



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

## PRECIZNÍ AUDIO PŘEDZESILOVAČ PRO KVALITNÍ POSLECH

PRECISE AUDIO AMPLIFIER FOR QUALITY LISTENING

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Lukáš Janošík

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.

BRNO 2018

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Elektronika a sdělovací technika**

Ústav radioelektroniky

**Student:** Lukáš Janošík

**ID:** 174318

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2017/18

## NÁZEV TÉMATU:

### Precizní audio předzesilovač pro kvalitní poslech

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

V teoretické části práce navrhnete blokovou a obvodovou strukturu precizního audio předzesilovače, který by integroval několik elektronicky přepínaných vstupů s různou citlivostí, nízkým šumem, vysokou separací kanálů, vysokou rychlostí přeběhu a vícepásmový ekvalizér. Při návrhu zohledněte možnost klasické tranzistorové struktury a nejmodernější součástkovou základnu se zaměřením na velmi kvalitní poslech.

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

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

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

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

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

**Termín zadání:** 5.2.2018

**Termín odevzdání:** 24.5.2018

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

**Konzultant:**

**prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.**  
*předseda oborové rady*

#### UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **ABSTRAKT**

Obsahem této bakalářské práce je návrh a konstrukce precizního audio předzesilovače určeného pro věrnou kvalitu hudebního přednesu. Typologie celkového návrhu klade důraz na velmi důležité přenosové vlastnosti, nízké zkreslení, velký odstup signálu od šumu, nízké přeslechy aj. Součástí je symetrický vstup, relátkový přepínač vstupů, 5 pásmový ekvalizér s možností překlenutí a symetrický výstup s aktivním budičem linek.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Předzesilovač, operační zesilovač, zesílení, šum, zkreslení, zpětná vazba, hudba

## **ABSTRACT**

This bachelor thesis deals with a design of quality audio preamplifier designed for high quality production. The typology of whole design emphasizes very important transmission properties, i.e. high signal-to-noise ratio, high separation of channel, low distortion, The content of the semestral thesis is an symetrical input, relay input switch, 5 band equalizer with bypass and symetrical output with active line driver.

## **KEYWORDS**

Preamplifier, operational amplifier, amplification, noise, distortion, feedback, music

JANOŠÍK Lukáš. *Precizní audio předzesilovač pro kvalitní poslech*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2018. 47 s, 28s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.

# PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci na téma Precizní audio předzesilovač pro kvalitní poslech jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

# PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu práce prof. Ing. Tomáši Kratochvílovi, Ph.D. za cenné rady, jak odborné, tak i k formální stránce práce. Děkuji také kolegům a kamarádům za případné podmínky a rady.

# OBSAH

<b>Seznam obrázků</b>	<b>viii</b>
<b>Seznam tabulek</b>	<b>x</b>
<b>Úvod</b>	<b>1</b>
<b>1 Vlastnosti a parametry</b>	<b>2</b>
1.1 Vlastnosti a parametry předzesilovačů .....	2
<b>2 Funkční části předzesilovače</b>	<b>5</b>
2.1 Blokové schéma předzesilovače .....	5
2.2 Modul přepínače vstupů.....	6
2.2.1 Teoretický a praktický obvodový návrh.....	6
2.2.2 Měření a zhodnocení parametrů a funkce .....	7
2.3 Modul regulace hlasitosti.....	7
2.3.1 Simulace přenosové frekvenční a fázové charakteristiky .....	7
2.3.2 Simulace odezvy na obdélníkový signál .....	9
2.3.3 Praktický obvodový návrh.....	11
2.3.4 Měření a zhodnocení parametrů a funkce .....	11
2.4 Symetrický vstupní modul .....	13
2.4.1 Simulace přenosové frekvenční a fázové charakteristiky .....	14
2.4.2 Simulace odezvy na obdélníkový signál .....	15
2.4.3 Praktický obvodový návrh.....	17
2.4.4 Měření a zhodnocení parametrů a funkce .....	17
2.5 Korekční modul .....	19
2.5.1 Sériový rezonanční obvod a pásmová propust .....	19
2.5.2 Výpočet hodnot součástí jednotlivých filtrů [6] .....	21
2.5.3 Popis návrhu a simulace přenosové frekvenční charakteristiky.....	22
2.5.4 Praktický obvodový návrh.....	25
2.5.5 Měření a zhodnocení parametrů a funkce .....	27
2.6 Výstupní modul.....	29
2.6.1 Popis návrhu a simulace přenosové frekvenční charakteristiky.....	29
2.6.2 Simulace odezvy na obdélníkový signál .....	31

2.6.3	Praktický obvodový návrh.....	32
2.6.4	Měření a zhodnocení parametrů a funkce .....	33
2.7	Řídící modul .....	35
2.7.1	Praktický obvodový návrh.....	35
2.8	Napájecí modul .....	36
2.8.1	Praktický obvodový návrh.....	36
2.8.2	Měření a zhodnocení parametrů a vlastností .....	36
<b>3</b>	<b>Návrh a realizace celkového zapojení předzesilovače a prototypu</b>	<b>38</b>
3.1	Celkové zapojení předzesilovače pro simulaci .....	38
3.2	Simulace a měření.....	40
3.2.1	Přenosová frekvenční charakteristika předzesilovače s přemostěnou kmit. korekcí.....	40
3.2.2	Měření a korekce vstupní citlivosti předzesilovače [2] .....	41
3.2.3	Měření celkového zkreslení a šumu THD+noise [2].....	42
3.2.4	Měření zkreslení 2. a 3. harmonickou složkou výstupního napětí [2]	42
3.2.5	Měření maximálního výstupního napětí.....	43
3.2.6	Měření přeslechu kanálů [2].....	43
3.2.7	Měření rychlosti přeběhu SR.....	43
3.2.8	Použité měřicí přístroje.....	44
3.3	Konstrukční realizace prototypu .....	44
3.3.1	Výběr vhodné instalační krabice .....	44
3.3.2	Výrobní proces prototypu.....	45
	<b>Závěr</b>	<b>47</b>
	<b>Literatura</b>	<b>48</b>
	<b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>	<b>49</b>
<b>A</b>	<b>Schémata zapojení</b>	<b>51</b>
A.1	Schéma zapojení modulu přepínače vstupů.....	51
A.2	Schéma zapojení modulu regulace hlasitosti .....	52
A.3	Schéma zapojení symetrického vstupního modulu.....	53
A.4	Schéma zapojení korekčního modulu .....	54
A.5	Schéma zapojení výstupního modulu .....	55
A.6	Schéma zapojení řídicího modulu.....	56
A.7	Schéma zapojení napájecího modulu.....	57

<b>B</b>	<b>desky plošných spojů</b>	<b>58</b>
B.1	DPS modulu přepínače vstupů – vrstva TOP .....	58
B.2	DPS modulu přepínače vstupů – vrstva BOTTOM .....	59
B.3	DPS modulu regulace hlasitosti – vrstva TOP.....	60
B.4	DPS modulu regulace hlasitosti – vrstva BOTTOM .....	60
B.5	DPS symetrického vstupního modulu – vrstva TOP .....	61
B.6	DPS symetrického vstupního modulu – vrstva BOTTOM.....	61
B.7	DPS korekčního modulu – vrstva TOP.....	62
B.8	DPS korekčního modulu – vrstva BOTTOM .....	63
B.9	DPS výstupního modulu – vrstva TOP.....	64
B.10	DPS výstupního modulu – vrstva BOTTOM .....	64
B.11	DPS řídicího modulu – vrstva TOP .....	64
B.12	DPS řídicího modulu – vrstva BOTTOM.....	65
B.13	DPS napájecího modulu – vrstva TOP .....	66
B.14	DPS napájecího modulu – vrstva BOTTOM.....	67
<b>C</b>	<b>Osazovací plány</b>	<b>68</b>
C.1	Osazovací plán modulu přepínače vstupů – strana TOP .....	68
C.2	Osazovací plán modulu regulace hlasitosti – strana TOP.....	69
C.3	Osazovací plán modulu regulace hlasitosti – strana BOTTOM .....	69
C.4	Osazovací plán symetrického vstupního modulu – strana TOP .....	70
C.5	Osazovací plán symetrického vstupního modulu – strana BOTTOM....	70
C.6	Osazovací plán korekčního modulu – strana TOP.....	71
C.7	Osazovací plán korekčního modulu – strana BOTTOM .....	72
C.8	Osazovací plán výstupního modulu – strana TOP.....	73
C.9	Osazovací plán výstupního modulu – strana BOTTOM .....	73
C.10	Osazovací plán řídicího modulu – strana TOP .....	73
C.11	Osazovací plán řídicího modulu – strana BOTTOM.....	74
C.12	Osazovací plán napájecího modulu – strana TOP .....	75
<b>D</b>	<b>Soupisky součástek</b>	<b>75</b>
<b>E</b>	<b>Vrtací plány panelů</b>	<b>76</b>
<b>F</b>	<b>Fotografie</b>	<b>76</b>
F.1	Fotografie modulu přepínače vstupů .....	76
F.2	Fotografie modulu regulace hlasitosti.....	76



F.3	Fotografie symetrického vstupního modulu .....	77
F.4	Fotografie korekčního modulu.....	77
F.5	Fotografie výstupního modulu.....	77
F.6	Fotografie řídicího modulu .....	78
F.7	Fotografie napájecího modulu .....	78
F.8	Fotografie měření prototypu .....	78

# SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 2.1 Blokové schéma zapojení předzesilovače .....	5
Obrázek 2.2 Schéma části přepínače vstupů – TAPE.....	7
Obrázek 2.3 Schéma části přepínače vstupů – TAPE.....	8
Obrázek 2.4 Frekvenční přenosová a fázová charakteristika zapojení hlavního zesílení.	9
Obrázek 2.5 Schéma zapojení hlavního zesílení pro simulaci odezvou na obdélníkový signál.....	9
Obrázek 2.6 Odezva na obdélníkový signál zapojení hlavního zesílení.....	10
Obrázek 2.7 Schéma zapojení části regulace hlasitosti – L. kanál .....	11
Obrázek 2.8 Graf závislosti souběhu odporových drah na nastaveném útlumu potenciometru .....	12
Obrázek 2.9 Změřená přenosová frekvenční charakteristika modulu regulace hlasitosti .....	12
Obrázek 2.10 Změřená nástupná hrana modulu regulace hlasitosti .....	13
Obrázek 2.11 Schéma zapojení symetrického vstupního modulu pro simulaci přenosové frekvenční charakteristiky [9].....	14
Obrázek 2.12 Frekvenční přenosová charakteristika symetrického vstupního modulu .	15
Obrázek 2.13 Schéma zapojení symetrického vstupního modulu pro simulaci odezvy na obdélníkový signál [9] .....	16
Obrázek 2.14 Odezva na obdélníkový signál symetrického vstupního modulu.....	16
Obrázek 2.15 Schéma zapojení části symetrického vstupního modulu – L kanál [9] ....	17
Obrázek 2.16 Změřená přenosová frekvenční charakteristika a CMR symetrického vstupního modulu .....	18
Obrázek 2.17. Změřená odezva na obdélníkový signál symetrického vstupního modulu .....	19
Obrázek 2.18 Sériový rezonanční obvod a pásmová propust s OZ.....	20
Obrázek 2.19 SRO a zapojení syntetické indukčnosti .....	20
Obrázek 2.20 Schéma pásmové propusti s gyrátorem.....	21
Obrázek 2.21 Schéma zapojení ekvalizéru .....	23
Obrázek 2.22 Přenosové frekvenční charakteristiky ekvalizéru.....	25
Obrázek 2.23 Schématické zapojení části korekčního modulu – levý kanál.....	26
Obrázek 2.24 Změřené přenosové frekvenční charakteristiky korekčního modulu .....	28
Obrázek 2.25 Schéma zapojení výstupního modulu pro simulaci přenosové frekvenční charakteristiky.....	30

Obrázek 2.26 Přenosová frekvenční charakteristika výstupního modulu.....	30
Obrázek 2.27 Odezva na obdélníkový signál výstupního modulu .....	31
Obrázek 2.28 Výstupní průběhy střídavého napětí výstupního modulu.....	32
Obrázek 2.29 Schéma části výstupního modulu – levý kanál [4].....	32
Obrázek 2.30 Změřená přenosová frekvenční charakteristika výstupního modulu.....	33
Obrázek 2.31 Změřená odezva na obdélníkový signál výstupního modulu .....	34
Obrázek 2.32 Výstupní průběhy napětí výstupního modulu .....	34
Obrázek 2.33 Celkové schéma zapojení řídicího modulu .....	35
Obrázek 2.34 Celkové schéma napájecího zdroje .....	37
Obrázek 3.1 Celkové schéma zapojení ekvalizéru pro simulace .....	39
Obrázek 3.2 Přenosová frekvenční charakteristika předzesilovače s přemostěnou kmitočtovou korekcí .....	40
Obrázek 3.3 Změřená přenosová frekvenční charakteristika předzesilovače s přemostěnou kmitočtovou korekcí.....	41
Obrázek 3.4 Fotografie montážní krabice 1U [10] .....	44
Obrázek 3.5 Fotografie navrtného zadního panelu .....	45
Obrázek 3.6 Fotografie osazeného zadního panelu .....	45
Obrázek 3.7 Lakování předního panelu .....	45
Obrázek 3.8 Fotografie otevřené krabice prototypu předzesilovače .....	46
Obrázek 3.9 Fotografie prototypu předzesilovače .....	46

# SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Teoretické parametry předzesilovače .....	4
Tabulka 2 Vypočítané hodnoty součástí gyrátoru a rezonanční frekvence SRO.....	22
Tabulka 3 Změřené a vypočítané rezonanční frekvence a jakosti jednotlivých pásem korekčního modulu .....	29
Tabulka 4 Teoretické, simulované a měřené parametry předzesilovače .....	41
Tabulka 5 Změřené hodnoty citlivosti předzesilovače .....	42
Tabulka 6 Naměřené hodnoty celkového zkreslení a šumu THD+noise.....	42
Tabulka 7 Naměřené hodnoty zkreslení 2. a 3. harmonickou složkou .....	43

# ÚVOD

Cílem bakalářské práce je návrh a konstrukce prototypu předzesilovače určeného pro kvalitní poslech a přednes hudební produkce, především z analogových zdrojů např. z gramofonů či cívkových magnetofonů, ale i z jiných zdrojů.

Předzesilovač je jeden z velmi důležitých článků celého elektro-akustického řetězce, slouží jako centrála pro připojení všech audio komponentů, jako prvotní zesilovač signálů, či pro jeho další úpravy, tj. regulace hlasitosti nebo kmitočtové korekce aj.

Návrh předzesilovače bude koncipován tak, aby se zpracovávaný signál postupně přepnul z jednotlivých vstupů, zesílil a kmitočtově upravil. V žádném případě se nesmí signál zásadně zkreslit nebo přidat nežádoucí šum, či jiný rušivý signál (brum, praskot). Proto bude v návrhu použito operačních zesilovačů s nízkým šumem a nízkým zkreslením od výrobce Analog Devices (AD8510, AD8512), kde jejich typické zkreslení je 0,0005 % a typický šum  $8 \text{ nV}/\text{H}_z/1 \text{ kHz}$  [7.]

Návrh kmitočtové korekce, (ekvalizéru) bude vycházet ze subjektivních poslechových testů. Výpočet jednotlivých parametrů ekvalizéru, tzn. rezonanční frekvence, jakosti jednotlivých pásmových propustí, zesílení, simulace budou obsahem následujících kapitol.

Celkový signálový výstup bude řešen výstupním symetrickým zesilovačem. Z důvodu potlačení parazitního rušení po signálním vodiči vedoucím do koncového zesilovače a bude osazen rychlým operačním zesilovačem od firmy Texas Instruments, LM6172 určeným přímo pro buzení dálkových spojů. [8]

Předzesilovač bude navrhován, simulován a následně měřen po blocích. Na konci se všechny bloky spojí do celkového funkčního zapojení, které bude podrobena důkladnému měření a zkoušení.

# 1 VLASTNOSTI A PARAMETRY

Teoretický rozbor, vlastnosti a parametry předzesilovačů jsou popsány v následující kapitole.

## 1.1 Vlastnosti a parametry předzesilovačů

Tato kapitola je zaměřena na teoretické parametry a vlastnosti předzesilovačů jako je šířka přenášeného pásma, vstupní impedance, vstupní citlivost, šum, zkreslení, kmitočtové korekce, výstupní impedance. Proto zde budou uvedeny i parametry, které jsou voleny pro návrh práce.

### - Šířka přenášeného pásma

U běžných zesilovačů se šířka přenášeného pásma (B), tj. frekvence které zesilovač přenáší bez většího útlumu, volí s ohledem na šířku slyšitelného pásma lidského ucha, zhruba  $f_{PRE} = (20 - 20\ 000)$  Hz pro pokles o 3 dB [2], ale kvůli přenosu alikvotních tónů nahrávek a celkového věrného přednesu, hlavně ve vyšším spektru frekvencí, budeme volit horní mez zhruba  $f_{HOR\ PRE\ TEO} = 350$  kHz a dolní  $f_{DOL\ PRE\ TEO} = 15$  Hz

### - Vstupní impedance

Velikosti vstupních impedancí se volí v komerčních přístrojích různě. Základní hodnota je  $Z_{VST\ PRE\ TEO} = 22\ k\Omega$  pro vstupy PC, TUNER, VIDEO... Pro gramofonní, mikrofonní vstupy klidně i stovky  $k\Omega$ , pro naše potřeby budeme volit impedanci cca  $Z_{VST\ PRE\ TEO} = 5\ k\Omega$ , je to kvůli menší náchylnosti na indukční rušení po kabelu (brum, praskot).

### - Vstupní citlivost

Vstupní citlivost zesilovače je hodnota napětí přivedeného na určitý vstup zesilovače, která zajistí max. nezkreslené vybuzení zesilovače. Pro běžné vstupy jako AUX, TUNER, TV, CD je to linková úroveň  $U_{CIT\ PRE\ TEO} = 0,775$  V, ale pro gramofonový či mikrofonní vstup může být i  $U_{CIT\ MIK} = (5-10)$  mV. V návrhu bude použita základní citlivost  $U_{CIT\ PRE\ TEO} = 0,775$  V. Její donastavení se bude provádět na základě požadavků jednotlivých komponentů. [1]

### - Výstupní impedance

Zásadně ji ovlivňuje vnitřní zapojení použitých operačních zesilovačů, Její nízká hodnota je potřebná k rychlému přenosu ostrých hran obdélníkových signálů. V našem obvodovém návrhu je výstupní impedance  $Z_{VYST\ PRE} = 50\ \Omega$ .

- Šum

Odstup signálu od šumu (s/š) se dnes v kvalitní studiové technice pohybuje okolo 120 dB. Proto je dobré tento odstup zajistit i v samotném předzesilovači, vhodnou volbou nízkošumových operačních zesilovačů (AD8510,2) a vhodnými zapojeními, které jsou absolutně stabilní. Například odstup s/š gramofonové desky a magnetofonového pásku je jen okolo (50–80) dB [1].

- Celkové zkreslení

Cílem kvalitního zesilovacího zařízení je zesílit zvuk bez přidání dalšího zkreslení, které se již vyskytuje v nahrávkách. Je zapotřebí minimalizovat celkové zkreslení předzesilovače, to se provádí výběrem kvalitních operačních zesilovačů, které mají zkreslení v řádech setin procent. Také navržením zesílení jednotlivých bloků. Nesmíme se pohybovat v napěťových limitacích zesilovačů, to má za následek enormní nárůst zkreslení, až k desítkám procent. V běžné praxi mají dnes předzesilovače spolu s koncovými zesilovači celkové zkreslení v rozmezí THD = (0,5 – 0,005) % [1].

Přeslech kanálů

Z angl. Crosstalk (CRT) Přeslech kanálů je hodnota v logaritmické míře (dB). A udává nám parazitní úroveň signálu buzeného kanálu v jiném kanálu. Vzhledem ke konstrukci předzesilovače, návrhu DPS (desky plošných spojů) a samotného návrhu zapojení se může přeslech zhoršit nebo zlepšit, vzniká hlavně galvanickou, induktivní, anebo kapacitní vazbou. Přeslech v běžné komerční audiotechnice pohybuje v mezích (80-10) dB. [2]

- Kmitočtové korekce

Vzhledem k odlišně nahaným nahrávkám z různých zdrojů, je zapotřebí kmitočtových korekcí. Proto je součástí práce i kmitočtový ekvalizér, kterým je možnost plynule regulovat kmitočtovou charakteristiku předzesilovače v mezích +-15 dB. Na hlubokých frekvencích, na kmitočtech  $f_{EKV\ TEO\ 1,2,3} = 40, 80, 160$  Hz, dále pak na středních  $f_{EKV\ TEO\ 4} = 4$  kHz a následně na vyšších, tj. korekce  $f_{EKV\ TEO\ 5} = 2,5$  kHz typu horní propust („shelving“).[5]

- CMR

Z angl. (Common mode rejection) neboli činitel potlačení souhlasného (součtového) signálu. Je definován jako poměr změny souhlasného napětí  $\Delta U_{COM}$  a změny výstupního napětí  $\Delta U_{OUT}$  v decibelové míře viz vztah (3.0). U běžných OZ se pohybuje CMR = (70– 75) dB u kvalitnějších OZ CMR = 110–140 dB [2].

Vztah pro výpočet CMR

$$CMR = 20 \log \frac{\Delta U_{COM}}{\Delta U_{OUT}} [V, dB] \quad (3.0)$$

V tabulce (Tab.1) jsou vypsány teoreticky navržené parametry a běžně používané ve spotřební elektronice.

Tabulka 1 Teoretické parametry předzesilovače

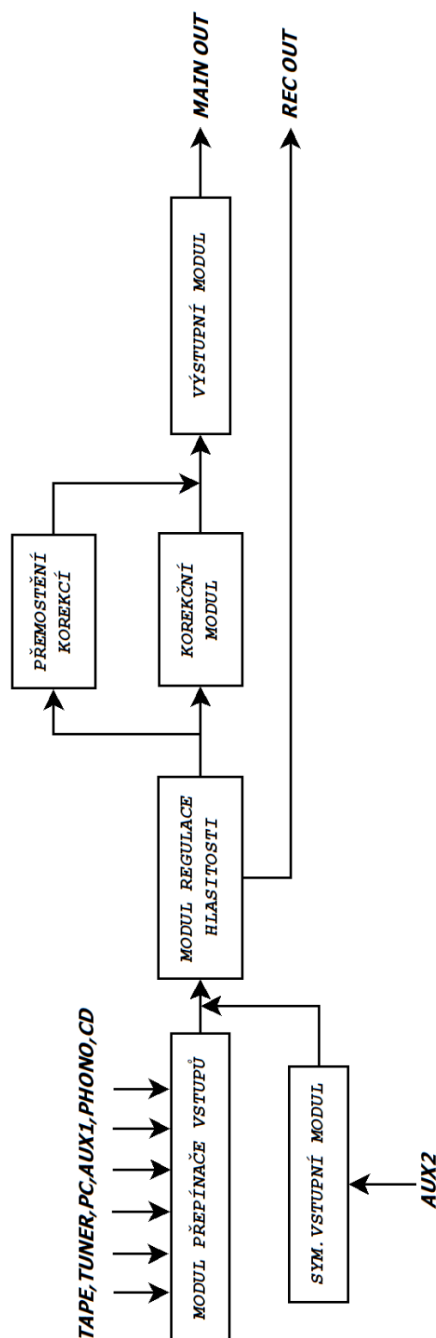
<b>Parametr</b>	<b>Symbol</b>	<b>Teoretické hodnoty</b>	<b>Hodnoty ve spotřební elektronice</b>
Vstupní citlivost	$U_{\text{CIT PRE}}$	0,775 V	(0,01–1,55) V
Šířka pásma	$B_{\text{PRE}}$	349,585 kHz	20 kHz
Dolní mezní frekvence	$f_{\text{DOL PRE}}$	15 Hz	20 Hz
Horní mez. frekvence	$f_{\text{HOR PRE}}$	350 kHz	20 kHz
Vstupní impedance	$Z_{\text{IN PRE}}$	5 k $\Omega$	22 k $\Omega$
Výstupní impedance	$Z_{\text{OUT PRE}}$	50 $\Omega$	(50–22) k $\Omega$



## 2 FUNKČNÍ ČÁSTI PŘEDZESILOVAČE

Obsahem této větší kapitoly je blokové schéma předzesilovače a popis jeho jednotlivých bloků. Následně již každá samotná podkapitola rozebírá návrh, simulaci a měření jednotlivých částí předzesilovače.

### 2.1 Blokové schéma předzesilovače



Obrázek 2.1 Blokové schéma zapojení předzesilovače

## 2.2 Modul přepínače vstupů

Tento modul zpracovává nesymetrické vstupy, a to vstupy jako, kazetový magnetofon (dále TAPE), rádio (dále TUNER), počítač (dále PC), přídatný linkový vstup (dále AUX1), gramofon (dále PHONO), cd přehrávač (dále CD).

Prvotně je zesílí a za pomoci dolních a horních propustí odfiltruje nežádoucí frekvence. Volba vstupů bude řešena relátkovým přepínáním, a vždy bude sepnut jen jeden vstup. Konektivita bude řešena pomocí RCA (cinch) konektorů.

### 2.2.1 Teoretický a praktický obvodový návrh

V příloze A.1 je vyobrazeno celé obvodové schéma zapojení modulu přepínače vstupů. Na Obrázku 2.2 je zobrazeno zapojení vstupu TAPE.

Přepínač je jednoduše realizován s pomocí relé. Rezistor  $R_1$  spolu s kondenzátorem  $C_1$  tvoří první část dolní propusti na kmitočtu  $f_{1MTEO} = 720,5$  kHz, druhá část se nachází v modulu regulace hlasitosti

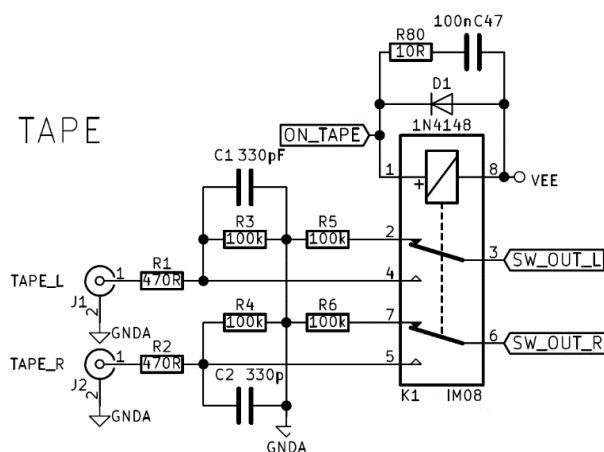
Vztah pro výpočet mezní frekvence filtru 1. řádu

$$f_M = \frac{1}{2\pi \cdot R \cdot C} [\Omega, F, Hz] \quad (3.1)$$

Dosazením do vztahu (3.1) vypočítáme lomovou frekvenci

$$f_{1MTEO} = \frac{1}{2\pi \cdot R_{192} \cdot C_{110}} = \frac{1}{2\pi \cdot 470 \cdot 470 \cdot 10^{-12}} = 720,5 \text{ kHz} \quad (3.2)$$

Rezistory  $R_3$  a  $R_5$  slouží k vybití možné stejnosměrné složky a k nastavení požadované vstupní impedance. K ovládací cívice relé  $K_1$  je připojena komutační dioda  $D_1$ , která slouží k eliminaci napěťových impulzů způsobených spínáním cívky relé, a RC (rezistor, kondenzátor) článek složený z rezistoru  $R_{80}$  a z kondenzátoru  $C_{47}$  tyto připojené součástky zajistí potlačení spínacích parazitních impulzů. Ostatní vstupy jsou zapojené obdobně. Výrobní podklady jako obrazce plošných spojů, osazovací plány, i fotografie jsou obsaženy v přílohách B.1, B.2 a C.1, F.3.



Obrázek 2.2 Schéma části přepínače vstupů – TAPE

## 2.2.2 Měření a zhodnocení parametrů a funkce

Měření reálných složek impedancí (odporů) bylo provedeno s rozpojeným výstupem, hodnota vstupního odporu modulu pro pravý kanál je  $Z_{IN\ PRP\ Lch} = 18,34\ k\Omega$  a pro levý kanál  $Z_{IN\ PRP\ Rch} = 18,32\ k\Omega$ . Měřená hodnota spínacího proudu ovládací cívky relé je  $I_{ON\ rel} = 4,85\ mA$

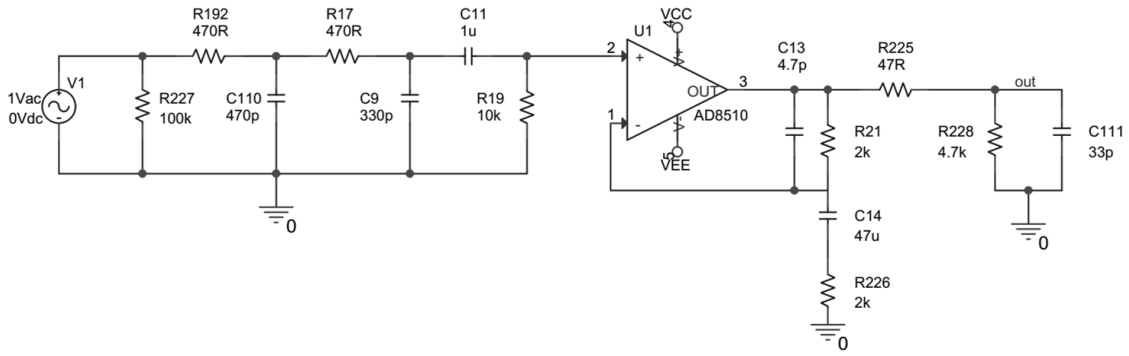
Měřeno automatickým multimetrem RE50G.

## 2.3 Modul regulace hlasitosti

Modul se skládá z hlavní regulace hlasitosti, které je provedena tandemovým, logaritmickým potenciometrem zn. ALPS, o hodnotě  $R_{POT} = 10\ k\Omega$ . Modul dále obsahuje nahrávací zesilovač pro nahrávací výstup REC OUT (RCA), tento zesilovač nemá regulaci úrovně signálu, tato regulace se provádí až v záznamových zařízeních. Modul regulace hlasitosti je zapojen v signálovém řetězci zesilovače hned za přepínačem vstupů viz Obrázek 2.1. [1].

### 2.3.1 Simulace přenosové frekvenční a fázové charakteristiky

Na Obrázku 2.3 je zobrazena část zapojení, která je využita pro hlavní zesílení, ale i pro nahrávací výstup. Funkčnost a parametry ověřeny pomocí simulace přenosové frekvenční a fázové charakteristiky v programu Orcade Pspice.



Obrázek 2.3 Schéma části přepínače vstupů – TAPE

Rezistor  $R_{17}$  spolu s kondenzátorem  $C_9$  tvoří druhou část dolní propusti na kmitočtu  $f_{2MTEO} = 1,026$  MHz, první část se nachází v přechozím modulu. Spojením těchto propustí dosáhneme vyšší strmosti filtru (2.řád), naladěném na výsledné frekvenci  $f_{HTEO} = 335,2$  kHz.

Dosazením do vztahu (3.1) vypočítáme lomovou frekvenci

$$f_{2MTEO} = \frac{1}{2\pi \cdot R_{17} \cdot C_9} = \frac{1}{2\pi \cdot 470 \cdot 330 \cdot 10^{-12}} = 1,026 \text{ MHz} \quad (3.3)$$

Rezistor  $R_{227}$  slouží k potlačení stejnosměrné složky signálu v celkovém zapojení, dále je zde CR článek, (kondenzátor, rezistor) tj. horní propust naladěná na  $f_{3MTEO} = 15,9$  Hz výpočet opět podle (3.1) uveden níže (3.4).

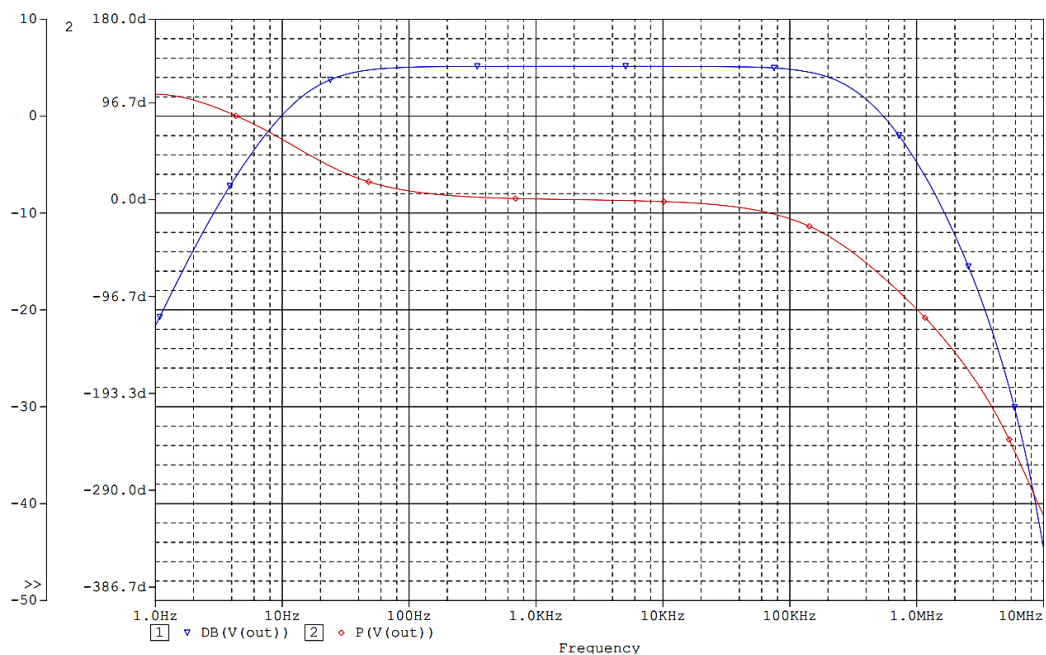
$$f_{DTEO} = \frac{1}{2\pi \cdot R_{19} \cdot C_{11}} = \frac{1}{2\pi \cdot 1000 \cdot 10 \cdot 10^{-6}} = 15,9 \text{ Hz} \quad (3.4)$$

$R_{19} = 10 \text{ k}\Omega$  slouží k uzemnění neinvertujícího vstupu operačního zesilovače U4. Proud tekoucí do invertujícího vstupu, max.  $I_{inv} = 700 \text{ pA}$  (datasheet AD8510) vytvoří menší úbytek na  $R_{19}$  a ten způsobí offset (stejnosemernou složku) na výstupu OZ. Např. při zesílení 100x, je stejnosměrné napětí na výstupu (offset),  $U_{offOZ1} = 700\mu\text{V}$ , ale zapojením  $C_{14}$  se střídavě uzemní zpětná vazba, tzn. DC zesílení jen 1x, takže offset  $U_{offOZ2} = 7 \mu\text{V}$ , takto malé stejnosměrné napětí by nemělo vznést do obvodu žádné problémy. [7]

Zesílení OZ volíme 2x, tj. 6 dB. Vycházíme z předpokladu, že OZ AD8510 [7] pracuje ideálně s hodnotou rezistorů ve zpětné vazbě (dále ZV),  $R_{ZVCEL} = 2\text{--}10 \text{ k}\Omega$ , volíme  $R_{226} = 2 \text{ k}\Omega$ , dopočítáme  $R_{21}$  podle rovnice (3.5) pro zesílení OZ v neinvertujícím zapojení. [4]

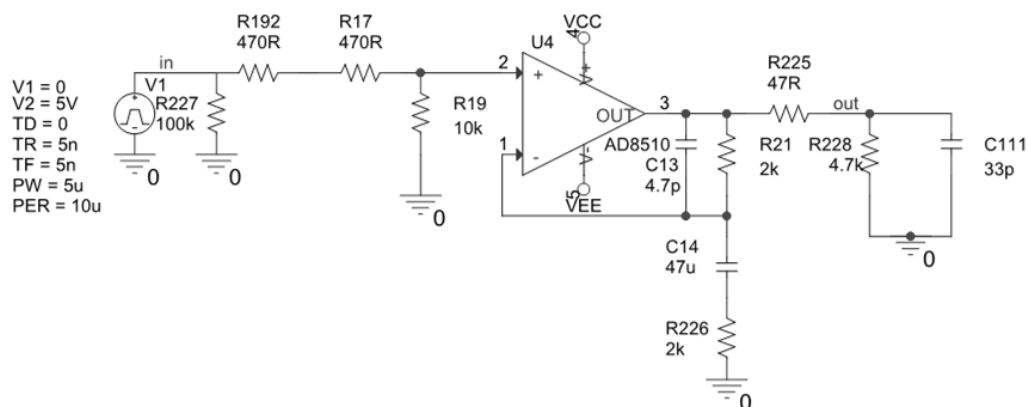
$$A_{uOZ} = 1 + \frac{R_{21}}{R_{226}} \rightarrow R_{21} = R_{226} \cdot (A_u - 1) = 2 \text{ k}\Omega \quad (3.5)$$

Rezistor  $R_{225}$  slouží jako ochrana proti zničení OZ nízkou impedancí (zkratem).  $R_{228}$  spolu s  $C_{111}$  slouží jako simulace zátěže dalším stupněm.



Obrázek 2.4 Frekvenční přenosová a fázová charakteristika zapojení hlavního zesílení

Na Obrázku 2.4 výše vidíme frekvenční přenosovou charakteristiku. Lomové kmitočty jsou odečteny pomocí kurzorů a jsou  $f_{D\text{ GRAF}} = 15,85\text{ Hz}$  a  $f_{H\text{ GRAF}} = 339,68\text{ Hz}$ . Průběh fázové charakteristiky je podle teoretických předpokladů správný.



Obrázek 2.5 Schéma zapojení hlavního zesílení pro simulaci odezvou na obdélníkový signál

### 2.3.2 Simulace odezvy na obdélníkový signál

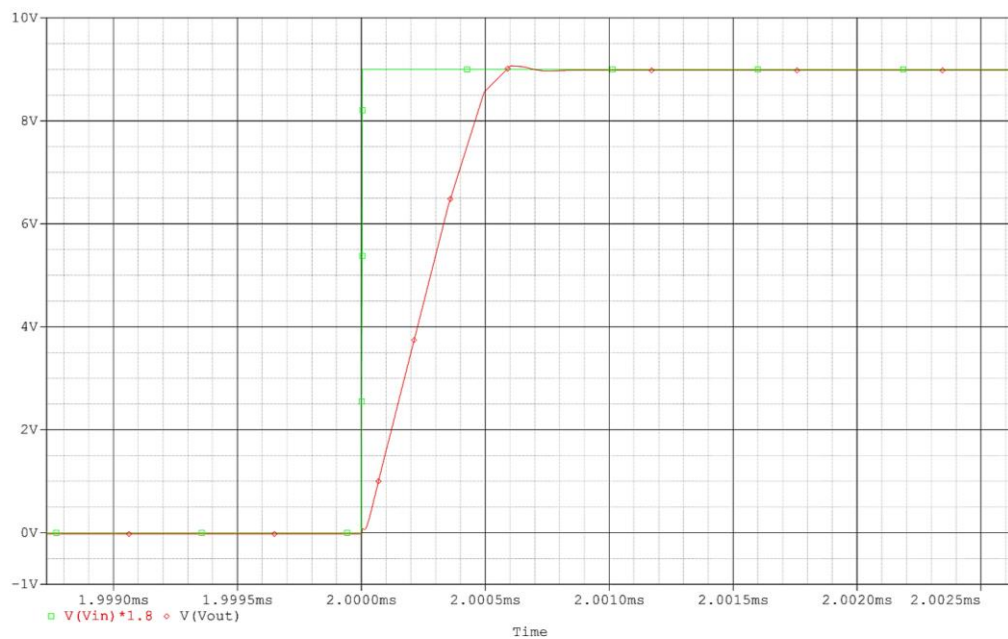
Na Obrázku 2.5 je zobrazeno schématické zapojení vstupního zesilovače pro měření odezvy na obdélníkový signál s amplitudou  $U_{OUT\text{ GEN}} = 5\text{ V}$ , frekvencí  $f_{OUT\text{ GEN}} = 100\text{ kHz}$ , střídou 1:1, dobou nástupné hrany  $t_{RISE\text{ GEN}} = 5\text{ ns}$  a sestupné hrany  $t_{FALL\text{ GEN}} = 5\text{ ns}$ .

K výstupu je opět připojena simulační zátěž (kousek symetrického vedení), aby bylo schopné zjistit, jestli na výstupu nejsou případné zákmity nebo podkmity, či oscilace.

Ze zapojení byly odstraněny všechny vstupní, vazební, filtrační kondenzátory, protože by nám zkreslovaly výstupní průběh napětí.

Na Obrázku 2.6 lze vidět nástupnou hranu budícího průběhu (zelený průběh) a následnou nástupnou hranu výstupního průběhu zesilovače. Můžeme pozorovat zpoždění nárůstu napětí výstupního napětí  $t_{RISE\ OUT} = 520\text{ ns}$ , dále lze vidět, že zde nejsou žádné překmity či podkmity nebo oscilace, tímto jsme dosáhly vhodnou volbou kondenzátoru  $C_{13} = 4,7\text{ pF}$  ve ZV. Sestupná hrana se chovala naprosto stejně.

Z hlediska simulací můžeme zapojení považovat za stabilní a pro náš návrh dostačující.



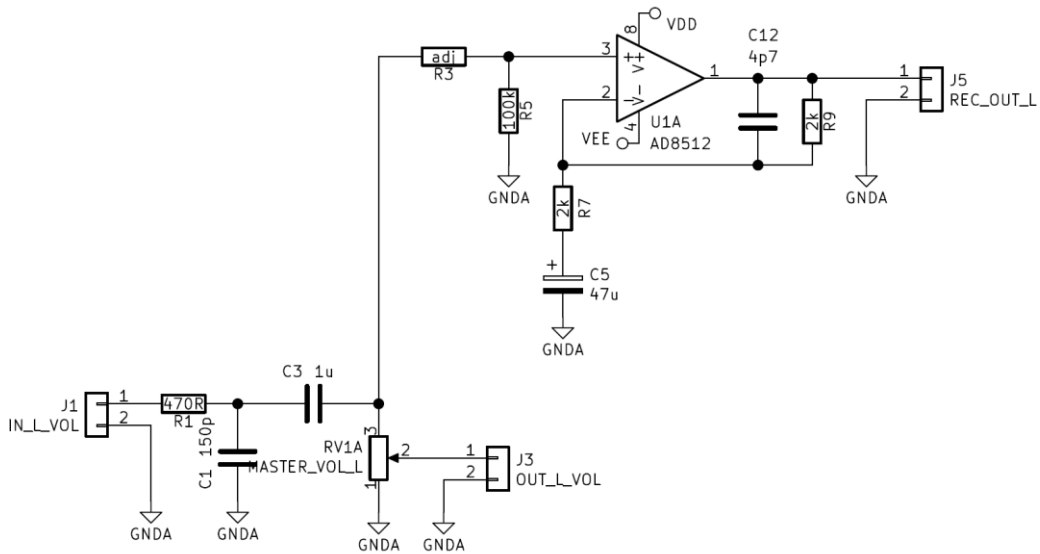
Obrázek 2.6 Odezva na obdélníkový signál zapojení hlavního zesílení.

### 2.3.3 Praktický obvodový návrh

Na Obrázku 2.7 je zobrazen již reálný návrh levého kanálu regulace hlasitosti s mírnými úpravami.

Byl přidán dělič úrovně  $R_3$  a  $R_5$  pro mírné donastavení výstupní úrovně nahrávacího zesilovače. Dále byl prohozen  $R_7$  a  $C_5$  kvůli oddělení kapacity invertujícího vstupu OZ

Celkové schéma zapojení regulace hlasitosti a nahrávacího zesilovače je přiloženo v příloze A.2. Dále pak výrobní podklady v B.3, B.4 a C.2, C.3 a fotografie F2.0.



Obrázek 2.7 Schéma zapojení části regulace hlasitosti – L. kanál

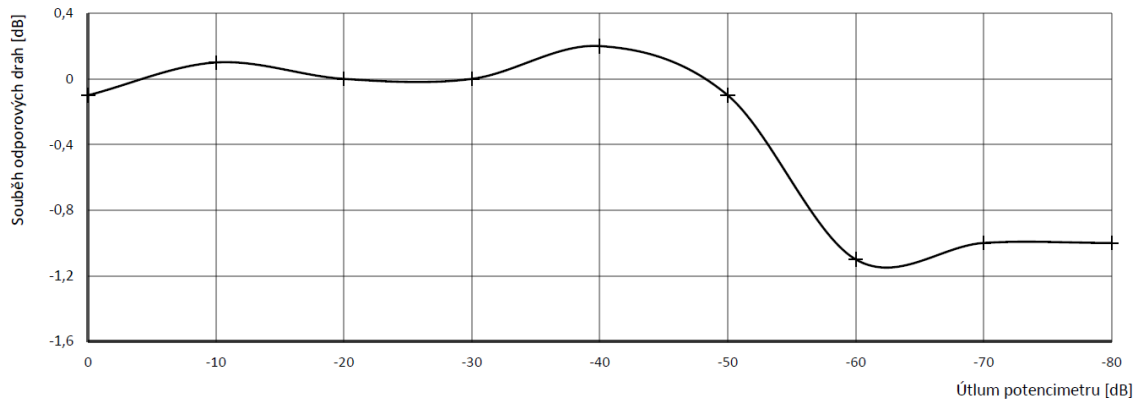
### 2.3.4 Měření a zhodnocení parametrů a funkce

#### Měření souběhu odporových drah potenciometru hlasitosti ALPS

Střídavé napětí o frekvenci 330 Hz napojíme na konce odporových drah, na pravém kanálu nastavujeme požadovaný útlum potenciometru a měříme útlum na levém kanálu.

Průběh souběhu je do útlumu  $-50$  dB v rozmezí  $\pm 0,2$  dB. Pod  $-50$  dB byly již výsledky měření zatíženy chybou měření způsobenou nižší částí rozsahu nf milivoltmetru, ale i tak dosahuje souběh skvělých výsledků viz graf na Obrázku 2.8.

Největší možný útlum byl naměřen  $-80$  dB, tato hodnota odpovídá katalogové hodnotě, ale potenciometr tlumí i více, ale souběh a průběh odporové dráhy již není úplně ideální, proto budeme uvažovat maximální útlum  $-80$  dB, což je útlum 10 000x, tj, plně dostačující pro domácí hi-end techniku.

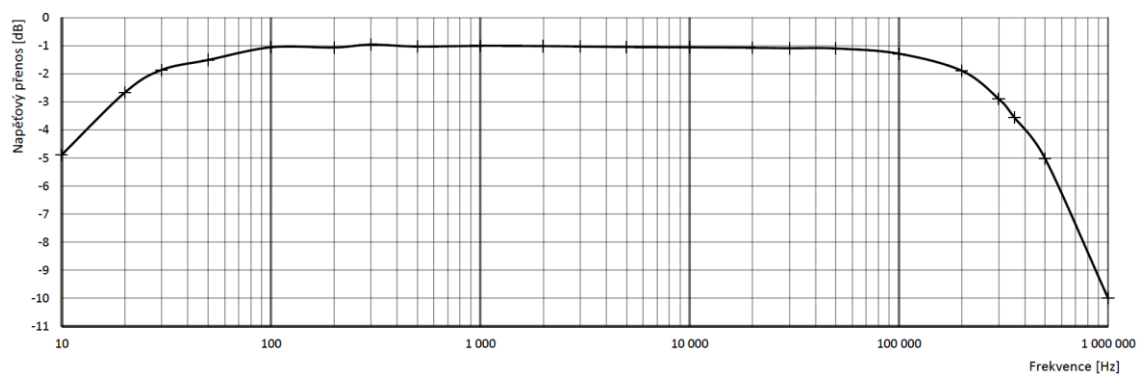


Obrázek 2.8 Graf závislosti souběhu odporových drah na nastaveném útlumu potenciometru

### Měření přenosové frekvenční závislosti modulu regulace hlasitosti

V grafu níže viz Obrázek 2.9 je zanesena měřená přenosová charakteristika regulace hlasitosti. Změřili jsme dolní mezní frekvenci  $f_{D\text{ MĚŘ}} = 14,96\text{ Hz}$  rozdíl oproti teoretické hodnotě  $f_{D\text{ TEO}} = 15,9\text{ Hz}$  je  $\Delta f_D = 0,94\text{ Hz}$ . Naměřená horní frekvence je  $f_{H\text{ MĚŘ}} = 383\text{ kHz}$  a její rozdíl oproti teoretické hodnotě  $f_{H\text{ MTEO}} = 335,2\text{ kHz}$  je  $\Delta f_H = 47,8\text{ kHz}$ . Rozdíly hodnot oproti simulovaným hodnotám jsou přibližně stejné jako vůči vypočítaným.

Záznamovému zesilovači (REC) jsme naměřili zesílení 2x (6 dB) což odpovídá teoretickým předpokladům.

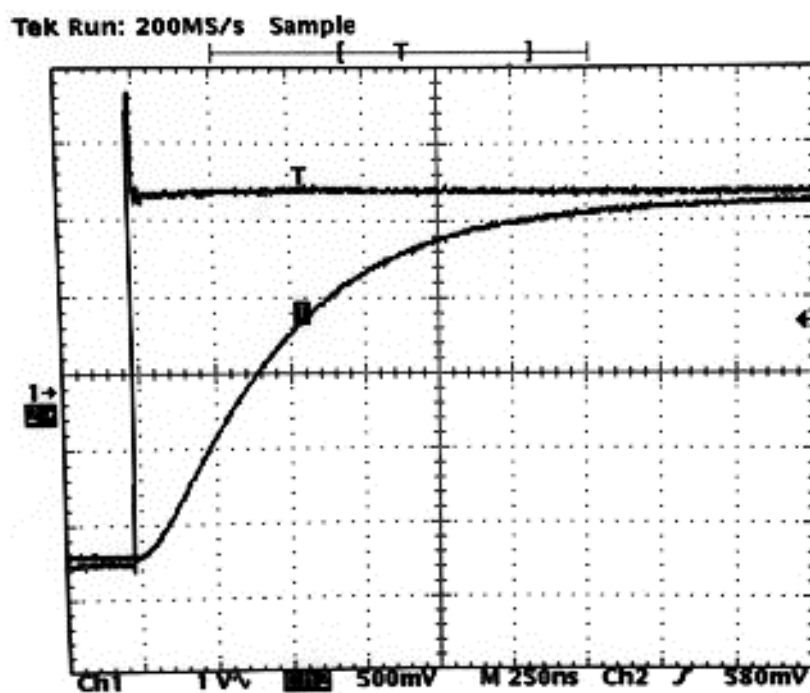


Obrázek 2.9 Změřená přenosová frekvenční charakteristika modulu regulace hlasitosti

### Měření odezvy na obdélníkový signál symetrického vstupního modulu

Na Obrázku 2.10 je fotografie oscilogramu, průběhu odezvy na obdélníkový signál náběžné hrany. Změřená rychlost náběžné hrany symetrického vstupního modulu (CH 1) je  $t_{\text{RISE OUT MĚŘ}} = 1435\text{ ns}$ , z důvodu vstupní kapacity modulu se objevil překmit nástupné hrany na vstupním signálu, ale výrazně neovlivnil výstupní průběh.

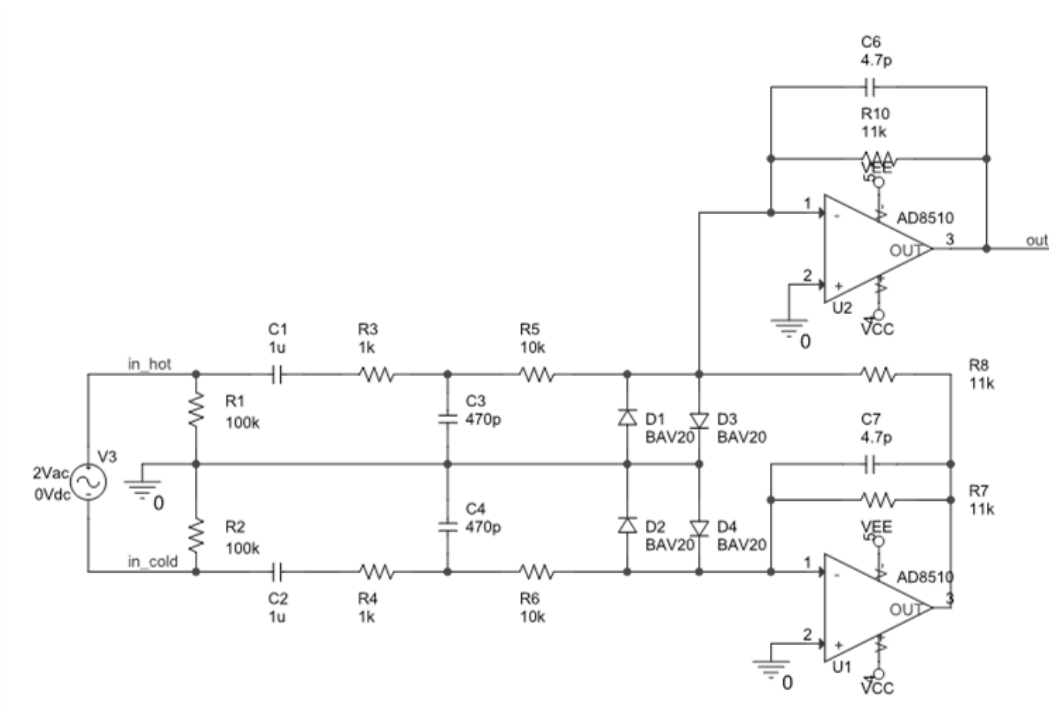




Obrázek 2.10 Změřená nástupná hrana modulu regulace hlasitosti

## 2.4 Symetrický vstupní modul

Slouží pro připojení symetrického signálu do předzesilovače, např. z přístrojů studiové techniky, korektorů, mikrofonů, páskových magnetofonů. Bude se jednat o dvojité zapojení operačního zesilovače pro stereo vstup AUX2. Konektivita bude řešena pomocí XLR symetrických konektorů viz obrázek 2.15.



Obrázek 2.11 Schéma zapojení symetrického vstupního modulu pro simulaci přenosové frekvenční charakteristiky [9]

## 2.4.1 Simulace přenosové frekvenční a fázové charakteristiky

Obrázek 2.11 zobrazuje zapojení symetrického vstupního modulu skládajícího se ze zapojení dvojic invertujících zesilovačů.  $C_1$ ,  $C_2$  spolu s  $R_5$ ,  $R_6$ ,  $R_3$ ,  $R_5$  tvoří horní propust s lomovým kmitočtem  $f_{D\text{TEO}} = 14,46$  Hz.  $R_3$ ,  $R_4$  a  $C_3$ ,  $C_4$  tvoří dolní propust na frekvenci  $f_{H\text{TEO}} = 338,6$  kHz.

Vstupní signál na vstupu „in\_hot“ spolu se vstupním signálem na vstupu „in\_cold“ (fázově otočený o  $180^\circ$ ) se sčítají na invertujícím vstupu OZ U2, který je následně zesílí a fázově otočí o  $180^\circ$  na celkový výstup zesilovače (modulu).

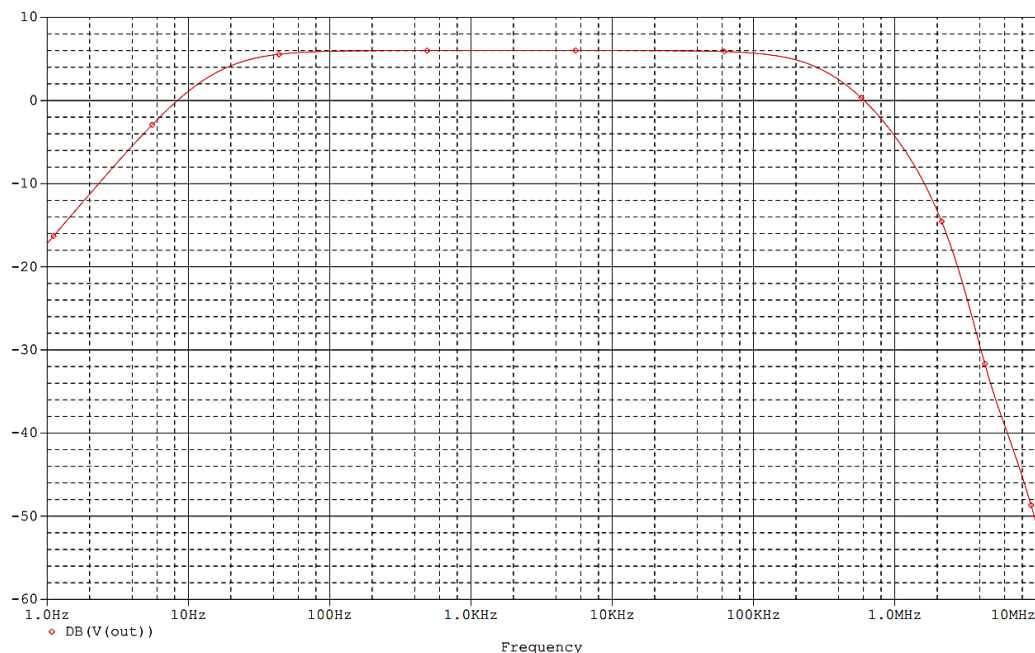
Diody  $D_1$  až  $D_4$  slouží k limitaci vstupního signálu při přebuzení zesilovače. V normálním stavu jsou zavřené a nezkrusují vstupní signál, ale při přebuzení operačních zesilovačů se z jejich výstupů dostane větší napětí na vstup OZ, ZV již přestává fungovat a diody se začínají otevírat, nárůst napětí na vstupech OZ se zastaví na cca 0,65V, takto jsou vstupy OZ ošetřeny před destrukcí.

Vzor výpočtu dolní mezní frekvence vychází ze vzorce (3.1)

$$f_{D\text{TEO}} = \frac{1}{2\pi \cdot ((R_3 + R_5) \cdot C_1)} = \frac{1}{2\pi \cdot ((1000 + 10000) \cdot 1 \cdot 10^{-6})} = 14,46 \text{ Hz} \quad (3.6)$$

Vzor výpočtu horní mezní frekvence podle vztahu (3.1)

$$f_{H\text{TEO}} = \frac{1}{2\pi \cdot R_3 \cdot C_3} = \frac{1}{2\pi \cdot 1000 \cdot 470 \cdot 10^{-12}} = 338,6 \text{ kHz} \quad (3.7)$$

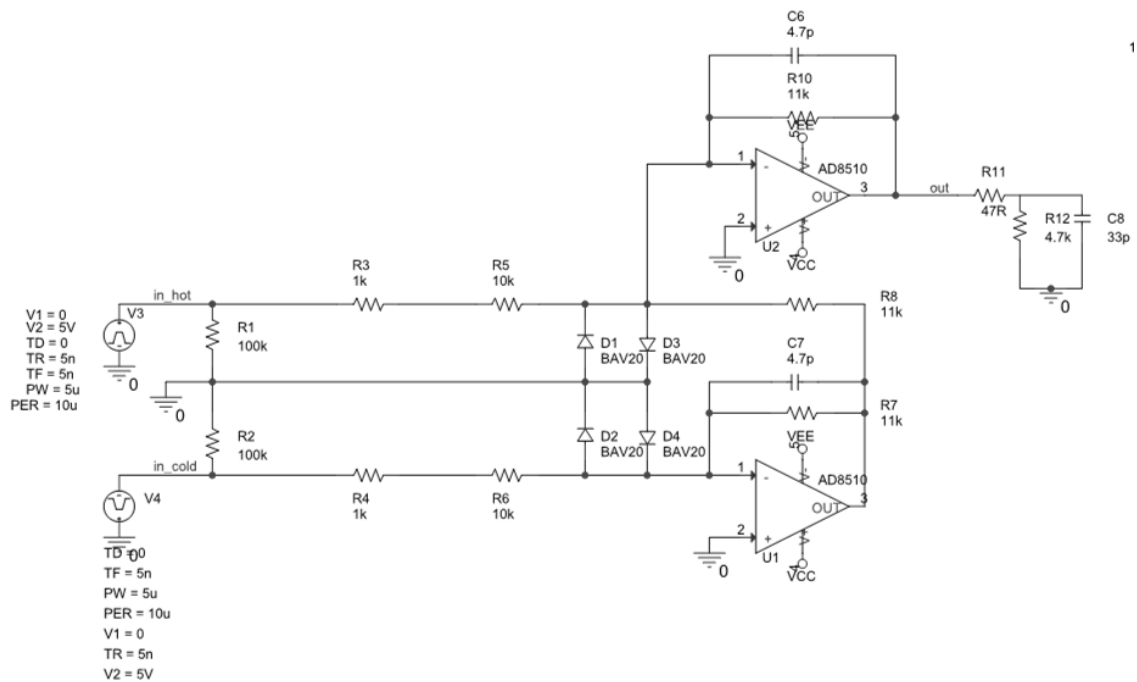


Obrázek 2.12 Frekvenční přenosová charakteristika symetrického vstupního modulu

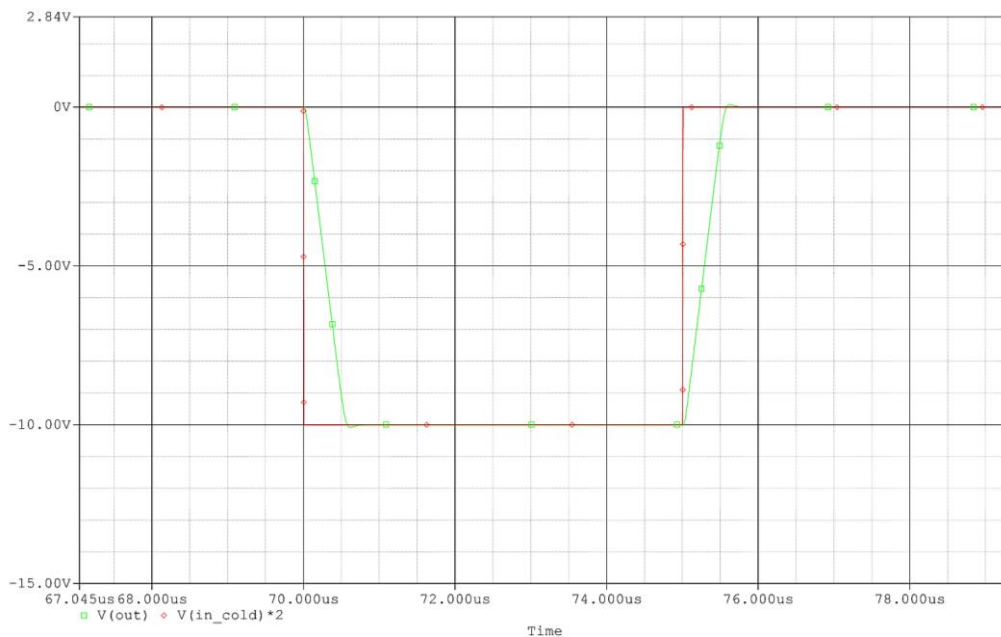
Z Obrázku 2.12 odečteme spodní lomový kmitočet pomocí kurzoru a je  $f_{D\text{ GRAF}} = 14,72\text{ Hz}$  a horní lomový kmitočet  $f_{H\text{ GRAF}} = 366,7\text{ kHz}$ .

## 2.4.2 Simulace odezvy na obdélníkový signál

Na obrázku 2.13 je zapojení pro měření odezvy na obdélníkový signál. Parametry signálu jsou totožné jako v simulaci hlavního zesílení viz kapitola (2.4.1), jen střídavé zdroje jsou dva. Vstup „in\_cold“ je buzen signálem fázově posunutým o  $180^\circ$ . Hodnoty ZV kondenzátorů byly odladěny, aby výstupní průběh odpovídal co nejlépe ideálnímu.



Obrázek 2.13 Schéma zapojení symetrického vstupního modulu pro simulaci odezvy na obdélníkový signál [9]



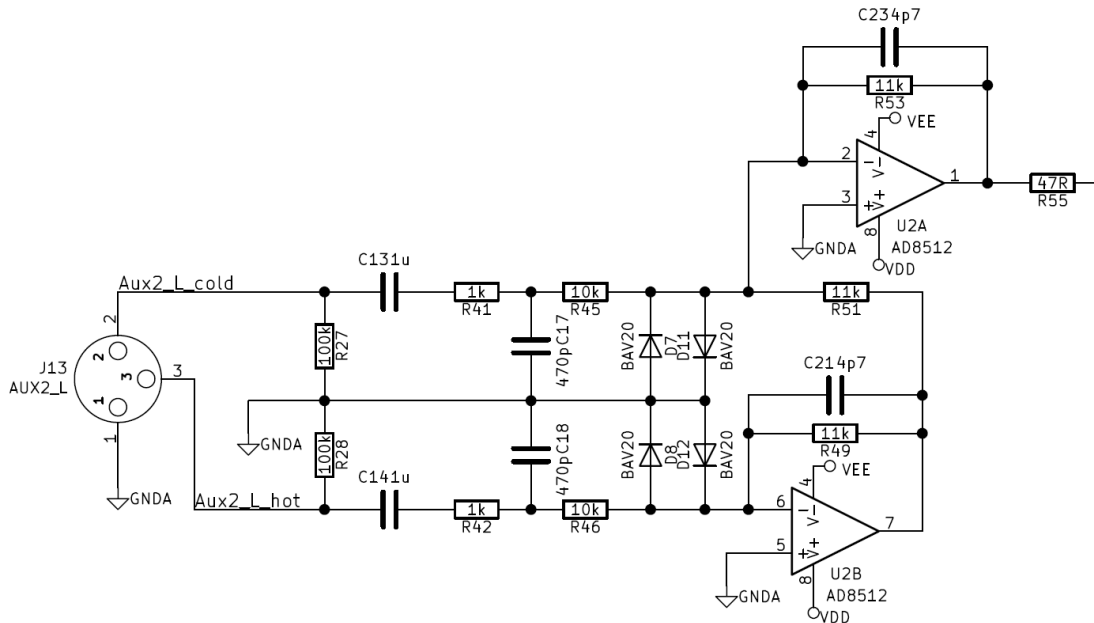
Obrázek 2.14 Odezva na obdélníkový signál symetrického vstupního modulu

Na Obrázku 2.14 je odezva a obdélníkový signál (červený průběh). Výstup (zelený průběh) je jen mírně opožděn za budícím signálem, a to o  $t_{\text{RISE OUT}} = 510 \text{ ns}$

A je bez výrazných překmitů a kmitání. Modul je vzhledem k simulacím odladěn.

### 2.4.3 Praktický obvodový návrh

Na Obrázku 2.15 je vykresleno zapojení části symetrického vstupního modulu, konkrétně levý kanál, nejsou zde rozdíly v zapojení oproti simulačnímu schématu, jen výstup je spínán za pomoci relé na hlavní signálovou sběrnici, více v příloze A.3.



Obrázek 2.15 Schéma zapojení části symetrického vstupního modulu – L kanál [9]

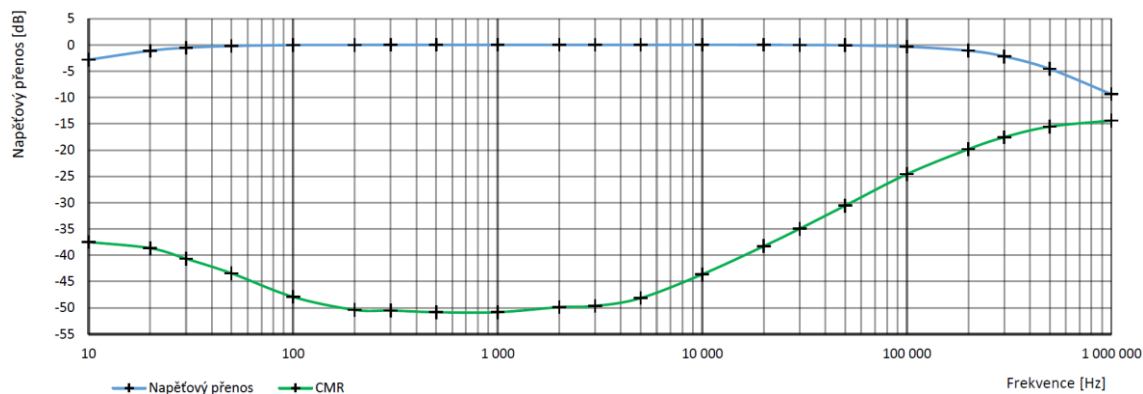
### 2.4.4 Měření a zhodnocení parametrů a funkce

#### Měření přenosové frekvenční závislosti symetrického a CMR vstupního modulu

V grafu níže Obrázek 2.16 je zanesena změřená přenosová charakteristika symetrického vstupního modulu, změřili jsme dolní mezi frekvenci  $f_{D\text{MĚŘ}} = 13,75$  Hz rozdíl oproti teoretické hodnotě  $f_{D\text{TĚO}} = 14,46$  Hz je  $\Delta f_D = 0,71$  Hz. Naměřená horní frekvence je  $f_{H\text{MĚŘ}} = 357$  kHz a její rozdíl oproti teoretické hodnotě  $f_{H\text{MĚO}} = 338,6$  kHz je  $\Delta f_H = 18,4$  kHz.

Teoreticky navržený zisk symetrického vstupního modulu je při symetrickém buzení 6 dB (2x) tato hodnota byla ověřena měřením.

Největší změřená hodnota CMR je -50 dB a se zvyšující se frekvencí klesá až k -15 dB na 1 MHz, tvar křivky a zvětšení útlumu se dá zlepšit důkladným párováním a výběrem kvalitních součástek dále také lepším operačním zesilovačem či lepším návrhem desky plošných spojů (symetrie rozložení součástek, menší parazitní indukčnosti, aj.).



Obrázek 2.16 Změřená přenosová frekvenční charakteristika a CMR symetrického vstupního modulu

### Měření odezvy na obdélníkový signál symetrického vstupního modulu

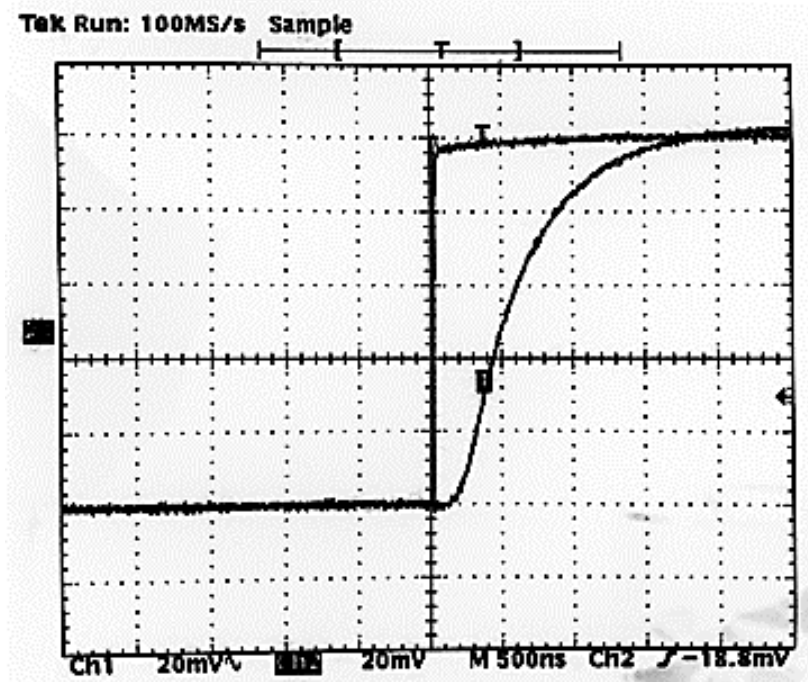
Na Obrázku 2.17 je fotografie oscilogramu průběhu odezvy na odelníkovitý signál náběžné hrany.

Na druhém kanálu osciloskopu (dále CH2) je zobrazena nástupná hrana odelníkovitého signálu generovaná signálním generátorem, rychlost nástupné hrany genátoru je  $t_{RISE\ GEN} = 5\ ns$ .

Změřená rychlost náběžné hrany symetrického vstupního modulu (CH 1) je  $t_{RISE\ OUT\ MĚŘ} = 1435\ ns$ , tato hodnota je téměř 3x větší než simulovaná hodnota, ale jelikož jsme při měření budily symetrický vstup pouze do jednoho kanálu (z důvodu absence symetrického výstupu generátoru) tak by teoretická hodnota nástupné hrany měla být dvojnásobná, tzn cca je  $t_{RISE\ SIM\ 2x} = 1020\ ns$  protože nám nepomáhá s rychlostí druhý operační zesilovač, takže výsledný rozdíl je  $\Delta t_{RISE} = 415\ ns$ .

Průběh nástupné hrany je bez překmitů a kmitání, je sice pomalejší, ale zato absolutně stabilní, nehrozí tak možnost nástupu oscilací.

Výrobní podklady jako obrazce plošných spojů, osazovací plány, i fotografie jsou obsaženy v přílohách B.5, B.6 a C.4, C.5, fotografie F.3.



Obrázek 2.17. Změřená odezva na obdélníkový signál symetrického vstupního modulu

## 2.5 Korekční modul

Obsahuje 4 pásmový ekvalizér na frekvencích  $f_{EKV\text{TEO}} = 40,80,160,4000$  Hz. A horní propust („shelving“) pracující od frekvence 2,5 kHz Tento korekční modul je možno přemostit, a zajistit tak čistou signálovou cestu. Viz Obrázek 2.1. Modul také obsahuje nastavitelné předzesílení pro různou volbu citlivosti jednotlivých vstupů viz celkové schéma zapojení A.4.

### 2.5.1 Sériový rezonanční obvod a pásmová propust

Pro návrh jednoho pásma použijeme sériový rezonanční obvod (SRO) Obrázek 2.18. Obvod se skládá ze sériového zapojení cívky  $L_{SRO}$  a kondenzátoru  $C_{SRO}$ . Ztráty v cívce jsou nahrazeny zapojením sériového rezistoru  $R_{LSRO}$ .

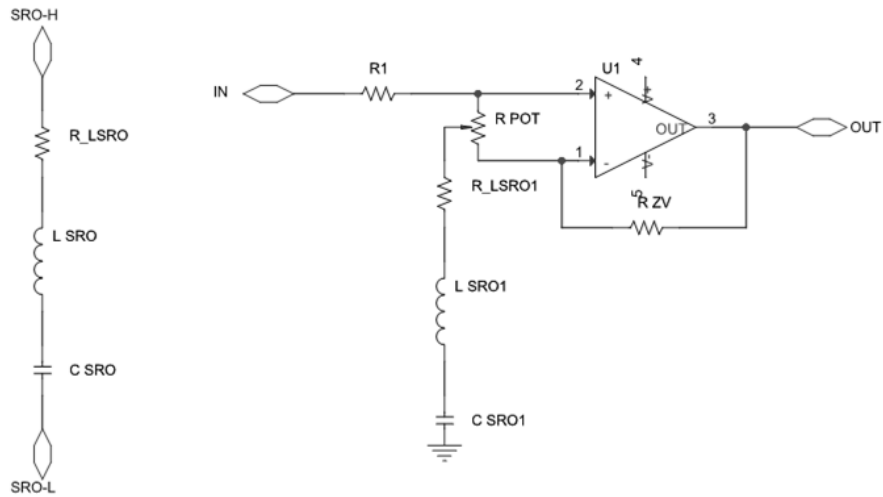
Rezonanční frekvenci  $f_0$  lze vypočítat ze vzorce (3.8)

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_{SRO} \cdot C_{SRO})}} \text{ [H, F, Hz]} \quad (3.8)$$

Jakost obvodu  $Q_{SRO}$  můžeme vypočítat ze vztahu (3.9)

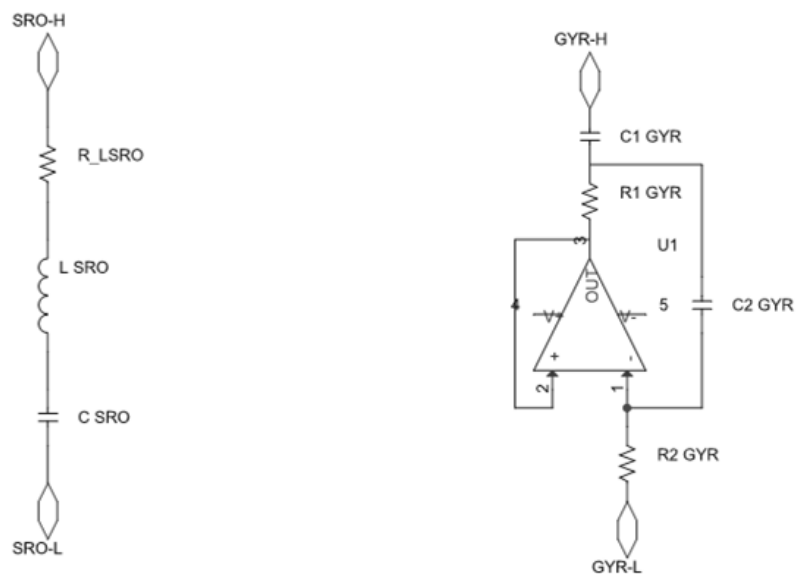
$$Q_{SRO} = \frac{1}{2\pi \cdot f_0 \cdot R_{LSRO} \cdot C_{SRO}} \text{ [Hz, } \Omega, \text{ F, -]} \quad (3.9)$$

Na levé straně Obrázku 2.18 lze vidět principiální zapojení SRO a na pravé již SRO zapojené jako pásmová propust s operačním zesilovačem.



Obrázek 2.18 Sériový rezonanční obvod a pásmová propust s OZ

V praxi se mechanické provedení cívek pro malosignálové zapojení používá zřídka, v našem případě budou vycházet hodnoty indukčností v řádech desítek H (Henry). Proto použijeme specifického zapojení operačního zesilovače, které vytvoří syntetickou indukčnost, za pomoci tzv. gyrátoru viz Obrázek 2.19, který transformuje impedanční průběh kondenzátoru na impedanční průběh cívky. [4]



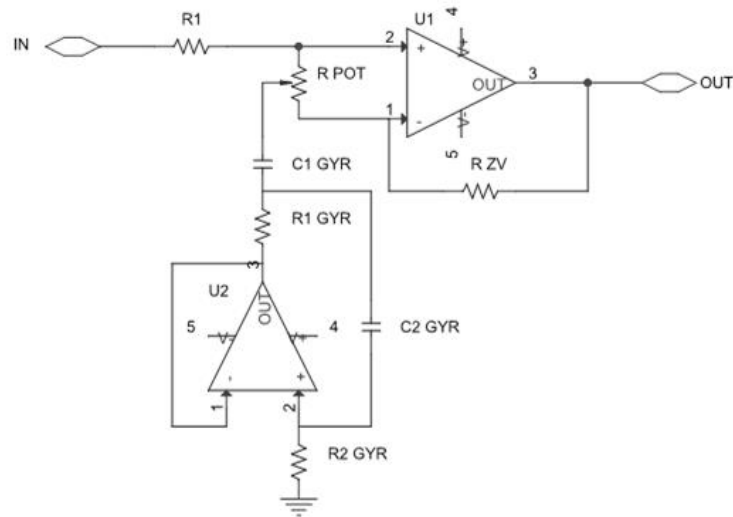
Obrázek 2.19 SRO a zapojení syntetické indukčnosti



Pro hodnoty rezistorů  $R_{2GYR} \gg R_{1GYR}$  můžeme psát převodní rovnici gyrátoru (3.11) a také možno konstatovat že  $C_{SRO} = C_{1GYR}$  a  $R_{LSRO} = R_{1GYR}$ . A vypočítat tak hodnotu syntetické indukčnosti.

$$L_{SRO} = C_{2GYR} \cdot R_{1GYR} \cdot R_{2GYR} \quad (3.11)$$

Vlastní zapojení gyrátoru se skládá ze dvou kondenzátorů, operačního zesilovače a dvou rezistorů, na dalším Obrázku 2.20 je vyobrazena pásmová propust s gyrátorem.



Obrázek 2.20 Schéma pásmové propusti s gyrátorem

## 2.5.2 Výpočet hodnot součástek jednotlivých filtrů [6]

Na následujících řádcích bude uveden postup výpočtu (návrhu) jednoho z pěti filtrů ekvalizéru, a to filtr pro nízké kmitočty s rezonanční frekvencí 40 Hz a s jakostí  $Q = 1,7$ .

V návrhu se počítá se zesílením ekvalizéru  $G_{EKV} = 15$  dB proto za pomoci vztahu (3.12) přepočítáme zisk v decibelové míře na zisk v poměrové míře.

$$A_u = 10^{\frac{G_{EKV}}{20}} = 10^{\frac{15}{20}} = 5,623 \text{ [dB, -]} \quad (3.12)$$

Pro výpočet rezistoru  $R_{1GYR}$  (3.1) si zvolíme hodnotu rezistorů  $R_{ZV}$ ,  $R_1 = 3,3 \text{ k}\Omega$ , volíme hodnotu rezistorů z použitelného rozsahu zpětné vazby OZ AD8510. Pro naše zapojení vychází výpočet maximálního zesílení (3.13) z něj vypočítáme hodnotu rezistoru  $R_{1GYR}$

$$A_{uMAX} = \frac{R_{ZV} + R_{1GYR}}{R_{1GYR}} \rightarrow R_{1GYR} = \frac{R_{ZV}}{(K_{uMAX} - 1)} = \frac{3300}{4,623} = 713,8 \Omega \quad (3.13)$$

Úpravou vztahu (3.9) dostáváme vztah (3.14) pomocí něj lze vypočítat hodnotu kondenzátoru gyrátoru  $C_{1GYR}$ , jakost  $Q$  z praktických zkušeností volíme 1,7.

$$C_{1\text{GYR}} = \frac{1}{Q \cdot 2\pi \cdot f_0 \cdot R_{1\text{GYR}}} = \frac{1}{1,7 \cdot 2\pi \cdot 40 \cdot 713,8} = 3,278 \text{ } \mu\text{F} \quad (3.14)$$

Ze vztahu pro výpočet rezonančního kmitočtu (3.8) dostáváme vztah (3.15) pomocí něj lze vypočítat hodnotu indukčnosti

$$L_{\text{SRO}} = \frac{1}{4\pi \cdot C_{1\text{GYR}} \cdot f_0^2} = \frac{1}{4\pi \cdot 3,378 \cdot 10^{-6} \cdot 40^2} = 4,829 \text{ H} \quad (3.15)$$

Pro nahrazení cívky gyrátorem vypočítáme hodnoty součástek gyrátoru. Pro dodržení podmínky  $R_{2\text{GYR}} \gg R_{1\text{GYR}}$  volíme  $R_{2\text{GYR}} = 100 \cdot R_{1\text{GYR}} = 71,380 \text{ k}\Omega$ . Kondenzátor  $C_{2\text{GYR}}$  vypočteme dosazením do vztahu (3.16)

$$C_{2\text{GYR}} = \frac{L_{\text{SRO}}}{R_{2\text{GYR}} \cdot R_{2\text{GYR}}} = \frac{4,829}{713,8 \cdot 71380} = 94,7 \text{ nF} \quad (3.16)$$

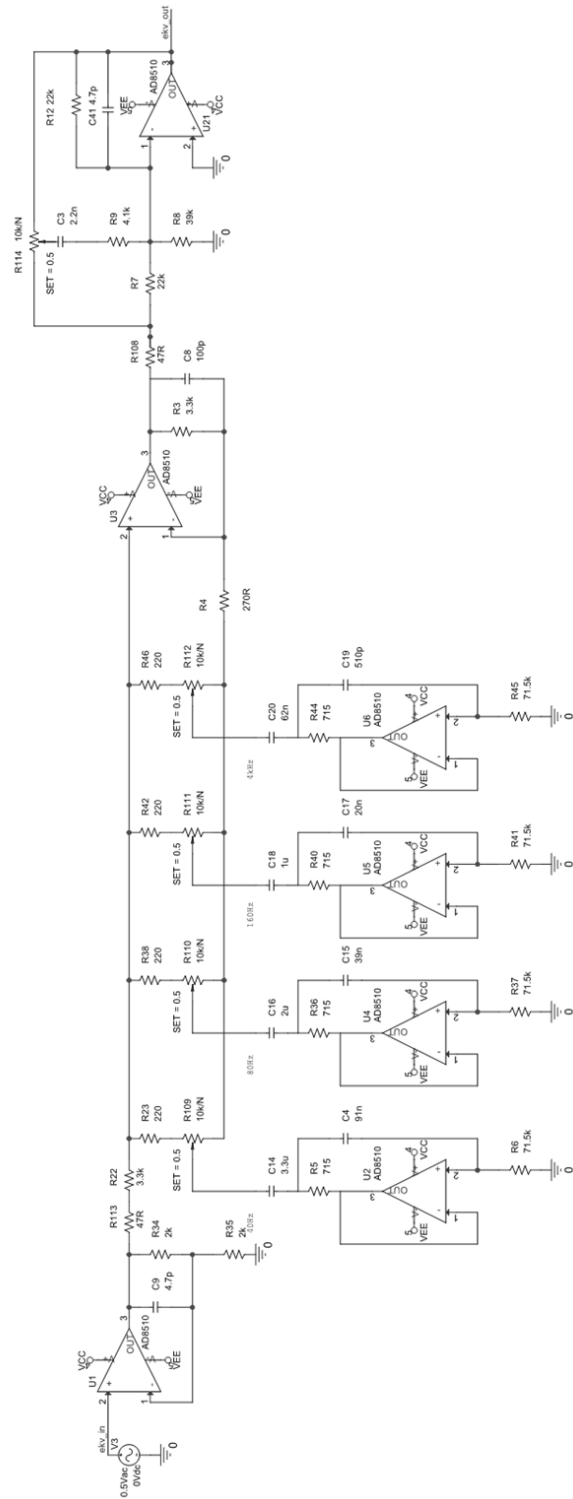
Ostatní výpočty hodnot součástek, rezonančních frekvencí a jakostí jsou uvedeny v Tabulce 2.

Tabulka 2 Vypočítané hodnoty součástek gyrátoru a rezonanční frekvence SRO

$f_0$ [Hz]	$Q$ [-]	$R_{1\text{GYR}}$ [ $\Omega$ ]	$R_{2\text{GYR}}$ [k $\Omega$ ]	$C_{1\text{GYR}}$ [ $\mu\text{F}$ ]	$C_{2\text{GYR}}$ [nF]	$L_{\text{SRO}}$ [H]	$f_{\text{OVYP}}$ [Hz]
40	1,7	715	71500	3,3	91	4,829	39,86
80	1,414	715	71500	2	39	2,006	79,45
160	1,414	715	71500	1	20	1,0035	158,87
4000	0,9	715	71500	0,062	0,51	0,0255	4002,71

### 2.5.3 Popis návrhu a simulace přenosové frekvenční charakteristiky

V této podkapitole bude popsán návrh schématického zapojení ekvalizéru. Na Obrázku 2.21 níže je simulované schéma zapojení ekvalizéru.



Obrázek 2.21 Schéma zapojení ekvalizéru

První operační zesilovač  $U_1$  s nastaveným zesílením 2x slouží jako budič SRO s gyrátory, samotné syntetické indukčnosti jsou použity ve 4 pásmech. SRO jsou napojeny na jezdcy lineárních potenciometrů ( $R_{109} - R_{112}$ ).

Pokud se potenciometr vytočí do pravé krajní polohy, tj. plně k rezistoru  $R_4$  dojde k vytažení zisku požadovaného pásma zelený průběh v grafu viz Obrázek 2.2. Naopak když potenciometr vytočíme do levé krajní polohy dojde k útlumu požadovaného pásma, červený průběh v grafu.

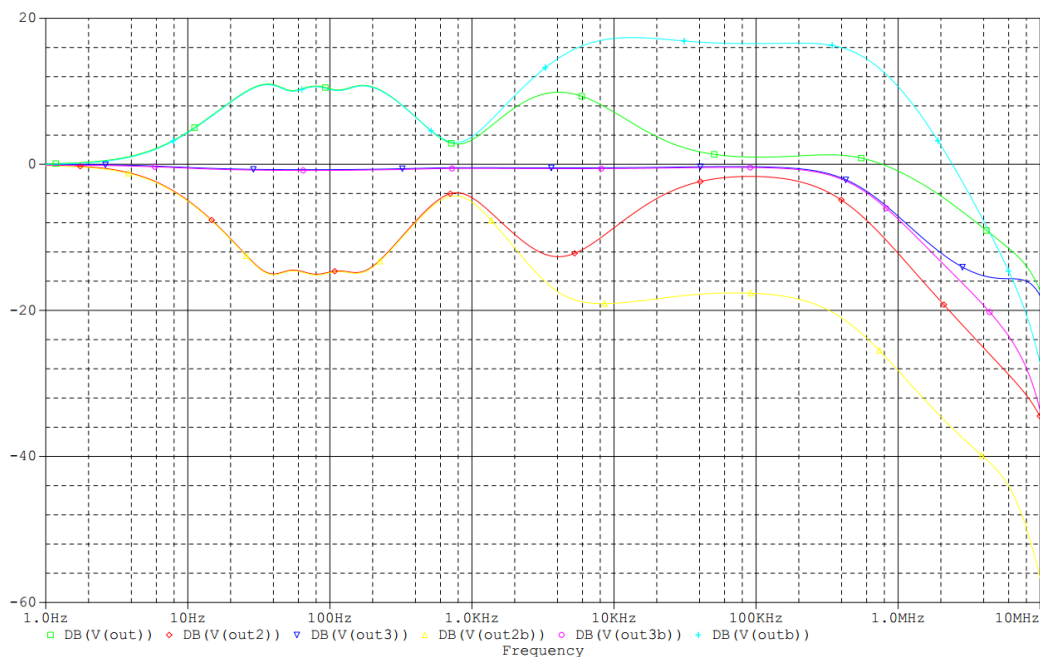
Rezistory sériově s potenciometry slouží k symetrizaci útlumu a zisku pásmových propustí, spolu s  $R_4$ , který zlepšuje stabilitu OZ  $U_3$  (odděluje kapacitu invert. vstupu).

Za operačním zesilovačem  $U_3$  je zařazeno poslední pásmo. Jedná se o horní propust laděnou od 2,5 kHz, tato propust je vhodná k celkovému zvýraznění horních středů (středních frekvencí) a celého vyššího pásma. [4]

Rezistory  $R_7$  a  $R_{22}$  tvoří základní zesílení OZ, a tj. 1x, protože je zapojen jako sledovač, frekvenčně závislý zisk se mění potenciometrem. Ve střední vyvážené poloze potenciometru signál prochází OZ bez kmitočtové korekce. Při vytočení do pravé koncové polohy dochází k paralelnímu spojení  $R_{12}$  a  $C_3$  sériově s  $R_9$  takto nám impedance ZV v závislosti na frekvenci klesá a horní propust tlumí. Naopak při vytočení do levé krajní polohy se nám snižuje hodnota impedance  $R_7$  a také zisk horní propustí. [4]

Rezistor  $R_8$  slouží k přizemnění invertujícího vstupu. Velice důležitý je rezistor  $R_9$ , eliminuje růstu zisku s frekvencí, takto by rostl zisk lineárně, až do frekvencí řádů MHz, to by mohlo způsobit rozkmitání zapojení, a to by nepříjemně ovlivnilo zvukový projev a životnost zapojení, popřípadě funkce připojených periférií.

Světle modrý průběh je pro zdůraznění všech pásem, včetně 2,5 kHz pásma. Žlutý je pro jejich potlačení. Fialový průběh bez jakékoliv korekce (střední polohy potenciometrů). Z hlediska simulací je korekční část odladěna a je možno postoupit dále k praktickému návrhu zapojení a výrobě DPS.



Obrázek 2.22 Přenosové frekvenční charakteristiky ekvalizéru

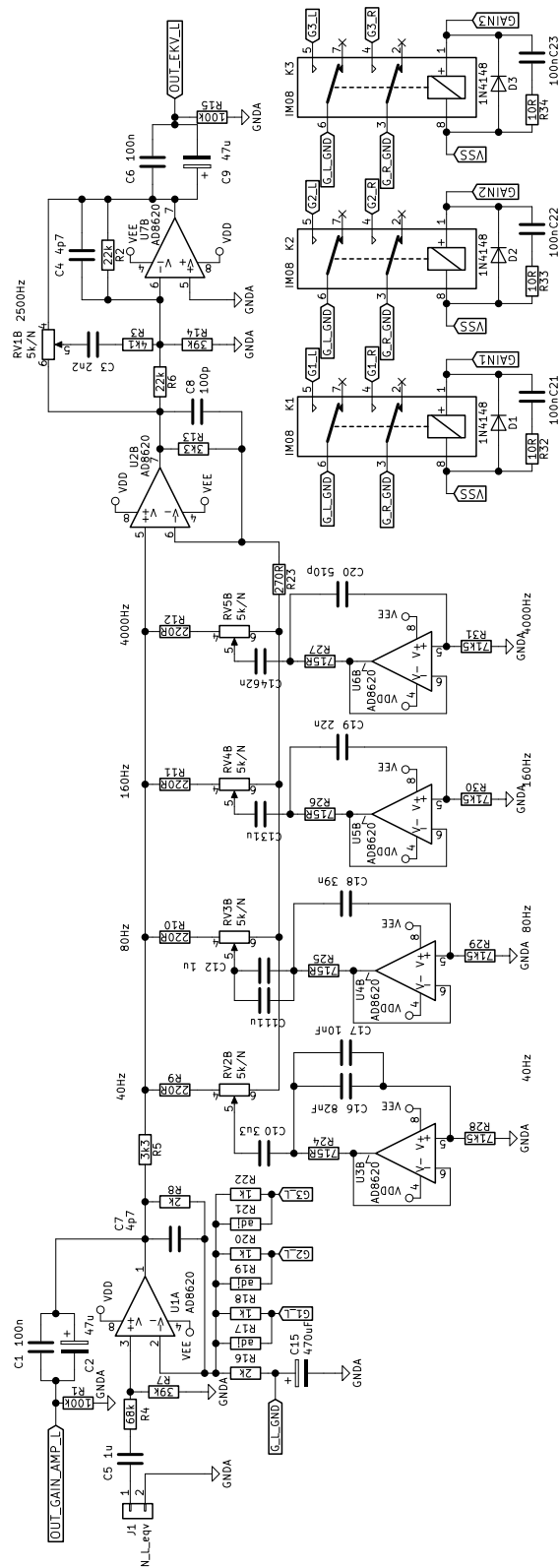
## 2.5.4 Praktický obvodový návrh

Na schématu Obrázek 2.23 jsou určité rozdíly oproti simulovanému zapojení Obrázek 2.17.

Kompletní schéma zapojení je v příloze A.4 Např. byl přidán oddělovací kondenzátor  $C_5$  pro oddělení DC složky. Dále je zde přidán dělič úrovně  $R_4$  a  $R_7$  pro případnou korekci. OZ U1 je základním zesilovací prvkem předzesilovače, jeho zesílení může být změněno třemi relé K1, K2, K3. Pomocí hodnot rezistorů „adj“ se můžou nastavit přesně požadované zesílení a k nim odpovídající citlivosti vstupů. Kondenzátor  $C_{15} = 470 \mu\text{F}$  slouží ke střídavému přizemnění zpětné vazby.

Byly odstraněny i ochranné rezistory  $47 \Omega$  z důvodu nadbytečnosti. Z hlediska dostupnosti kvalitních potenciometrů byly jejich hodnoty změněny na  $5 \text{ k}\Omega/\text{N}$ .

Přidáno přemostění korekcí, a to za pomoci relé K4.



Obrázek 2.23 Schématické zapojení části korekčního modulu – levý kanál

## 2.5.5 Měření a zhodnocení parametrů a funkce

Změřené přenosové frekvenční charakteristiky korekčního modulu

V grafu na Obrázku 2.24 vidíme pět vyobrazených křivek přenosové frekvenční charakteristiky korekčního modulu za různě nastavených potenciometrů.

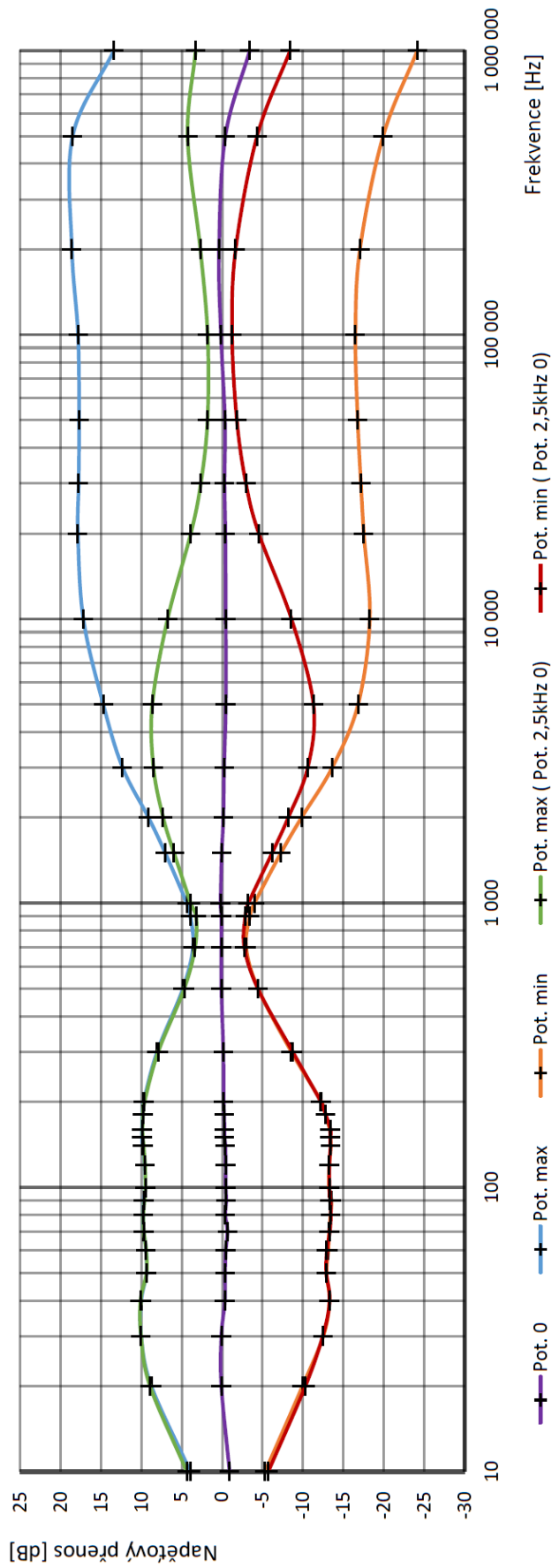
Oproti simulovaným charakteristikám jsou tu různé odchylky. Menší maximální zisk a maximální útlum na spodních pásmech o 2 dB.

Také lze vidět větší zisk ve vyšší frekvenční části okolo 600 kHz, toto mírné zvětšení způsobuje parazitní kapacita spojů v invertujícím vstupu operačního zesilovače, dalo by se kompenzovat zvětšením kondenzátoru ve zpětné vazbě ( $C_8$ ), ale tím by se zhoršili přenosové vlastnosti korekční části.

Jelikož vlastní zisk hlasitostí části je 6 dB a ztráty v signálové cestě 1 dB, tak bylo od naměřených hodnot přenosů odečtena korekční hodnota 5 dB aby výsledné charakteristiky byly symetrické kolem 0 dB, viz fialová křivka z grafu na Obrázku 2.26

V Tabulce 2 pro porovnání nalezneme změřené a vypočítané frekvence jednotlivých frekvenčních

V průběhu testování zapojení byla zjištěna nefunkčnost všech gyrátorů v jednotlivých pásmech. Chyba byla způsobena v návrhu DPS záměnou invertujícího (pin 6) a neinvertujícího (pin 5) pinu operačních zesilovačů (U3, U4, U5, U6). Obnovení funkce modulu bylo zajištěno vhodným křížovým spojením prohozených pinů za pomoci tenkých lakem izolovaných drátků. Výsledné konstrukční řešení je otřesu vzdorné.



Obrázek 2.24 Změřené přenosové frekvenční charakteristiky korekčního modulu



Tabulka 3 Změřené a vypočítané rezonanční frekvence a jakosti jednotlivých pásem korekčního modulu

$f_0$ [Hz]	$f_{0\text{ VYP}}$ [Hz]	$f_{0\text{ MER}}$ [Hz]	$Q_{\text{VYP}}$ [-]	$Q_{\text{MER}}$ [-]
40	39,86	38	1,7	1,2
80	79,45	83	1,414	1,1
160	158,84	165	1,414	1,0
40000	4002,71	4100	0,9	0,8

## 2.6 Výstupní modul

Jedná se o symetrické zapojení operačního zesilovače LM6172 [8] vyobrazené na Obrázku 2.25, z kterého je vyveden MAIN OUT výstup, jak symetrický (XLR) tak i nesymetrický (RCA).

Celkové schéma zapojení je v příloze A.5.

Operační zesilovač LM6172 je schopný vybudit délky kabelů okolo 10 m, tj, parazitní kapacity vedení až několik nF a to dokonce i při nižších zatěžovacích impedancích.

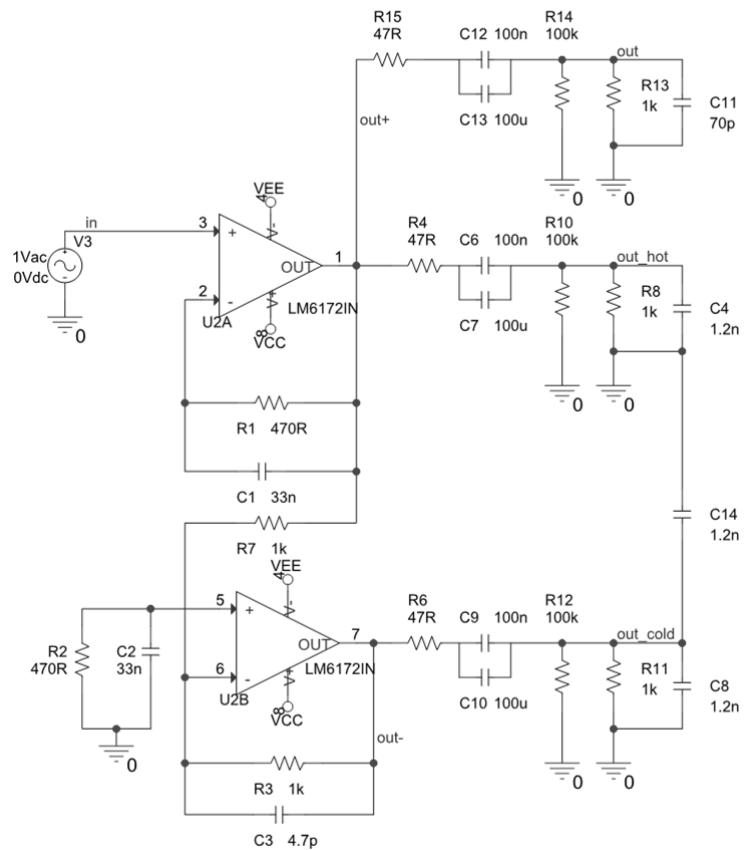
### 2.6.1 Popis návrhu a simulace přenosové frekvenční charakteristiky

Na Obrázku 2.25 je zapojení neinvertujícího OZ  $U_{2A}$ , který je výstupem XLR-hot na tento výstup je připojeno invertující zapojení OZ  $U_{2B}$  tj. výstup XLR-cold. Také z výstupu XLR-hot je vyveden nesymetrický výstup out, který bude ve finálním prototypu reprezentován konektorem typu cinch.

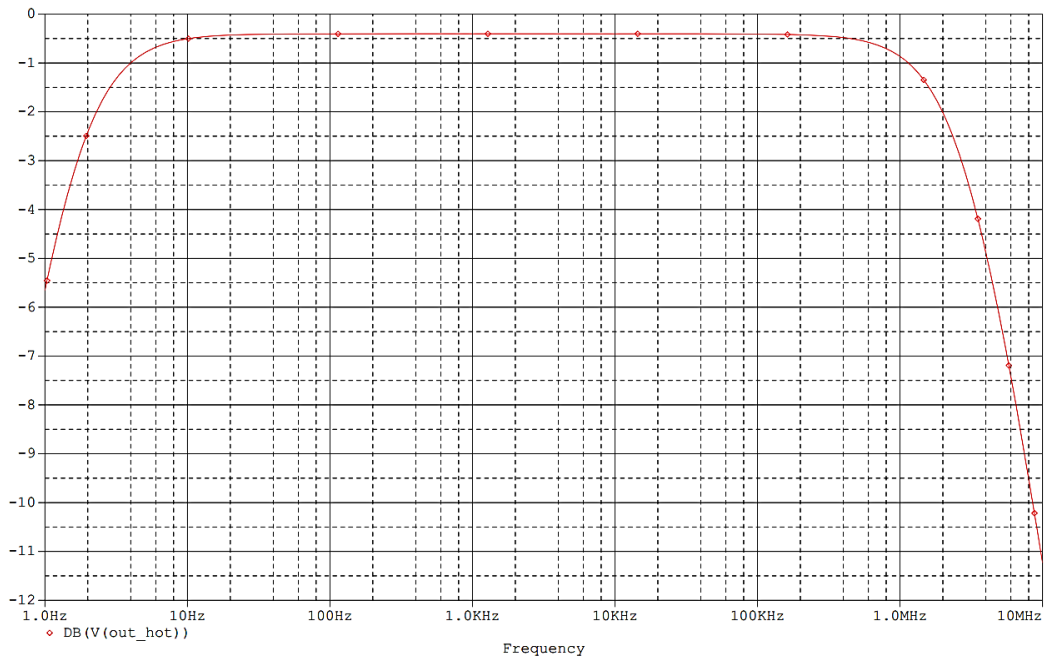
Kondenzátory  $C_6, C_{12}, C_9 = 100\text{nF}$  připojeny paralelně k  $C_7, C_{13}, C_{10} = 100\mu\text{F}$  slouží ke snížení impedance kondenzátoru na vyšších kmitočtech, protože parazitní indukčnost elektrolytického kondenzátoru nám ji zvyšuje, toto opatření zároveň s nízkým výstupním odporem operačního zesilovače  $14\Omega$ , je nutnou podmínkou pro dobrý přenos rychlých hran signálu.

Kondenzátory  $C_{11}, C_4, C_8, C_{14}$  a rezistory  $R_{13}, R_8, R_{11}$  tvoří simulovanou zátěž, kapacitně odpovídající připojeným kabelům v délce 10 m.

Simulovaná přenosová frekvenční charakteristika je vynesena v grafu Obrázku 2.26.



Obrázek 2.25 Schéma zapojení výstupního modulu pro simulaci přenosové frekvenční charakteristiky

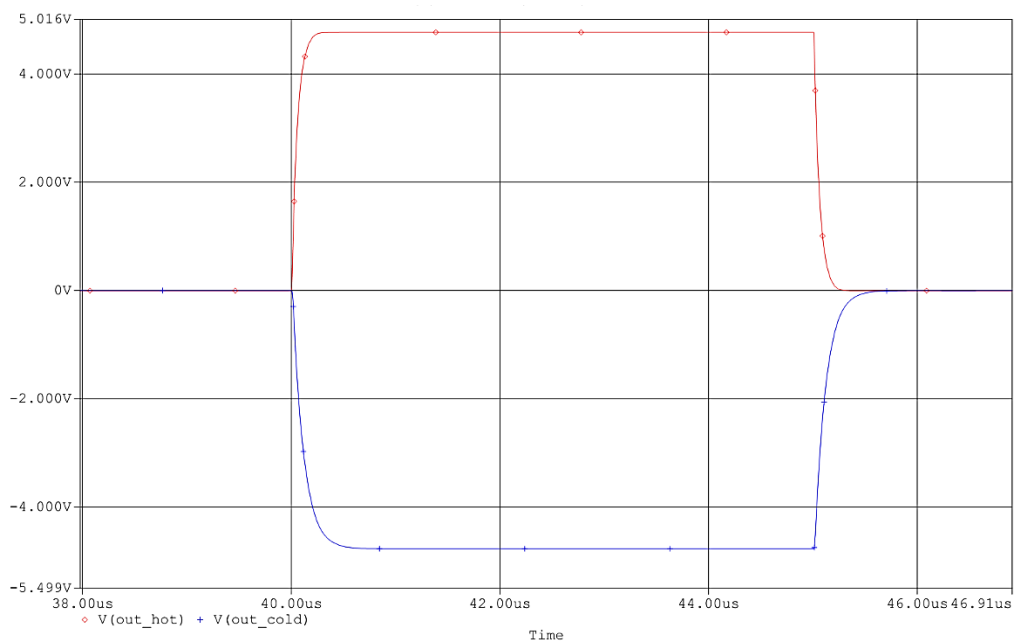


Obrázek 2.26 Přenosová frekvenční charakteristika výstupního modulu

Simulovaná šířka pásma je  $B_{SIM} = 4\text{MHz}$ . Důvodem, proč je šířka pásma tak velká je, že LM7172 je velmi rychlý OZ, s velkou hodnotou rychlosti přeběhu, bez takto rychlého OZ by nebylo možné věrně přenést rychlé změny signálu (nástupné, sestupné hrany).

Na dalším Obrázku 2.27 je zobrazena odezva na obdélníkový průběh napětí.

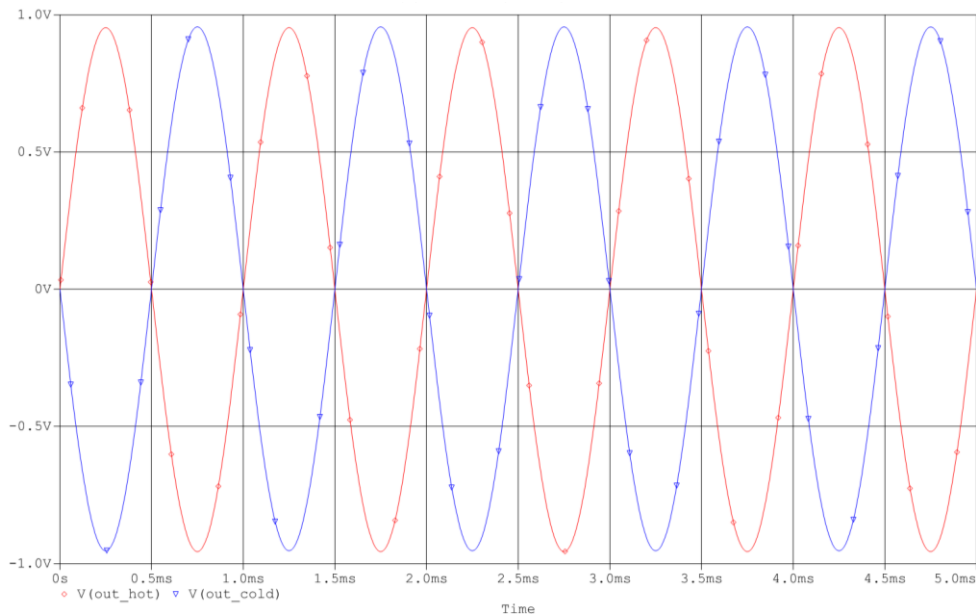
## 2.6.2 Simulace odezvy na obdélníkový signál



Obrázek 2.27 Odezva na obdélníkový signál výstupního modulu

Průběh napětí na výstupech je bez překmitů, podkmitů, či výrazného kmitání. Maximální doby nástupných, sestupných hran jsou do  $t_{RISE\ OUT\ SIM} = 250\text{ ns}$ , což je vynikající hodnota vzhledem k připojené kapacitě  $C_4, C_8 = 1,2\text{nF}$ .

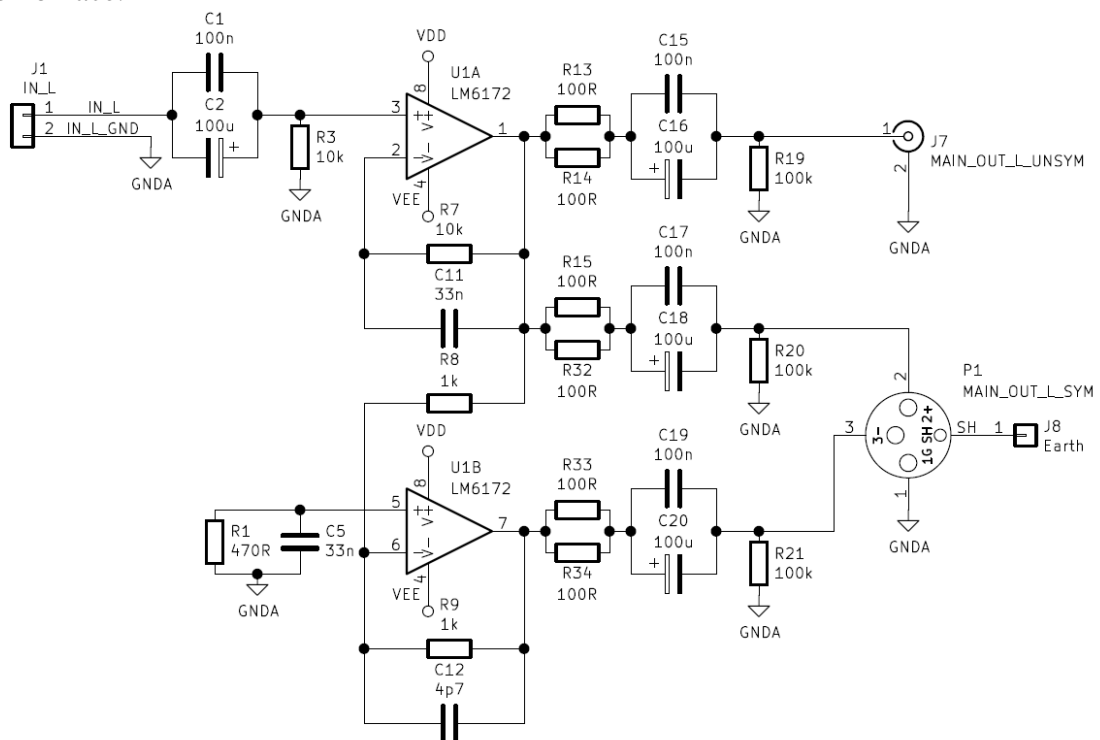
Na dalším Obrázku 2.28 jsou zobrazeny průběhy výstupních napětí, je zde více názorné, že výstup cold je fázově otočen o  $180^\circ$  proti hot výstupu.



Obrázek 2.28 Výstupní průběhy střídavého napětí výstupního modulu

### 2.6.3 Praktický obvodový návrh

Na Obrázku 2.29 vidíme rozdíly oproti schématu pro simulace, byly přidány vazební kondenzátory  $C_1$  a  $C_2$ , dále byl přidán rezistor  $R_3$  a hodnota rezistoru  $R_1$  ( $R_7$ ) byla změněna na  $10\text{ k}\Omega$ , kvůli symetrizaci vstupního proudu OZ. Paralelním spojením výstupních rezistorů  $100\ \Omega$  docílíme většího zatěžovacího ztrátového výkonu této kombinace.



Obrázek 2.29 Schéma části výstupního modulu – levý kanál [4]

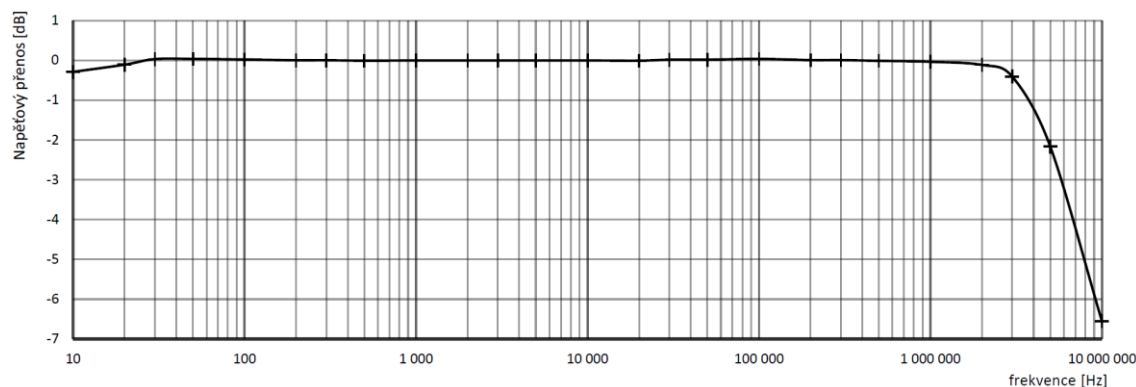
Výrobní podklady jako obrazce plošných spojů, osazovací plány, i fotografie jsou obsaženy v přílohách B.9, B.10 a C.8, C.9, fotografie F.5.

## 2.6.4 Měření a zhodnocení parametrů a funkce

### Měření přenosové frekvenční charakteristiky výstupního modulu

Na Obrázku 2.30 je vynesena přenosová frekvenční charakteristika výstupního modulu, dolní mezní frekvence je pod nejnižší měřenou frekvencí 10 Hz, v grafu na Obrázku 2.25 je dolní mezní frekvence 3 Hz. Takto nízká hodnota přenášené frekvence není pro problém, jelikož přechází zařazené moduly mají na této frekvenci dostatečný útlum, takže se tyto (subsonické) frekvence na výstup nedostanou.

Ze simulací víme, že simulovaná šířka přenášeného pásma je  $B_{SIM} = 4$  MHz a změřená šířka pásma je dokonce o 2 MHz vyšší a je  $B_{MĚŘ} = 6$  MHz.



Obrázek 2.30 Změřená přenosová frekvenční charakteristika výstupního modulu

### Měření odezvy na obdélkový signál symetrického vstupního modulu

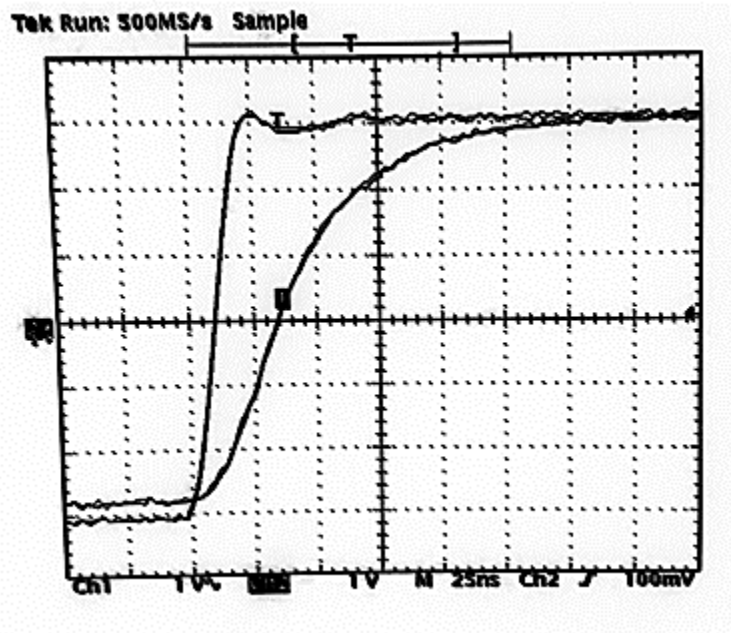
Na obrázku 2.31 je fotografie oscilogramu průběhu odezvy na odelníkovitý signál náběžné hrany.

Na druhém kanálu osciloskopu (dále CH2) je zobrazena nástupná hrana odelníkovitého signálu generovaná signálním generátorem, rychlost nástupné hrany genátoru je  $t_{RISE\ GEN} = 20$  ns. S mírným překmitem způsobeným vyšší vstupní kapacitou výstupního modulu

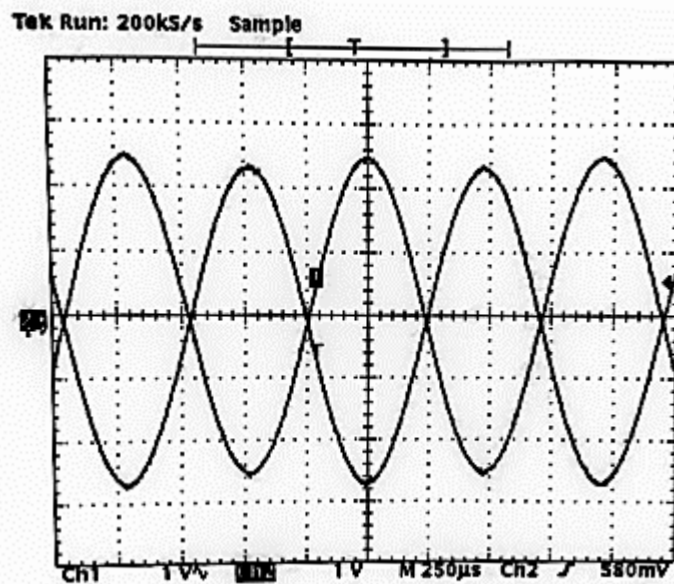
Změřená rychlost náběžné hrany výstupního modulu (CH1) je  $t_{RISE\ OUT\ MĚŘ} = 150$  ns, jelikož jsme při měření zatěžovali výstup poloviční kapacitou  $C_4, C_8 = 470$  pF z důvodu kratšího zatěžovacího vedení, tak je tato hodnota cirka poloviční než simulovaná hodnota,  $t_{RISE\ OUT\ SIM} = 250$  ns, a  $\Delta t_{RISE} = 100$  ns.

V případě zatížení delším symetrickým vedením o kapacitě  $C_4, C_8 = 1,2$  nF by měla doba náběžné hrany prodloužit s odhadem na  $t_{RISE\ OUT\ 1,2nF} = 300$  ns.

Průběh nástupné hrany je bez překmitů a oscilací, je sice pomalejší, ale zato absolutně stabilní, nehrozí tak možnost nástupu nežádoucího kmitání. Průběh sestupné hrany je stejný.



Obrázek 2.31 Změřená odezva na obdélníkový signál výstupního modulu



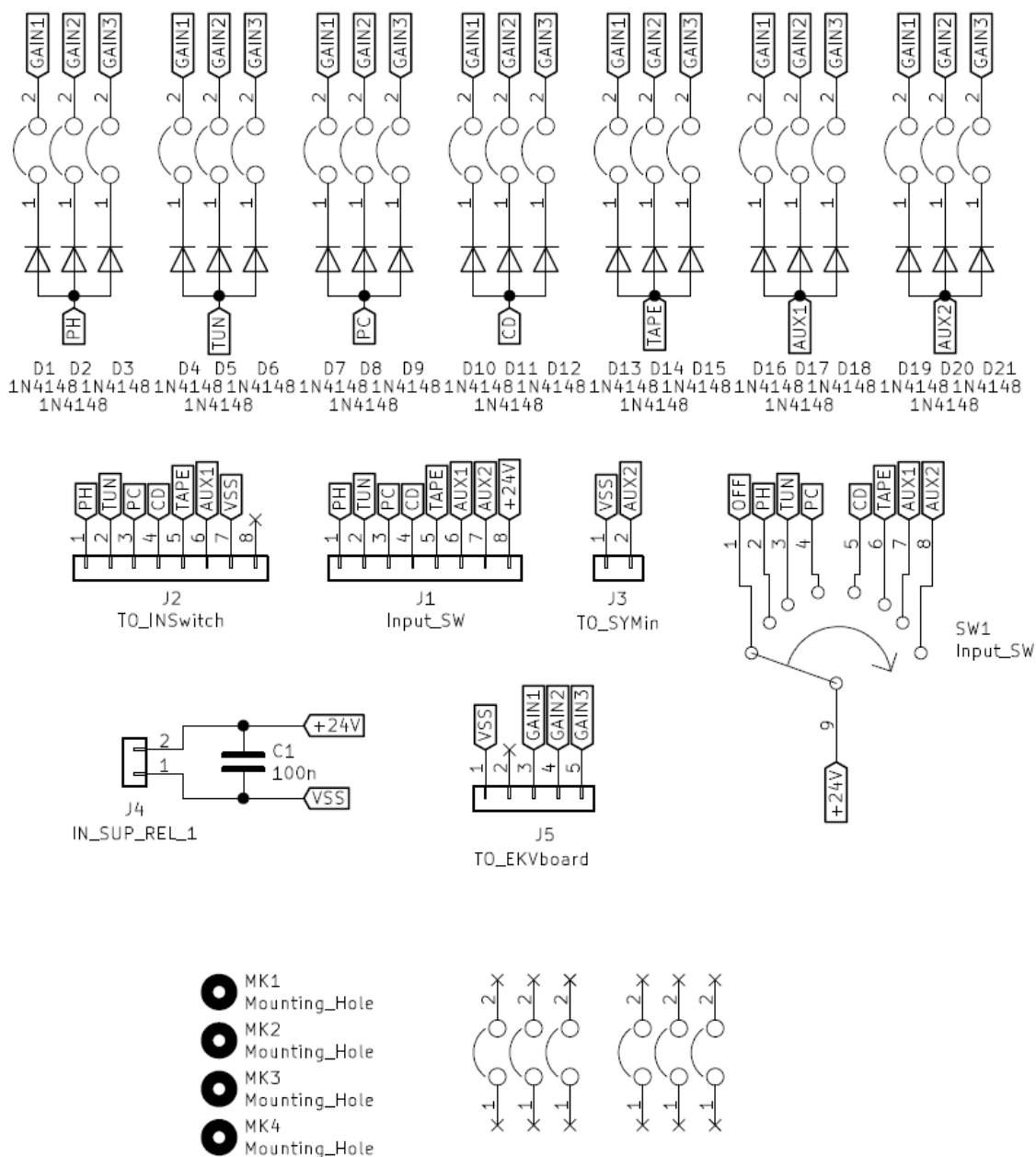
Obrázek 2.32 Výstupní průběhy napětí výstupního modulu

Na Obrázku 2.32 je zobrazený oscilogram průběhu výstupních napětí. Jak z výstupu HOT tak z výstupu COLD, který je fázově otočen o  $180^\circ$

## 2.7 Řídicí modul

### 2.7.1 Praktický obvodový návrh

Za pomoci otočného osmi polohového přepínače SW1 viz Obrázek 2.23, je možné volit požadovaný vstup a zároveň i jeho citlivost. Nastavení citlivosti (zesilení) vstupů se provádí propojkami (jumpery), možnost k základní citlivosti přidat 3–9 dB. Diody  $D_1$ – $D_{21}$  slouží k tomu, aby nám volba zesilení propojkou nezapínala vypnuté vstupní relé a nenavolené GAIN relé.



Obrázek 2.33 Celkové schéma zapojení řídicího modulu

Výrobní podklady jako obrazce plošných spojů, osazovací plány, i fotografie jsou obsaženy v přílohách B.11, B.12 a C.10, C.11, fotografie F.6 .

## 2.8 Napájecí modul

### 2.8.1 Praktický obvodový návrh

Z externího napájecího zdroje se přivede stejnosměrné napětí  $U_{SUPP} = \pm 14$  V a přes hlavní vypínač předzesilovače Sw1 se napájecí napětí spíná na modul napájecího zdroje viz Obrázek 2.34. Pojistky  $F_1, F_2$  spolu s transily (rychlá zenerova dioda konstruovaná na vyšší zkratové proudy)  $D_1, D_2$  zajišťují nadproudovou a přepětovou ochranu, která je nastavena na 1 A a 15,6 V, následuje LC (cívka, kondenzátor) filtr typu dolní propust 2.řádu ( $L_1, C_2$ ), pro omezení vf rušení po napájecím vedení.  $C_1$  slouží k vyhlazení zvlnění napájecího napětí.

RC článek ( $R_1, C_3, C_5, C_4$ ) slouží k dostatečnému vyhlazení zvlnění napájecího napětí

$D_2, D_4$  jsou ochranné diody, následuje vybíjecí rezistor  $R_2$  a napájecí konektory symetrického napájecího napětí.

Pro napájení relétek byl zvolen stabilizátor se zenerovou diodou ( $R_4, D_5$ ). Napájecí napětí pro relé je 24 V. Výpočet hodnoty rezistoru viz vztah (3.17) [4]

$$R_4 = \frac{U_{cc} - R_{zd}}{I_{zmax}} = \frac{30 - 24}{0,035} = 171,42 \Omega \doteq 180 \Omega \quad (3.17)$$

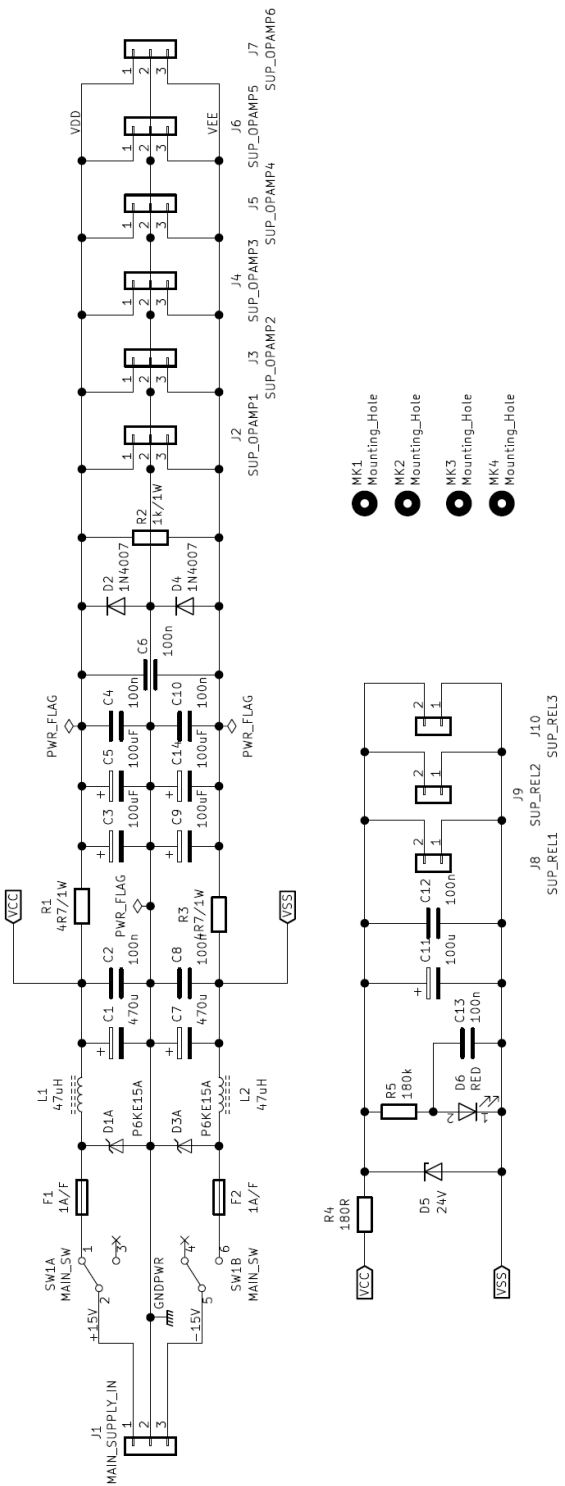
Za stabilizátorem je zapojena signální LED ( $D_6$ ), která je zablokovaná proti šumu kondenzátorem  $C_{13}$ , následuje dodatečná filtrace ( $C_{11}, C_{12}$ ) dále pak již samotné konektory pro napájení relé.

### 2.8.2 Měření a zhodnocení parametrů a vlastností

Po připojení napětí  $U_{SUPP} = \pm 14$  V na vstup napájecího modulu nám vlivem úbytků na rezistorech  $R_1, R_3$  pokleslo napájecí napětí pro operační zesilovače  $U_{SUPP OZ} = \pm 13,6$  V, tento pokles na celkovou funkci nebude mít vliv, i tak je dost vysoká napájecí rezerva.

Změřené napájecí napětí pro relé naprázdno je  $U_{SUPP REL 0} = 23,7$  V, při zatížení proudem odpovídající zapnutí pěti signálových relé, tj. 25 mA napětí pokleslo na  $U_{SUPP REL Z} = 22,4$  V. Při této hodnotě relé stále spolehlivě spínají.





- MK1 Mounting\_Hole
- MK2 Mounting\_Hole
- MK3 Mounting\_Hole
- MK4 Mounting\_Hole

Obrázek 2.34 Celkové schéma napájecího zdroje

Výrobní podklady jako obrazce plošných spojů, osazovací plány, i fotografie jsou obsaženy v přílohách B.13, B.14 a C.12, fotografie F.7.

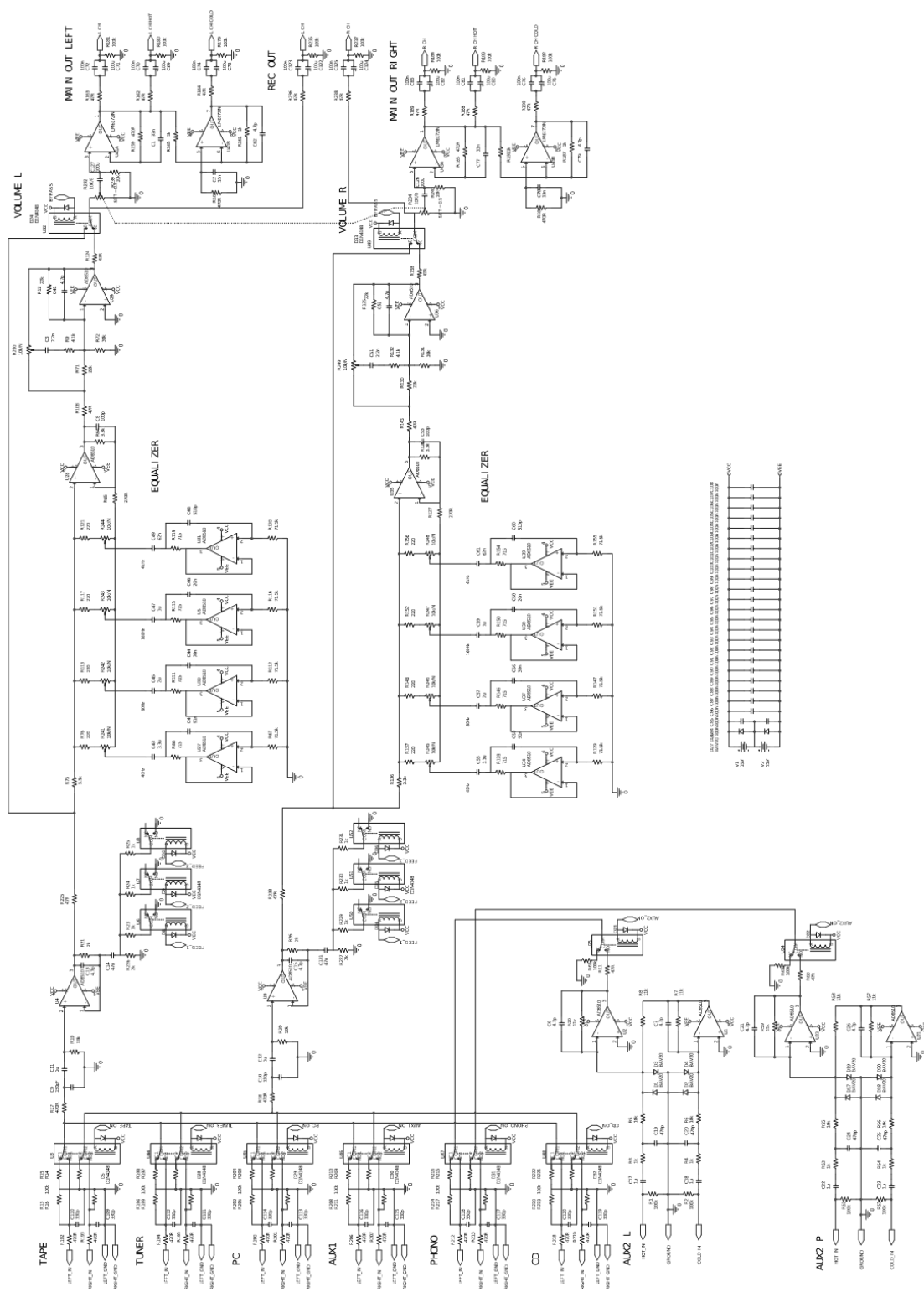
# **3 NÁVRH A REALIZACE CELKOVÉHO ZAPOJENÍ PŘEDZESILOVAČE A PROTOTYPU**

Obsahem této kapitoly je spojení všech simulovaných a otestovaných modulů předzesilovače do celkového zapojení předzesilovače, simulace a následné měření přenosové frekvenční charakteristiky, měření celkového zkreslení a šumu (THD+noise), a zkreslení 2. a 3. harmonickou složkou výstupního napětí.

Porovnání teoreticky navržené vstupní citlivosti. Reálné maximální možné výstupní napětí předzesilovače a doplňující informace k měření. Vrtací návrhy předního a zadního panelu, celková kompozice a výroba funkčního prototypu.

## **3.1 Celkové zapojení předzesilovače pro simulaci**

Jednotlivé moduly samotného předzesilovače budou spojeny do funkčního celku viz Obrázek 3.1 tak jak je uvedeno v blokovém schématu na Obrázku 2.1, následují simulace a měření k ověření funkčnosti a správnosti teoreticky navržených parametrů.



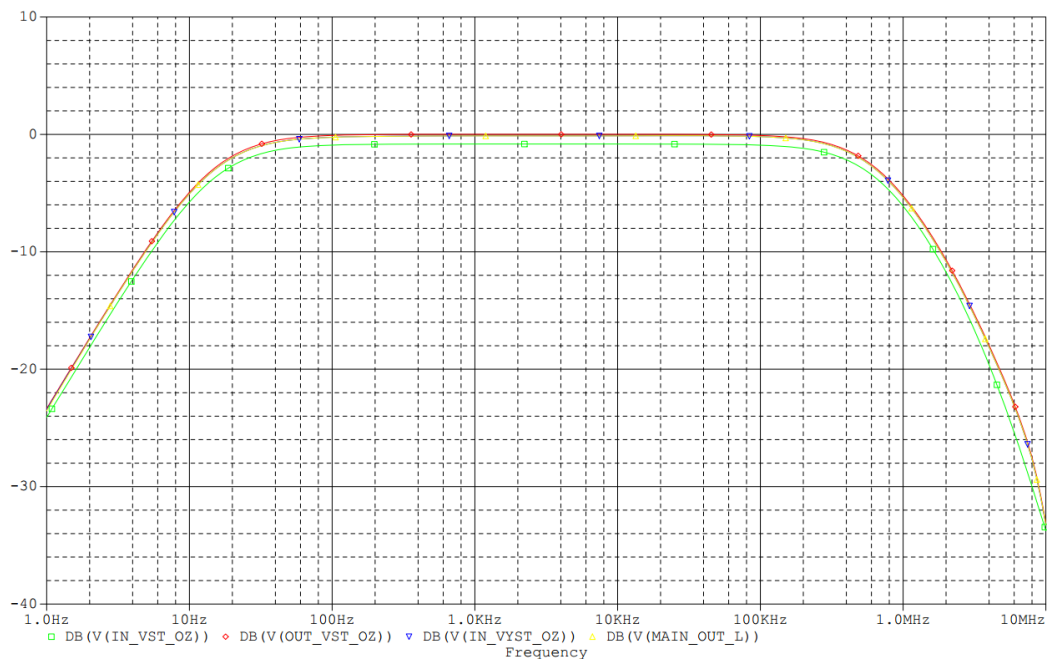
Obrázek 3.1 Celkové schéma zapojení ekvalizéru pro simulace

## 3.2 Simulace a měření

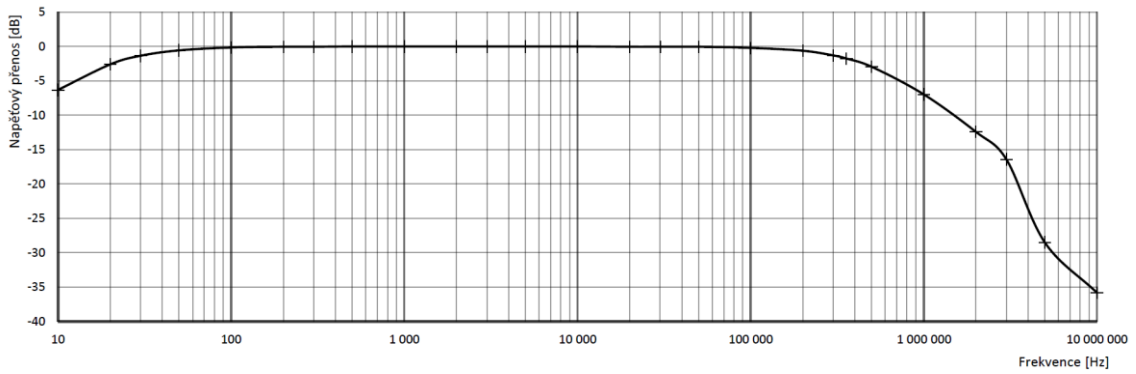
V následující kapitole budou uvedeny simulace a měření přenosové frekvenční charakteristiky předzesilovače, měření a korektura vstupní citlivosti a její rozdělení, dále měření zkreslení, šumu, přeslechu, maximálního výstupního napětí.

### 3.2.1 Přenosová frekvenční charakteristika předzesilovače s přemostěnou kmit. korekcí

Na obrázku (Obr. 3.2) je zobrazena simulovaná přenosová frekvenční charakteristika předzesilovače. Zelená křivka je měření na neinvertujícím vstupu OZ U4, červená platí pro jeho výstup. Modrá křivka odpovídá měření na neinvertujícím vstupu OZ U4a a žlutá platí pro jeho výstup (skrytá pod červenou), tzn. hlavní výstup předzesilovače.



Obrázek 3.2 Přenosová frekvenční charakteristika předzesilovače s přemostěnou kmitočtovou korekcí



Obrázek 3.3 Změřená přenosová frekvenční charakteristika předzesilovače s přemostěnou kmitočtovou korekcí

Změřená dolní mezní frekvence  $f_{D\text{ MĚŘ}} = 17,5$  Hz, rozdíl oproti teoretické hodnotě  $f_{D\text{ SIM}} = 15,5$  Hz je  $\Delta f_D = 2$  Hz. Naměřená horní mezní frekvence je  $f_{H\text{ MĚŘ}} = 494$  kHz a její rozdíl oproti teoretické hodnotě  $f_{H\text{ SIM}} = 450$  kHz je  $\Delta f_H = 44$  kHz.

Tabulka 4 Teoretické, simulované a měřené parametry předzesilovače

Parametr	Symbol	Teoretická hodnota	Simulovaná hodnota	Měřená hodnota	Jednotka
Vstupní citlivost	$U_{CIT\ PRE}$	0,775	0,7738	0,775V	V
Šířka pásma	$B_{PRE}$	349,584	449,984	493,982	kHz
Dolní mez. frekv.	$f_{DOL\ PRE}$	15,9	15,55	17,5	Hz
Horní mez. frekv.	$f_{HOR\ PRE}$	335,2	450	494	kHz
Vstupní impedance	$Z_{IN\ PRE}$	4,443	4,358	3,950	k $\Omega$
Výstupní impedance	$Z_{OUT\ PRE}$	50	65	64	$\Omega$

### 3.2.2 Měření a korekce vstupní citlivosti předzesilovače [2]

Výstupní citlivost v našem případě je definovaná pro výstupní napětí předzesilovače 1 V (Plné vybuzení připojeného koncového zesilovače), její hodnota se pohybuje  $U_{CIT\ PRE\ MĚŘ} = (0,387-1,55)$  V a její hodnotu je možné nastavit pro jednotlivé vstupy ve 4 možnostech uvedených v Tabulce 4.

Základní citlivost  $U_{CIT\ PRE\ MĚŘ} = 0,775$  V (linková) byla do nastavena hodnotami rezistorů v korekčním modulu, jedná se o rezistory  $R_4 = 0$   $\Omega$ ,  $R_7 = 100$  k $\Omega$ . zapojené v napěťovém děliči neinvertujícím vstupu OZ U1 namísto nich byl připojen odporový trimr (proměnný 3 vývodový rezistor), tím se nastavila požadovaná linková citlivost. Po změření jeho rezistivity byl nahrazen opět rezistorovým děličem o hodnotách rezistorů vybrané z řady E12,  $R_4 = 68$  k $\Omega$ ,  $R_7 = 39$  k $\Omega$ .

Tabulka 5 Změřené hodnoty citlivosti předzesilovače

Parametr	Symbol	Teoretická hodnota	GAIN 0	GAIN 1	GAIN 2	GAIN 3
Vstupní citlivost	$U_{CIT\ PRE\ MĚŘ}$	775 mV	1,55V	775 mV	510mV	387mV

### 3.2.3 Měření celkového zkreslení a šumu THD+noise [2]

Z angl. Total Harmonic Distortion + noise neboli celkové harmonické zkreslení + šum.

Hodnoty uvedeny v Tabulce 5 jsou měřeny při frekvenci 1 kHz, při maximální nastavené hlasitosti (potenciometr hlasitosti vytočen v pravém dorazu) a měříme na vstupu PHONO.

Tabulka 6 Naměřené hodnoty celkového zkreslení a šumu THD+noise

$U_{OUT\ PRE}$	THD+noise generátoru	THD+noise S přemostěnou korekcí	THD+noise S maximální korekcí všech pásem	Poznámky k měření
100 mV	0,042 %	0,81 %	4 %	Dominantní šum
645 mV	0,021 %	0,045 %	0,86 %	-
7,94 V	0,023 %	0,034 %	0,106 %	Těsně pod limitací

Hodnoty zkreslení při amplitudě 100 mV výstupního napětí byly ovlivněny zesílením korekčního modulu, a to hlavně na frekvencích od 2,5 kHz až k horní hranici přenášeného pásma, takže se tím hlavně zesílil šum a ten se také podílel na měřených hodnotách.

### 3.2.4 Měření zkreslení 2. a 3. harmonickou složkou výstupního napětí [2]

Měření prováděno na vstupu PHONO a na frekvencích 1 kHz a 10 kHz při amplitudách 1 V a 7 V výstupního napětí. Měřeno s přemostěnou korekcí a maximální korekcí všech pásem Hodnoty uvedeny v Tabulce 6.

Tabulka 7 Naměřené hodnoty zkreslení 2. a 3. harmonickou složkou

$U_{OUT\ PRE}$	$f_{OUT\ PRE}$	Zkreslení 2. harm. složkou			Zkreslení 3. harm. složkou		
		Gen.	Bez korekce	S max. korekcí	Gen.	Bez korekce	S max. korekcí
1 V	1 kHz	0,002 %	0,002 %	0,012 %	0,004 %	0,005 %	0,006 %
1 V	10 kHz	0,004 %	0,006 %	0,004 %	0,004 %	0,006 %	0,005 %
7 V	1 kHz	0,005 %	0,005 %	0,018 %	0,004 %	0,004 %	0,006 %
7 V	10 kHz	0,006 %	0,007 %	0,012 %	0,004 %	0,004 %	0,006 %

Zkreslení nepřesáhlo 0,018 % a minimální hodnoty byly na mezi zkreslení generátoru 0,002 %.

### 3.2.5 Měření maximálního výstupního napětí

Při napájecím napětí  $U_{SUPP} = \pm 14\text{ V}$  byla změřena maximální hodnota výstupního napětí těsně pod amplitudovou limitací, a to  $U_{OUT\ PRE\ MAX} = 8,19\text{ V}$ .

### 3.2.6 Měření přeslechu kanálů [2]

Maximálně vybudíme levý kanál vstupu PHONO předzesilovače na,  $U_{OUT\ L} = 8,19\text{ V}$ , a při frekvenci 1 kHz měříme na pravém kanálu rušivý signál  $U_{RUŠ\ R} = 460\ \mu\text{V}$  změřené hodnoty napětí dosadíme do vzorce (3.18). Vypočtená hodnota přeslechu  $CRT = -85\text{ dB}$  odpovídá rušivému napětí cca 17 000x menšímu, než je napětí na výstupu buzeného kanálu  $U_{OUT\ L} = 8,19\text{ V}$ . Při takovém potlačení není narušen prostorový (stereo) přednes.

Vztah pro výpočet přeslechu levého kanálu

$$CRT = 20\log \frac{U_{RUŠ\ R}}{U_{OUT\ L}} = 20\log \frac{460 \cdot 10^{-6}}{8,19} = -85\text{ dB} \quad (3.18)$$

### 3.2.7 Měření rychlosti přeběhu SR

Z angl. Slew rate, nám udává za jak rychle na stoupá napětí náběžné hrany výstupu zesilovače do maxima, při buzení vstupu obdélníkovým průběhem napětí a udává se ve  $[\text{V}/\mu\text{s}]$ .

Celková naměřená hodnota rychlosti přeběhu je  $SR_{MĚŘ} = 18\text{ V}/\mu\text{s}$ .

### 3.2.8 Použité měřicí přístroje

<u>Generátory</u>	– Tesla BM492, Tektronix TM515, Agilent 33220A
<u>Osciloskopy</u>	– Tektronix TDS 320, TM 515, HP 54603B, Tesla BM 566
<u>Napájecí zdroje</u>	– Tektronix TM515, MCP M10-DP_305E
<u>Nf. Milivoltmetr</u>	– Grundig MV100

## 3.3 Konstrukční realizace prototypu

Poslední kapitola shrnuje konstrukci prototypu neboli samotná montáž jednotlivých modulů předzesilovače do kovové krabice.

### 3.3.1 Výběr vhodné instalační krabice

Kvůli elektromagnetickému a elektrostatickému stínění jsem zvolil materiál z kterého je skříň vyrobena, jako kombinaci hliníku a železných plechů. Byla vybrána racková krabice (1U, 40 mm výška) se zadním panelem z eloxovaného hliníku o 5 mm tloušťce a se spodními a vrchními víky z železného 1 mm plechu a vnitřními rozměry 415x350x40 mm (šířka x hloubka x výška) viz fotografie na Obrázku 3.4.



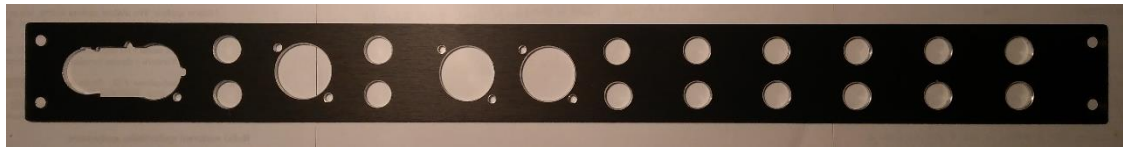
Obrázek 3.4 Fotografie montážní krabice 1U [10]



### 3.3.2 Výrobní proces prototypu

Kvůli galvanickému oddělení a zamezení případných zkratů byly samotné moduly v krabici přichyceny za pomoci plastových distančních sloupků.

Vrtání předních a zadních panelů se provádělo na pomaluběžné stojanové vrtačce za pomoci speciálního vrtáku ve tvaru stromečku, mazáno řezným olejem, výsledek na fotografii Obrázek 3.5.



Obrázek 3.5 Fotografie navrtnaného zadního panelu

Dále byl zadní panel osazen zlacenými nebo stříbřenými konektory značky Rean a Neutrik viz fotografie na Obrázku 3.6



Obrázek 3.6 Fotografie osazeného zadního panelu

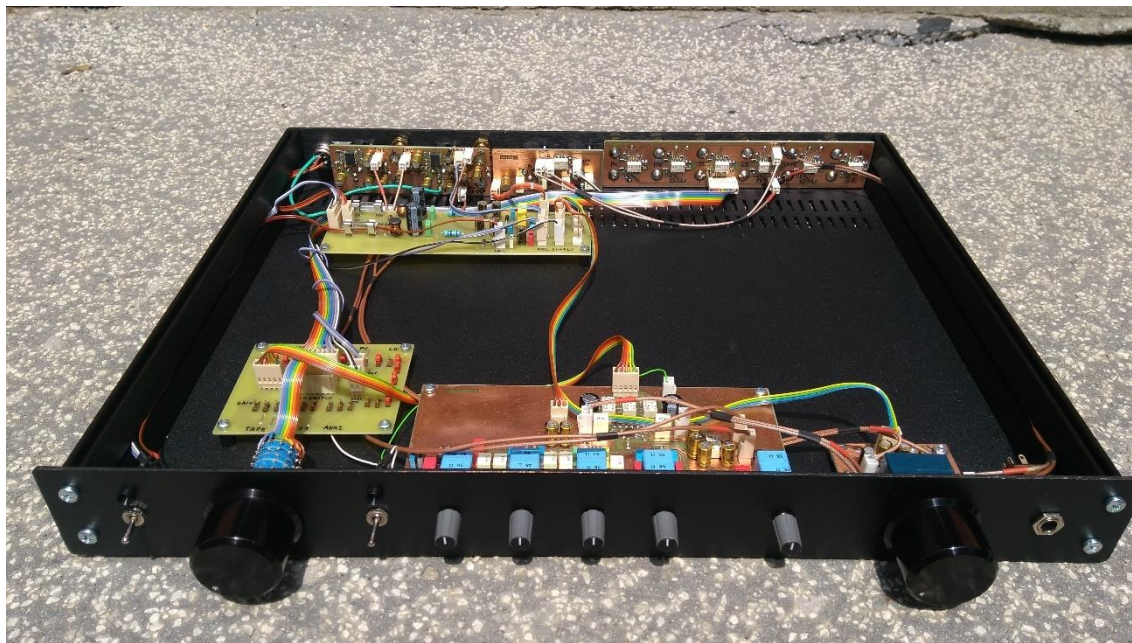
Dodávaný přední panel byl nahrazen kuprextitem, který byl očištěn od mastnoty, zdrsněn a nalakován matným černým lakem, který byl následně při teplotě 200 °C vytvrzen. Fotografie z lakování je zobrazena na Obrázku 3.7



Obrázek 3.7 Lakování předního panelu

Následuje celková montáž, zapojení a oživení. Oživení probíhalo po modulech, kdy se postupně připojovalo napájecí napětí na jednotlivé moduly přes ochranné rezistory zařazené sériově v napájecích větvích ( $100\ \Omega$ ), na kterých se měřil úbytek napětí a po přepočtu také napájecí proud, pokud proud enormně nepřesáhne teoretickou hodnotu můžeme přistoupit k jednotlivým měřením k ověření funkce a parametrů

Na Obrázku 3.8 a 3.9 vidíme finální verzi prototypu předzesilovače.



Obrázek 3.8 Fotografie otevřené krabice prototypu předzesilovače



Obrázek 3.9 Fotografie prototypu předzesilovače

# ZÁVĚR

Vzhledem k vytyčeným cílům práce se dosáhlo téměř plné úspěšnosti návrhu. Výstupní parametry jednotlivých modulů předzesilovače byly ověřeny zkušebním měřením. Jejich hodnoty se pohybovali v rámci teoretických předpokladů, případně s minimálními odlišnostmi.

Krátkými poslechovými testy na profesionální aparatuře se zjistilo, že stanovených cílů bylo plně dosaženo. Promyšleným návrhem došlo k eliminaci parazitních ovládacích vlastností, jako je praskání při přepínání. Nebo také při počátečním zapnutí přístroje, kdy se natavují pracovní body.

Při návrhu konstrukčního řešení a následné kontrole funkce korekčního modulu byla zjištěna chyba návrhu desky plošného spoje. Vzhledem k časové náročnosti výroby DPS s opraveným designem bylo rozhodnuto chybu odstranit na vyrobeném prototypu. Měřením se ověřila 100% funkčnost opraveného modulu a zjistilo se, že některé parametry se mírně odchyľují od očekávaných.

Mechanická konstrukce byla vhodně zvolena s ohledem na plánovaná rozšíření, mezi které patří zejména o tranzistorový sluchátkový předzesilovač nebo o aktivní výhybku pro subwoofer či modul ovládání zapínání externího zdroje. Z těchto důvodů bylo rozhodnuto použít namísto eloxovaného 10 mm tlustého předního panelu kuprextit. Ten pro aktuální koncepci dostatečně poskytuje mechanickou oporu pro ovládací prvky.

Nevhodně hodnotím zvolené konektory na desce plošných spojů z hlediska mechanických a elektrických vlastností. Ostatní precizní konektory použité na panelech se maximálně osvědčily.

Byly použity operační zesilovače dodané od zahraničního distributora z portálu eBay.com. Za dostupných podmínek pro měření byly ověřeny základní parametry, které se shodovaly s katalogovými. Z ekonomického hlediska je toto řešení nejvýhodnější.

Závěrem bych práci zhodnotil jako přínosnou. V mnoha ohledech byla teoreticky i prakticky přínosná. Samotné zařízení je vhodné jak pro domácí kvalitní poslech, ale tak i v profesionální použití.

# LITERATURA

- [1] WIRSUM, Siegfried. Abeceda nf techniky. Praha: BEN - technická literatura, 1998. ISBN 80-86056-26-0.
- [2] KOTISA, Zdeněk. NF zesilovače. Praha: BEN - technická literatura, 2003. ISBN 80-7300-065-2.
- [3] METZLER, B. Audio Measurement Handbook. Beaverton, Audio Presision, Inc., 1993.
- [4] PUNČOCHÁŘ, Josef. Operační zesilovače v elektronice. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-059-8
- [5] ALLEN & HEATH. GL 2200 Service Manual. [online]. [cit. 2018-05-24] 2017. Dostupné z: <https://www.manualslib.com/manual/849436/Allen-And-Heath-Gl-2200.html>
- [6] KARKOŠKA, J. Ekvalizér s korekcí hlasitosti pro laboratorní výuku. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2017. 43 s., 8 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.
- [7] AD8510/AD8512 Operational Amplifier Datasheet [online], [cit. 2018-05-24] Analog Devices, 2017 Dostupné z: [http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8510\\_8512\\_8513.pdf](http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8510_8512_8513.pdf)
- [8] LM6172 Feedback Amplifer Datasheet [online], [cit. 2018-05-24] Texas Instruments, 2013 Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm6172.pdf>
- [9] MACKIE FUSION 3000 Service Manual [online] [cit. 2018-05-24], 2000 Dostupné z : [https://elektrotanya.com/mackie\\_fusion\\_1800sa\\_1800s\\_3000.rar/download.html](https://elektrotanya.com/mackie_fusion_1800sa_1800s_3000.rar/download.html)
- [10] ISL01350N [online]. [cit. 2018-05-24]. Dostupné z: <http://www.modushop.cz/ISL01350N-1u-rack-krabice-s-listou-350mm-4mm-rack-panel-cerny.html>

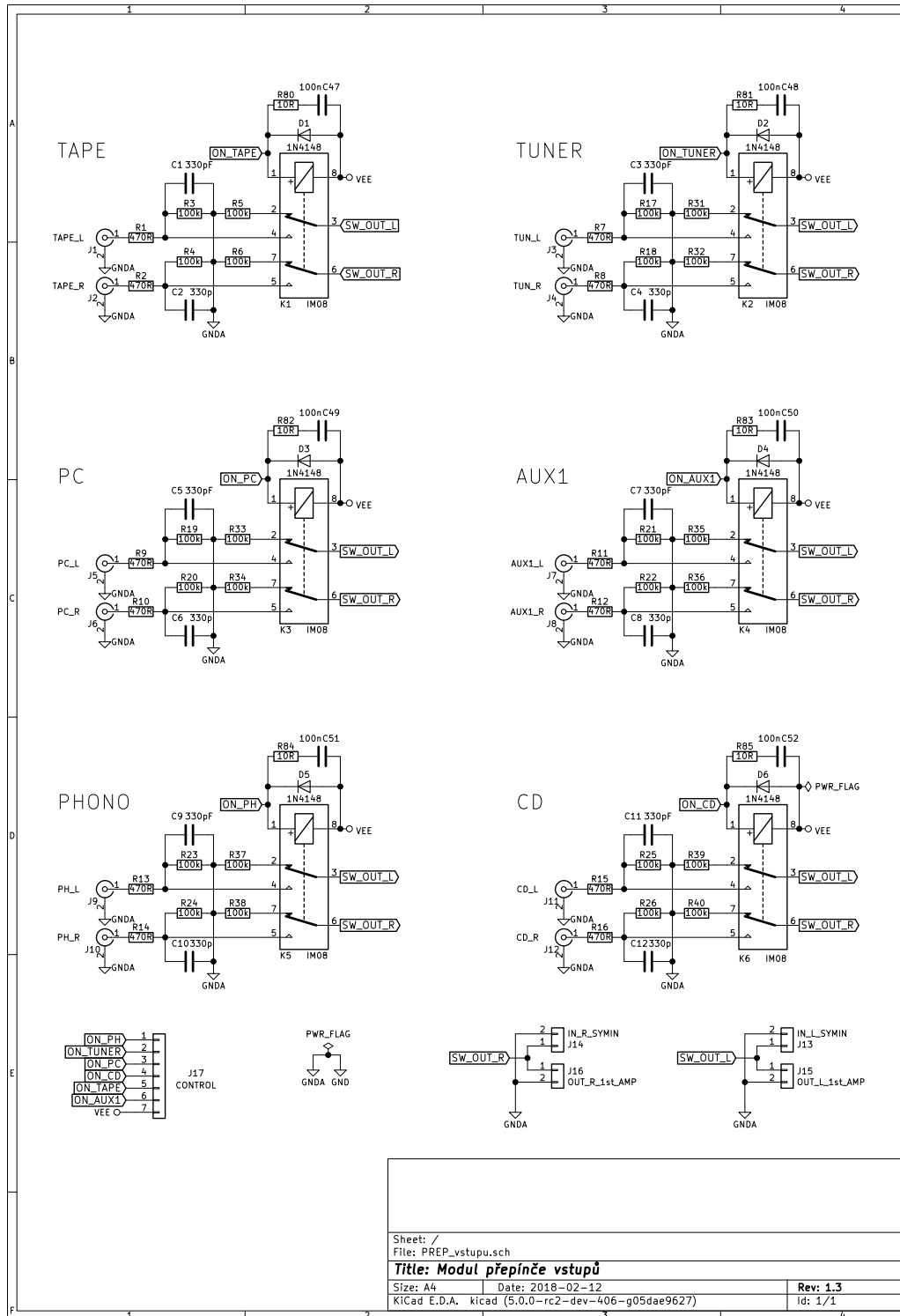
# SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

$f$	Frekvence
$f_0$	Rezonanční frekvence
$U$	Elektrické napětí
$I$	Elektrický proud
$Z$	Impedance
$R$	Rezistor
$L$	Cívka, elektrická indukčnost
$C$	Kondenzátor, elektrická kapacita
$D$	Dioda
$B$	Šířka pásma
$Q$	Jakost
$t$	Čas
$A_u$	Napět'ový přenos
$G$	Napět'ový zisk
$dB$	Logaritmická jednotka
RC	Rezistor, kondenzátor článek
CR	Kondenzátor, rezistor článek
ZV	Zpětná vazba
OZ	Operační zesilovač
EQ	Equalizer, ekvalizér
CH	Channel- kanál
SRO	Sériový rezonanční obvod
THD	Total harmonic distortion, celkové harmonické zkreslení
CMR	Common mode rejection – činitel potlačení souhlasného signálu
SR´	Slew rate – rychlost přeběhu
CRT	Crosstalk - přeslech
XLR	Typ symetrického konektoru
RCA	Typ nesymetrického konektoru (cinch)
REC	Record – nahrávání, nahrávací

LED	Light emitting diode – elektroluminiscenční dioda
DPS	Deska plošných spojů
K	Relé
s/š	Signál/šum
DC	Direct current – stejnosměrný proud
$U_{CC}$	Kladné napájecí napětí stejnosměrné
$U_{EE}$	Záporné napájecí napětí stejnosměrné

# A SCHÉMATA ZAPOJENÍ

## A.1 Schéma zapojení modulu přepínače vstupů

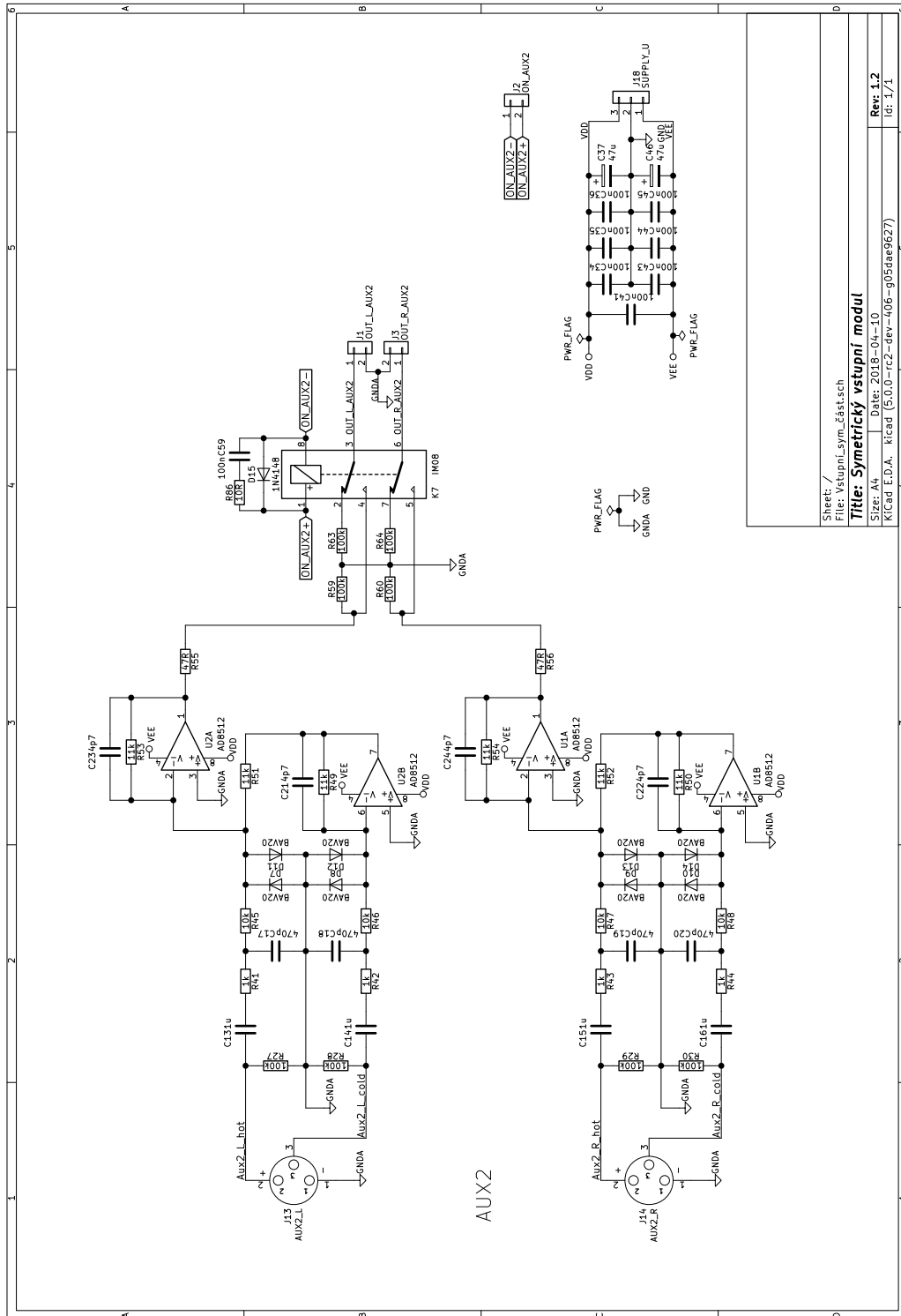


Sheet: /  
 File: PREP\_vstupu.sch  
**Title: Modul přepínče vstupů**  
 Size: A4 Date: 2018-02-12 Rev: 1.3  
 KiCad E.D.A. kicad (5.0.0-rc2-dev-406-g05dae9627) Id: 1/1



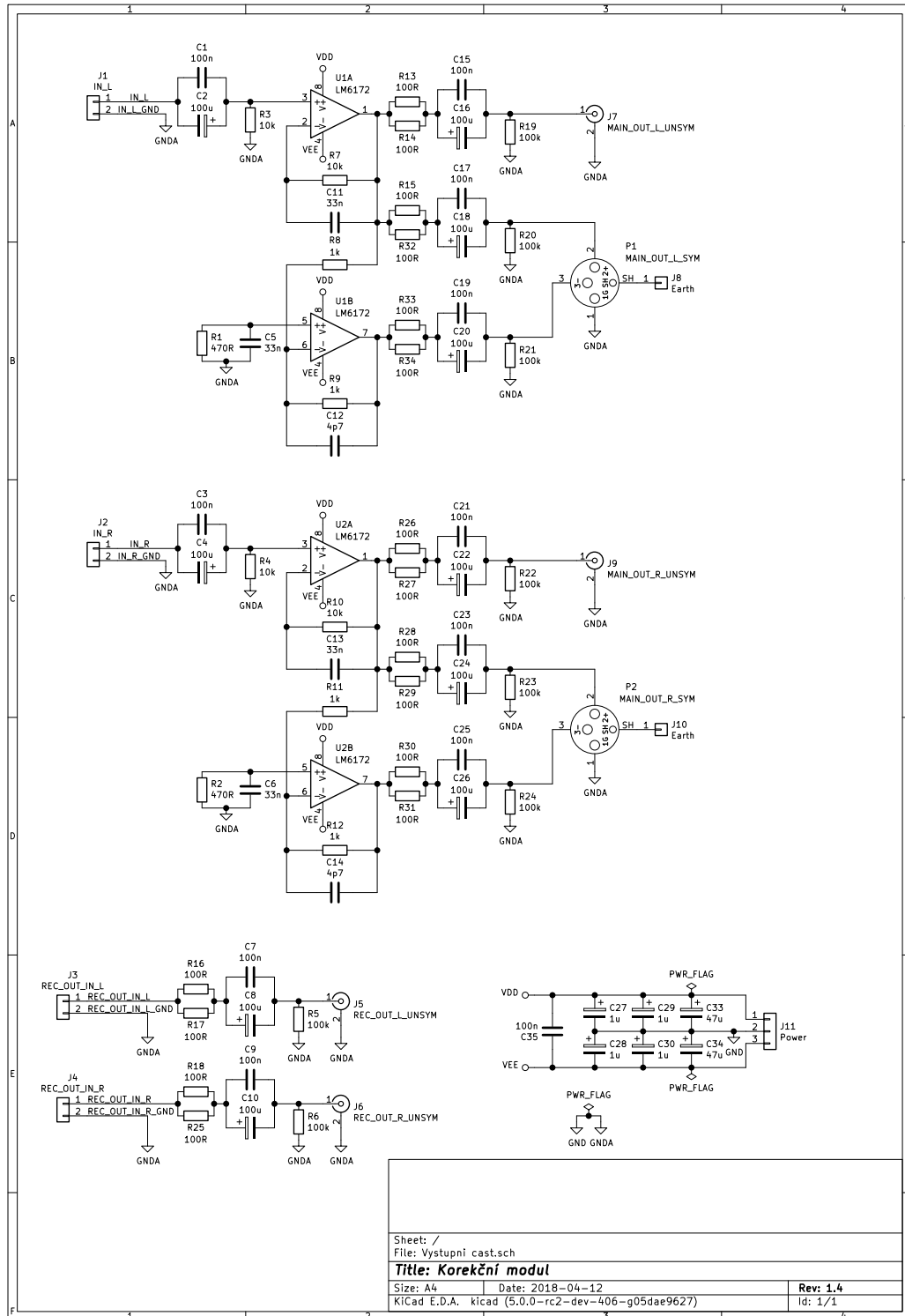


## A.3 Schéma zapojení symetrického vstupního modulu





## A.5 Schéma zapojení výstupního modulu



Sheets /  
File: Vystupni cast.sch

**Title: Korekční modul**

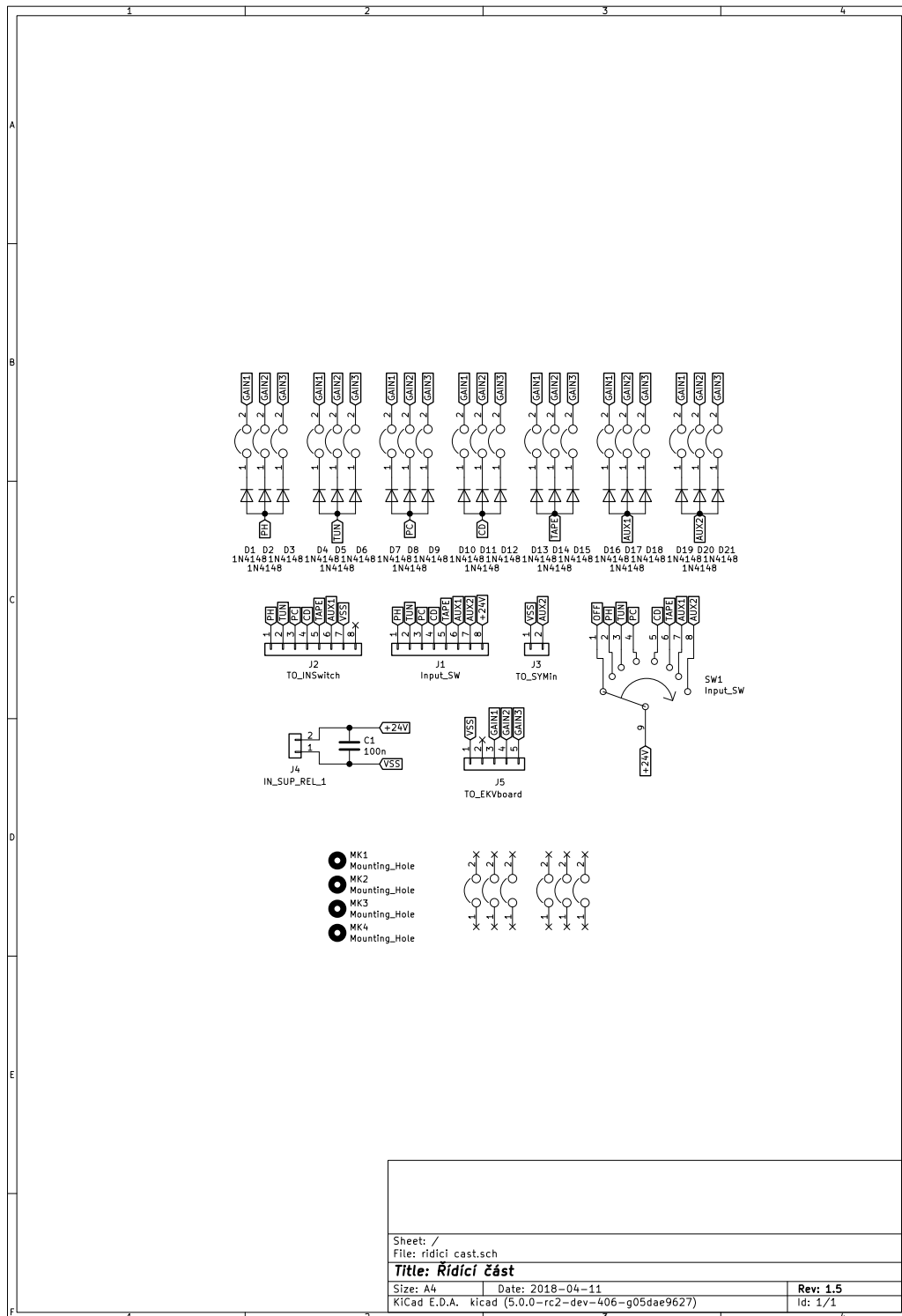
Size: A4 Date: 2018-04-12

Rev: 1.4

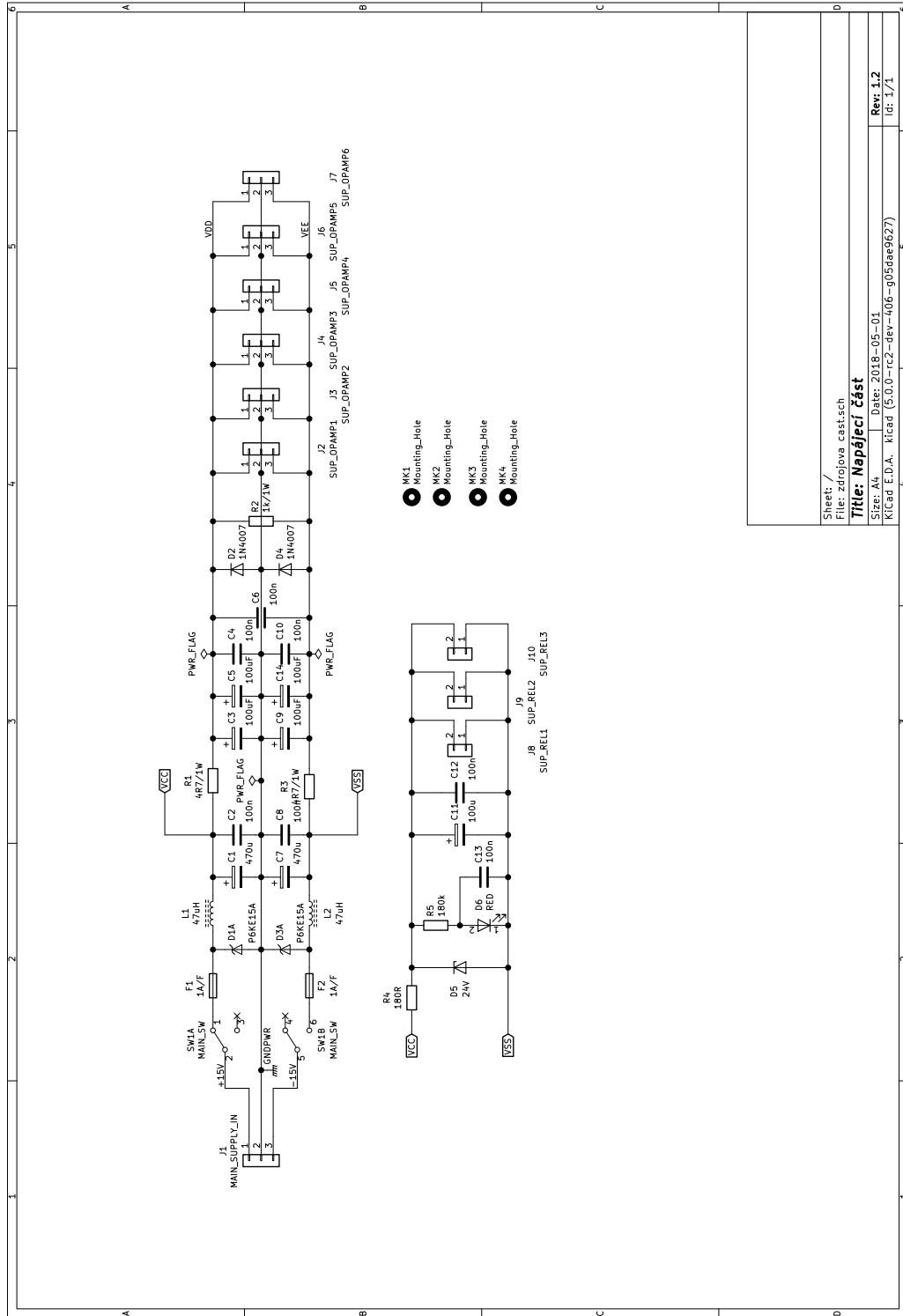
KiCad E.D.A. kicad (5.0.0-rc2-dev-406-g05dae9627)

Id: 1/1

## A.6 Schéma zapojení řídicího modulu

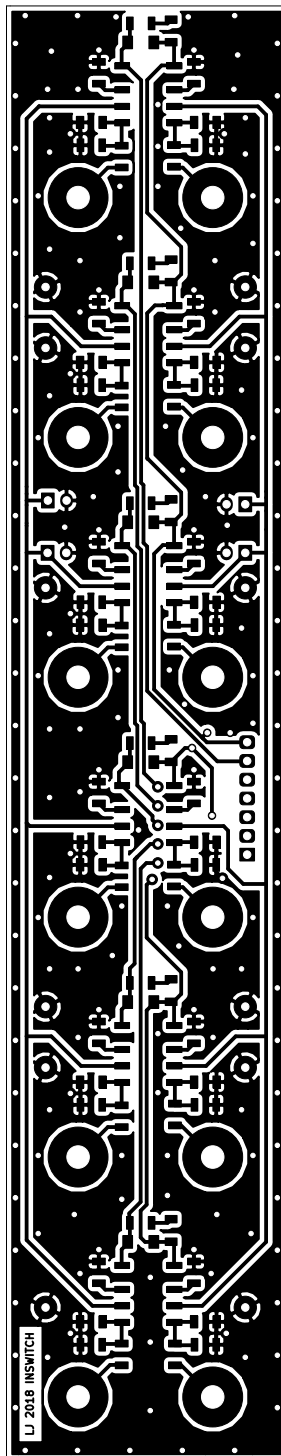


## A.7 Schéma zapojení napájecího modulu



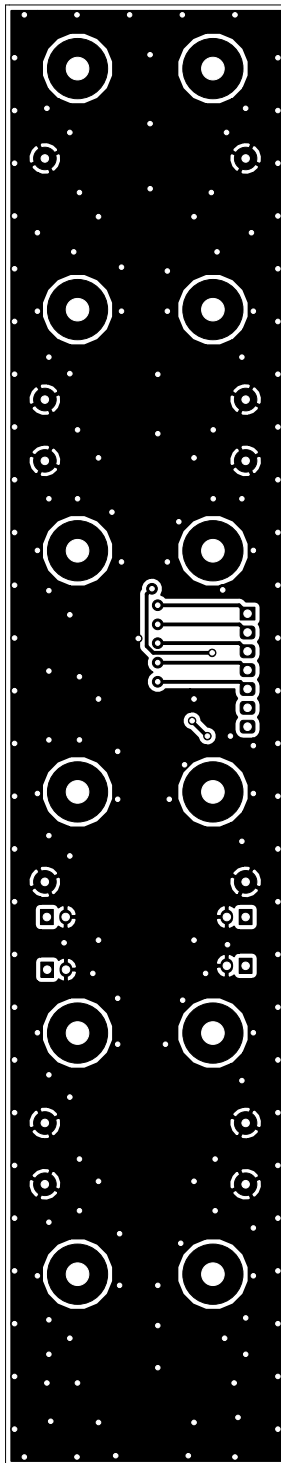
## B DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ

### B.1 DPS modulu přepínače vstupů – vrstva TOP



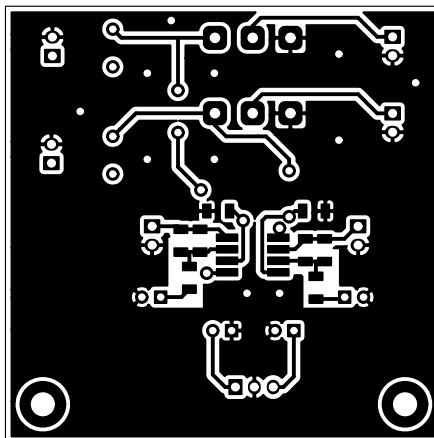
Rozměr desky 194x37,5 [mm], měřítko M1:1

## B.2 DPS modulu přepínače vstupů – vrstva BOTTOM



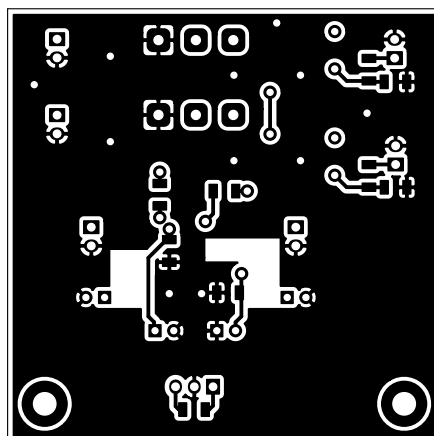
Rozměr desky 194x37,5 [mm], měřítko M1:1

### B.3 DPS modulu regulace hlasitosti – vrstva TOP



Rozměr desky 58x58 [mm], měřítko M1:1

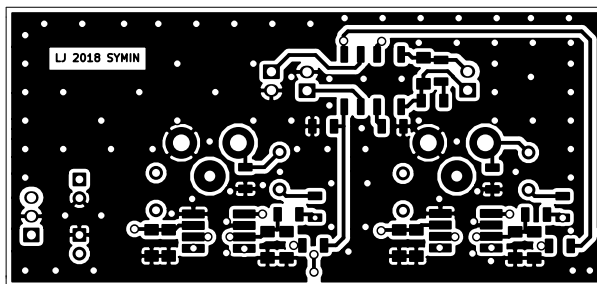
### B.4 DPS modulu regulace hlasitosti – vrstva BOTTOM



Rozměr desky 58x58 [mm], měřítko M1:1

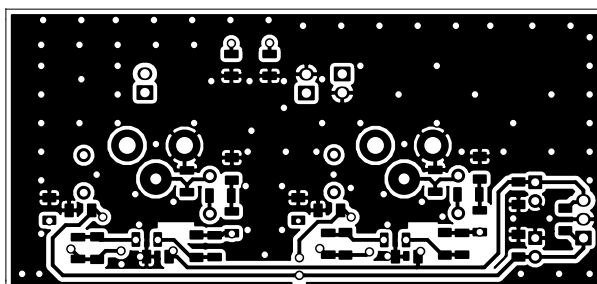


## B.5 DPS symetrického vstupního modulu – vrstva TOP



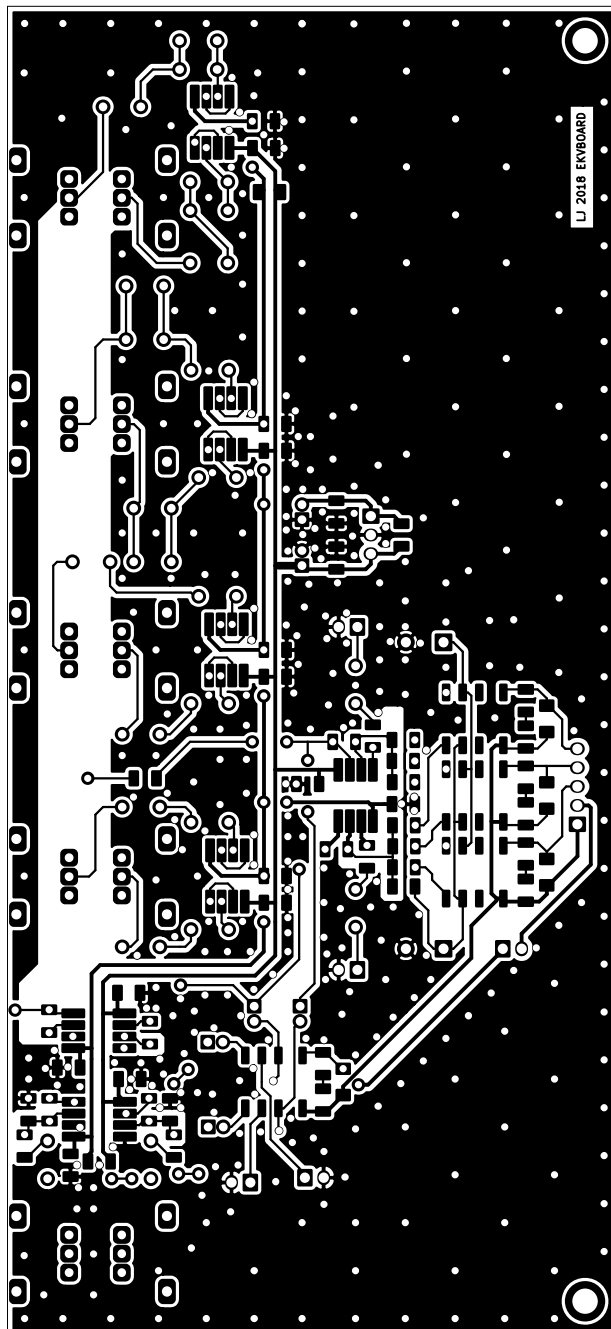
Rozměr desky 80x37,5 [mm], měřítko M1:1

## B.6 DPS symetrického vstupního modulu – vrstva BOTTOM



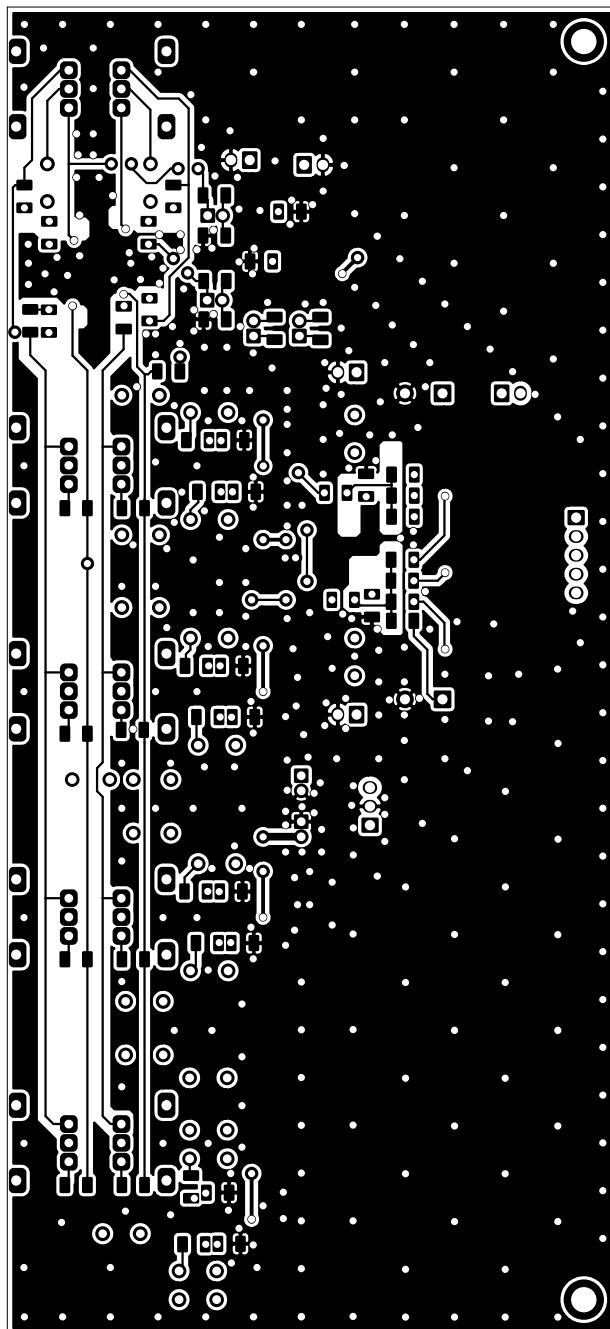
Rozměr desky 80x37,5 [mm], měřítko M1:1

## B.7 DPS korekčního modulu – vrstva TOP



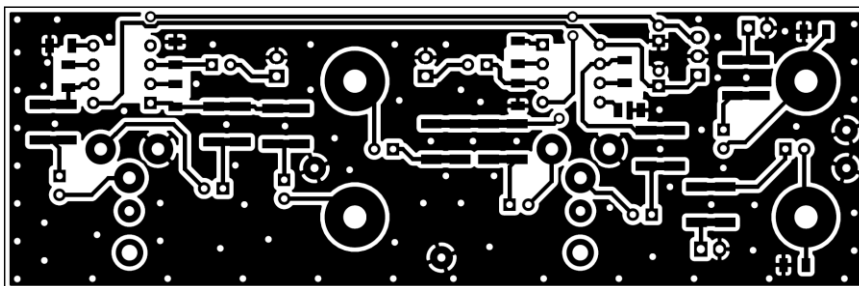
Rozměr desky 176x81 [mm], měřítko M1:1

## B.8 DPS korekčního modulu – vrstva BOTTOM



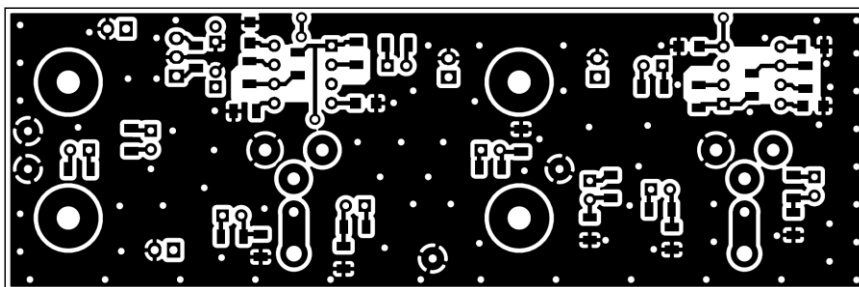
Rozměr desky 176x81 [mm], měřítko M1:1

## B.9 DPS výstupního modulu – vrstva TOP



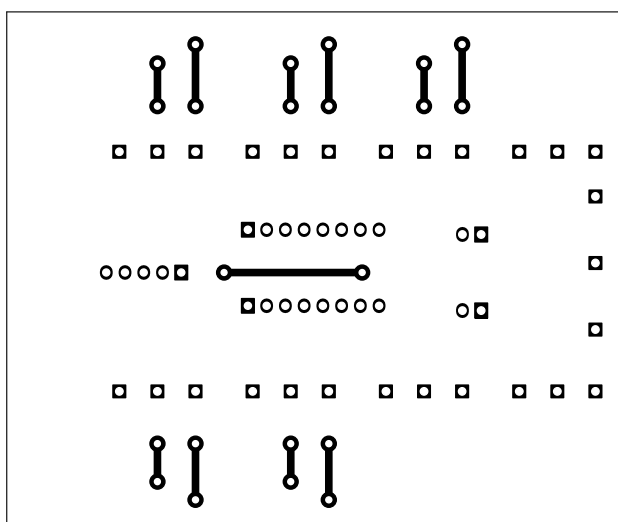
Rozměr desky 115x37,6 [mm], měřítko M1:1

## B.10 DPS výstupního modulu – vrstva BOTTOM



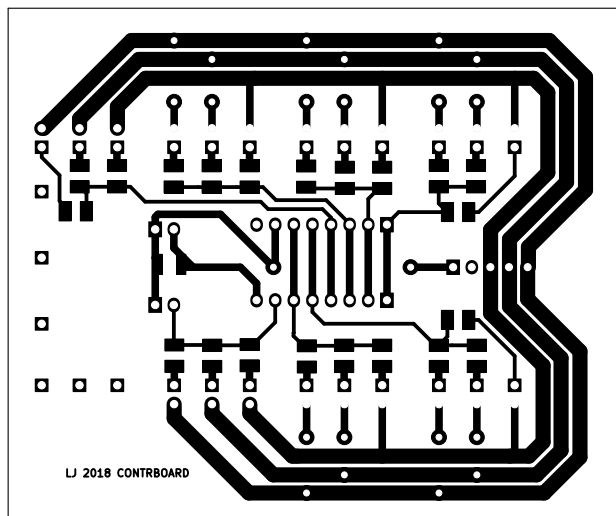
Rozměr desky 115x37,6 [mm], měřítko M1:1

## B.11 DPS řídicího modulu – vrstva TOP



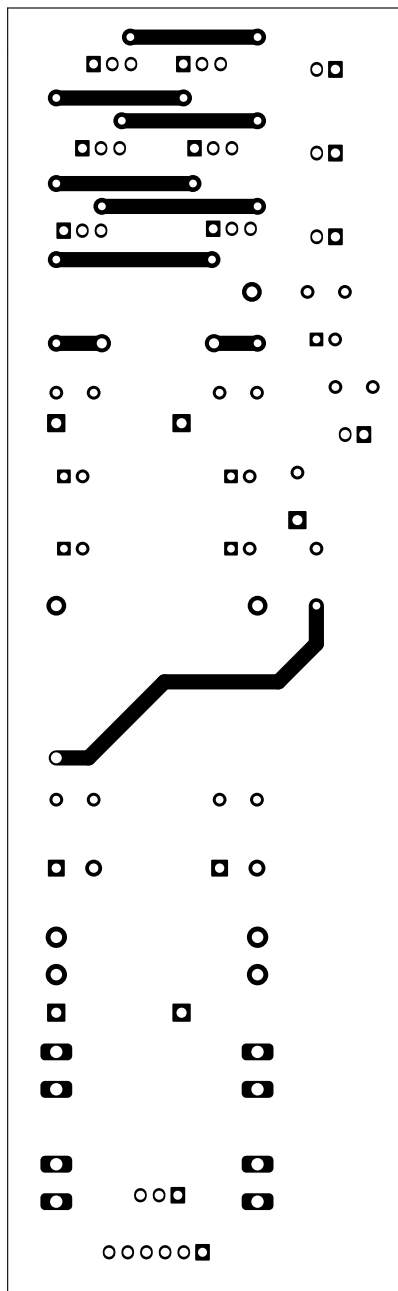
Rozměr desky 83x39 [mm], měřítko M1:1

## B.12 DPS řídicího modulu – vrstva BOTTOM



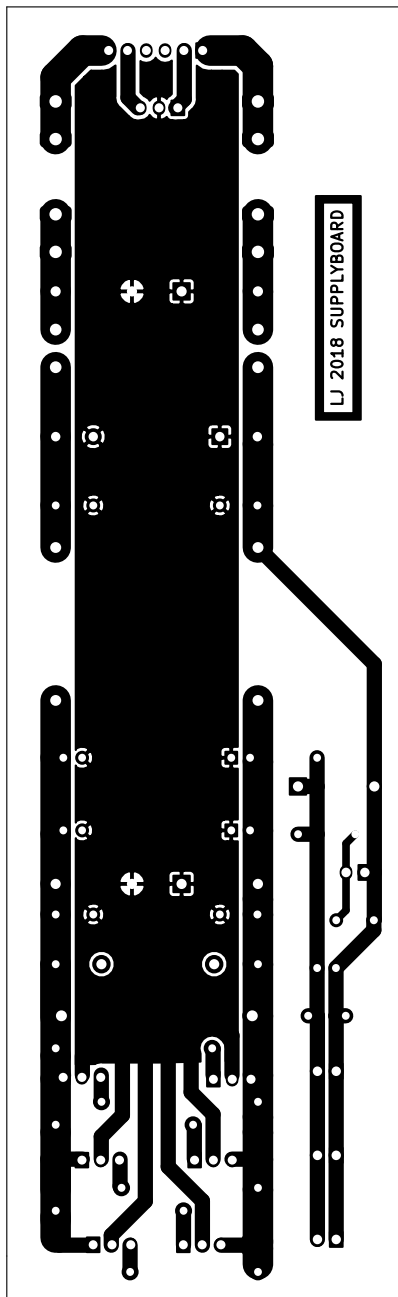
Rozměr desky 83x39 [mm], měřítko M1:1

## B.13 DPS napájecího modulu – vrstva TOP



Rozměr desky 172x53 [mm], měřítko M1:1

## B.14 DPS napájecího modulu – vrstva BOTTOM

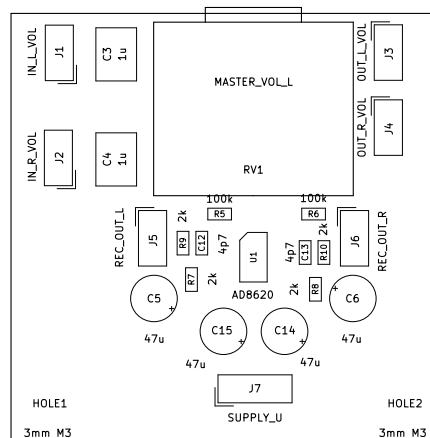


Rozměr desky 172x53 [mm], měřítko M1:1

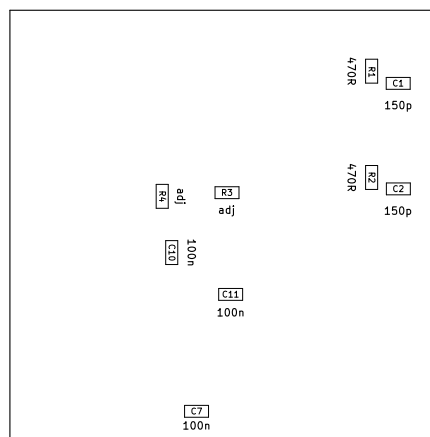




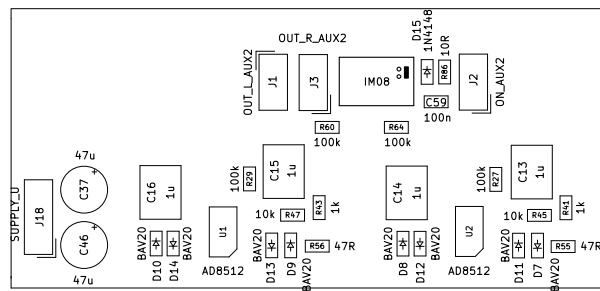
## C.2 Osazovací plán modulu regulace hlasitosti – strana TOP



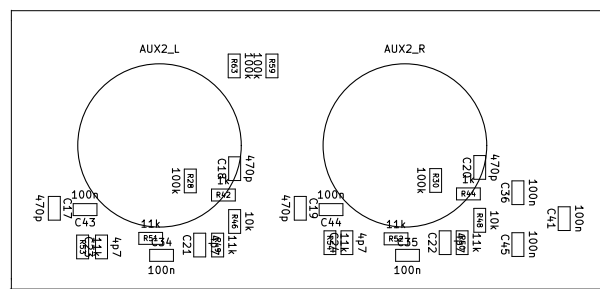
## C.3 Osazovací plán modulu regulace hlasitosti – strana BOTTOM



## C.4 Osazovací plán symetrického vstupního modulu – strana TOP

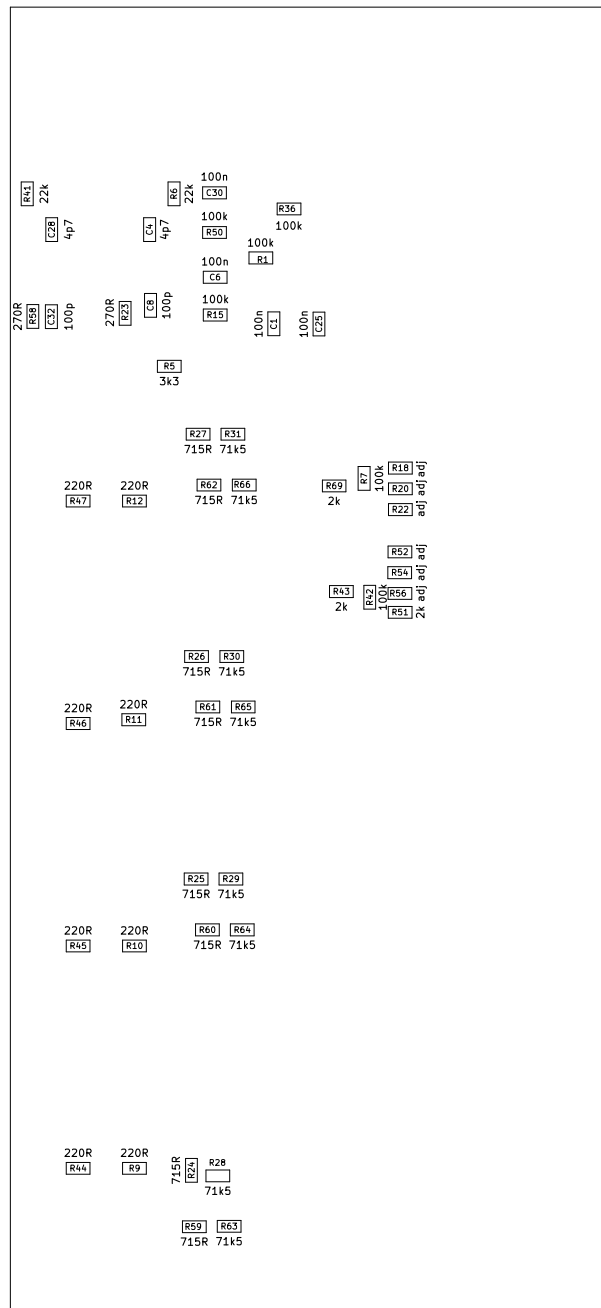


## C.5 Osazovací plán symetrického vstupního modulu – strana BOTTOM

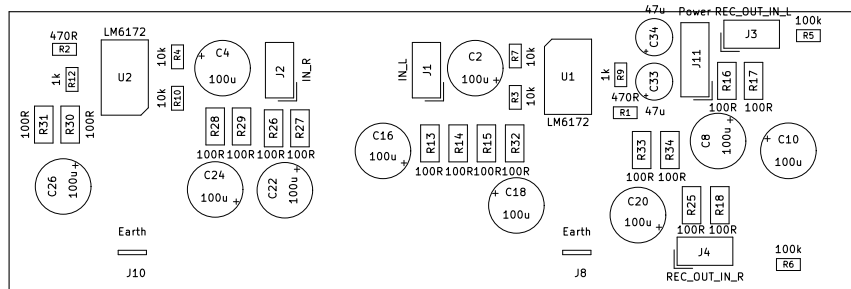




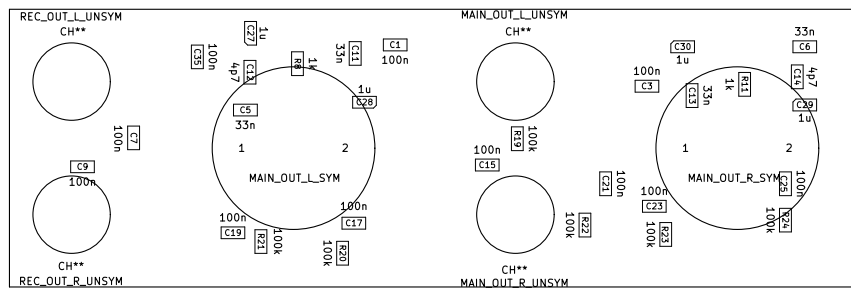
## C.7 Osazovací plán korekčního modulu – strana BOTTOM



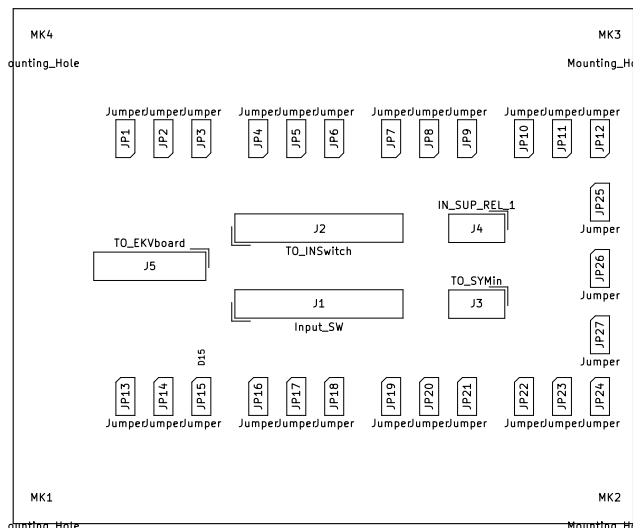
## C.8 Osazovací plán výstupního modulu – strana TOP



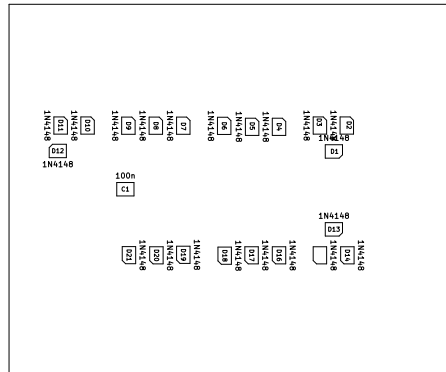
## C.9 Osazovací plán výstupního modulu – strana BOTTOM



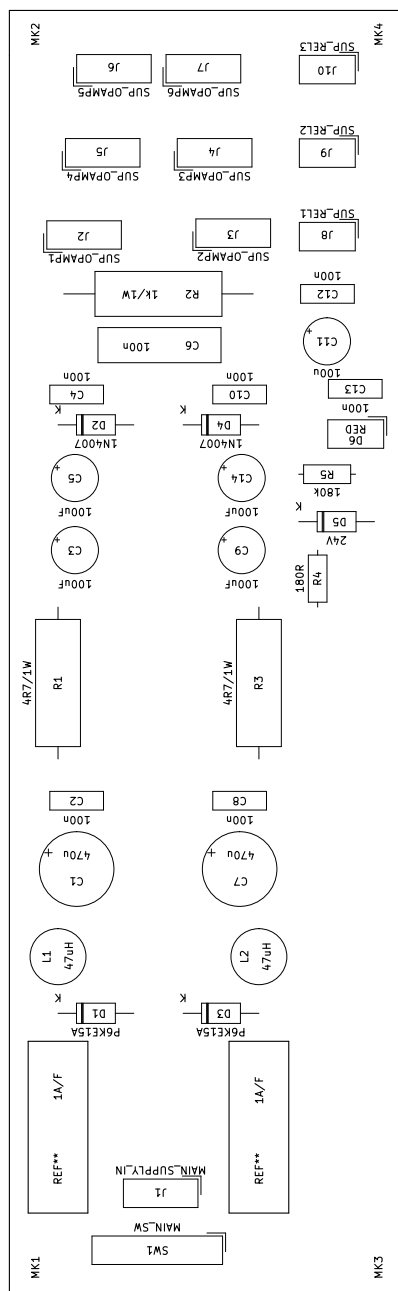
## C.10 Osazovací plán řídicího modulu – strana TOP



## C.11 Osazovací plán řídicího modulu – strana BOTTOM



## C.12 Osazovací plán napájecího modulu – strana TOP



## D SOUPOISKY SOUČÁSTEK

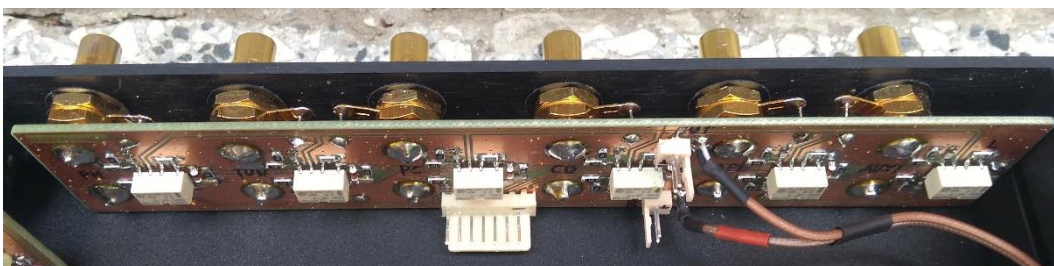
Kvůli obsáhlosti jsou obsaženy na příloženém CD

## E VRTACÍ PLÁNY PANELŮ

Vrtací plány předního a zadního panelu obsaženy na přiloženém CD

## F FOTOGRAFIE

### F.1 Fotografie modulu přepínače vstupů



### F.2 Fotografie modulu regulace hlasitosti

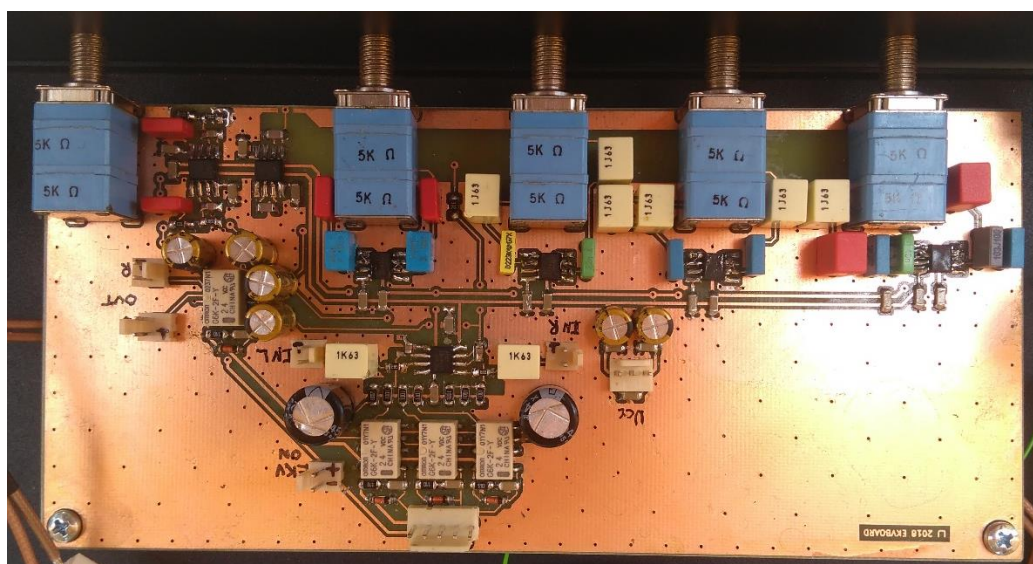




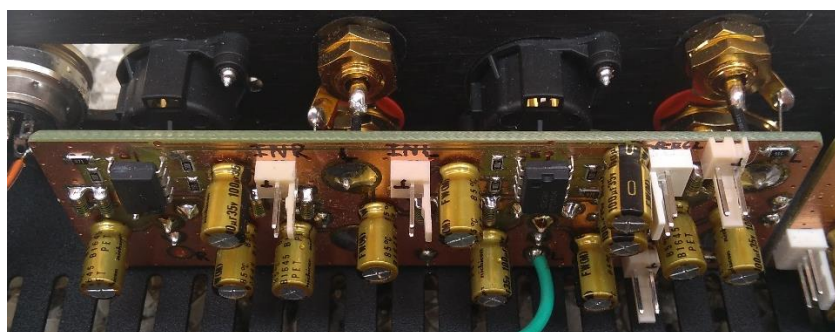
### F.3 Fotografie symetrického vstupního modulu



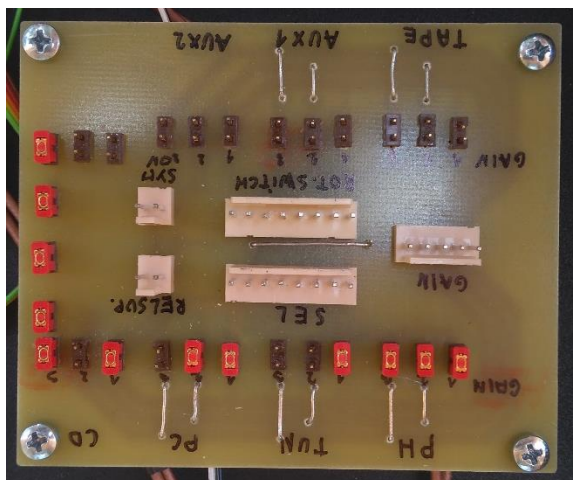
### F.4 Fotografie korekčního modulu



### F.5 Fotografie výstupního modulu



## F.6 Fotografie řídicího modulu



## F.7 Fotografie napájecího modulu



## F.8 Fotografie měření prototypu

