesílení na kmitočtu. Kmitočtová charakteristika je velmi důležitá, poněvadž se zvyšujícím se kmitočtem dochází k poklesu zesílení (při kapacitní vazbě i se snižujícím se kmitočtem). V zadání je definován kmitočtový rozsah 20Hz – 20000Hz pro pokles zesílení 1dB. Dle tohoto parametru budou zkoumány vybírané operační zesilovače.

### 2.3 Fázová charakteristika

Fázová charakteristika je reprezentována grafem udávající závislost posuvu výstupního napětí na kmitočtu. S vyššími kmitočty dochází ke změně fáze. Změna fáze může být tak velká, že při využití záporné zpětné vazby se stává z této vazby kladná, což vede k nestabilitě, která se může projevit sklonem k oscilacím. Tato charakteristika ať je jakkoliv důležitá, není udávána všemi výrobci operačních zesilovačů

## 2.4 Odstup signálu od šumu

Jak už bylo řečeno v kapitole 1.2.6 odstup signálu od šumu, je dán poměrem užitečného signálu k šumu. Jak aktivní, tak i pasivní součástky generují šum. Proto při výběru součástkové základny se snažíme o volbu takových součástek, u kterých bude generovaný šum minimální. Mezi tyto generované šумы patří následující druhy [4], [5]:

*Tepelný šum* (Johnsonův, bílý), který je způsoben náhodným pohybem elektronů v odporových strukturách, kde tento pohyb vyvolává vznik šumového napětí.

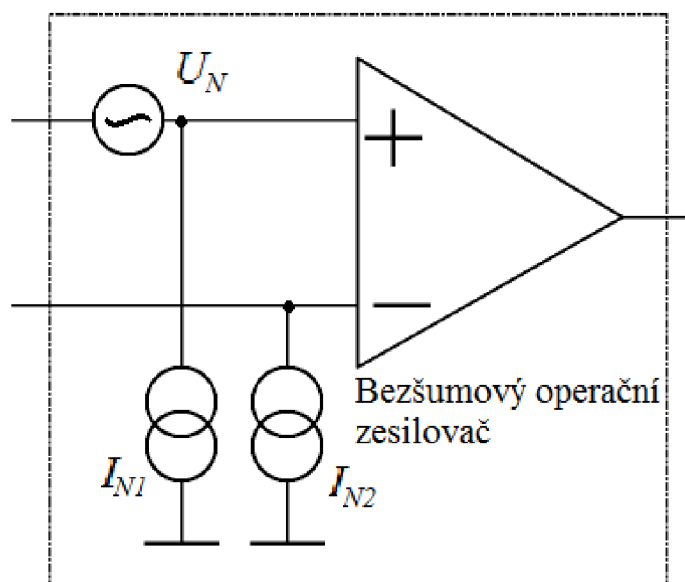
*Výstřelový šum* (Shot Noise), který vzniká při průchodu proudu nosičů náboje otevřeným PN přechodem.

*Blikavý šum* ( $1/f$  flicker noise), který vzniká v oblasti přechodu báze – emitor, která je narušena nečistotami nebo poruchami struktury na povrchu polovodiče.

*Práskavý šum* (popcorn), který vzniká pravděpodobně v přechodu báze – emitor znečištěním oblasti emitoru ionty těžkých kovů. Jedná se o proudový jev, který se uplatňuje především při velkých vstupních impedancích operačního zesilovače. Vyznačuje se skoky mezi diskretními šumovými úrovněmi.

### 2.4.1 Šum operačních zesilovačů

U operačního zesilovače závisí šumové vlastnosti na vnitřní struktuře, tedy na tranzistorech použitých uvnitř daného operačního zesilovače. U každého operačního zesilovače se vyskytuje spousta zdrojů šumu. Přepočítáme-li tyto šумы na vstup, dostaneme šumový model operačního zesilovače, ze kterého lze určit poměr signál/šum na vstupu tohoto zesilovače, bez ohledu na vnitřní strukturu operačního zesilovače a jeho velikost zesílení. Šumový model operačního zesilovače je zobrazen na Obr. 8 [4].



Obr. 8: Šumový model operačního zesilovače

Dle obrázku je šum modelován šumovým napětím  $U_N$  a vstupními šumovými proudy  $I_{N1}$  a  $I_{N2}$ . V katalogích se udává tzv. spektrální šumová hustota  $u_n$  a  $i_n$ . Platí [4],

$$u_n^2 = \frac{dU_N^2}{df}, \quad (2.1)$$

$$u_n = \frac{U_N}{\sqrt{B}}, \quad (2.2)$$

kde  $u_n$  (V /  $\sqrt{\text{Hz}}$ ).....je spektrální napěťová šumová hustota,  
 $U_N$  (V) .....je vstupní šumové napětí,  
 $B$  (Hz) .....je šířka pásma ve které bylo šumové vstupní napětí  $U_N$  měřeno,

$$i_n^2 = \frac{dI_N^2}{df}, \quad (2.3)$$

$$i_n = \frac{I_N}{\sqrt{B}}, \quad (2.4)$$

kde  $i_n$  (A /  $\sqrt{\text{Hz}}$ ).....je spektrální proudová šumová hustota,  
 $I_N$  (A) .....je vstupní šumový proud,  
 $B$  (Hz) .....je šířka pásma ve které bylo šumový vstupní proud  $I_N$  měřen.

Z výše uvedeného plyne, že volba operačního zesilovače z hlediska nejnižšího šumu bude podléhat velikosti spektrální šumových hustot  $u_n$  a  $i_n$ .

## 2.4.2 Šum pasivních součástek

U rezistorů je uplatněn zejména tepelný šum. Velikost tohoto šumu je udávána poměrem šumového napětí  $u_n$  v  $\mu\text{V}$  a velikosti přiloženého napětí  $U_0$  ve V, [ $\mu\text{V}/\text{V}$ ]. V ideálním případě není velikost generovaného šumového napětí závislá na proudu protékajícím rezistorem.

Generovaný šum je nejvýraznější u uhlíkových odporů (jednotky  $\mu\text{V}$ ), což znamená jejich nevhodnost pro systémy, ve kterých se snažíme dosáhnout co nejmenšího šumu. Nejnižších hodnot generovaného šumu dosahují odpory drátové a metalizované (desetiny  $\mu\text{V}$ ) [5]. Proměnné rezistory, trimry a potenciometry z hlediska šumu generují větší hodnoty než odpory statické. Pokud budeme používat ve vstupním obvodu některý z těchto proměnných rezistorů, budeme vybírat ty s vrstvou cermetovou nebo drátovou (nízký šum) [5].

Ideální kapacitor je brán jako bezšumový. Při uvažování komplexní impedance kapacitou je její reálná část zdrojem tepelného šumu. Vlivem ztrátového činitele  $\text{tg}\delta$  je kapacitor zdrojem šumu na nízkých kmitočtech. Z hlediska šumových vlastností jsou považovány za nejhorší hliníkové elektrolytické kondenzátory [5].

Obecný vztah pro výsledné šumové napětí je dáno následujícím vztahem,

$$U_N^2 = \sum_{i=1}^k U_{Ni}^2, \quad (2.5)$$

kde  $U_N$  (V) .....je vstupní šumové napětí,  
 $U_{Ni}$  (V) .....je napětí  $n$ -tého zdroje šumu.

Při výběru konkrétní součástkové základny problematika probíraná v kapitolách 2.4.1 a 2.4.2 bude hrát významnou roli.



## 2.5 Nelineární zkreslení a činitel nelineárního zkreslení

K posouzení míry nelineárního zkreslení u operačních zesilovačů slouží činitel *THD* (viz. kapitola 1.2.8). Tento činitel je udáván dvěma odlišnými způsoby. Pro první způsob platí rovnice (1.1) a druhý je označován *THD+N* (Total Harmonic Distortion + Noise) a platí pro něj následující [3],

$$\text{THD} + \text{N} = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2 + U_N^2}}{\sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}, \quad (2.6)$$

kde *THD+N (%)*.....je činitel harmonického zkreslení,  
*U<sub>1</sub> (V)* .....je efektivní hodnota vstupního harmonického signálu,  
*U<sub>n</sub> (V)* .....jsou efektivní hodnoty vyšších harmonických složek,  
*U<sub>N</sub> (V)* .....je efektivní hodnota šumového napětí na měřeném měřicím rozsahu.

Spoustu výrobců operačních zesilovačů dává přednost činiteli nelineárního zkreslení vyjádřeného pomocí *THD+N*, jelikož pro konkrétní aplikace má mnohem větší vypovídací hodnotu než činitel *THD*.

### 2.5.1 Konečná rychlost přeběhu

Nelineární zkreslení operačního zesilovače úzce souvisí s jeho konečnou rychlostí přeběhu. Konečná rychlost přeběhu je definována jako maximální změna výstupního napětí související se skokovou změnou napětí na vstupu. Platí vztah [4],

$$S = \frac{du_0}{dt}, \quad (2.7)$$

kde *S (V / s)* .....je rychlost přeběhu,  
*u<sub>0</sub> (V)* .....je výstupní napětí operačního zesilovače.

Předpokládáme-li, že na výstupu zesilovače je napětí  $u_0 = U_{0m} \sin(\omega t)$  a nemá dojít ke zkreslení signálu, musí být splněna následující podmínka,

$$S \geq \left( \frac{du_0}{dt} \right)_{\max}, \quad (2.8)$$

což znamená, že nejrychlejší změna harmonického signálu nesmí přesáhnout rychlost přeběhu. Platí, že  $(du_0 / dt)_{\max}$  je za daných podmínek rovno hodnotě  $U_{0m} \omega$ . Odsud dostaneme hraniční podmínky  $U_{0m} \omega_m = S$  a úpravou vztah pro mezní kmitočet  $f_m$ ,

$$f_m = \frac{S}{2\pi U_{0m}}, \quad (2.9)$$

kde  $f_m$  (Hz) .....je mezní kmitočet,

na kterém platí podmínka (11). Z předcházejících vztahu je zřejmé, že s růstem  $U_{0m}$  klesá  $f_p$ . Na kmitočtu  $f_p$  je zkreslení cca 1%.

Na základě výše uvedeného je snaha vybrat takový operační zesilovač, který dosahuje pro maximální hodnotu amplitudy co největší hodnoty. Doporučuje se z důvodu co nejmenšího vlivu nelinearity převodní charakteristiky operačního zesilovače, aby bylo splněno kritérium

$$S = (0,5 \quad \text{až} \quad 1)U_{0m}, \quad (2.10)$$

Konečná rychlost přeběhu (v anglické literatuře označována jako SR – slew rate) patří tedy primárním vlastnostem, které jsou důležité pro výběr operačního zesilovače [4].

## 2.6 Srovnání operačních zesilovačů

Výběr součástek především pak operačních zesilovačů definuje konečné vlastnosti celého obvodu. Tento výběr je podřízen primárním vlastnostem popisovaných v předcházejících částech kapitoly 2. Mezi další kritéria výběru patří cena a dostupnost daného typu operačního zesilovače.

Dle konkrétních požadavků na aplikaci operačního zesilovače v jednotlivých blocích vstupního mikrofón/linkového zesilovače a výstupního linkového zesilovače bude porovnáno několik typů od různých výrobců. Porovnání primárních vlastností operačních zesilovačů vhodných do bloku předzesilovače je uvedeno v příloze A tab. A1. V tab. A3 přílohy A jsou porovnány vybrané parametry operačních zesilovačů hodící se k realizaci bloku filtru horní propusti a bloku přepínání nominálních úrovní. V tab. A2 a tab. A4 jsou porovnány operační zesilovače pro blok vstupního zesilovače a pro blok výstupního zesilovače.

Na základě těchto tabulek s přihlédnutím k ceně a dostupnosti konkrétního typu je vybrán pro použití v bloku předzesilovače integrovaný obvod firmy Analog Devices SSM2019 [11], v bloku filtru horní propusti operační zesilovač firmy New Japan Radio Co.,Ltd. NJM4580 [21][14]. NJM4580 tvoří i obvod výstupního zesilovače. Dále je tento zesilovač použit při realizaci všech bloků výstupního linkového zesilovače.

Jako vhodné se jeví použití tzv. line drive transmitter-ů tzv. „linkových budičů“. Což jsou obvody SSM2142 [13], THAT1646 [17], DRV134 [20] a tzv. line drive receiver-ů tzv. „linkových přijímačů“, jsou to obvody SSM2141 [16], THAT1200 [16] a INA137 [19]. Tyto „budiče“ a „přijímače“ mají nastavený definovaný zisk díky diskretním součástkám integrovaných v čipu a jsou schopny bez dalších pomocných součástek realizovat blok vstupního a výstupního zesilovače u obou typu navrhovaných zesilovačů. Problémem pro jejich využití je však především malá dostupnost a cena.

### 3 NÁVRH VLASTNÍHO ŘEŠENÍ

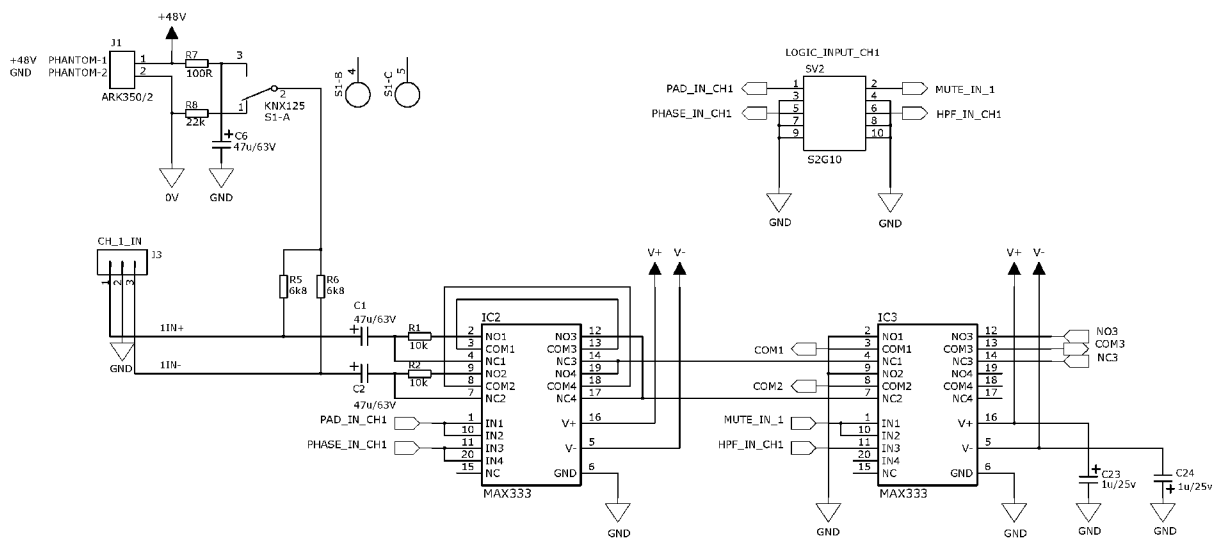
Při návrhu vlastního schématu obvodového zapojení je třeba vycházet z blokových schémat vstupního mikrofon/linkového a výstupního linkového zesilovače. Návrhem jsou ujasněny požadavky kladené na tyto zesilovače. V rámci návrhu vlastního řešení jsou detailněji zkoumány požadavky na jednotlivé logické bloky v návaznosti na vlastní řešení obvodového zapojení. Je opět dbáno na dodržení kvalitativních požadavků popisovaných v kapitole 1.2, s jakými musí jednotlivé logické bloky signál zpracovávat.

#### 3.1 Návrh vstupního mikrofon/linkového zesilovače

Dle kapitoly 1.3.1 jsou požadovány dva vstupy mikrofon/linkové zesilovače. Proto bude realizace provedena dvěma mikrofon/linkovými zesilovači a to i se samostatnými výstupy, z důvodu připojení obou vstupů A/D převodníku PCM4202. Jediný rozdíl mezi oběma zesilovači je v jejich označení, vstupní mikrofon/linkový zesilovač č. 1 a č. 2. V rámci návrhu vlastního řešení obvodového schématu je popsán pouze vstupní mikrofon/linkový zesilovač č. 1. Kompletní obvodové zapojení tohoto zesilovače je uvedeno na **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** (obvodové schéma vstupního mikrofon/linkového zesilovače čerpáno z [24]). Zde je třeba zmínit, že obvodové schéma mezi vstupním mikrofon/linkovým zesilovačem č. 1 a č. 2, se liší pouze v očíslování použitých obvodových součástek, které u vstupního zesilovače č. 2 začíná prefixem 100. Obvodové zapojení je popisováno z hlediska logických bloků zmiňovaných v předchozím textu. Obvod vstupního mikrofon/linkového zesilovače je napájen symetrickým stejnosměrným napětím  $\pm 17V$  a napětím 48V pro činnost fantomového napájení.

##### 3.1.1 Blok předzesilovače

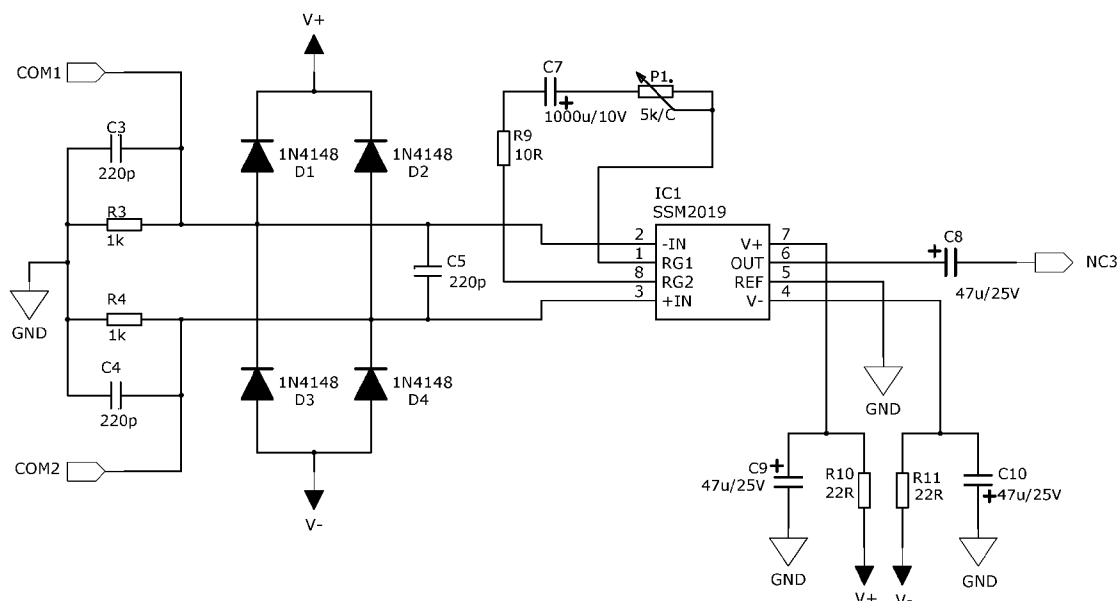
Blok předzesilovače je rozdělen na dvě části. První „vstupní a řídicí“ část uvedena na Obr. 9 je realizována za pomoci dvojice analogových spínačů s digitálním řízením IC2 a IC3 s označením MAX333 od firmy Maxim Integrated Products, Inc [23].



Obr. 9: Vstupní část předzesilovače s obvodou MAX333

Tento integrovaný obvod MAX333 byl zvolen s ohledem na požadavky z hlediska počtu přepínačů (4×SPDT) a z hlediska vyhovujících el. parametrů, jako je možnost duálního napájení, nízký odpor sepnutého spínače (menší než 17Ω), kompatibilita logických vstupů se technologiemi TTL a CMOS, atd. Součástí této „vstupní a řídicí“ části je i blok fantomového napájení.

Druhou částí je „jádro“ bloku předzesilovače obsahující zesilovač IC1 tvořený integrovaným obvodem SSM2019 od firmy Analog Devices. Schéma „jádra“ bloku předzesilovače uvedeného na Obr. 10 je realizováno dle doporučeného zapojení výrobce tohoto integrovaného obvodu [11].



**Obr. 10: Schéma zapojení integrovaného obvodu SSM2019**

Nízkofrekvenční signál je přiveden do bloku předzesilovače pomocí konektoru XLR, který umožňuje připojení symetrického zdroje signálu přes piny s označením CH\_1\_IN.

Skrze tento konektor je možné připojit aktivací přepínače S1 fantomové napájení potřebné pro elektrostatické a elektretové mikrofony o velikosti 48V. Toto napětí je před spínačem S1 filtrováno elektrolytickým kondenzátorem C6 a přes odpory R5 a R6 přivedeno na obě vstupní signálové cesty. Pro oddělení stejnosměrného napětí fantomového napájení od zbytku obvodu slouží elektrolytické kondenzátory C1, C2 o velikosti 47μF dimenzované na napětí 63V.

V bloku předzesilovače jsou realizovány funkce definované zadáním prostřednictvím integrovaných obvodů IC2 a IC3. Logické vstupy pro řízení IC2 a IC3 jsou vyvedeny na skupinu pinů s označením LOGIC\_INPUT\_CH1 (viz. Obr. 9). U integrovaného obvodu IC2 jsou zapojeny dvě dvojice spínačů. Jedna dvojice je tvořena skupinou spínačů 1 a 2 pro aktivaci útlumového článku a druhá dvojice tvořená skupinou 3 a 4 slouží k převrácení fáze. U integrovaného obvodu IC3 je využita pouze jedna dvojice spínačů a jeden samostatný spínač. Dvojice tvořená skupinou spínačů 1 a 2 slouží k aktivaci funkce MUTE a spínač 3 je určen pro zapnutí bloku filtru horní propusti. Oba integrované obvody mají spínače zapojeny, tak že při logickém stavu „0“ jsou neaktivní, nachází se ve stavu NC (normally closed). K aktivaci spínačů dochází přivedením logického stavu „1“ na konkrétní řídicí piny ze skupiny LOGIC\_INPUT\_CH1, spínače budou ve stavu NO (normally opened).

Přivedením logické úrovně „1“ na piny 1 a 3 ze skupiny LOGIC\_INPUT\_CH1 se aktivuje útlumový článek 20dB tvořený dvěma dvojicemi rezistorů R1,R3 a R2,R4. Při přepnutí

skupiny spínačů 1 a 2 u IC2 pro dvojici rezistorů R1,R3 platí následující rovnice, která je upravena dle označení součástek v obvodovém zapojení [4]. Potom,

$$U_{OUT+} = \frac{R_3}{R_1 + R_3} U_{IN+}, \quad (3.1)$$

kde  $U_{OUT+}$  (V).....je výstupní napětí útlumového článku,  
 $U_{IN+}$  (V).....je vstupní napětí,  
 $R_1$  ( $\Omega$ ).....je hodnota rezistoru R1,  
 $R_3$  ( $\Omega$ ).....je hodnota rezistoru R3.

Napěťové zesílení (upravená rovnice (1.1)) útlumového článku je,

$$A_U = 20 \log \frac{U_{OUT+}}{U_{IN+}} = 20 \log \frac{R_3}{R_1 + R_3} = 20 \log \frac{1 \cdot 10^3}{1 \cdot 10^3 + 10 \cdot 10^3} = -20,8 \text{dB}.$$

Dělič tak utlumí signál o cca 20dB. To samé platí i pro druhou dvojici rezistorů R2,R4.

Druhou funkcí je převrácení fáze vstupního signálu. Tato funkce se zapíná přivedením logické úrovně „1” na piny 5 a 7 ze skupiny LOGIC\_INPUT\_CH1, kde při sepnutí skupiny spínačů 3 a 4 u IC2 dojde k inverzi mezi kladnou a zápornou větví vstupů integrovaného obvodu IC1 a tím pádem k obrácení fáze vstupního signálu o 180°.

Poslední z funkcí bloku předzesilovače definované zadáním je funkce MUTE uskutečněna prostřednictvím skupiny spínačů 1 a 2 u IC3 opět přivedením logické úrovně „1”, tentokrát na piny 2 a 4 ze skupiny LOGIC\_INPUT\_CH1. Přepnutím zmíněné skupiny spínačů dojde k odpojení vstupního signálu a propojení vstupů integrovaného obvodu IC1 se zemí.

Napájecí napětí integrovaných obvodů MAX333 je filtrováno přes elektrolytické kondenzátory C23 a C24 o velikosti 1 $\mu$ F. Trojice kondenzátorů C3, C4, a C5 potlačuje vliv rušivých napětí o vysokých kmitočtech. Diody D1 až D4 slouží k ochraně vstupu integrovaného obvodu IC1 proti napěťovým špičkám, které mohou vzniknout při zapnutí či vypnutí fantomového napájení. Potenciometrem P1 je možné regulovat zesílení integrovaného obvodu SSM2019. Velikost potenciometru P1 byla zvolena 5k $\Omega$ , jelikož se předpokládá použití předzesilovače hlavně pro zesílení velmi slabých signálu (mikrofonní úrovně). Dle doporučení výrobce musí být tento potenciometr v provedení s exponenciálním či logaritmickým průběhem. Při nastavené minimální hodnotě potenciometru P1 je maximální zisk předzesilovače dán rezistorem R9. Dle [11], platí

$$R_9 + P_1 = \frac{10 \cdot 10^3}{A_U - 1}, \quad (3.2)$$

kde  $A_U$  (-).....je požadované napěťové zesílení předzesilovače,  
 $R_9$  ( $\Omega$ ).....je hodnota rezistoru R9,  
 $P_1$  ( $\Omega$ ).....je hodnota nastavená na potenciometru P1.

Potom maximální zesílení bloku předzesilovače dle (3.2) je,

$$A_U = \frac{10 \cdot 10^3}{R_9 + P_1} + 1 = \frac{10 \cdot 10^3}{10 + 0} + 1 = 1001 \cong 60\text{dB}.$$

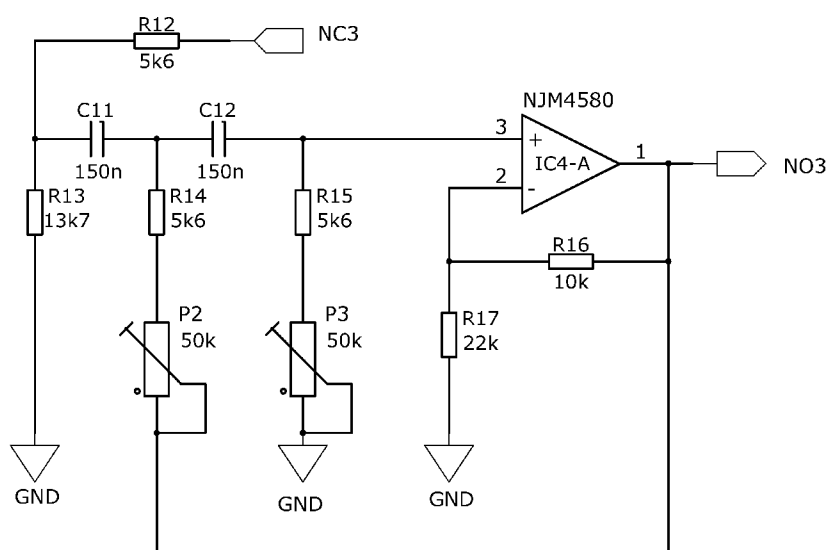
A minimální zesílení bloku předzesilovače dle (15) je,

$$A_U = \frac{10 \cdot 10^3}{R_9 + P_1} + 1 = \frac{10 \cdot 10^3}{10 + 5 \cdot 10^3} + 1 = 2,99 \cong 9,53\text{dB}.$$

Jelikož obvod SSM2019 má na výstupu typicky kladné stejnosměrné napětí o velikosti v řádu 100mV, je jeho výstup od následujícího bloku oddělen kondenzátorem C8. Napájecí napětí je pro tento obvod filtrováno pomocí elektrolytických kondenzátorů C9 a C10 o velikosti 47μF.

### 3.1.2 Blok filtru horní propusti

Za blokem předzesilovače se nachází blok filtru horní propusti, který může být aktivován přivedením logické úrovně „1” na piny 6 a 8 ze skupiny LOGIC\_INPUT\_CH1 ovládajících spínač 3 u IC3. Schéma zapojení je uvedené na Obr. 11 (čerpáno z [26]).



**Obr. 11: Schéma bloku filtru horní propusti**

Jak již bylo zmíněno v předchozím textu kapitoly 1.3.1 slouží tento filtr k potlačení rušivých signálů o nízkých kmitočtech v rozsahu cca 20Hz – 200Hz. Zapojení filtru horní propusti je provedeno prostřednictvím operačního zesilovače, kterým je integrovaný obvod od firmy New Japan Radio Co.,Ltd., a to NJM4580.

Obvodové schéma filtru horní propusti je tvořeno operačním zesilovačem IC4A. Jedná se o horní propust 2. řádu v tzv. Sallen – Key zapojení se strmostí +12dB/oktáva. Dle literatury [3] pro Sallen – Key zapojení platí pro výpočet mezního kmitočtu  $f_0$  následující vztah (je upraven dle schématu na Obr. 11),

$$f_0 = \frac{1}{\sqrt{4\pi^2 (R_{14} + P_2)(R_{15} + P_3)C_{11}C_{12}}}, \quad (3.3)$$

kde  $R_{14}$  ( $\Omega$ ).....je hodnota rezistoru R14,  
 $R_{15}$  ( $\Omega$ ).....je hodnota rezistoru R15,  
 $P_1$  ( $\Omega$ ).....je hodnota nastavená na trimru P1,  
 $P_2$  ( $\Omega$ ).....je hodnota nastavená na trimru P2,  
 $C_{11}$  (F).....je hodnota kapacity kondenzátoru C11,  
 $C_{12}$  (F).....je hodnota kapacity kondenzátoru C12,  
 $f_0$  (Hz).....je mezní frekvence.

Hodnota kondenzátoru C11 je zvolena 150nF. Pro kondenzátor C12 dle [3], platí  $C_{11} = C_{12}$ , z čehož vyplývá hodnota kapacity tohoto kondenzátoru 150nF. Dále je zvolena hodnota rezistorů R14 a R15 a to  $R_{14} = R_{15} = 5,6k\Omega$ . Pro jednoduchost výpočtu je zvoleno i  $P_2 = P_3$ . Potom dle vztahu (18) platí pro hodnoty potenciometrických trimrů P2 a P3 pro mezní kmitočet  $f_0 = 20\text{Hz}$  dle (3.3), platí

$$P_2 = \frac{1}{2\pi f_0 C_{11}} - R_{14} = \frac{1}{2\pi \cdot 20 \cdot 150 \cdot 10^{-9}} - 5,6 \cdot 10^3 \cong 47k\Omega.$$

Stejným způsobem lze vypočítat hodnoty potenciometrických trimrů P2 a P3 pro mezní kmitočet  $f_0 = 200\text{Hz}$ , potom platí

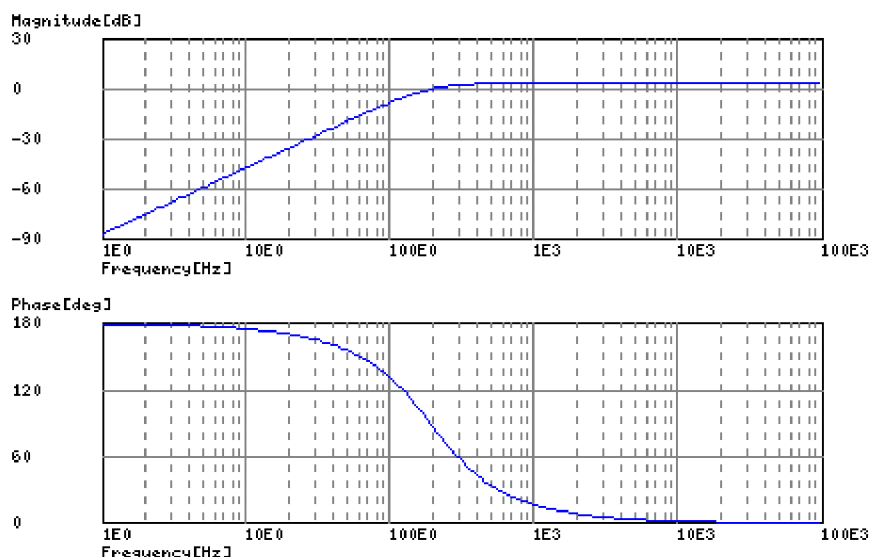
$$P_2 = \frac{1}{2\pi f_0 C_{11}} - R_{14} = \frac{1}{2\pi \cdot 200 \cdot 150 \cdot 10^{-9}} - 5,6 \cdot 10^3 \cong 0k\Omega.$$

Na základě předchozích výpočtů byla hodnota potenciometrických trimrů P2 a P3 zvolena 50k $\Omega$ .

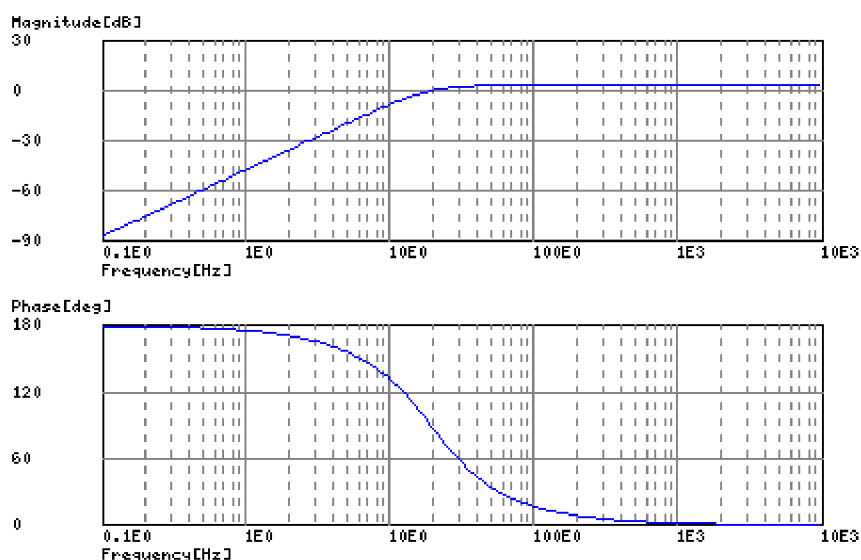
K ověření správnosti návrhu bylo využito „návrhové pomůcky“ ze zdroje [27]. Výstupem z této „pomůcky“ po zadání parametrů navrhovaného filtru byly získány následující údaje: frekvence mezního kmitočtu  $f_0$ , kvalitativní faktor tohoto filtru  $Q$  (viz Tabulka), kmitočtová a fázová charakteristika (viz Obr. 12 a Obr. 13).

**Tab. 3: Tabulka parametrů HPF v závislosti na nastavení trimrů P2 a P3**

Hodnota odporu trimrů P2 a P3 [ $\Omega$ ]	0	50000
Mezní kmitočet $f_0$ [Hz]	189.5	19.1
Kvalitativní faktor $Q$	0.65	0.65



Obr. 12: Kmitočtová a fázová charakteristika HPF pro  $P_2 = P_3 = 0\Omega$



Obr. 13: Kmitočtová a fázová charakteristika HPF pro  $P_2 = P_3 = 50\text{k}\Omega$

Pro výstupní napětí a zesílení operačního zesilovače IC4A dle rovnic uvedených v [4] a upravených s ohledem na označení součástek v obvodovém schématu, platí

$$U_{OutIC4A} = \left(1 + \frac{R_{16}}{R_{17}}\right) U_{InIC4A}, \quad (3.4)$$

$$A_{UIC4A} = 20 \log \frac{U_{OutIC4A}}{U_{InIC4A}} = 20 \log \left(1 + \frac{R_{16}}{R_{17}}\right), \quad (3.5)$$



kde  $U_{OutIC4A}$  (V).....je výstupní napětí z IC4A,  
 $U_{InIC4A}$  (V).....je vstupní napětí IC4A,  
 $A_{UIC4A}$  (dB).....napěťové zesílení operačního zesilovače IC4A,  
 $R_{16}, R_{17}$  ( $\Omega$ ).....jsou hodnoty rezistorů zpětné vazby operačního zesilovače.

Vlastní zesílení operačního zesilovače IC4A dle obvodového schématu je,

$$A_{UIA4C} = 20 \log \left( 1 + \frac{R_{16}}{R_{17}} \right) = 20 \log \left( 1 + \frac{10 \cdot 10^3}{22 \cdot 10^3} \right) = 3,25 \text{ dB}.$$

Z hlediska celkového zapojení vstupního mikrofon/linkového zesilovače by mělo být zesílení bloku filtru horní propusti nulové. Jelikož operační zesilovač IC4A pracuje v neinverujícím zapojení a jeho zesílení je větší jak 1, je vstupní signál přiveden do tohoto bloku přes odporový dělič tvořený rezistory  $R_{12}$  a  $R_{13}$ . Pro získání tohoto odporového děliče platí následující rovnice [4] upravená dle označení součástek v obvodovém zapojení. Potom,

$$U_{OUT+} = \frac{R_{13}}{R_{12} + R_{13}} U_{IN+}, \quad (3.6)$$

kde  $U_{OUT+}$  (V).....je výstupní napětí útlumového článku,  
 $U_{IN+}$  (V).....je vstupní napětí,  
 $R_{12}$  ( $\Omega$ ).....je hodnota rezistoru  $R_{12}$ ,  
 $R_{13}$  ( $\Omega$ ).....je hodnota rezistoru  $R_{13}$ .

Napěťové zesílení (upravená rovnice (1.1)) útlumového článku je,

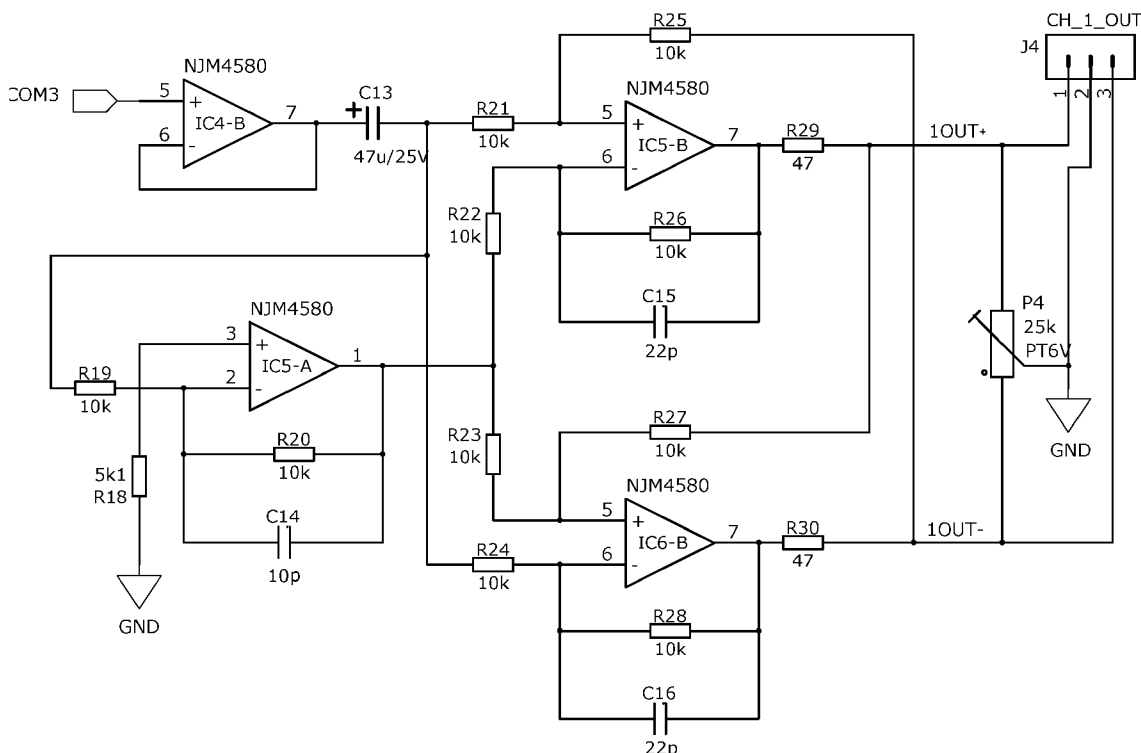
$$A_U = 20 \log \frac{U_{OUT+}}{U_{IN+}} = 20 \log \frac{R_{13}}{R_{12} + R_{13}} = 20 \log \frac{13,7 \cdot 10^3}{5,6 \cdot 10^3 + 13,7 \cdot 10^3} \cong -3 \text{ dB}.$$

Výsledné napěťové zesílení operačního zesilovače IC4A  $A_{uVystZesIC4A}$  je dáno součtem zesílení vstupního děliče a vlastního zesílení operačního zesilovače tzn.,

$$A_{uVystZesIC4A} = 3,25 + (-3) = 0,25 \text{ dB}.$$

### 3.1.3 Blok výstupního zesilovače

Posledním blokem výstupního mikrofon/linkového zesilovače je blok výstupního zesilovače. Schéma zapojení je uvedeno na Obr. 14. Obvodové schéma bylo čerpáno z [28]. Zesilovač je tvořen stejně jako blok filtru horní propusti integrovanými obvody NJM4580.



**Obr. 14:** Schéma bloku výstupního zesilovače.

Obvodové schéma bloku výstupního zesilovače obsahuje operační zesilovače IC4B, IC5A, IC5B a IC6B. Operační zesilovač IC4A je zapojen jako napěťový sledovač, který impedančně odděluje vstupní část od výstupní. Za tímto zesilovačem následuje elektrolytický kondenzátor C13 o hodnotě 47  $\mu\text{F}$  pro oddělení stejnosměrné vazby tohoto zesilovače. Operační zesilovač IC5A vytváří virtuální plovoucí zem pro IC5A a IC6B. Operační zesilovače IC5A a IC6B tvoří symetrický výstupní zesilovač s tzv. servo – symetrickou zpětnou vazbou. Tyto vazby jsou tvořeny rezistory R25 a R27. Zapojení je výhodné v tom, že výstupní signál má konstantní amplitudu jak v případě symetrické, tak i v případě nesymetrické zátěže. Kondenzátory C14 až C16 slouží jako korekční kapacity operačních zesilovačů IC5A, IC5B a IC6B. Zesílení koncového stupně je dáno rezistory R22 a R26 pro operační zesilovač IC5B a dvojicemi rezistorů R24, R28 a R23, R27 pro operační zesilovač IC6B. Pro výstupní napětí a zesílení operačního zesilovače IC5B v neinvertujícím zapojení platí rovnice dle [4] upravené s ohledem na označení součástek v obvodovém schématu,

$$U_{OutIC5B} = \left(1 + \frac{R_{26}}{R_{22}}\right) U_{InIC5B}, \quad (3.7)$$

$$A_{UIC5B} = 20 \log \frac{U_{OutIC5B}}{U_{InIC5B}} = 20 \log \left(1 + \frac{R_{26}}{R_{22}}\right), \quad (3.8)$$

kde  $U_{OutIC5B}$  (V).....je výstupní napětí z IC5B,  
 $U_{InIC5B}$  (V).....je vstupní napětí IC5B,  
 $A_{UIC5B}$  (dB).....napěťové zesílení operačního zesilovače IC5B,  
 $R_{22}, R_{26}$  ( $\Omega$ ).....jsou hodnoty rezistorů R22 a R26.

Vlastní zesílení operačního zesilovače IC4A dle obvodového schématu je,

$$A_{UIC5B} = 20 \log \left( 1 + \frac{R_{26}}{R_{22}} \right) = 20 \log \left( 1 + \frac{10 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^3} \right) \cong 6 \text{dB}.$$

Výstupní napětí  $U_{OutIC5B}$  vytváří kladnou signálovou cestu výstupního bloku zesilovače.

Stejné zesílení je zrealizováno také operačním zesilovačem IC6B. Tento operační zesilovač se chová jako rozdílový zesilovač, pro jehož zesílení dle [4] platí rovnice upravená s ohledem na označení součástek v obvodovém schématu,

$$U_{OutIC6B} = \left( \frac{R_{28}}{R_{24}} \right) (U_{InIC6B+} - U_{InIC6B-}), \quad (3.9)$$

kde  $U_{OutIC6B}$  (V).....je výstupní napětí IC6B,  
 $U_{InIC6B+}$  (V).....je vstupní napětí invertujícího vstupu IC6B,  
 $U_{InIC6B-}$  (V).....je vstupní napětí neinvertujícího vstupu IC6B,  
 $R_{24}, R_{28}$  ( $\Omega$ ).....jsou hodnoty rezistorů R24 a R28.

Dle obvodového schématu pro napětí invertujícího a neinvertujícího vstupu operačního zesilovače IC6B, platí  $-U_{InIC6B+} = U_{InIC6B-}$ . Za tohoto předpokladu lze dle vztahu (3.9) vypočítat vlastní zesílení operačního zesilovače IC6B  $A_{UIC6B}$ , které je

$$A_{UIC6B} = 20 \log \left( 2 \frac{R_{28}}{R_{24}} \right) = 20 \log \left( 2 \cdot \frac{10 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^3} \right) \cong 6 \text{dB}.$$

Výstupní napětí  $U_{OutIC6B}$  je invertováno a vytváří tak zápornou signálovou cestu výstupního bloku zesilovače. Potenciometrický trimr P4 slouží ke zvýšení stability bloku výstupního zesilovače a odstraňuje případné rozdíly v hodnotách rezistorů tvořících servo – symetrickou zpětnou vazbu [28]. Blokování napájecího napětí použitých operačních zesilovačů je provedeno keramickými kondenzátory C17 až C22 o kapacitě 100nF viz příloha B **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů..**

Celkový zisk vstupního mikrofon/linkového zesilovače je dán součtem zesílení jednotlivých bloků a dosahuje hodnoty v rozmezí 15 až 66dB.

### 3.2 Návrh výstupního linkového zesilovače

Obvodové zapojení tohoto zesilovače je uvedeno na Obr. B3:**Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** (obvodové schéma výstupního linkového zesilovače čerpáno z [25]). Obvodové zapojení je opět popisováno dle logických bloků zmiňovaných v kapitole 1.3.2. Také obvod výstupního linkového zesilovače bude napájen symetrickým napájecím napětím  $\pm 17\text{V}$ .

### 3.2.1 Vstupní blok zesilovače

Vstupní blok zesilovače využívá opět integrovaných obvodů NJM4580. Hlavním úkolem vstupního bloku je nastavení zesílení definovaného zadáním. Tento úkol je realizován operačními zesilovači IC1A, IC1B, IC2A, IC2B, IC3A a IC3B, které tvoří tzv. přístrojové zapojení. Vstupní signál přivedený pomocí pinů označených IN+ a IN- je utlumen dvěma vstupními děliči složených z rezistorů R1 a R3 pro vstup signálu z pinu IN+ a rezistory R2 a R4 pro vstup signálu z pinu IN-. Tyto odporové děliče též definují výsledné zesílení výstupního linkového zesilovače. Útlum byl zvolen s přihlédnutím na zisk bloku výstupního zesilovače, který je realizován téměř identickým zapojením popsáním v kapitole 3.1.3. Požadovaná výstupní úroveň linkového zesilovače je +4dBu, při vstupní úrovni 0dBu, zisk bloku výstupního zesilovače je 6 dB z čehož vyplývá útlum vstupních děličů 2 dB. Potom dle upravené rovnice (3.1) platí,

$$U_{OUT+} = \frac{R_3}{R_1 + R_3} U_{IN+}, \quad (3.10)$$

kde  $U_{OUT+}$  (V).....je výstupní napětí útlumového článku,  
 $U_{IN+}$  (V).....je vstupní napětí,  
 $R_1, R_3$  ( $\Omega$ ).....jsou hodnoty rezistorů odporového děliče.

potom napěťový zisk útlumového článku je,

$$A_U = 20 \log \frac{U_{OUT+}}{U_{IN+}} = 20 \log \frac{R_3}{R_1 + R_3} = 20 \log \frac{3,83 \cdot 10^3}{1 \cdot 10^3 + 3,83 \cdot 10^3} \cong -2 \text{dB}.$$

Dělič tak utlumí signál o požadované 2 dB. To samé platí i pro druhou dvojici rezistorů R2, R4. Následuje rozdílový zesilovač IC2A, jehož zesílení je definováno rezistory R7 až R10. Z hodnot těchto rezistorů je zřejmé, že zesílení operačního zesilovače IC2A je 1. Výstup operačního zesilovače IC2A je připojen přes elektrolytický kondenzátor C1 o kapacitě 47 $\mu$ F eliminující stejnosměrnou složku výstupního napětí tohoto zesilovače.

### 3.2.2 Blok výstupního zesilovače

Druhým blokem výstupního linkového zesilovače je výstupní blok. Tento blok je tvořen také pomocí integrovaných obvodů NJM4580. Podle schématu je realizace uskutečněna operačními zesilovači IC2B, IC3A a IC3B. Zapojení těchto operačních zesilovačů využívá stejného principu jako zapojení s operačními zesilovači v bloku výstupního zesilovače u vstupního mikrofon/linkového zesilovače popsané v kapitole 3.1.3 s jedinou rozdílností. Tou je absence napěťového sledovače tvořeného operačním zesilovačem IC4B u mikrofon/linkového zesilovače.

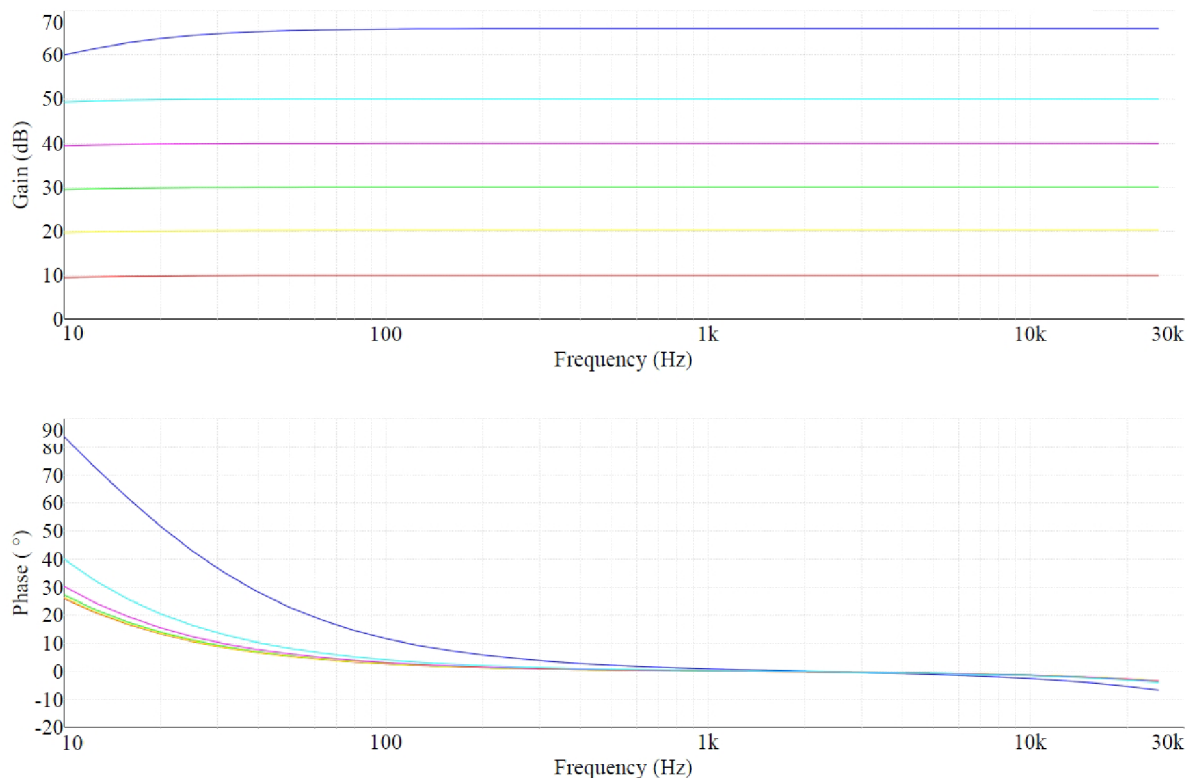
## 4 SOFTWAREVÉ SIMULACE

Vzájemná kombinace a zajištění optimální činnosti logických bloků může být problematické. Výhodou je, pokud je k dispozici program na simulaci jednotlivých obvodů (např. program MultiSIM, PSPICE apod.), na jejichž základě se dá vyhodnotit činnost, chování a splnění kvalitativních požadavků na zpracování signálu jednotlivých logických bloků. Je vhodné před návrhem desky plošného spoje pomocí simulace získat detailnější představu o chování navržených schémat zapojení a popřípadě odstranit nedostatky zjištěné pomocí této simulace. V následujících podkapitolách bude provedena simulace pomocí software MultiSim 10, jelikož software PSPICE neobsahoval potřebné knihovny součástek.

### 4.1 Simulace vstupního mikrofon/linkového zesilovače

Simulace vstupního mikrofon/linkového zesilovače je zaměřena především na simulaci funkcí, které jsou definovány zadáním MUTE, otočení fáze vstupního článku, aktivaci útlumového článku 20dB a regulace zesílení mikrofonního/linkového vstupu. Simulace chování obvodu bude realizováno pomocí funkce AC Analysis, což je simulace frekvenčního rozmítání. Frekvence bude rozmítána logaritmicky, v hodnotách od 10 Hz do 30 kHz s krokem 50 bodů na každou dekádu. Z této simulace budou zobrazeny výsledky s kmitočtovou a fázovou charakteristikou, ze kterých je možno posoudit chování obvodu. Dále bude využito ke sledování průběhu signálů virtuálních měřících přístrojů, především osciloskopu. Jako zdroje signálu jsou v simulaci použity dva zdroje harmonického signálu o frekvenci 1 kHz s amplitudou 60 mV a s navzájem otočenou fází o 180°.

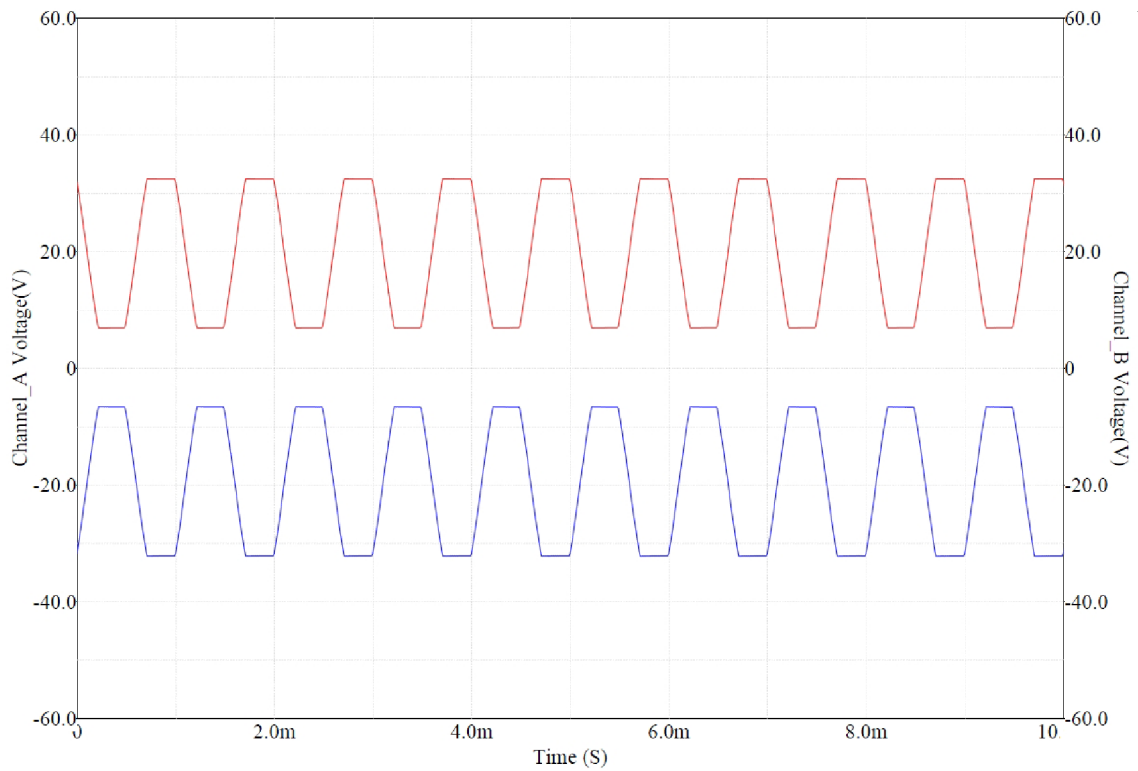
Na Obr. 15 je zobrazena kmitočtová a fázová charakteristika pro vstupní mikrofon/linkový zesilovač, pro různá nastavení potenciometru P1 (hodnoty P1 jsou počítány dle (15) a to i s uvažovaným ziskem bloku výstupního zesilovače viz. kapitola 3.1.3) s vypnutým blokem filtru horní propusti pro zesílení 10 až 60 dB. Z grafu je zřejmé, že pokud bude vstupní mikrofon/linkový zesilovač použit primárně pro zesilování slabých signálů vystačíme si s hodnotou P1 kolem 5k $\Omega$ . Pokud by byl požadavek na nižší zesílení tohoto zesilovače, musela by být hodnota P1 řádově v desítkách k $\Omega$ . Poslední hodnota potenciometru uvedená v grafu pro zesílení 10 dB je při hodnotě P1 = 17 k $\Omega$  a slouží jen pro představu. Z Obr. 15 je patrné, že nejlineárnější kmitočtové charakteristiky dosahuje vstupní mikrofon/linkový zesilovač pro nižší zesílení 10dB, 20dB, 30dB a 40dB, kde charakteristika je velmi plochá, tedy pokles zesílení vstupního mikrofon/linkového zesilovače je zde minimální. Při maximálním zesílení je patrný pokles zesílení cca 2 až 3dB.



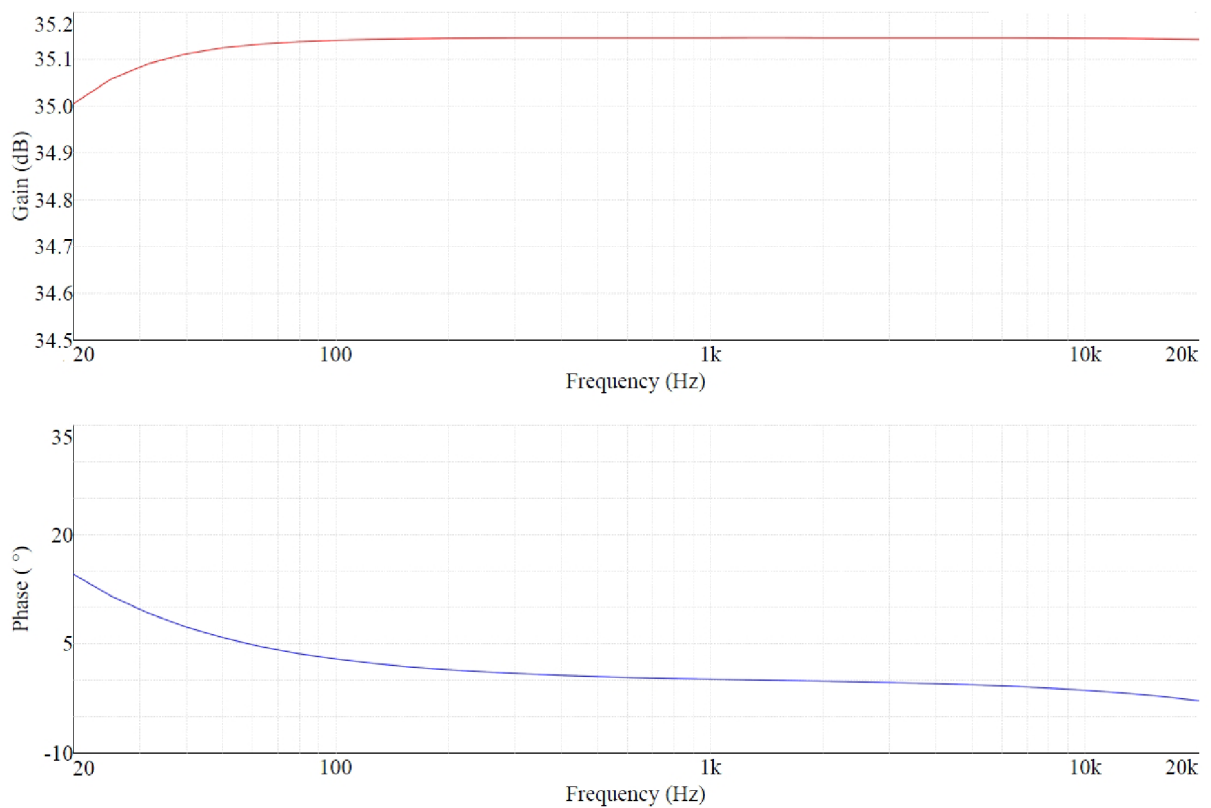
**Obr. 15: Kmitočtová a fázová charakteristika vstupního mikrofon/linkového zesilovače pro různá zesílení**

Následně byl „připojen“ k výstupu mikrofon/linkového zesilovače virtuální osciloskop za účelem sledování průběhu výstupního napětí mikrofon/linkového zesilovače. Při postupné regulaci zesílení tohoto zesilovače potenciometrem P1 byla zjištěno omezení výstupního signálu pro zesílení kolem 50 dB. Toto omezení zesilovače je určeno velikostí napájecího napětí, v daném případě dle návrhu hodnotou  $\pm 17$  V. Rozkmit výstupního signálu nemůže být totiž větší, než je rozsah napájecích napětí, což se projevilo „ořezáním“ amplitud výstupního signálu. Tento jev je patrný z průběhu výstupního signálu zobrazeného na Obr. 16. Průběh výstupního signálu kladné větve je v grafu zobrazen červenou křivkou a záporné větve křivkou modrou.

Pro simulaci funkcí vstupního mikrofon/linkového zesilovače definovaných zadáním bylo zesílení zesilovače nastaveno na hodnotu cca 35,1 dB. Kmitočtová a fázová charakteristika bez aktivovaných funkcí je zobrazena na Obr. 17.

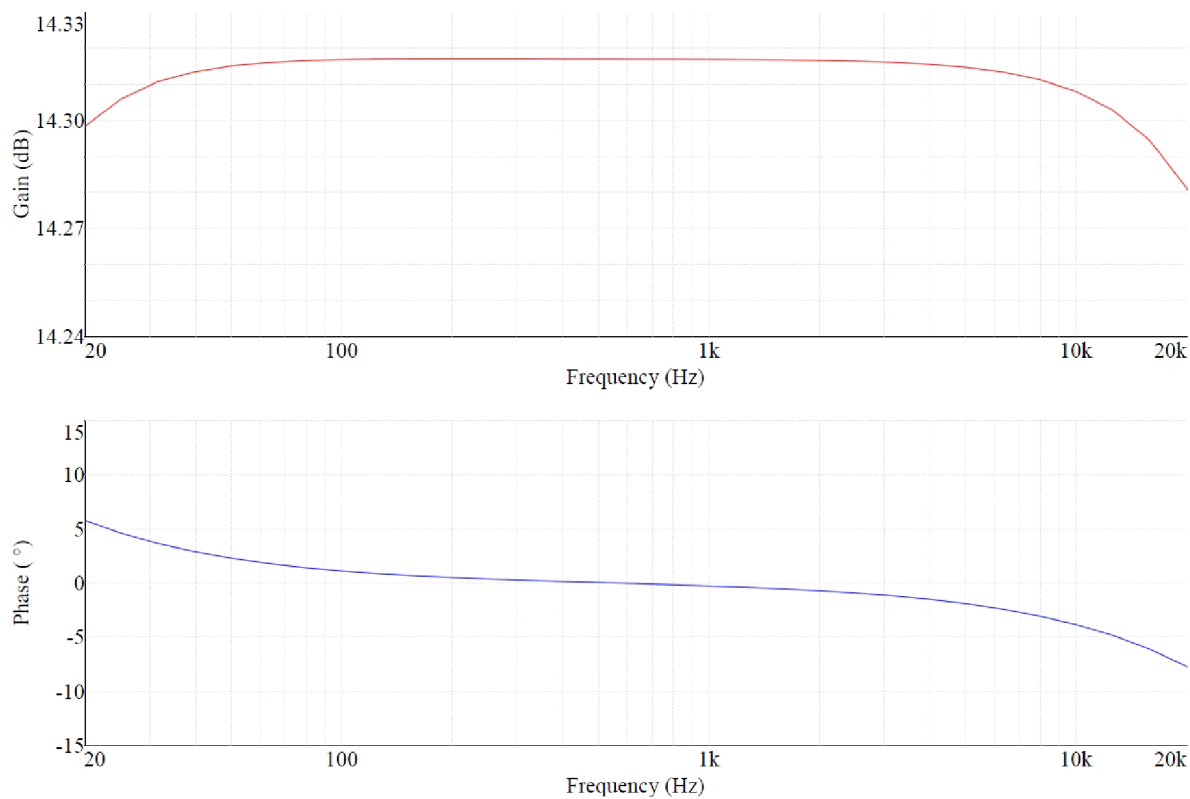


**Obr. 16: Průběh výstupního signálu vstupního mikrofon/linkového zesilovače při limitaci**



**Obr. 17: Kmitočtová a fázová charakteristika vst. mikrofon/linkového zesilovače při zesílení 35,1dB**

První ze simulovaných funkcí je aktivace útlumového článku 20dB. Kmitočtová a fázová charakteristika při činném útlumovém článku se nachází na Obr. 18.

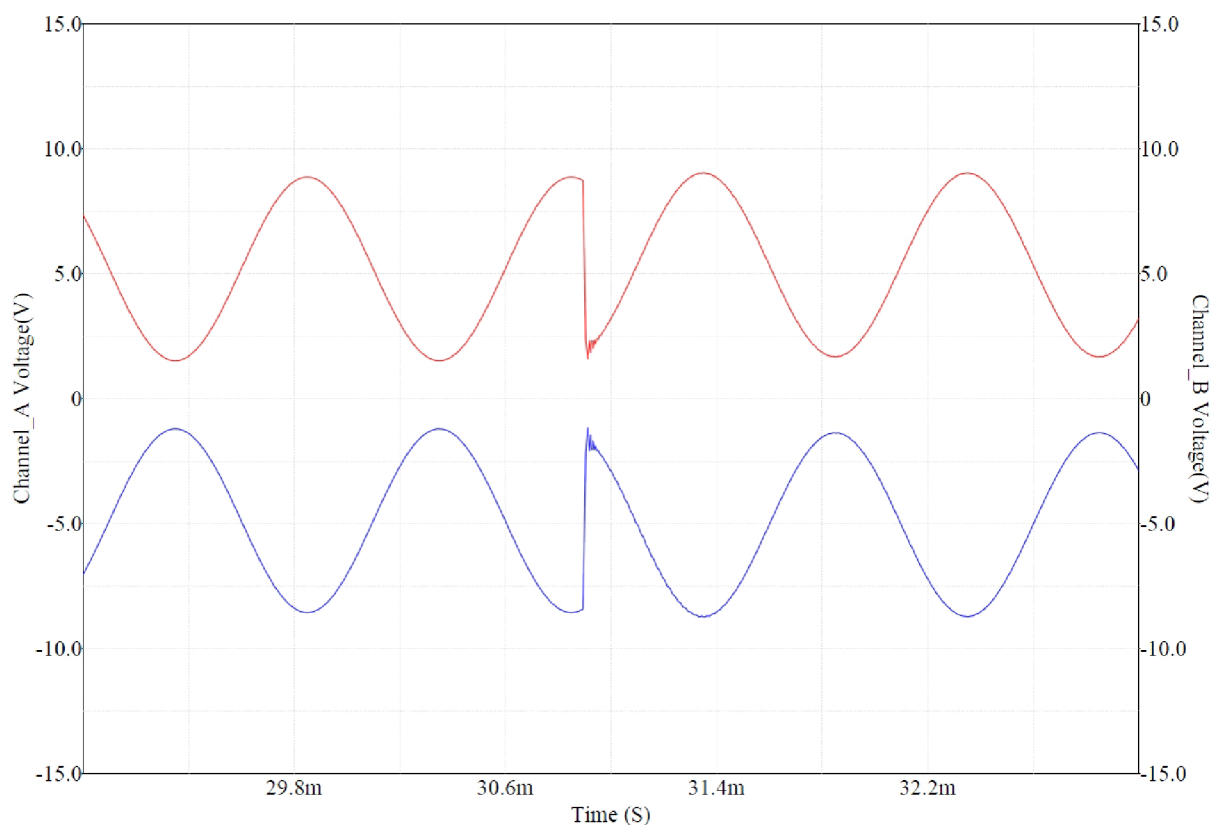


**Obr. 18: Kmitočtová a fázová charakteristika vst. mikrofon/linkového při zesílení 35,1 dB s aktivovaným útlumovým článkem 20dB**

Z této charakteristiky je patrný útlum realizovaný odporovým děličem s dvojicí rezistorů R1, R3 a R2, R4. Útlum odpovídá hodnotě 20,8dB, která byla spočtena v rámci návrhu.

Druhou ze simulovaných funkcí je obrácení fáze vstupního signálu. Připojeným virtuálním osciloskopem byl monitorován průběh výstupního signálu během aktivace funkce pro obrácení fáze. Průběh signálu je zobrazen na Obr. 19. Z tohoto obrázku je zřejmá inverze signálů kladné výstupní větve (v grafu představován červenou křivkou) a záporné výstupní větve (v grafu představován modrou křivkou) o 180°.

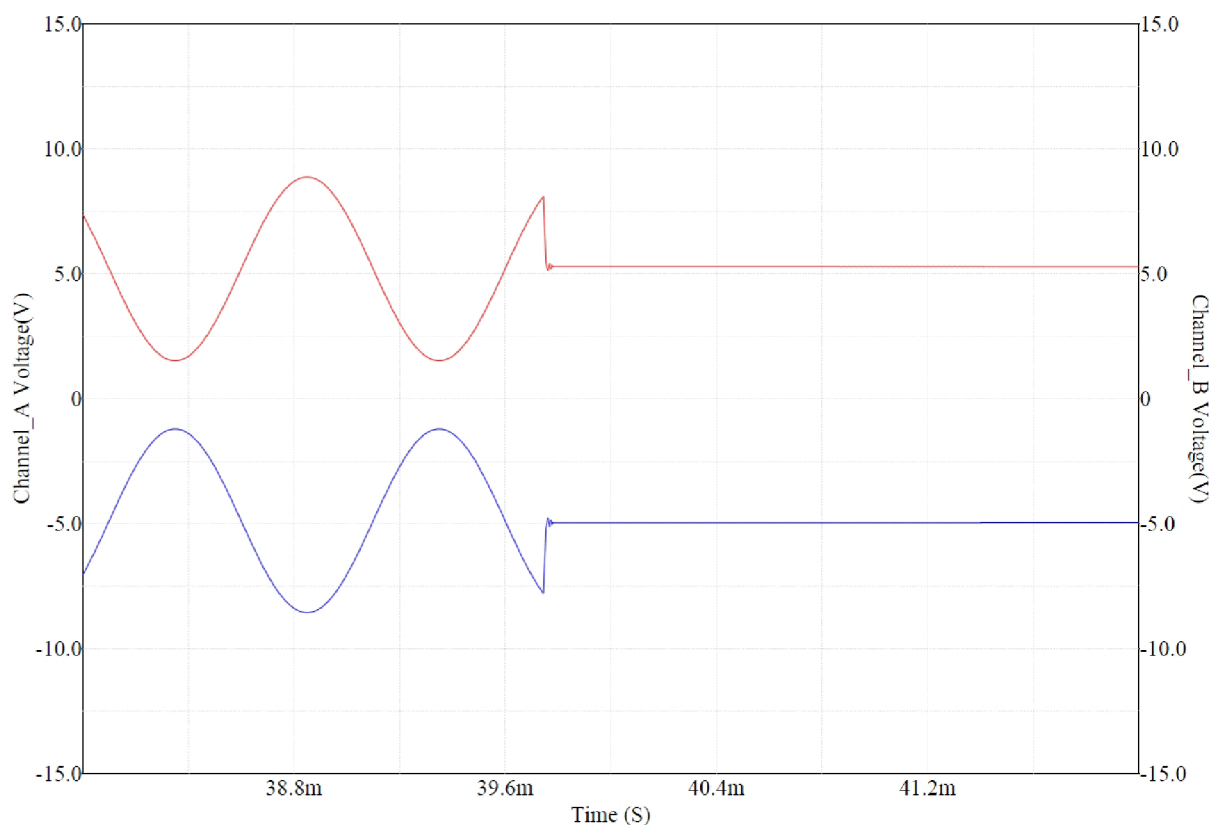




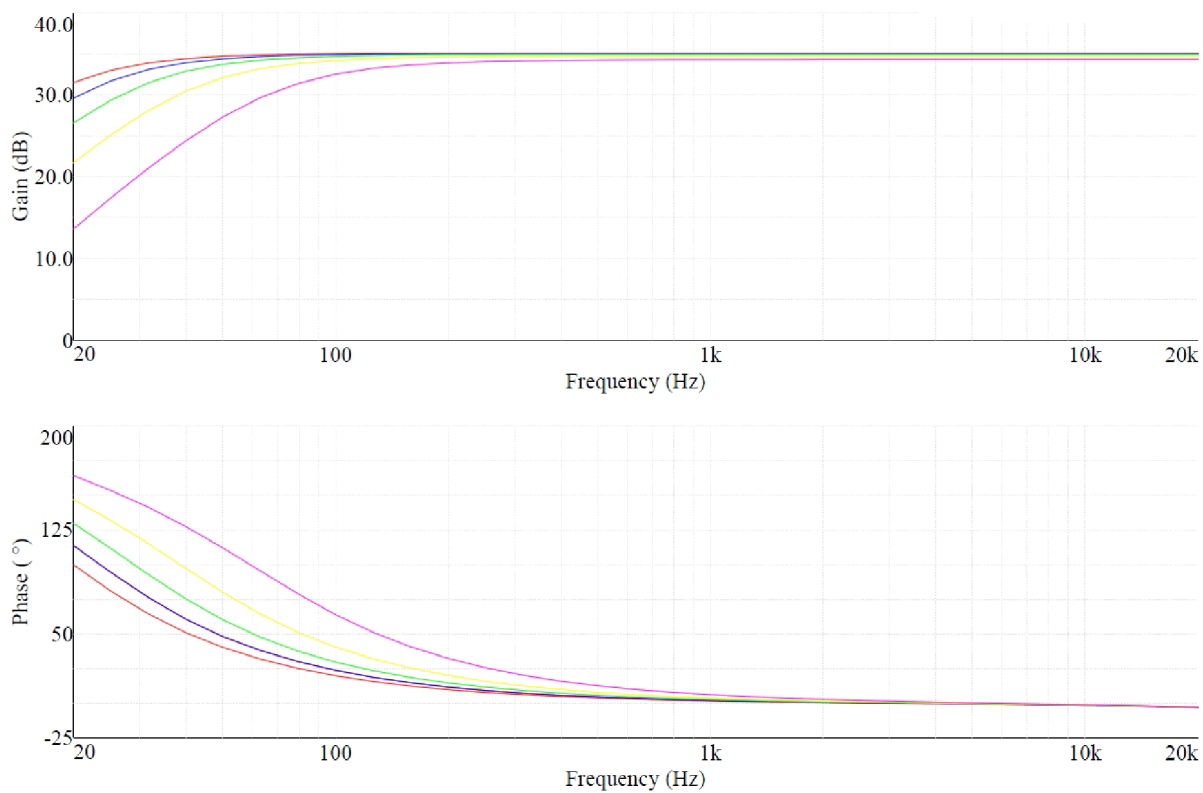
**Obr. 19: Průběh výstupního signálu vstupního mikrofon/linkového zesilovače při aktivaci funkce pro obrácení fáze**

Třetí simulovanou funkcí je funkce MUTE. Opět byl pozorován průběh výstupního signálu během aktivace funkce MUTE. Průběh tohoto signálu je uveden na Obr. 20. Z průběhu výstupního signálu je zcela zřejmé, kdy došlo k propojení vstupů bloku předzesilovače s integrovaným obvodem SSM2019 se zemí.

Poslední simulací je aktivace bloku filtru horní propusti. Kmitočtová a fázová charakteristika s aktivovaným blokem filtru horní propusti pro různé hodnoty nastavení potenciometrických trimrů P2 a P3 je uvedena na Obr. 21. Mezní kmitočty  $f_0$  se pohybují pro tyto hodnoty v rozsahu cca 30 – 150 Hz.



**Obr. 20: Průběh výstupního signálu vstupního mikrofon/linkového zesilovače při aktivaci funkce MUTE**

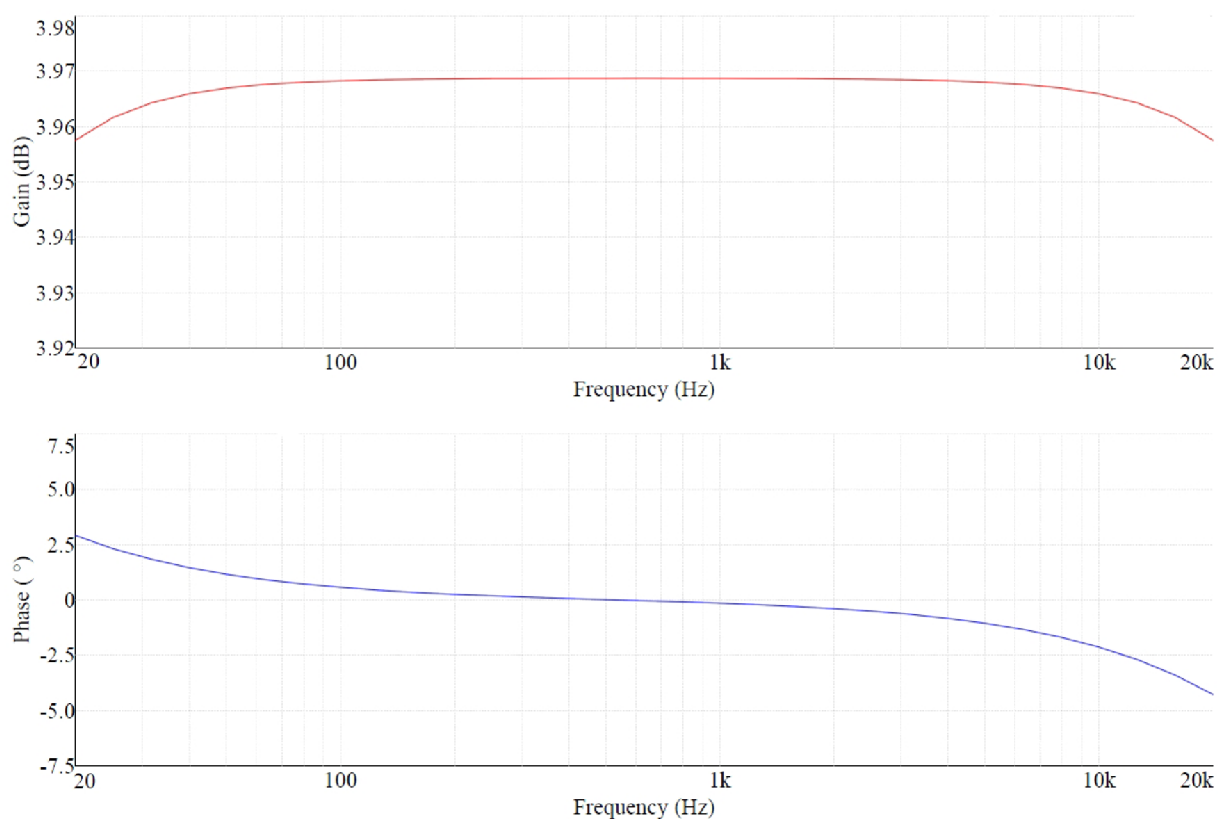


**Obr. 21: Kmitočtová a fázová charakteristika s aktivním blokem filtru horní propusti pro různá nastavení trimrů**

## 4.2 Simulace výstupního linkového zesilovače

U simulace výstupního linkového zesilovače je třeba otestovat chování celého obvodu při definované nominální úrovni na výstupu, tedy +4 dBu při vstupní úrovni signálu 0 dBu. Opět bude simulováno pomocí funkce AC Analysis, při stejném nastavení rozmítání jako v případě simulace vstupního mikrofon/linkového zesilovače. Jako zdroj signálu jsou v simulaci použity dva zdroje harmonického signálu o frekvenci 1 kHz s amplitudou 775 mV, tedy 0 dBu s navzájem otočenou fází o 180°. Výstupem této simulace je kmitočtová a fázová charakteristika pro definovanou nominální úroveň.

Kmitočtová a fázová charakteristika pro požadovanou úroveň +4dBu je zobrazena na Obr. 22. Kmitočtová charakteristika je velmi lineární, pokles je zde menší než 0,02 dB. Jak je vidět z obou charakteristik parametry definované zadáním jsou u výstupního linkového zesilovače splněny.



**Obr. 22: Kmitočtová a fázová charakteristika výstupního linkového zesilovače při nominální úrovni zesílení +4 dBu**

## 5 NÁVRH DESEK PLOŠNÝCH SPOJŮ

Na základě navržených obvodových schémat vstupního mikrofon/linkového zesilovače a výstupního linkového zesilovače budou navrženy desky plošných spojů (v textu bude dále reprezentováno pod zkratkou DPS). K vlastnímu návrhu obou DPS byl použit program PADS určený pro návrh DPS od firmy Mentor Graphics. Popis jednotlivých DPS bude rozebrán v následujících kapitolách.

### 5.1 Návrh DPS č.1 – Vstupního mikrofon/linkového zesilovače č.1 a č.2

DPS č. 1 sdružuje vstupní mikrofon/linkový zesilovač č. 1 a č. 2. Jsou zde tedy umístěny veškeré bloky popsané v kapitole 3.1. DPS č. 1 je realizovaná dle obvodových schémat uvedených na v příloze B na Obr. B1: a Obr. B2:.

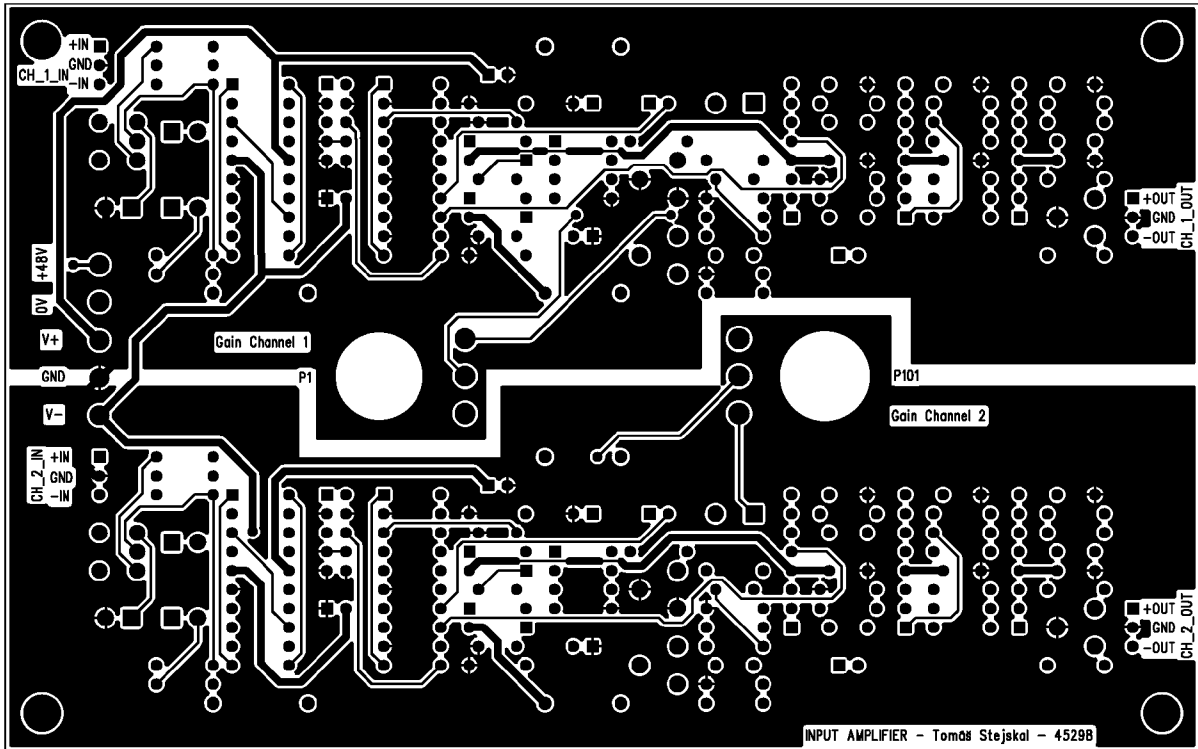
Zpracovávaný signál je přiveden pomocí dvojice konektorů XLR3KU. Jedná se o konektory XLR v provedení pro montáž na kabel. Tyto konektory jsou připojeny k DPS, stíněným kabelem prostřednictvím trojice pinů označených CH\_1\_IN pro mikrofon/linkový zesilovač č.1, potažmo pomocí trojice pinů CH\_2\_IN pro mikrofon/linkový zesilovač č.2.

K aktivaci funkcí definovaných zadáním realizovaných čtveřicí integrovaných obvodů IC2,IC3, IC102 a IC103 je nutné přivést signál o logické úrovni „1” na řídicí piny těchto obvodů. Pro přivedení logické úrovně na správné řídicí piny těchto integrovaných obvodů slouží piny s označením SV2 pro vst. mikrofon/linkový zesilovač č. 1 a s označením SV102 pro vst. mikrofon/linkový zesilovač č. 2. Jak u pinů s označením SV2, tak u pinů s označením SV102 je rozložení identické. Piny číslo 1, 5, 2 a 6 jsou signálové a piny číslo 3, 4, 7, 8, 9 a 10 jsou určené pro připojení signálové země. Konkrétní rozložení těchto pinů je následující: piny č. 1 a č. 3 ovládají aktivaci útlumového článku, piny č. 5 a č. 7 slouží k obrácení fáze vstupního signálu, piny č. 2 a č. 4 aktivují funkci MUTE a piny č. 6 a č. 8 zapínají filtr horní propusti.

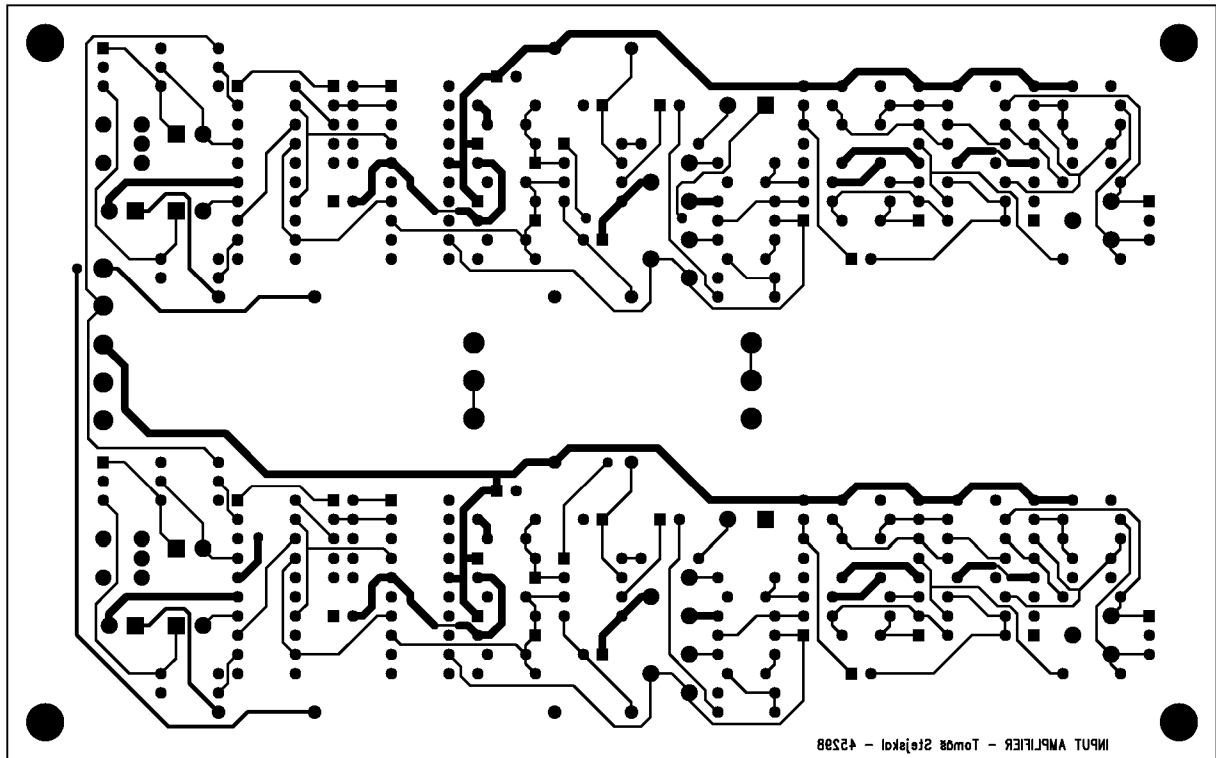
Na DPS se nachází dva potenciometry P1 a P101 určené pro regulaci zesílení jednotlivých mikrofon/linkových zesilovačů. Z důvodu vyšší mechanické stability a pro snadnější manipulaci s těmito potenciometry jsou upevněny k DPS a to v poloze kolmo. Díky tomuto mechanickému upevnění jsou „těla” potenciometrů umístěna na straně BOTTOM DPS č.1. Aby nedošlo k poškození „těl” potenciometrů je deska opatřena kovovými distančními sloupky, které jsou k DPS pevně přišroubovány.

Výstup směrem k A/D převodníku je vyveden prostřednictvím trojice pinů označených CH\_1\_OUT pro výstup z mikrofon/linkového zesilovače č. 1 a s označením CH\_2\_OUT pro výstup z mikrofon/linkového zesilovače č. 2. Fantomové napájení je přivedeno k DPS pomocí svorkovnice J1. Pro zapnutí tohoto fantomového napájení jsou určeny jednopólové přepínače umístěné v levé části DPS označené S1 a S101.Svorkovnice označená J2 přivádí symetrické napájení pro celý vstupní mikrofon/linkový zesilovač  $\pm 17V$ . Co se týče vlastního rozložení součástek, byla snaha o dodržení základních pravidel pro návrh desek plošných spojů. Na následujících obrázcích níže (Obr. 23, Obr. 24) je zobrazen návrh desky, která je oboustranná, o rozměrech 160 x 100 mm. Na obrázcích Obr. 25 a Obr. 26 se nachází osazovací plán DPS č. 1 pro stranu TOP a pro stranu BOTTOM této DPS. Měřítko obrázku je 1:1 a obrázek strany BOTTOM desky plošných spojů č. 1 je zrcadlově převrácen.

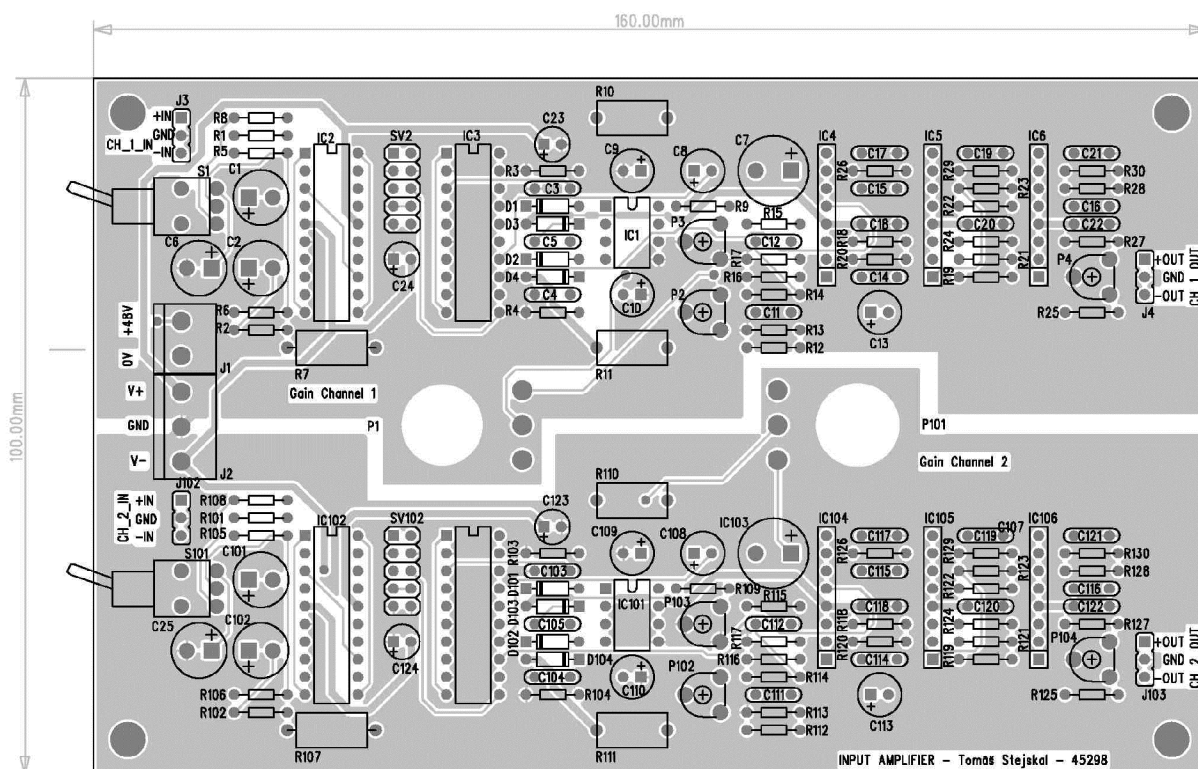
Fotografie strany TOP osazené DPS č. 1 je uvedena v příloze D na Obr. D1:.



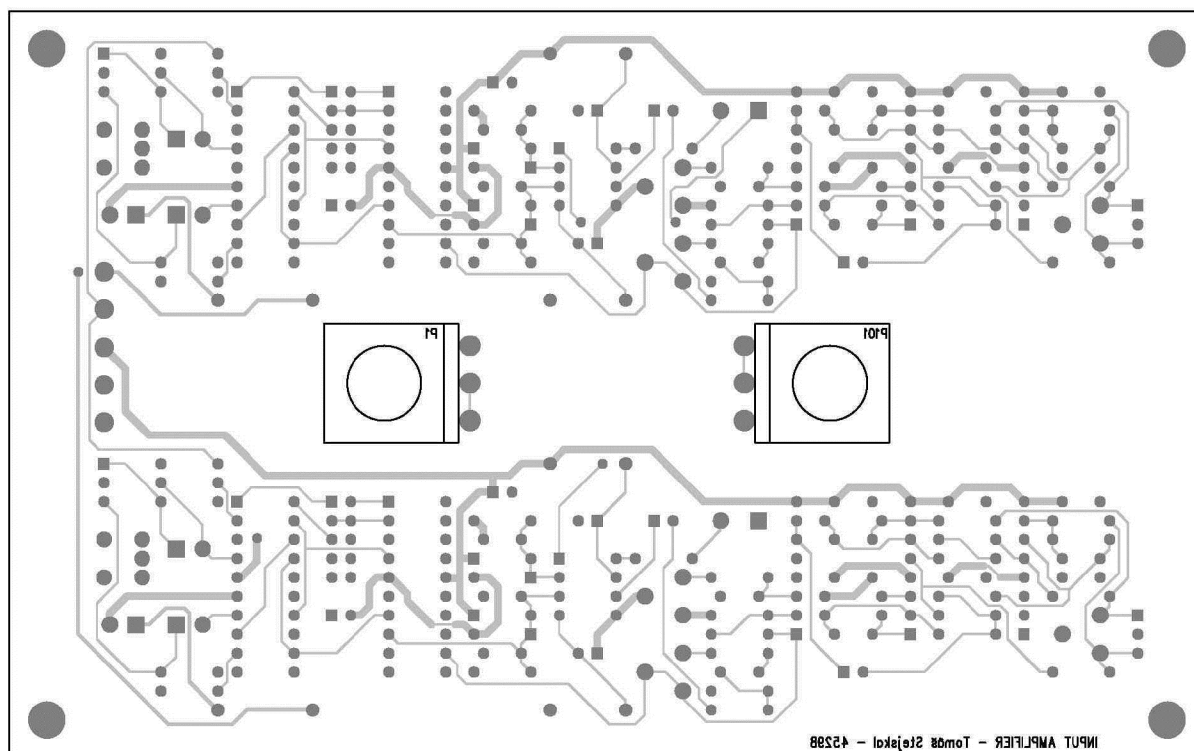
Obr. 23: DPS č. 1, strana TOP, 160x100 mm, měřítko 1:1



Obr. 24: DPS č. 1, strana BOTTOM, 160x100 mm, měřítko 1:1



Obr. 25: DPS č. 1, osazovací plán pro vstupní mikrofon/linkový zesilovač strana TOP



Obr. 26: DPS č. 1, osazovací plán pro vstupní mikrofon/linkový zesilovač strana BOTTOM

## 5.2 Návrh DPS č.2 – Výstupního linkového zesilovače

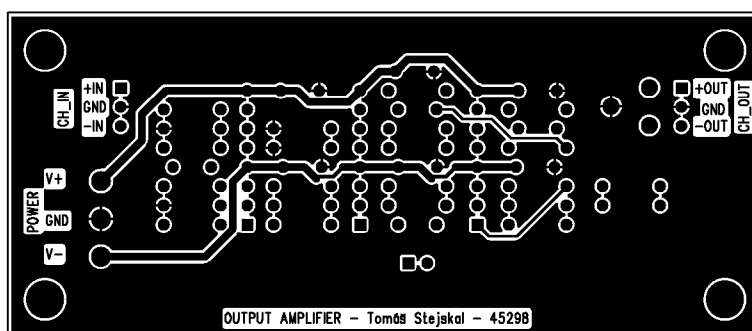
DPS č. 2 sdružuje bloky popsané v kapitole 3.2. Tato DPS je realizovaná dle obvodových schémat uvedených v příloze B na Obr. B3:.

Vstup směrem od D/A převodníku je realizován prostřednictvím trojice pinů s označením CH\_IN. Výstup je proveden obdobným způsobem jakým bylo realizováno přivedení zpracovávaného nf signálu na vstupy mikrofon/linkového zesilovače, tedy prostřednictvím stíněného kabelu opatřeného konektorem XLR3ST skrze trojici pinů označených CH\_OUT nacházejících se na výstupu linkového zesilovače.

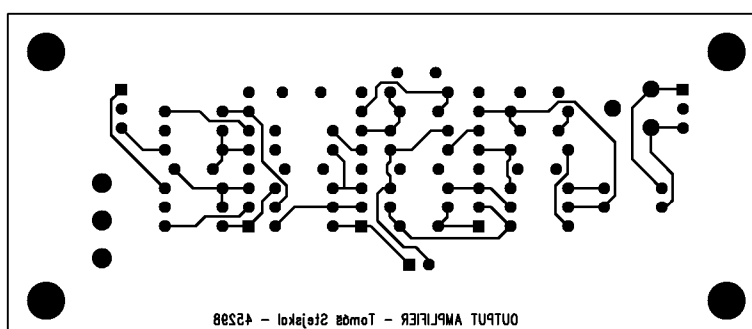
Svorkovnice označená J1 slouží pro připojení symetrického napájecího napětí o velikosti  $\pm 17V$ .

Na obrázcích níže (Obr. 27 a Obr. 28) je zobrazen návrh desky, která je oboustranná 100 x 43 a Obr. 29 zobrazuje osazovací plán DPS č. 2. Obrázek strany BOTTOM desky plošných spojů je opět zrcadlově převrácen.

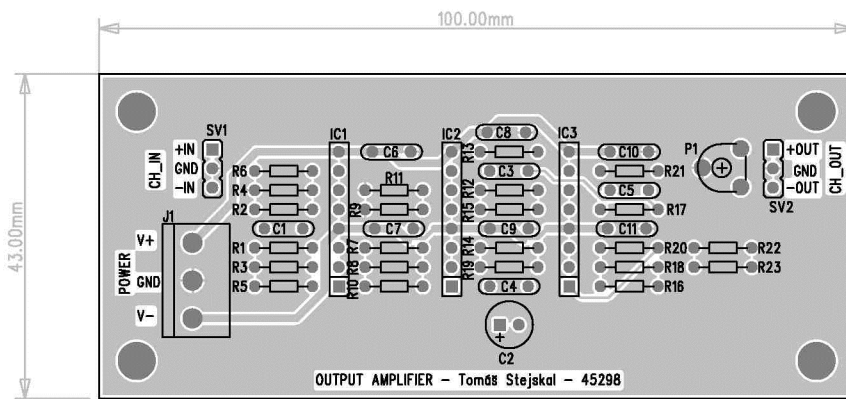
Fotografie strany TOP osazené DPS č. 2 je uvedena v příloze D na Obr. D2:.



Obr. 27: DPS č.2, strana TOP, 100x43 mm, měřítko 1:1



Obr. 28: DPS č.2, strana BOTTOM, 100x43 mm, měřítko 1:1



Obr. 29: DPS č.2, osazovací plán, měřítko 1:1



## 6 NAMĚŘENÉ VÝSLEDKY

V předchozí kapitole byl proveden návrh desek plošných spojů pro vstupní mikrofon/linkový zesilovač a výstupní linkový zesilovač. Po návrhu a následné výrobě byly tyto DPS osazeny součástkami. Po oživení těchto DPS byly proměřeny nejdůležitější charakteristiky z pohledu vlastností probíraných v kapitole 1.2. Těmito charakteristikami jsou kmitočtová a fázová charakteristika, měření THD + N, měření intermodulačního zkreslení IMD a měření odstupů užitečného signálu od šumu. V rámci měření vstupního mikrofon/linkového zesilovače byl proměřen přeslech mezi mikrofon/linkovým zesilovačem č. 1 a č. 2.

Veškerá měření probíhala na přístroji APx525 od firmy Audio Precision.

### 6.1 Měření vstupního mikrofon/linkového zesilovače

Vstupní zesilovač se skládá ze dvou částí mikrofon/linkového zesilovače č. 1 a č. 2, které jsou identické. Protože měření na těchto zesilovačích vykazovalo pouze nepatrné odchylky v rámci tolerance, je uvedeno měření pouze pro jeden „kanál“ a to „kanál“ č. 1.

Pro měření kmitočtové a fázové charakteristiky, měření IMD a THD + N byl nastaven generátor přístroje APx525 na rozmítání ve frekvenčním rozsahu 20Hz – 20kHz s amplitudou výstupního signálu 60mV.

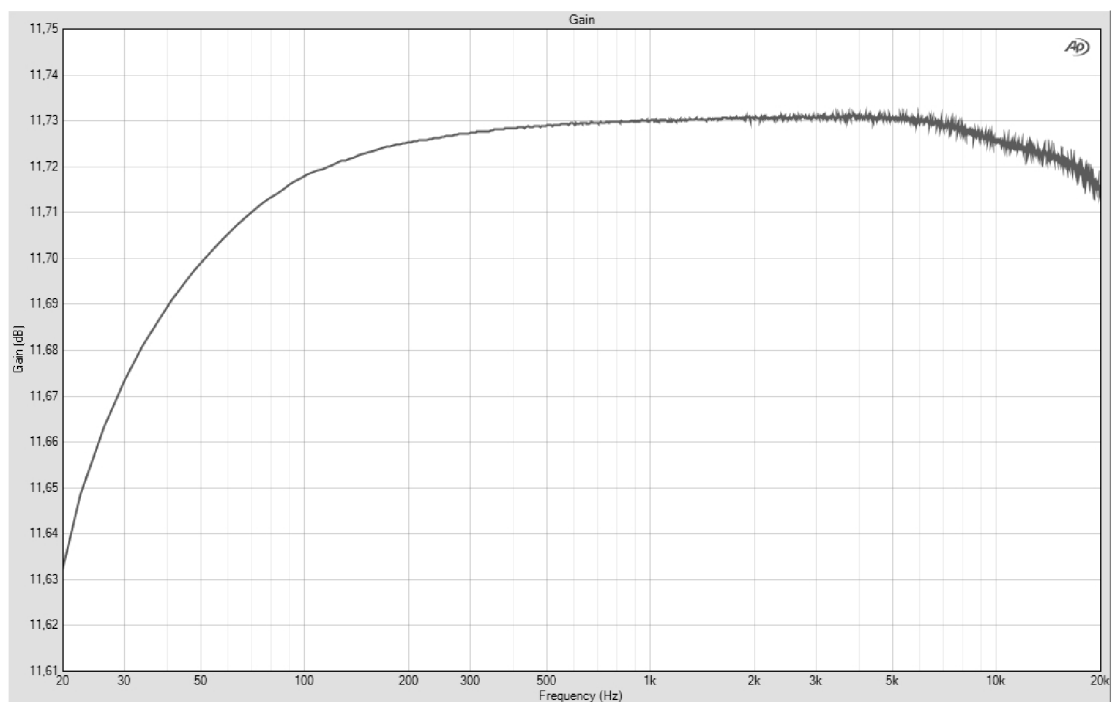
Měření odstupů signálu od šumu proběhlo ve frekvenčním rozsahu 20Hz – 20kHz, s amplitudou výstupního signálu generátoru 100mV.

Napájecí napětí bylo dodáno externím zdrojem o velikosti dle návrhu, tedy  $\pm 17V$ . Pro generování logické úrovně „1“ důležité pro aktivaci funkcí realizovaných pomocí integrovaných obvodů MAX333 byl použit druhý externí zdroj nastavený na napětí 2,4V.

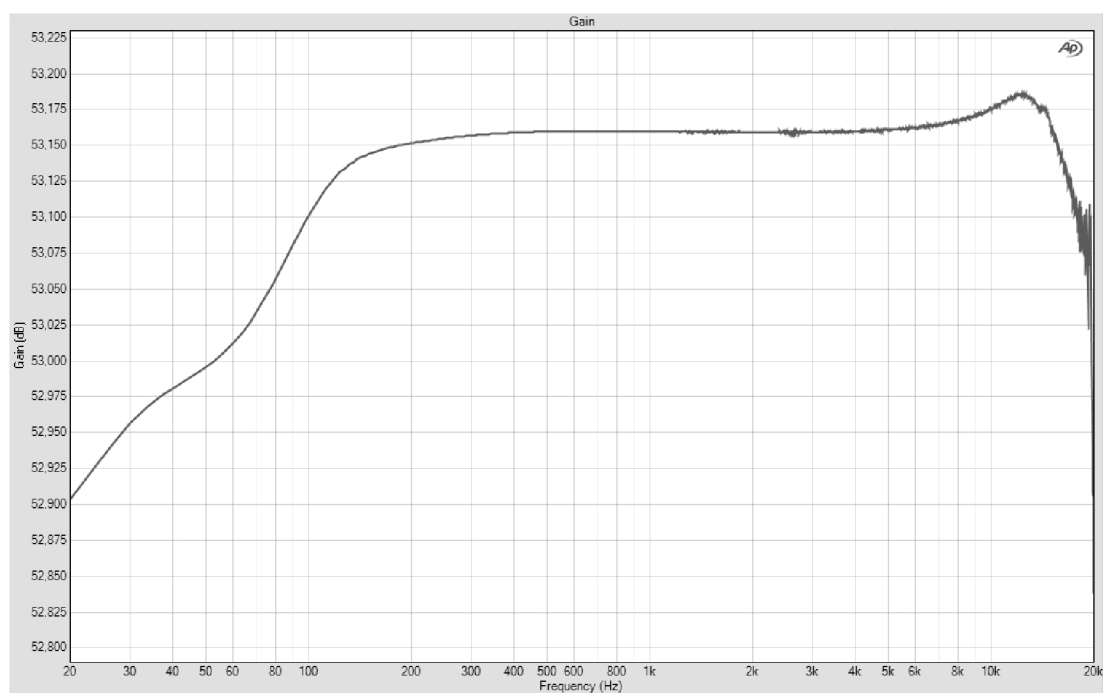
#### 6.1.1 Kmitočtová a fázová charakteristika

V této kapitole je uvedena kmitočtová charakteristika pro minimální zesílení vst. mikrofon/linkového zesilovače, konkrétně jeho kanálu č. 1 uvedená na Obr. 30, následuje kmitočtová charakteristika pro maximální zesílení, viz Obr. 31, při kterém se již projevovala limitace vlivem velikosti napájecího napětí. Pro ověření funkcí definovaných dle zadání bylo zesílení nastaveno na hodnotu cca 35 dB. Při tomto zesílení byly získány kmitočtová (viz Obr. 32) a fázová (viz Obr. 36) charakteristika jako výchozí charakteristiky pro porovnání, zda aktivace realizovaných funkcí proběhla dle očekávání. Kmitočtové charakteristiky získané při zapnutém útlumovém článku jsou uvedeny na Obr. 33, při aktivované funkci MUTE na Obr. 34, při zapnutém filtru horní propusti pro mezní kmitočet cca 35Hz na Obr. 35. Fázová charakteristika získaná po obrácení fáze vstupního signálu je uvedena na Obr. 37.

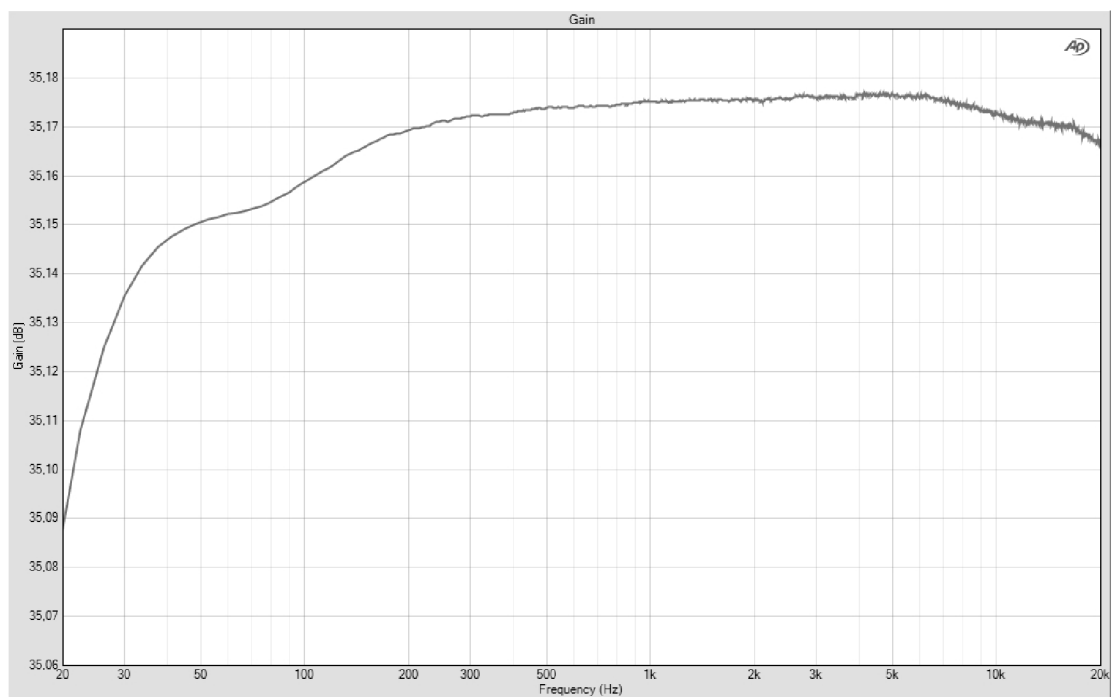
Dále je pro zajímavost uvedena kmitočtová a fázová charakteristika při připojení nesymetrické zátěže opět při zesílení cca 35 dB a to na Obr. 38 a na Obr. 39.



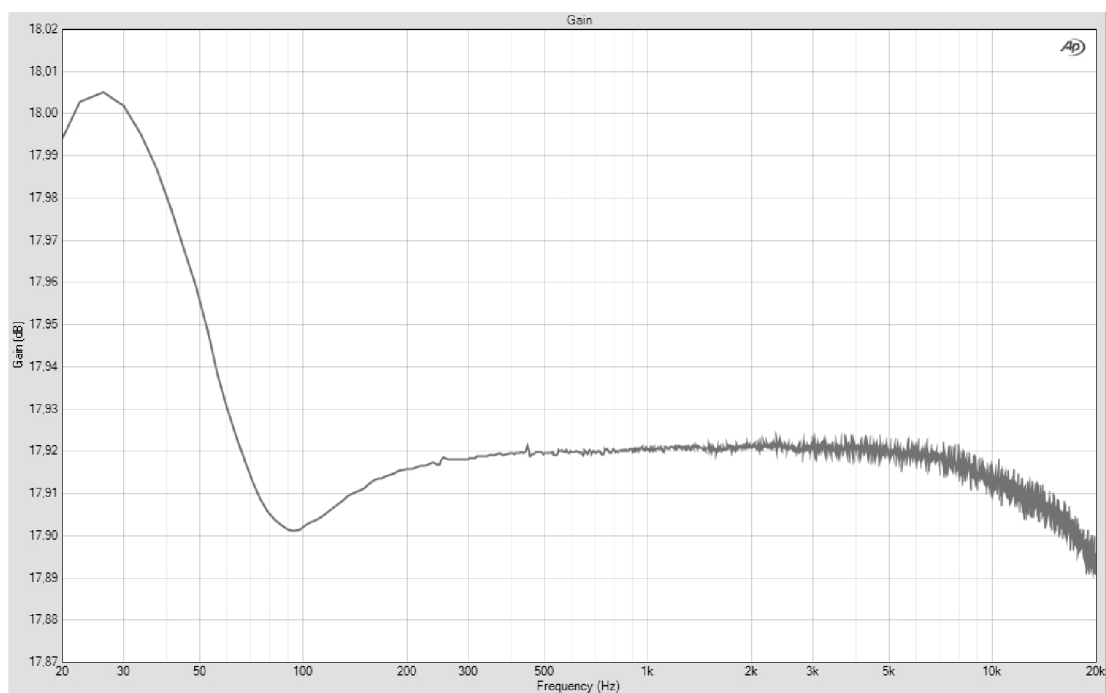
**Obr. 30: Kmitočtová charakteristika kanálu č. 1 pro minimální zesílení**



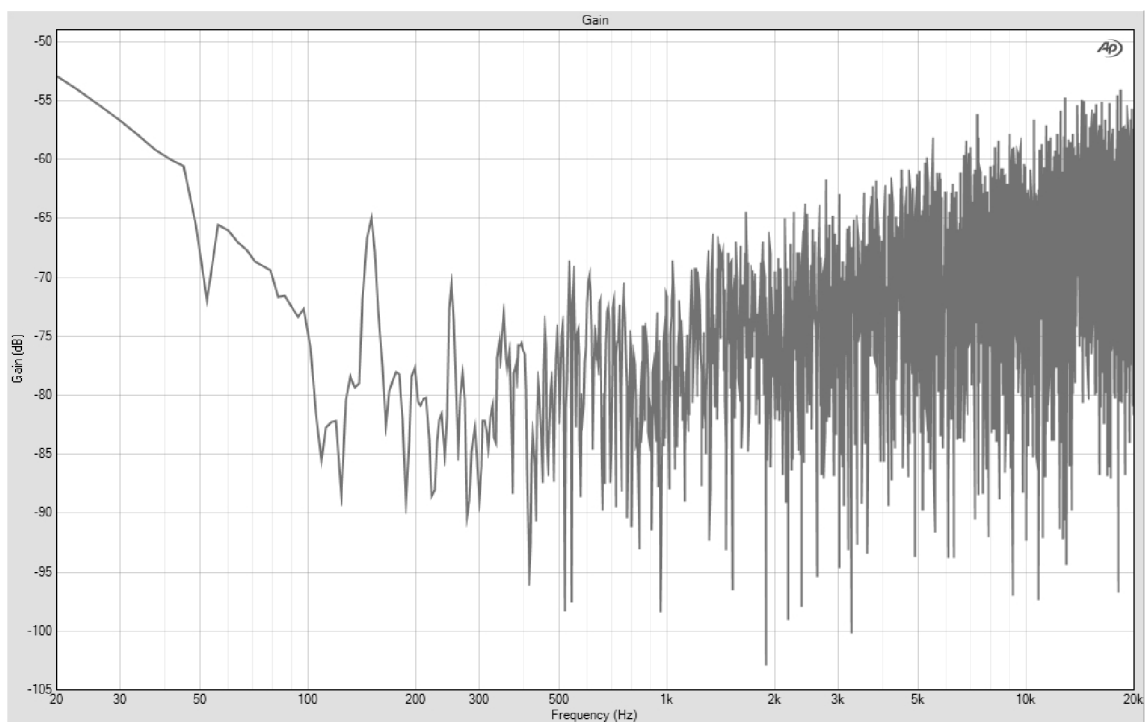
**Obr. 31: Kmitočtová charakteristika kanálu č. 1 pro maximální zesílení**



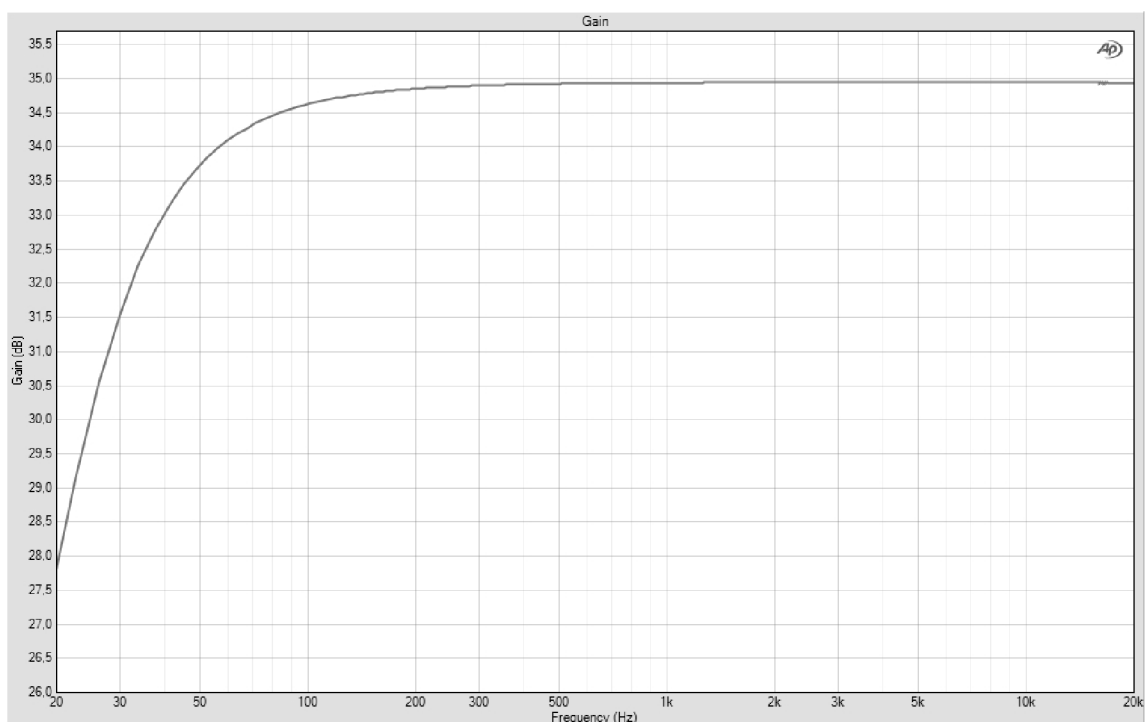
**Obr. 32: Kmitočtová charakteristika kanálu č. 1 při zesílení 35 dB**



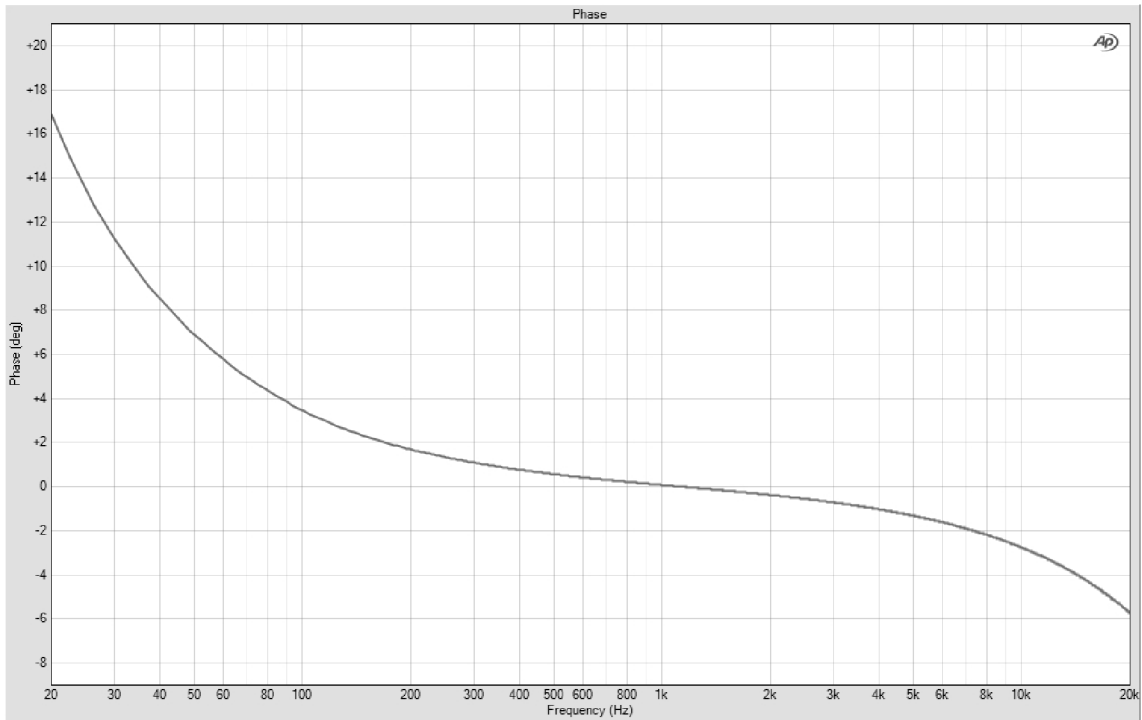
**Obr. 33: Kmitočtová charakteristika kanálu č. 1 při zesílení 35 dB a aktivním útlumovém článku**



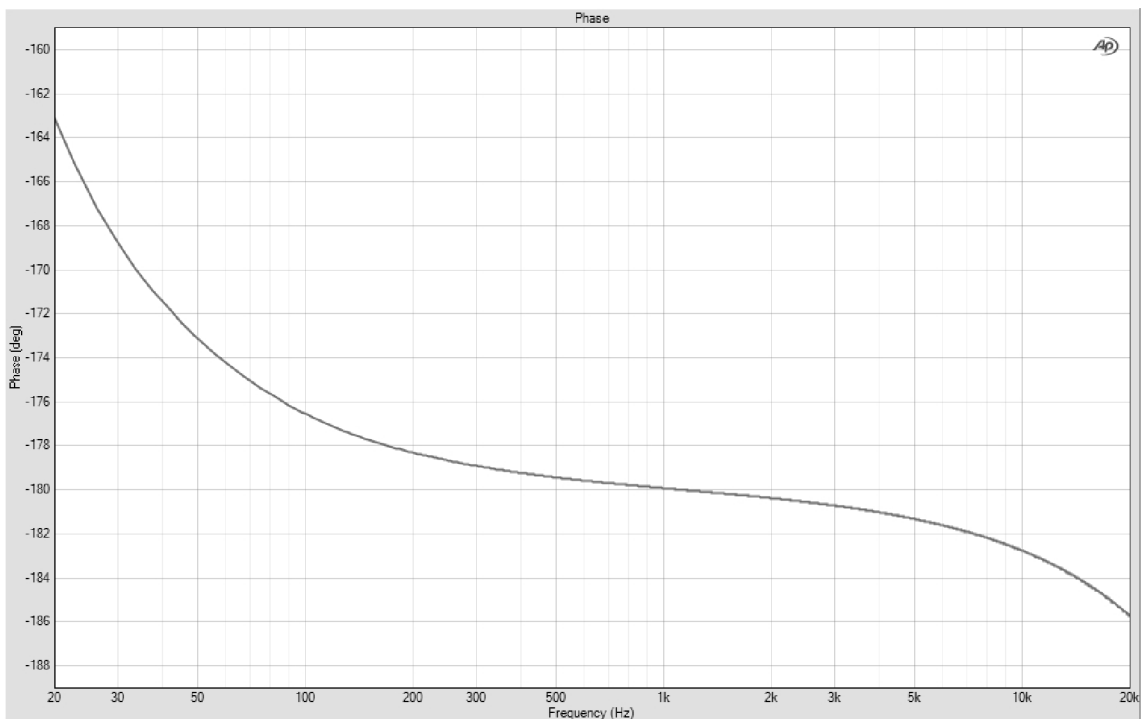
**Obr. 34: Kmitočtová charakteristika kanálu č. 1 při zesílení 35 dB a aktivní funkci MUTE**



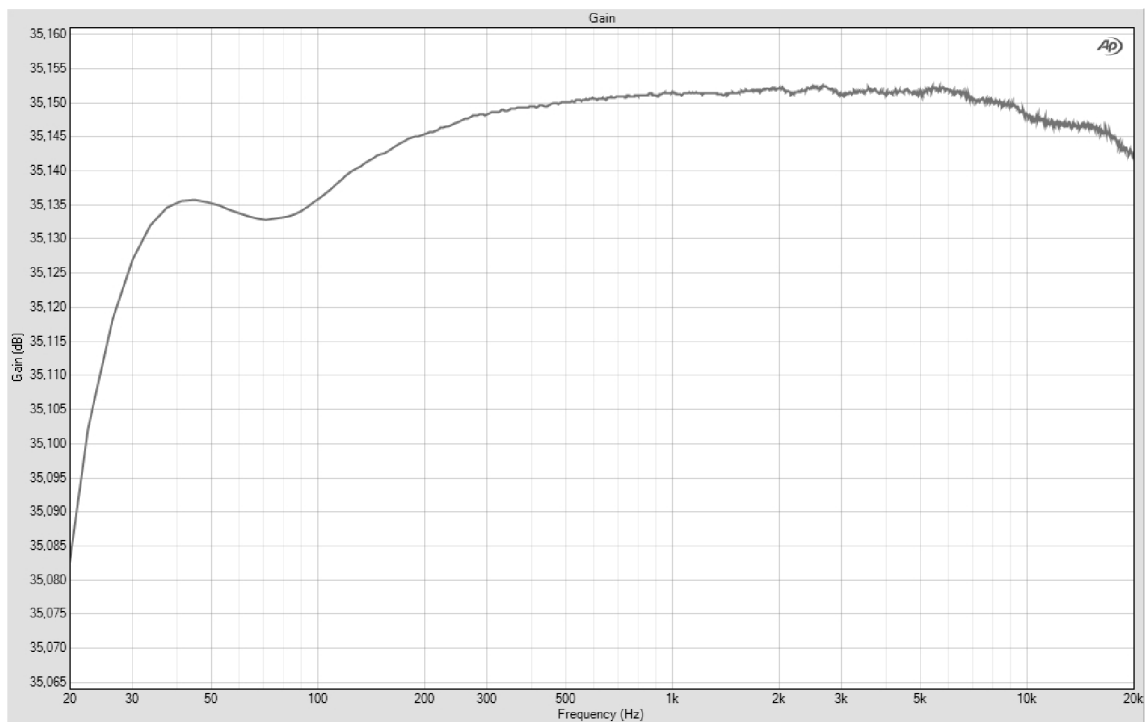
**Obr. 35: Kmitočtová charakteristika kanálu č. 1 při zesílení 35 dB a aktivní HPF**



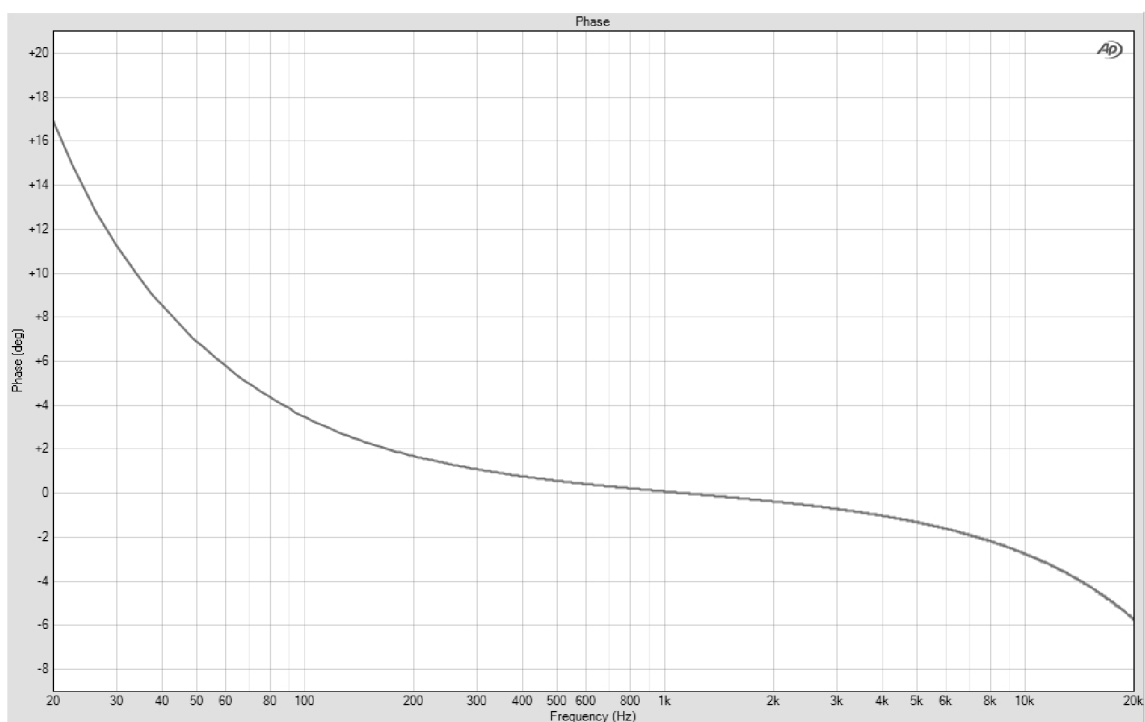
**Obr. 36: Fázová charakteristika kanálu č. 1 při zesílení 35 dB před obrácením fáze vstupního signálu**



**Obr. 37: Fázová charakteristika kanálu č. 1 při zesílení 35 dB po obrácení fáze vstupního signálu**

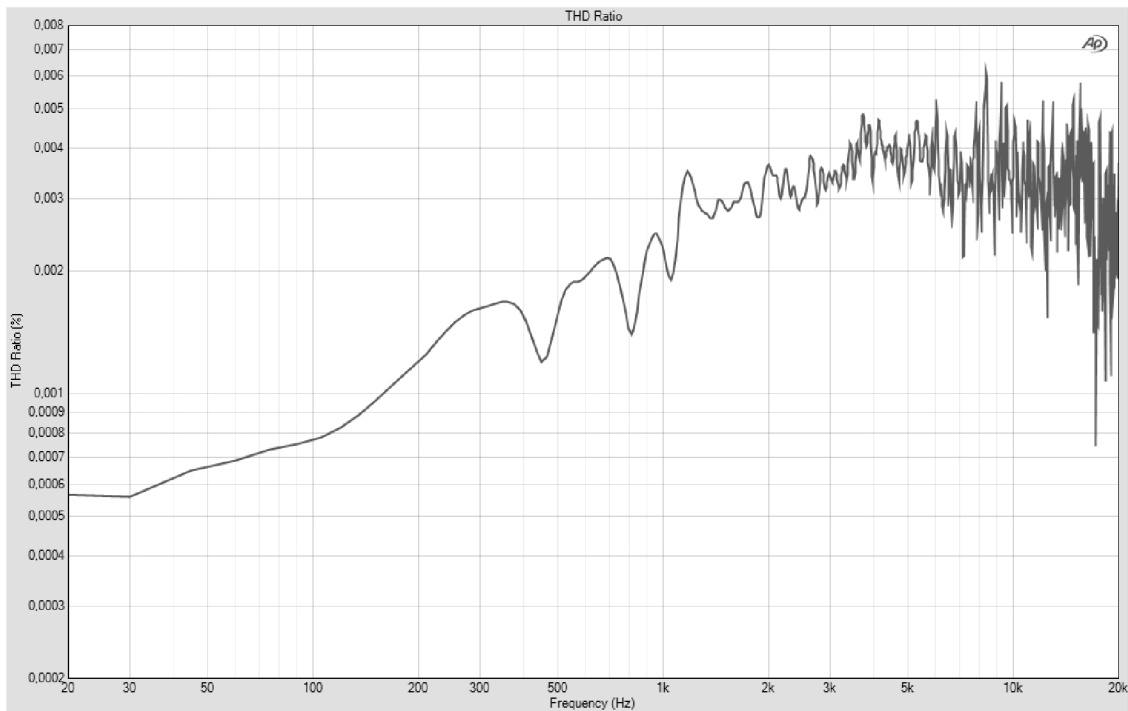


**Obr. 38: Kmitočtová charakteristika kanálu č. 1 při zesílení 35 dB při nesymetrické zátěži**

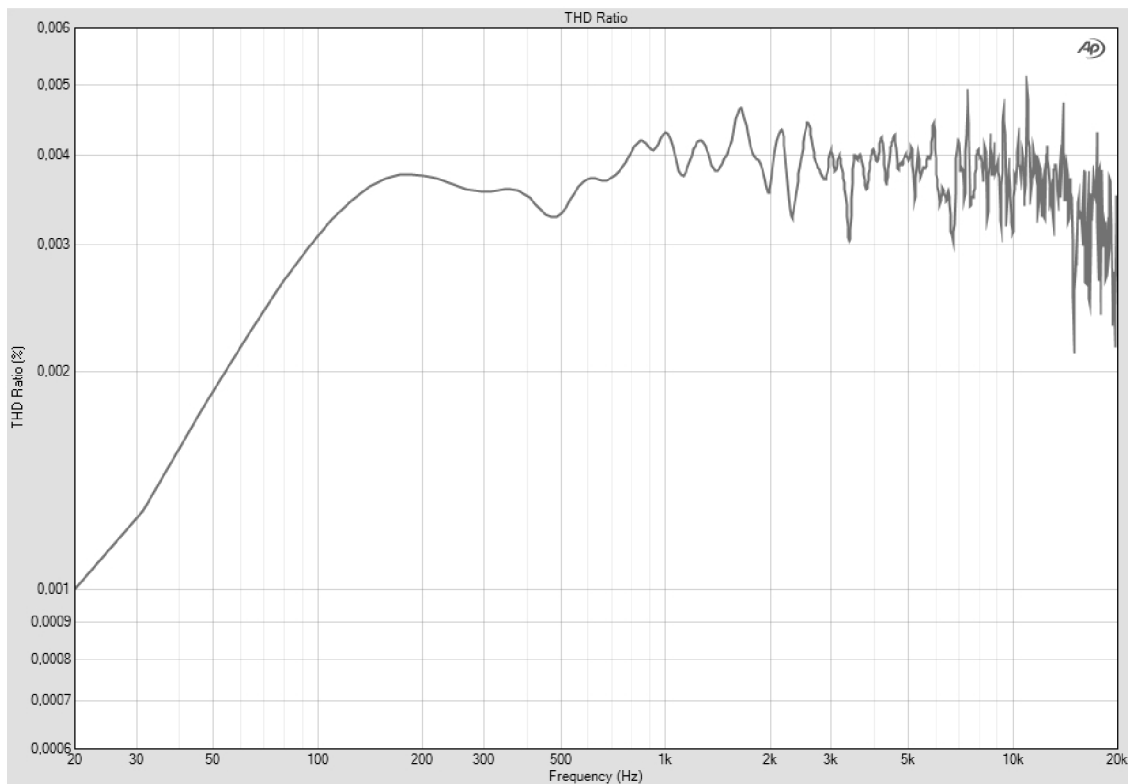


**Obr. 39: Fázová charakteristika kanálu č. 1 při zesílení 35 dB při nesymetrické zátěži**

## 6.1.2 Harmonického zkreslení THD + N

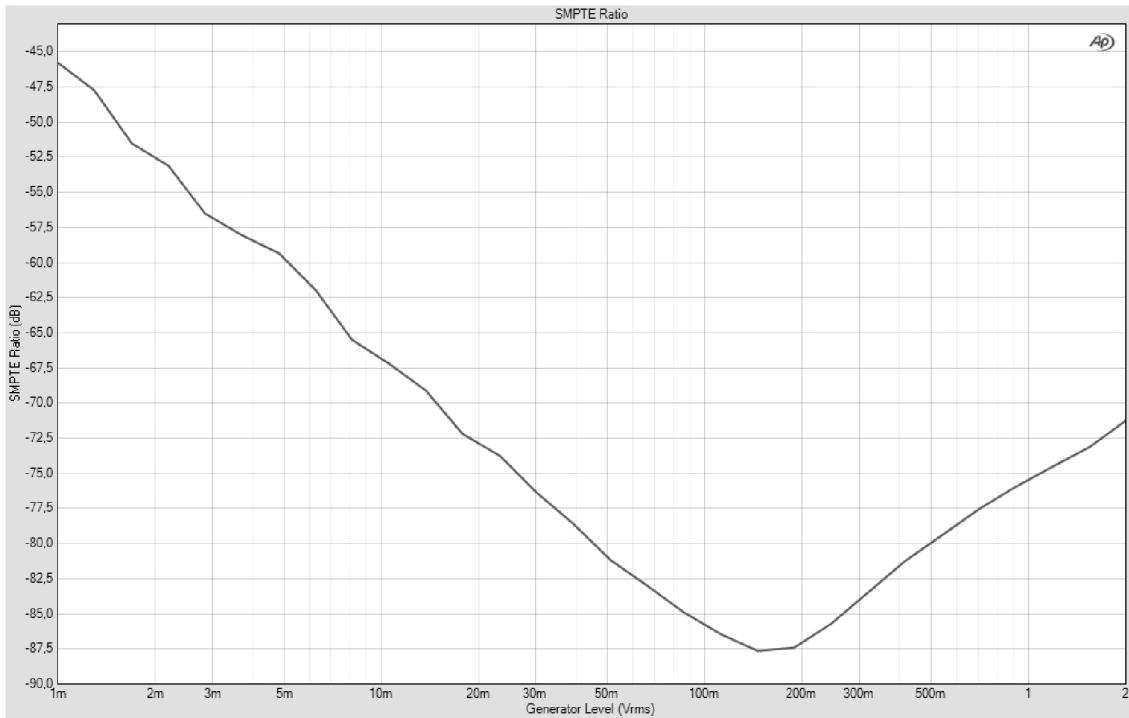


Obr. 40: Průběh harmonického zkreslení THD + N kanálu č. 1 při minimálním zesílení

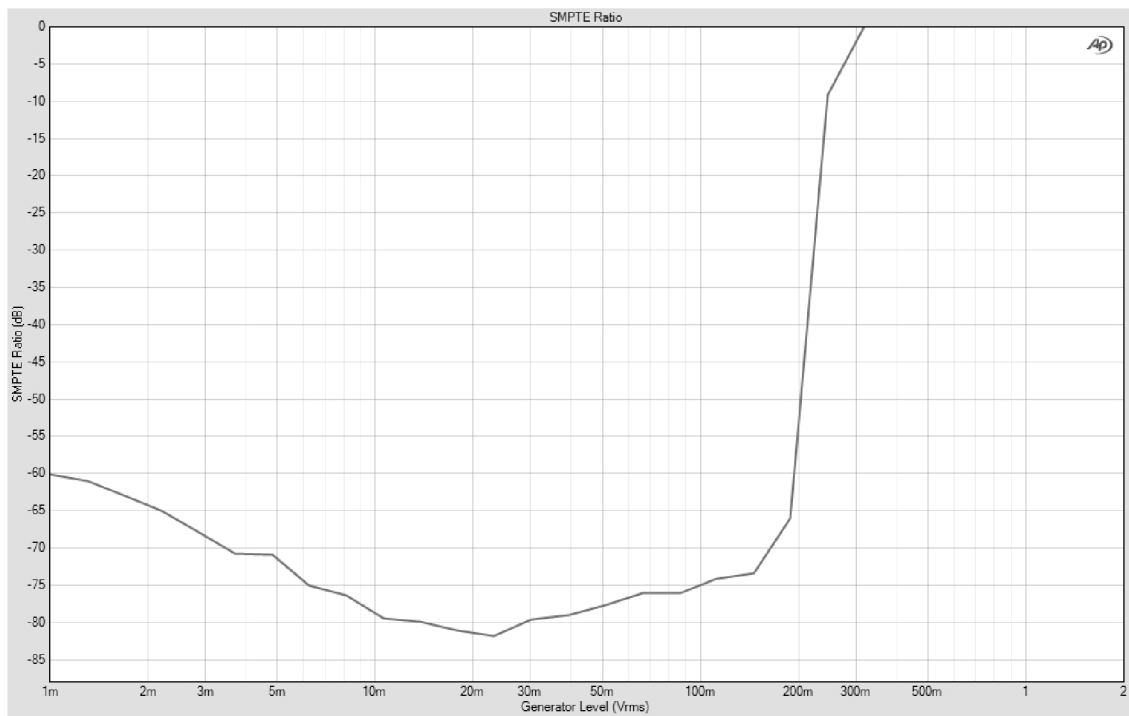


Obr. 41: Průběh harmonického zkreslení THD + N kanálu č. 1 při zesílení 35 dB

### 6.1.3 Intermodulační zkreslení IMD



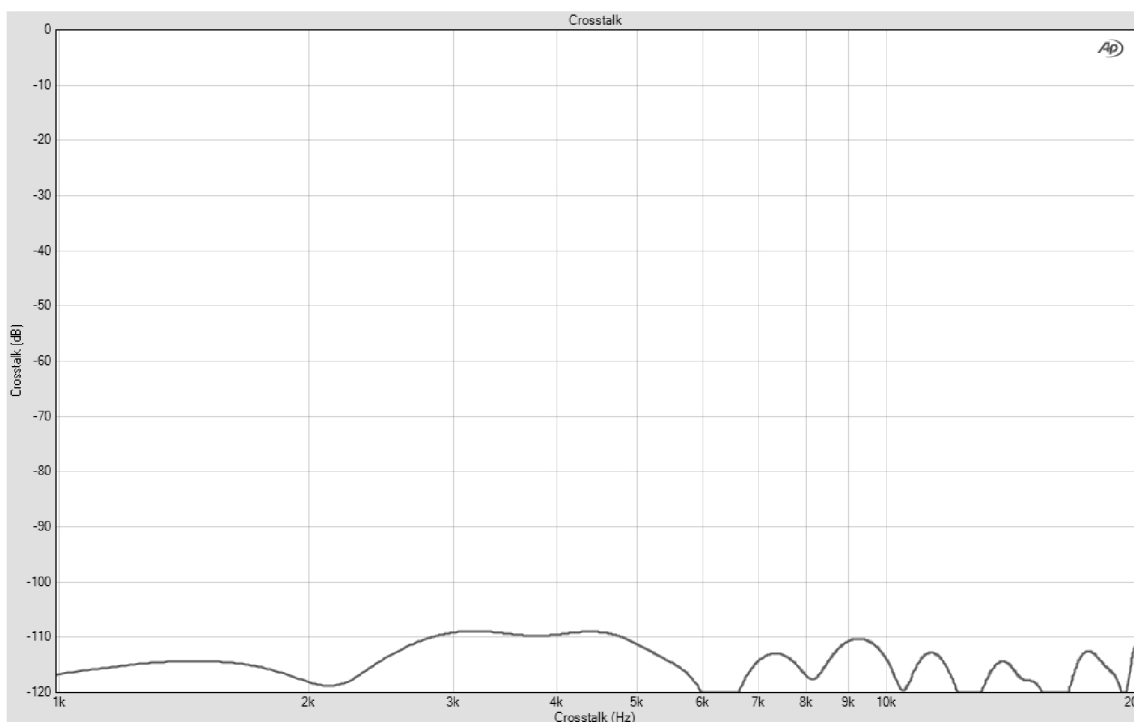
Obr. 42: Průběh intermodulačního zkreslení kanálu č.1 při minimálním zesílení



Obr. 43: Průběh intermodulačního zkreslení kanálu č. 1 při zesílení 35 dB



## 6.1.4 Přeslech mezi kanály č. 1 a č. 2



Obr. 44: Průběh měření přeslechů mezi kanály vst mikrofon/linkového zesilovače

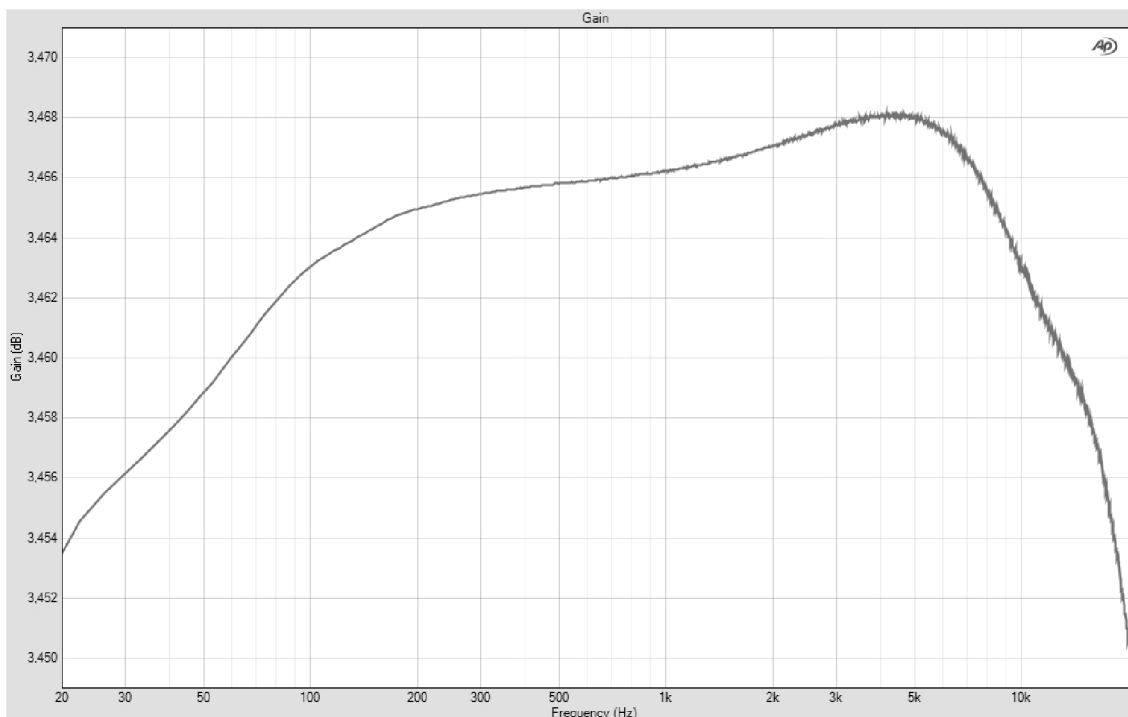
## 6.2 Měření výstupního linkového zesilovače

Pro měření kmitočtové a fázové charakteristiky, měření IMD a THD + N byl nastaven generátor přístroje APx525 na rozmítání ve frekvenčním rozsahu 20Hz – 20kHz s amplitudou výstupního signálu 0dBu.

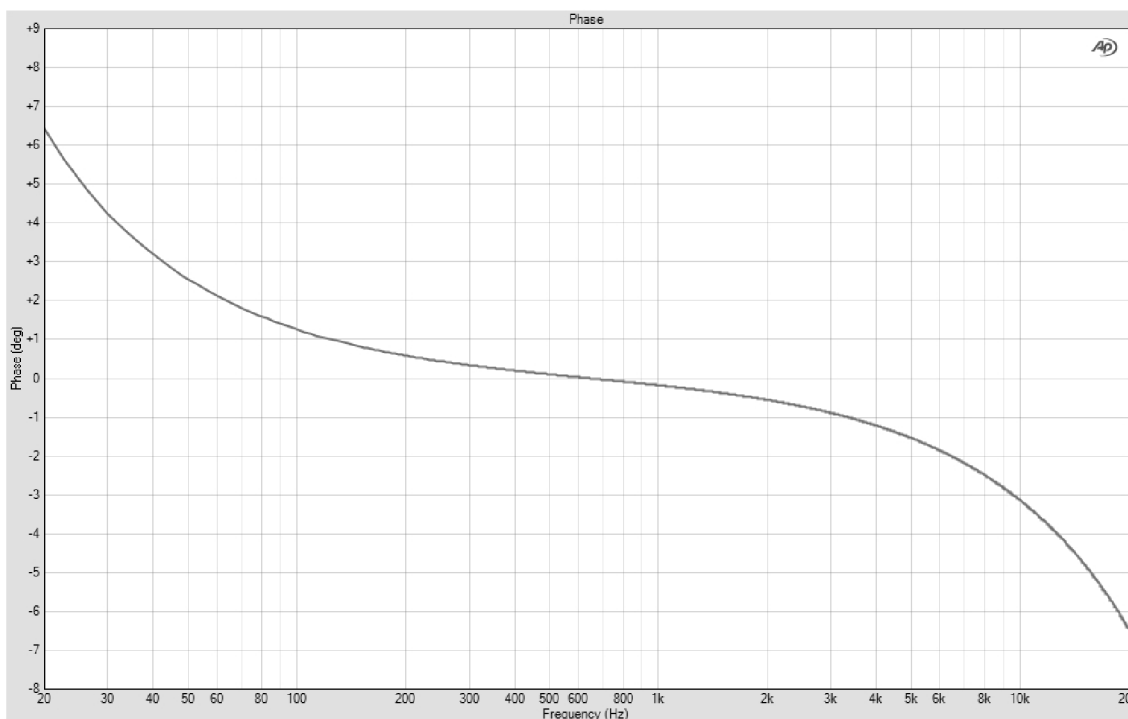
Měření odstupu signálu od šumu proběhlo opět ve frekvenčním rozsahu 20Hz – 20kHz, s amplitudou výstupního signálu generátoru 100mV.

Napájecí napětí bylo dodáno stejným externím zdrojem s nastaveným napětím o velikosti dle návrhu, tedy  $\pm 17V$ .

## 6.2.1 Kmitočtová a fázová charakteristika

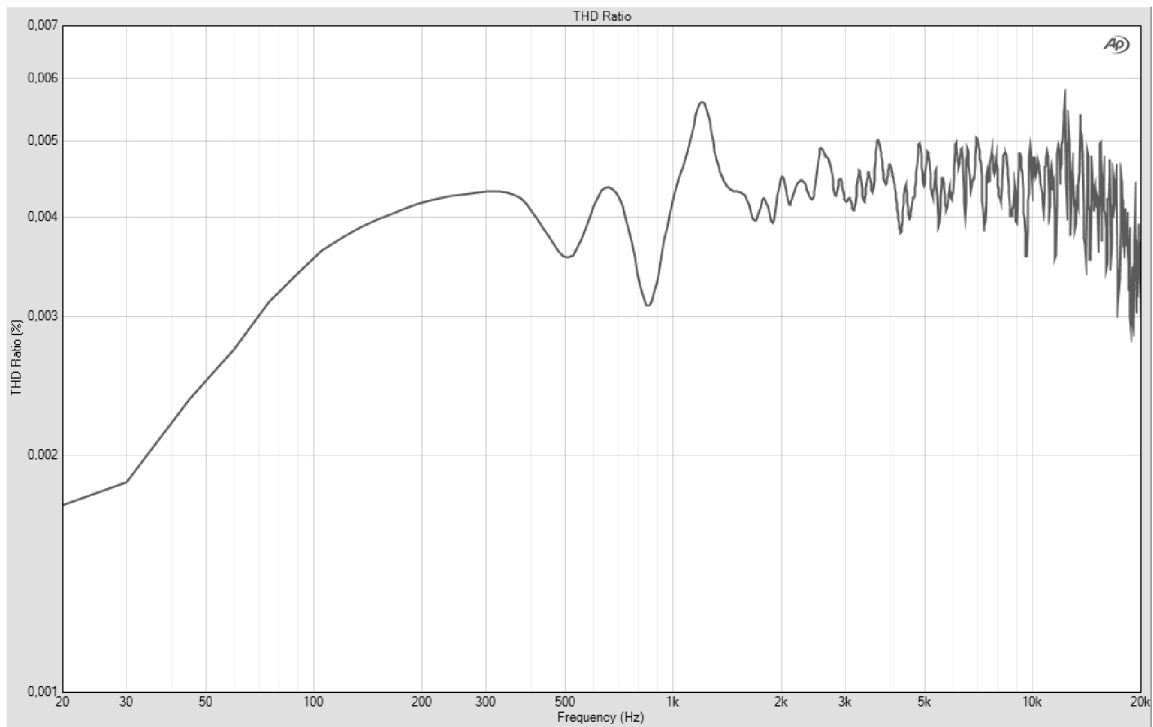


Obr. 45: Kmitočtová charakteristika výstupního linkového zesilovače



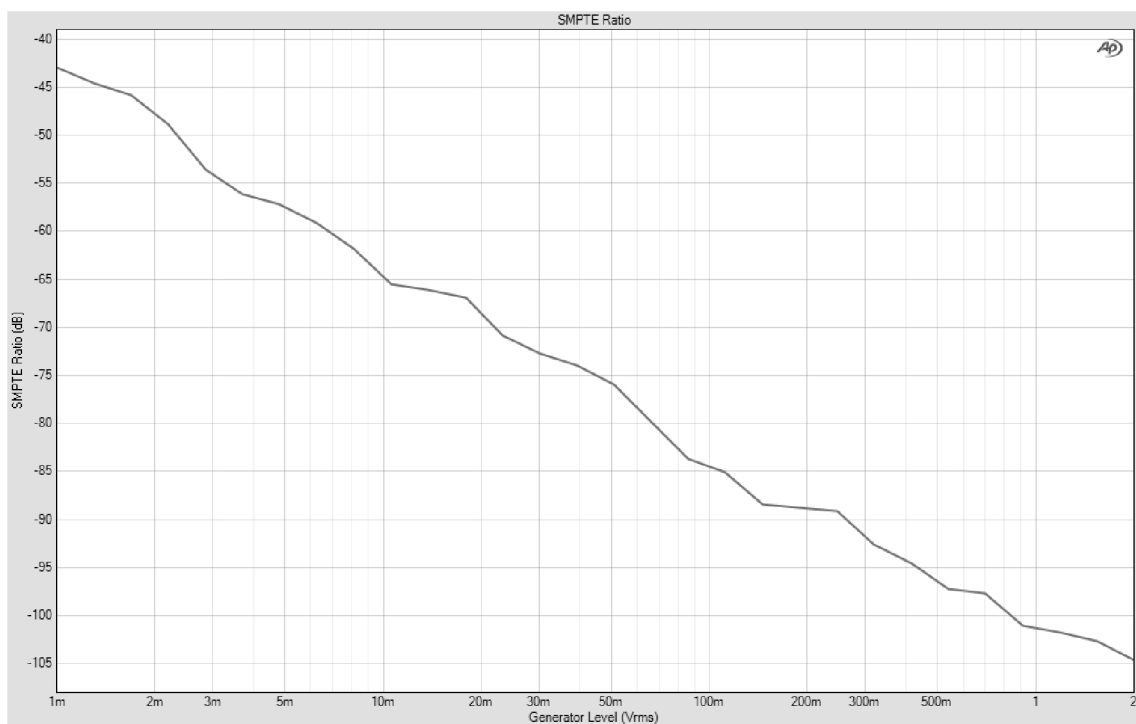
Obr. 46: Fázová charakteristika výstupního linkového zesilovače

## 6.2.1 Harmonického zkreslení THD + N



Obr. 47: Průběh intermodulačního zkreslení výstupního linkového zesilovače

## 6.2.1 Intermodulační zkreslení IMD



Obr. 48: Průběh intermodulačního zkreslení výstupního linkového zesilovače

# ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce byl návrh vstupních a výstupních obvodů A/D a D/A převodníku pro zpracování nízkofrekvenčního signálu. Jedná se tedy v podstatě o nf zesilovače pracující se signálem v kmitočtovém rozsahu 20Hz – 20kHz.

V první části je nastíněna všeobecná teorie související s požadavky na zpracování signálu těmito zesilovači. Jsou zde zdůrazněny převážně ty parametry, které nejvýrazněji ovlivňují zpracovávaný vstupní signál. Dále je v této části proveden rozbor zadání z hlediska těchto parametrů. Je zde navrženo blokové schéma vstupního obvodu (v textu jako vstupní mikrofon/linkový zesilovač) a výstupního obvodu (v textu jako výstupní linkový zesilovač), které je rozděleno do logických bloků z hlediska těchto požadavků a požadavků na funkce definované zadáním. Mezi hlavní kvalitativní požadavky patří co největší odstup užitečného signálu od šumu, definovaný pokles zesílení 1dB na kmitočtovém rozsahu uvedeném v předchozím odstavci.

V druhé části je proveden rozbor problematiky související se správným výběrem součástkové základny, kterou by měl být vstupní a výstupní obvod realizován. Na základě této části byly vybrány integrované obvody SSM2019 od firmy Analog Devices a NJM4580 od firmy New Japan Radio Co.,Ltd.

Třetí část se týká návrhu vlastního řešení pomocí těchto obvodů. Jsou zde detailně popsány jednotlivé logické bloky. U vstupního obvodu to jsou: blok předzesilovače, blok filtru horní propusti a blok výstupního zesilovače. Vstupní obvod je navržen pro zpracování signálu o mikrofonní úrovni, tedy -60dBu až -20dBu a signálu o linkové úrovni -20dBu až +10dBu. Použitelné maximální zesílení vstupního obvodu je kolem 50dB, které je plně regulovatelné. Zesilovač poskytuje sice zisk až 66dB, ale nad tuto hodnotu se projevilo dle simulací omezení výstupního signálu vlivem velikosti napájecího napětí. Pro silnější signály je zde zařazen útlumový článek -20dB. Pro potlačení „brumu“ se zde nachází nastavitelný filtr horní propusti s rozsahem od 20 do 200Hz. Výstup pro připojení k A/D převodníku je symetrický, ale umožňuje připojení díky zpětné servo – symetrické vazbě i připojení nesymetrické. Logické bloky výstupního obvodu jsou: vstupní blok a blok výstupního zesilovače. Připojení k D/A převodníku je realizováno symetricky s maximální vstupní úrovní 24dBu. Vstupním blokem je definována výstupní úroveň o hodnotě +4dBu. Jak vstupní tak i výstupní obvod mají definováno napájecí napětí o velikosti  $\pm 17V$ .

Ve čtvrté kapitole jsou uvedeny softwarové simulace vstupního a výstupního obvodu. Z grafu vybrané kmitočtové charakteristiky pro zisk cca 35dB vychází pokles zesílení u vstupního zesilovače pro kmitočtový rozsah 20Hz - 20kHz cca 0,15dB. U výstupního obvodu byl určen z kmitočtové charakteristiky pro stejný kmitočtový rozsah a při definované nominální úrovni na výstupu pokles zesílení menší než 0,01dB. Dále zde byly provedeny simulace funkcí realizovaných pomocí čtveřice obvodů MAX333.

V následující kapitole byl proveden návrh DPS pro vstupní a výstupní obvod pomocí programu.

V poslední kapitole jsou uvedeny výsledky měření na funkčních prototypch vstupního mikrofon/linkového zesilovače a výstupního linkového zesilovače. Měření bylo uskutečněno pomocí přístroje APx525. Měření probíhalo ve frekvenčním rozsahu 20Hz – 20kHz, při nastavené amplitudě výstupního signálu generátoru APx525 60mV pro vstupní mikrofon/linkový zesilovač a 0dBu pro výstupní linkový zesilovač.

U vstupního mikrofon/linkového zesilovače byl měřen pouze jeden kanál a to kanál č. 1, jelikož výsledky měření byly identické s mírnými odchylkami, které byly v rámci tolerance. Bez aktivovaných funkcí byl odečten z kmitočtové modulové charakteristiky tohoto zesilovače pokles zesílení 0,1dB pro minimální zisk a 0,09dB pro zisk kolem cca 35dB. Velikost intermodulačního zkreslení byla změřena 0,0058%@1kHz. Hodnota odstupu

užitečného signálu od šumu byla změřena přístrojem APx525 cca  $-98\text{dB}\% @ 1\text{kHz}$ . Přeslech mezi kanálem č. 1 a kanálem č. 2 vstupního mikrofon/linkového zesilovače byl odečtem určen cca  $-100\text{dB}$  pro minimální zesílení a  $-110\text{dB}$  pro zesílení  $35\text{dB}$ . Z průběhu intermodulačního zkreslení IMD je patrné s jakými vstupními napěťovými úrovněmi by měl daný zesilovač pracovat. Pro zajímavost byly proměřeny některé parametry tohoto zesilovače při připojení nesymetrické zátěže. Výsledky získané při tomto měření jsou téměř totožné s výsledky měření při symetrické zátěži. Dále byly otestovány funkce realizované integrovanými obvody MAX333, jako: aktivace útlumového článku  $20\text{dB}$ , obrácení fáze vstupního signálu, aktivace MUTE a funkčnost filtru horní propusti. Ověření všech funkcí proběhlo dle očekávání, což je zřejmé z grafů uvedených v kapitole 6.1.

U výstupního linkového zesilovače byl odečten z kmitočtové modulové charakteristiky tohoto zesilovače pokles zesílení  $0,01\text{dB}$ . Velikost intermodulačního zkreslení byla změřena  $0,0063\% @ 1\text{kHz}$ . Hodnota odstupu užitečného signálu od šumu byla změřena přístrojem APx525 cca  $-84\text{dB}\% @ 1\text{kHz}$ . Z průběhu intermodulačního zkreslení IMD je patrné s jakými napěťovými úrovněmi by měl daný zesilovač pracovat.

Porovnáním výsledků získaných měření na funkčních vzorcích mikrofon/linkového zesilovače a vstupního linkového zesilovače lze říci, že jak vstupní mikrofon/linkový zesilovač tak i výstupní linkový zesilovač se chovají dle předpokladu. Vyskytly se zde však rozdíly v hodnotách zisků, u mikrofon/linkového zesilovače při nastavení minimálního zesílení cca  $4\text{dB}$  (mezi simulací a reálným měřením). A u výstupního linkového zesilovače byla naměřena výstupní úroveň o cca  $0,4\text{dB}$  menší než hodnota odsimulovaná. Tyto rozdíly jsou s největší pravděpodobností způsobeny tolerancí pasivní součástkové základny.

Bylo by vhodné navržené schéma pro oba obvody zrealizovat na kontaktním nepájivém poli a ověřit reálnou funkčnost a správnost volby hodnot součástek včetně jejich tolerance. V případě zjištěného problému by měla následovat výměna součástek s nejvyšší tolerancí a poté teprve osazení DPS. Potom bychom se snad přiblížili více výsledkům získaných ze simulací s těmito obvody.

## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] WIRSUN, Siegfried. *Abeceda nf techniky*. Praha : BEN - technická literatura, 2003. 192 s. ISBN 80-86056-26-0.
- [2] Kotisa, Z., NF zesilovače a jejich amatérská stavba - 1. díl předzesilovače. BEN - technická literatura, Praha 2001. ISBN 80-7300-030-X.
- [3] ZUMBAHLEN, Hank. *Linear Circuit Design Handbook : Hank Zumbahlen with the engineering staff of Analog Devices*. Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP, UK : Elsevier Inc., 2008. 954 s. ISBN 978-0-7506-8703-4.
- [4] PUNČOCHÁŘ, Josef. *Operační zesilovače v elketrotechnice*. 5. vydání. Praha : BEN - technická literatura, 2002. 496 s. ISBN 80-7300-059-8.
- [5] HEJNY, Josef. *VSTUPNÍ NÍZKOFREKVENČNÍ KOREKČNÍ ZESILOVAČ*. Brno, 199?. 57 s. Diplomová práce. VUT UREL.
- [6] PANENKA, Pavel J. O zkreslení. *Praktická elektronika A Radio*. 2006, 11, 12, s. 25-27. ISSN 1211-328X.
- [7] PANENKA, Pavel J. O zkreslení 2. *Praktická elektronika A Radio*. 2007, 12, 9, s. 25-27. ISSN 1211-328X.
- [8] BAKER, Bonnie. *Real Analog Solutions for Digital Designers*. Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP, UK : Elsevier Inc., 2005. 362 s. ISBN 0-7506-7819-4.
- [9] *PCM4202 : High-Performance 24-Bit, 216kHz Sampling Stereo Audio Analog-to-Digital Converter*: Texas Instruments Incorporated, 2003-2004. 28 s. Dostupné z WWW: <www.ti.com>.
- [10] *PCMI796 : 24-Bit 192-kHz Sampling Advanced-Segment Audio Stereo DAC (Rev. A)*. [s.l.] : Texas Instruments Incorporated, 2003-2006. 60 s. Dostupné z WWW: <www.ti.com>.
- [11] *Self-Contained Audio Preamplifier : SSM2019*. One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A. : Analog Devices, Inc., 2003. 8 s. Dostupné z WWW: <www.analog.com>.
- [12] *High Common-Mode Rejection Differential Line Receiver : SSM2141*. One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A. : Analog Devices, Inc., 200?. 6 s. Dostupné z WWW: <www.analog.com>.
- [13] *Balanced Line Driver : SSM2142*. One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A. : Analog Devices, Inc., 200?. 6 s. Dostupné z WWW: <www.analog.com>.
- [14] *Dual Bipolar/JFET, Audio Operational Amplifier : OP275\**. One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A. : Analog Devices, Inc., 2004. 12 s. Dostupné z WWW: <www.analog.com>.

- [15] *Low-Noise, High Performance Audio Preamplifier IC : THAT 1510, 1512*. 45 Sumner Street; Milford, MA 01757-1656; USA : THAT Corporation, 2009. 8 s. Dostupné z WWW: <[www.thatcorp.com](http://www.thatcorp.com)>.
- [16] *InGenius High-CMRR Balanced Input Line Receiver ICs : THAT 1200, 1203, 1206*. 45 Sumner Street; Milford, MA 01757-1656; USA : THAT Corporation, 200?. 12 s. Dostupné z WWW: <[www.thatcorp.com](http://www.thatcorp.com)>.
- [17] *OutSmarts Balanced Line Driver ICs : THAT 1606, 1646*. 45 Sumner Street; Milford, MA 01757-1656; USA : THAT Corporation, 2007. 12 s. Dostupné z WWW: <[www.thatcorp.com](http://www.thatcorp.com)>.
- [18] *INA217: Low-Noise, Low-Distortion INSTRUMENTATION AMPLIFIER : Replacement for SSM2017*: Texas Instruments Inc., 2002-2005. 14 s. Dostupné z WWW: <[www.ti.com](http://www.ti.com)>.
- [19] *INA137, INA2137 : AUDIO DIFFERENTIAL LINE RECEIVERS  $\pm 6\text{dB}$  ( $G = 1/2$  or  $2$ )*: Burr-Brown Corporation, 1997. 14 s. Dostupné z WWW: <[www.ti.com](http://www.ti.com)>.
- [20] *DRV134, DRV135 : AUDIO BALANCED LINE DRIVERS.*: Burr-Brown Corporation, 1998. 20 s. Dostupné z WWW: <[www.ti.com](http://www.ti.com)>.
- [21] *NJM4580 : DUAL OPERATIONAL AMPLIFIER*: New Japan Radio Co.,Ltd., 2003. 4 s. Dostupné z WWW: <[www.njr.co.jp/english/](http://www.njr.co.jp/english/)>.
- [22] *NE/SA/SE5532/5532A : Internally-compensated dual low noise operational amplifier*: Philips Semiconductorstd., 2001. 13 s. Dostupné z WWW: <[www.semiconductors.philips.com](http://www.semiconductors.philips.com)>.
- [23] *MAX333 : Quad, SPDT, CMOS Analog Switch* : Maxim Integrated Products, Inc., 1999. 8 s. Dostupné z WWW: <<http://www.maxim-ic.com/datasheet/index.mvp/id/1316>>.
- [24] KRAUS, Alan. Profesionální mixážní pult MXC. *Stavebnice a konstrukce A Radio*. 2001, 5, 5, s. 2-20. ISSN 1212-1843.
- [25] High End mikrofonní předzesilovač. *Amatérské radio*. 2001, 9, s. 2-9. ISSN 0322-9572.
- [26] Přeladitelná horní propust 20 a 200 Hz. *Amatérské radio*. 2003, 22, 2, s. 29-30. ISSN 0322-9572.
- [27] *OKAWA Electric Design* [online]. 2008 [cit. 2011-06-01]. Sallen-Key High-pass Filter Design Tool. Dostupné z WWW: <<http://sim.okawa-denshi.jp/en/Fkeisan.htm>>.
- [28] HEBERT, Gary. Balanced Outputs. In TYLER, Les, et al. *Analog Secrets Your Mother Never Told You* [online]. New York : THAT Corporation, 2007 [cit. 2011-06-01]. Dostupné z WWW: <[http://www.thatcorp.com/datashts/Analog\\_Secrets\\_Your\\_Mother\\_Never\\_Told\\_You.pdf](http://www.thatcorp.com/datashts/Analog_Secrets_Your_Mother_Never_Told_You.pdf)>

## SEZNAM ZKRATEK

DPS	Deska Plošných Spojů
IMD	Intermodulation Distortion
NC	Normally Closed
NO	Normally Opened
SID	Slew Induced Distortion
SNR	Signal to Noise Ratio
SPDT	Single-Pole Double-throw
SR	Slew Rate
THD	Total Harmonic Distortion
THD+N	Total Harmonic Distortion Plus Noise



## **SEZNAM PŘÍLOH**

<b>Příloha A: Tabulky parametrů operačních zesilovačů</b>	<b>56</b>
<b>Příloha B: Schémata zapojení</b>	<b>58</b>
<b>Příloha C: Rozpis součástek</b>	<b>60</b>
<b>Příloha D: Fotografie DPS č. 1 a DPS č. 2</b>	<b>62</b>