



Fakulta elektrotechnická  
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

# DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh a realizace měřícího předzesilovače pro kondenzátorové měřící  
mikrofony

Autor práce: Bc. Zdeněk Kroc  
Vedoucí práce: Ing. Jiří Stifter, Ph.D.

Plzeň 2012

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2011/2012

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Zdeněk KROC**  
Osobní číslo: **E10N0144P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Telekomunikační a multimediální systémy**  
Název tématu: **Návrh a realizace měřicího předzesilovače pro kondenzátorové měřicí mikrofony**  
Zadávací katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Navrhněte měřicí předzesilovač pro měřicí kondenzátorové mikrofony. Zesilovač by měl umožňovat nastavení definovaného zisku ve více krocích, měl by být optimalizován z hlediska šumových poměrů/dynamického rozsahu a amplitudové/fázové frekvenční charakteristiky, dále by měl být vybaven zdrojem napájecího napětí pro polarizaci kondenzátorové vložky měřicího mikrofону a napájení jeho vestavěného integrovaného předzesilovače. Dále musí být vybaven obvody indikujícími jeho možné přebuzení.
2. Navržený předzesilovač zrealizujte a změřte jeho technické parametry, případně navržené zapojení dále optimalizujte z hlediska požadovaných technických parametrů.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

**Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.**

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jiří Stifter, Ph.D.**

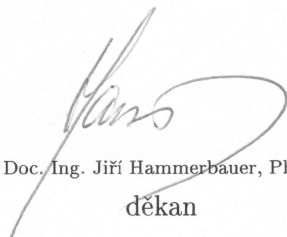
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

Konzultant diplomové práce: **Ing. Jiří Stifter, Ph.D.**

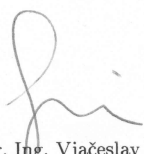
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

Datum zadání diplomové práce: **17. října 2011**

Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2012**

  
Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



  
Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev  
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

# Abstrakt

Obsahem práce je rešerše parametrů měřících mikrofonů, včetně historických modelů, na základě které je proveden návrh napájecích zdrojů a zesilovače. Snahou bylo navrhnout a realizovat obvody, které umožňují použití velké škály měřících mikrofonů bez ohledu na výrobce nebo stáří mikrofonu. Vlastnosti navržených zdrojů a zesilovače byly simulovány v programu PSpice, stejně jako vlastnosti pomocných obvodů, např. detektoru přebuzení. Nakonec byla zapojení realizována a jejich vlastnosti odměřeny.

## Klíčová slova

Měřící zesilovač, kondenzátorový mikrofon, mikrofonní zdroj

# Abstract

Kroc, Zdeněk. *Design and realization of condenser mic measurement amplifier [Návrh a realizace měřicího předzesilovače pro kondenzátorové měřicí mikrofony]*. Pilsen, 2012. Master thesis (in Czech). University of West Bohemia. Faculty of Electrical Engineering. Department of Applied Electronics and Telecommunications. Supervisor: Jiří Stifter

---

In this thesis is search of measuring condenser microphones parameters, including historical models, on its basis was made design of power supplies and amplifier. The aim was to design and implement circuits that allow the use of a large range of measuring microphones regardless of manufacturer or age of the microphone. Characteristics of designed supplies and amplifier were simulated in PSpice program, as well as properties of the auxiliary circuits, such as overvoltage detector. Finally, circuits was realized and their properties measured.

## Keywords

Measuring amplifier, condenser mic, microphone power supply

## Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem svou závěrečnou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové 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 diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné 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 § 270 trestního zákona č. 40/2009 Sb.

Také prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 11. května 2012

Bc. Zdeněk Kroc

.....

Podpis

## Poděkování

Tato práce vznikla s podporou projektu SGS-2012-019 „Moderní řešení elektronických řídicích a informačních systémů“.

# Obsah

Seznam obrázků	viii
Seznam tabulek	ix
Seznam symbolů a zkratk	x
<b>1 Úvod</b>	<b>1</b>
<b>2 Požadavky na měřící předzesilovač</b>	<b>2</b>
2.1 Přehled dostupných předzesilovačů na trhu . . . . .	2
2.1.1 Technické parametry profesionálních měřících zesilovačů . . . . .	3
2.2 Požadavky kladené na napájecí zdroj . . . . .	4
2.2.1 Zdroj pro polarizaci kapslí . . . . .	4
2.2.2 Zdroj pro napájení mikrofonních zesilovačů . . . . .	5
2.2.3 Zdroje pro žhavení katod, výhřev mikrofonu a vlastní předzesilovač	6
2.3 Požadavky kladené na zesilovač . . . . .	6
2.3.1 Elektrické parametry měřících mikrofonů . . . . .	7
2.3.2 Rozhraní měřících mikrofonů . . . . .	7
2.3.3 Šířka pásma, vstupní obvody . . . . .	8
2.3.4 Detektor přebuzení . . . . .	9
2.3.5 Výstupní rozhraní zesilovače . . . . .	9
<b>3 Návrh zdrojové části</b>	<b>10</b>
3.1 Návrh napájecího transformátoru . . . . .	10
3.2 Návrh zdroje polarizačního napětí . . . . .	11
3.3 Návrh zdroje pro mikrofonní předzesilovače . . . . .	12
3.4 Návrh zdrojů napětí pro žhavení katod, výhřev mikrofonů, a vlastní předzesilovač . . . . .	16
<b>4 Návrh zesilovače a pomocných obvodů</b>	<b>18</b>
4.1 Zesilovač . . . . .	21
4.1.1 Dělič vstupního napětí . . . . .	23
4.2 Phantomové napájení . . . . .	23



4.3	Vstupní impedance zesilovače . . . . .	24
4.4	Ochrana vstupů zesilovače . . . . .	24
4.5	Kompenzace stejnosměrného offsetu . . . . .	24
4.6	Obvod potlačení souhlasného rušení . . . . .	24
4.7	Simulace zapojení . . . . .	28
4.7.1	Amplitudové a fázové frekvenční charakteristiky . . . . .	28
4.7.2	Šumové parametry zesilovače . . . . .	31
4.8	Detektor přebuzení . . . . .	31
<b>5</b>	<b>Výsledky měření</b>	<b>34</b>
5.1	Měření zdroje polarizačního napětí . . . . .	34
5.2	Měření zdroje napětí pro mikrofonní předzesilovače . . . . .	34
5.3	Měření zdroje žhavicího napětí, napětí pro výhřev mikrofonu a vlastní zesilovač . . . . .	35
<b>6</b>	<b>Závěr</b>	<b>36</b>
	<b>Reference, použitá literatura</b>	<b>38</b>
	<b>Přílohy</b>	<b>40</b>
<b>A</b>	<b>Motivy desek plošných spojů a osazovací plány</b>	<b>40</b>
A.1	Zdroj polarizačního napětí . . . . .	40
A.2	Zdroj napětí pro napájení mikrofonních předzesilovačů . . . . .	41
A.3	Zdroj napětí pro žhavení katod elektronek, výhřev mikrofonů a napájení zesilovače . . . . .	43

# Seznam obrázků

2.1	Nákres konektoru mikrofonů z produkce bývalé RFT, strana pájecích oček	7
2.2	Nákres konektoru LEMO7	8
3.1	Schéma zapojení zdroje polarizačního napětí kondenzátorových mikrofonních vložek.	11
3.2	Časový průběh napětí na výstupu zdroje po připojení mikrofonní kondenzátorové vložky. První průběh odpovídá sepnutému spínači S1, napětí se ustálí na 28 V. Druhý průběh zobrazuje nabíjení mikrofonní vložky s konečným napětím 200 V	12
3.3	Schéma zapojení plovoucího regulátoru  Převzato z [2]	13
3.4	Zatěžovací charakteristika zdroje napětí podle schématu 3.3. Na ose $x$ je proud tekoucí zátěží, na ose $y$ napětí na zátěži. Vstupní napětí regulátoru je 226 V	14
3.5	Schéma zdroje napětí pro mikrofonní předzesilovače	15
3.6	Schéma zdrojů napětí pro žhavení katod, výhřev mikrofonů a vlastní předzesilovač	16
4.1	Blokové schéma zesilovače	19
4.2	Schéma měřícího zesilovače	20
4.3	Základní zapojení mikrofonního zesilovače  Převzato z [15]	21
4.4	Distribuce chyby zisku	23
4.5	Průběh CMRR v závislosti na frekvenci	25
4.6	Základní princip techniky zvané bootstrapping	25
4.7	Způsob připojení bootstrapového obvodu k přístrojovému zesilovači	26
4.8	Průběh CMRR v závislosti na frekvenci s použitím bootstrapového obvodu	26
4.9	Průběh CMRR v závislosti na frekvenci s použitím bootstrapového obvodu	27
4.10	Amplitudová frekvenční charakteristika zesilovače bez vstupního děliče	28
4.11	Amplitudová frekvenční charakteristika zesilovače se zařazeným vstupním děličem	29
4.12	Fázová frekvenční charakteristika a skupinové zpoždění symetrického výstupu	29
4.13	Fázová frekvenční charakteristika a skupinové zpoždění nesymetrického výstupu	30

4.14	Detail skupinových zpoždění symetrického (nahore) a nesymetrického výstupu . . . . .	30
4.15	Schéma detektoru přebuzení s MKO . . . . .	32
A.1	Motiv plošného spoje zdroje polarizačního napětí . . . . .	40
A.2	Osazovací plán desky zdroje polarizačního napětí . . . . .	40
A.3	Motiv plošného spoje zdroje napětí pro mikrofonní předzesilovače . . . . .	41
A.4	Osazovací plán desky zdroje napětí pro mikrofonní předzesilovače . . . . .	42
A.5	Motiv plošného spoje . . . . .	43
A.6	Osazovací plán . . . . .	44

# Seznam tabulek

2.1	Klíčové parametry profesionální měřicí techniky . . . . .	3
2.2	Napěťové a proudové požadavky mikrofonních předzesilovačů . . . . .	6
2.3	Zapojení konektoru LEMO7 podle Microtech Gefell a Brüel & Kjær . . . . .	8
3.1	Požadovaná napětí a proudy sekundárních vinutí toroidního transformátoru	10
3.2	Velikost odporu rezistorů $R_2$ a $R_{Dx}$ v závislosti na požadovaném výstupním napětí, kde $x$ představuje polohu přepínače . . . . .	16
4.1	Velikosti odporů rezistoru $R_G$ určující zisk přístrojového zesilovače . . . . .	22
4.2	Velikost vstupní impedance v závislosti na frekvenci . . . . .	26
4.3	Velikost šumových napětí pro zesilovač bez použití vstupního děliče . . . . .	31
4.4	Velikost šumových napětí pro zesilovač při použití vstupního děliče . . . . .	31
5.1	Výstupní napětí a zvlnění při dané zátěži . . . . .	34
5.2	Výstupní napětí a zvlnění při dané zátěži . . . . .	35

# Seznam symbolů a zkratek

THD+N .....	Total harmonic distortion plus noise. Celkové harmonické zkreslení plus šum.
$U$ .....	Napětí [V].
$Q$ .....	Elektrický náboj [C].
$C$ .....	Kapacita [F].
LEMO7 .....	Označení typu konektoru.
XLR .....	Označení typu konektoru.
BNC .....	Označení typu konektoru.
CINCH .....	Označení typu konektoru.
$V_{OUT}$ .....	Výstupní napětí stabilizátoru.
$V_{OUT}$ .....	Referenční napětí stabilizátoru.
$T_{cip}$ .....	Teplota polovodičového přechodu.
$T_{okoli}$ .....	Teplota okolí součástky.
$R_{cip-okoli}$ .....	Tepelný odpor mezi polovodičovými přechody a okolím součástky.
$R_{pозdro-chladic}$ .....	Tepelný odpor mezi pouzdrem součástky a chladičem.
$R_{chladic-okoli}$ .....	Tepelný odpor mezi chladičem a jeho okolím.
$G$ .....	Zesílení.

# 1

## Úvod

V této diplomové práci je řešen návrh mikrofonního měřícího předzesilovače především pro měřicí kondenzátorové mikrofony. Zařízení bude sloužit jako vybavení laboratoří FEL ZČU. Základním požadavkem na realizovaný zesilovač je schopnost pracovat s mikrofony různého stáří od různých výrobců. Zesilovač musí být schopen dodat potřebná napětí a proudy pro napájení integrovaných mikrofonních předzesilovačů a zároveň zesilovat vstupní napětí ve velkém rozsahu. Protože se jedná o prvek měřícího řetězce, jsou kladeny nároky na vyrovnané frekvenční charakteristiky a nízkou míru degradace vstupního signálu.

Na trhu jsou k dispozici především zesilovače firem, které je navrhují pouze pro mikrofony z vlastní produkce, čímž neumožňují používat je s mikrofony ostatních výrobců. V případě historických měřících kondenzátorových mikrofonů je potřeba obstarat i historické měřicí zesilovače, jejichž technické parametry jsou dnes překonány díky moderním technologiím.

V práci je provedena rešerše parametrů měřících mikrofonů. Na základě rešerše jsou stanoveny technické požadavky na měřicí zesilovač a napájecí zdroje. Dále je popsán návrh jednotlivých zdrojů napětí pro mikrofony a pomocných zdrojů pro vlastní zesilovač včetně simulací parametrů v programu PSpice. Nakonec jsou zdroje a zesilovač realizovány a změřeny jejich technické parametry.

## 2

# Požadavky na měřicí předzesilovač

Měřicí předzesilovač, jehož návrhem a realizací se zabývá tato práce nad průmyslovými řešeními vyniká především svojí univerzálností, z hlediska použitelnosti s měřicími mikrofony různých výrobců, včetně historických měřících mikrofونů. Technické parametry měřicího předzesilovače se blíží profesionální technice, zatímco jeho cena je zlomková.

Zesilovač je schopen zpracovat signál z historických i současných mikrofونů Brüel & Kjær, RFT, Microtech Gefell, Earthworks a klasických kondenzátorových mikrofونů. Z toho vyplývá potřeba osadit vstupy patřičnými konektory a předzesilovač vybavit zdroji napětí pro provoz těchto mikrofونů.

## 2.1 Přehled dostupných předzesilovačů na trhu

V oblasti akustických měření se profesionální měřicí technika dělí do dvou skupin. První skupina obsahuje měřicí zesilovače s regulovatelným ziskem vybavené přesnými voltmetry pro přímý odečet naměřených hodnot a datovým rozhraním pro jejich řízení a přenos dat. Druhá skupina obsahuje mikrofonní předzesilovače, které zesilují signál z mikrofونů před jeho přivedením do vlastní měřicí techniky, tedy zajišťují pouze napájení zesilovačů integrovaných v mikrofonech a elektrické zesílení vstupního signálu. Některé z těchto zesilovačů mají dokonce s regulovatelný zisk pro zlepšení odstupu signál-šum a mohou být vybaveny pasivními nebo aktivními váhovacími filtry pro jednotlivé kanály. Moderní měřicí zesilovače a předzesilovače umožňují také nahrát z elektroniky mikrofونu kalibrační data. Některá profesionální řešení mikrofonních měřících zesilovačů nebo napáječů jsou schopna provozu na baterie, což umožňuje měření v terénu mimo laboratoř.

Nejznámějším výrobcem měřicí techniky v oblasti akustiky je firma Brüel & Kjær ze Švédska. Její měřicí zesilovače a mikrofonní zdroje jsou však určeny pro mikrofony z její vlastní produkce, jako je tomu i u ostatních výrobců měřících mikrofونů (Microtech Gefell, Earthworks). Další firma zabývající se výrobou měřicí techniky nejen pro akustiku je RION.

### 2.1.1 Technické parametry profesionálních měřících zesilovačů

Parametry profesionální měřicí techniky získané z katalogových listů zařízení výše zmíněných firem byly vzaty jako vodítko při návrhu měřicího zesilovače. Zesilovače umožňují měnit zisk skokově v několika krocích, typicky po 10 dB, s maximální hodnotou zisku vyjimečně překračující 70 dB. Typická vstupní impedance takových zesilovačů se pohybuje okolo 1 M $\Omega$ , impedance symetrických vstupů se pohybuje v řádech desítek až stovek kiloohmů.

Zařízení	Šířka pásma	THD+N	Vstupní šum
Earthworks 1021	2 - 100 kHz $\pm$ 0,1 dB 1 - 200 kHz $\pm$ 0,5 dB	0,0001 %	1,6 $\frac{nV}{\sqrt{Hz}}$ při 20 dB
RION UN-14	10 - 40 kHz $\pm$ 0,5 dB 1 - 80 kHz $\pm$ 3 dB		4 $\frac{\mu V}{\sqrt{Hz}}$
Brüel & Kjær NEXUS 2690	0,1 - 100 kHz $\pm$ 1 dB	< 0,003 %	< 2 $\frac{\mu V}{\sqrt{Hz}}$
Brüel & Kjær 2636	1 - 200 kHz $\pm$ 0,5 dB	< 0,1 %	< 2 $\frac{\mu V}{\sqrt{Hz}}$
Brüel & Kjær 5935	0,5 - 100 kHz $\pm$ 3 dB		46 $\frac{\mu V}{\sqrt{Hz}}$

**Tab. 2.1:** Klíčové parametry profesionální měřicí techniky

Klíčovými parametry měřících zesilovačů jsou šířka zpracovatelného pásma s daným útlumem nebo zvlněním, celkové harmonické zkreslení, a šum zesilovače, respektive ekvivalentní šumové napětí přepočtené na vstup. Právě u šumového napětí někteří výrobci uvádějí, že bylo změřeno s použitím váhovacího filtru typu A, avšak ten je normou ANSI definován jen pro akustické pásmo, přičemž šířka pásma měřících zesilovačů obvykle přesahuje 100 kHz. Tento fakt zpochybňuje uváděnou hodnotu a lze předpokládat, že šumové napětí je ve skutečnosti větší. Dalším klíčovým parametrem zesilovače je tvar/zvlnění fázové frekvenční charakteristiky, avšak tyto informace výrobci v technických specifikacích neuvádějí.

Profesionální měřící zesilovače a předzesilovače samozřejmě disponují zdroji napětí pro podporované typy mikrofonů. Velikosti napětí a proudová zatížitelnost zdrojů se různí, a proto bude problematika napájecích zdrojů podrobně probrána v následující kapitole.

V katalogových listech průmyslových zesilovačů, jako je například NEXUS 2690, bývá uvedena odolnost zesilovačů vůči okolnímu elektromagnetickému poli nebo vibracím. Takovým testům však nebyl realizovaný zesilovač podroben, neboť se předpokládá jeho provoz pouze v laboratořích FEL ZČU.

Ze zjištěných technických parametrů profesionálních měřících zesilovačů lze vyvodit požadavek na zpracovatelnou šířku pásma s velikostí 200 kHz i při ziscích 60 dB a přibližné hodnoty celkového harmonického zkreslení a ekvivalentního šumového napětí.



## 2.2 Požadavky kladené na napájecí zdroj

Pro použití měřicího předzesilovače s více mikrofony různých výrobců je potřeba, aby měl napájecí zdroj volitelné napětí pro danou značku a typ mikrofonu. Měřicí mikrofon typicky potřebuje dvě až tři různá stejnosměrná napětí pro svůj provoz. Jedná se o napětí pro napájení předzesilovače v těle mikrofonu a napětí sloužící pro polarizaci mikrofonní kondenzátorové vložky, vyjma elektretových vložek nebo mikrofonů s vlastním napěťovým měničem či bateriovým napájením. Třetí napětí se u mikrofonních zesilovačů využívá buďto ke žhavení katody v katodových sledovačích, nebo k vyhřívání těla mikrofonu a kapsle pro zajištění konstantních podmínek během měření. Toho se využívá především při měření v prostředí s vysokou relativní vlhkostí.

### 2.2.1 Zdroj pro polarizaci kapslí

Pro správnou funkci mikrofonu je potřeba zajistit, aby náboj na elektrodách mikrofonní kapsle zůstal konstantní, neboť napětí s kapacitou je svázáno vztahem 2.1.

$$U = \frac{Q}{C} \quad (2.1)$$

Toho je dosaženo přivedením polarizačního napětí přes rezistor s velkou hodnotou odporu, řádově desítky až stovky megaohmů.

V závislosti na velikosti polarizačního napětí se mění frekvenční charakteristika, citlivost i kapacita mikrofonní kapsle [1]. Většina kapslí je určena pro polarizační napětí 200 V, některé kapsle se polarizují pouze 28 V. Je-li kapsle polarizována nižším než jmenovitým napětím, dochází především ke snížení její citlivosti na změnu okolního tlaku. Pokud je na elektrody mikrofonní vložky přiloženo vyšší než jmenovité napětí, může dojít dokonce k vytvoření elektrického oblouku [1] a tedy jejímu zničení. Některé měřicí mikrofony jsou osazeny elektretovými vložkami. Takové vložky nepotřebují žádné polarizační napětí, neboť elektrické pole nezbytné pro funkci je vyvoláno, jak již název napovídá, elektretem.

Z výše uvedeného vyplývají nároky na zdroj polarizačního napětí. Tento zdroj musí být schopen dodat polarizační napětí 200 V a 28 V, ne však současně, neboť realizovaný předzesilovač je jednokanálový. V případě, že bude použita elektretová vložka, musí být obsluze přístroje umožněno zdroj polarizačního napětí zcela odpojit. Jelikož na kvalitě polarizačního napětí závisí klíčové parametry mikrofonní vložky, nesmí napětí ze zdroje kolísat a jeho zvlnění musí být minimální. Výstupní impedance zdroje musí být velká, aby při poruše na mikrofonním kabelu nebo v mikrofonu nevyvolalo velký zkratový proud, který by mohl poškodit další části zařízení.

## 2.2.2 Zdroj pro napájení mikrofonních zesilovačů

Předzesilovače v měřících mikrofonech bývají obvykle napájeny po zvláštním vodiči v mikrofonním kabelu, některé koncepce však využívají phantomového napájení a symetrického vedení signálu z mikrofonu. To znamená nutnost použít elektretovou vložku nebo speciální předzesilovač se zabudovaným napěťovým měničem pro polarizaci kondenzátorové kapsle. Phantomové napájení je standardně řešeno napětím 48 V, při odběru proudu 10 až 15 mA. Při napájení po speciálním vodiči jsou obvykle využívána napětí 150 a 120 V pro historické a moderní mikrofonní předzesilovače firmy Brüel & Kjær a 130 a 90 V pro předzesilovače firem Microtech Gefell a bývalé RFT. Některé moderní předzesilovače však dokáží pracovat už při napětí 28 V.

Některé typy mikrofonních předzesilovačů jsou určeny pro měření ve větších vzdálenostech od měřících zesilovačů, tzn. umožňují připojení k zesilovači přes kabely s délkou přesahující 2 m. Takové předzesilovače musí být schopny dodat ze svého signálového výstupu velký proud v řádu desítek miliampér, aby byly schopny přenést signál dlouhým vedením bez újmy na kvalitě. Schopnost předzesilovače dodat takový proud může být logicky omezena zdrojem napájecího napětí pro předzesilovač, proto musí být napájecí zdroj dostatečně dimenzován tak, aby pokryl jak výstupní proud předzesilovače, tak jeho vlastní spotřebu. Některé předzesilovače obsahují další elektroniku, například pro kalibrační data, která také odebírá elektrickou energii z tohoto zdroje.

Aby bylo možno stanovit maximální proudové odběry z těchto zdrojů, byl proveden průzkum na poli měřících mikrofonů, a z katalogových listů a technických dokumentací mikrofonních integrovaných předzesilovačů byly získány informace týkající se velikostí požadovaných napětí i spotřeby proudu. Elektronkový mikrofonní předzesilovač 2615 z produkce Brüel & Kjær vyžaduje pro svůj provoz napětí 150 V a proud 2 mA, dokonce je v jeho katalogovém listu uvedeno i maximální dovolené zvlnění, a to  $60 \mu\text{V}$  [4]. Předzesilovače s označením 2619 a 2639 od téže firmy umožňují provoz při napájecím napětí 120 V i 28 V. Potřebný proud je pak přibližně stanoven na 2 mA a 1 mA [5]. Mezi předzesilovače s největší spotřebou proudu ze současné produkce Brüel & Kjær se řadí typy 2669, 2670 a 2673. Tyto předzesilovače pracují s napájecím napětím 120 V [6][7][8]. Proud, který jsou schopny dodat na svém signálovém výstupu, je 20 mA, avšak není v něm zahrnuta vlastní spotřeba. Ta je uváděna pouze ve zdroji [6] a činí 3 mA. U ostatních není v katalogovém listu vlastní spotřeba uvedena. Lze ale předpokládat, že nepřekročí řád jednotek miliampér. Další mikrofony, se kterými má navrhovaný zesilovač pracovat jsou z produkce bývalé RFT a Microtech Gefell. Předzesilovače MV201 a MV102 právě z produkce RFT vyžadují napájecí napětí o velikosti 90 V. Podle schémat jejich zapojení byl maximální odběr proudu stanoven na 2 mA, viz příloha. Předzesilovače MV203, MV204 a MV302 od Microtech Gefell je možno napájet 28 V nebo 130 V, přičemž spotřeba proudu nepřekročí 3 mA [9][10]. Posledním předzesilovačem od této firmy je MV220 P48, který je jako jediný vybaven symetrickým výstupem jeho napájení je řešeno phantomově o velikosti napětí 48 V při odběru 4 mA [11]. Poslední ve výčtu mikrofonů podporovaných realizovaným zesilova-

čem jsou produkty firmy Earthworks. Všechny její mikrofony používají standardizované phantomové napájení o velikosti 48 V s proudem maximálně 10 mA [12].

Napětí [V]	Proud [mA]
150	5
130	5
120	40
90	5
48	15
28	40

**Tab. 2.2:** Napěťové a proudové požadavky mikrofonních předzesilovačů

Požadovaná napětí a proudy pro napájení mikrofonních předzesilovačů jsou shrnuty v tabulce 2.2. Požadované proudy byly před vlastním návrhem napájecího zdroje navýšeny o 50 až 100 % u mikrofonních zesilovačů, u kterých nebyla v katalogových listech jasně definována vlastní spotřeba. Požadované proudy nejsou natolik velké, aby takové navýšení představovalo závažný problém nebo prodražení navrhovaného zesilovače. Takové navýšení zajistí dostatečnou rezervu nebo kompatibilitu s dalšími mikrofony.

### 2.2.3 Zdroje pro žhavení katod, výhřev mikrofonu a vlastní předzesilovač

Mikrofonní předzesilovače, které ve svých zapojeních využívají elektronku potřebují další zdroj napětí, konkrétně pro žhavení katody. Toto napětí se typicky pohybuje okolo 6 V. Podle zdroje [4] by zvlnění tohoto napětí může dosahovat maximálně 2 mA i při proudových odběrech okolo 200 mA.

Některé mikrofony určené pro provoz ve velké relativní vzdušné vlhkosti jsou vybaveny topným tělískem pro zajištění konstantních parametrů uvnitř těla mikrofonu. Topné tělísko je obvykle možné připojit na 6 V nebo 12 V. Proud pro výhřev těla mikrofonu se pohybuje v řádu desítek až stovek miliampér.

Samotný realizovaný měřící předzesilovač a některé pomocné obvody využívají stejnosměrné stabilizované symetrické napájecí napětí  $\pm 15$  V.

## 2.3 Požadavky kladené na zesilovač

Požadavky na měřící předzesilovač vycházejí z technických parametrů připojitelných mikrofonů s ohledem na minimální degradaci vstupního signálu. Zesilovač musí umožnit nastavení definovaného zisku ve více krocích, být optimalizován z hlediska šumových parametrů/dynamického rozsahu a amplitudové/fázové frekvenční charakteristiky. Dále musí

být vybaven obvody indikujícími jeho možné přebuzení. Měřicími mikrofony bude v laboratořích FEL ZČU měřen akustický tlak především do 120 až 130 dB.

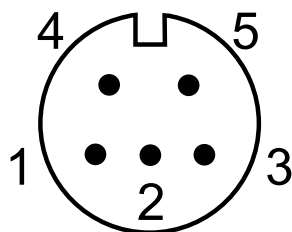
### 2.3.1 Elektrické parametry měřících mikrofonů

Mikrofony se skládají z mikrofonních vložek a mikrofonních předzesilovačů. Výstupní napětí mikrofonu je odvozeno od akustického tlaku na membránu mikrofonní vložky a citlivosti mikrofonu udávané typicky v mV/Pa. Výrobci udávají vždy minimální a maximální hladinu akustického tlaku. Minimální hladina reprezentuje šumové pozadí mikrofonní vložky a maximální hladina odpovídá maximálnímu dovolenému akustickému tlaku na plochu membrány. Převedením těchto dvou tlaků na napětí je získáno šumové napětí mikrofonu a maximální napětí, které musí zesilovač zpracovat. Dynamika mikrofonu je dána rozdílem minimálního a maximálního tlaku. Další parametry měřících mikrofonů jsou šířka pásma, kterou dokáží zpracovat, výstupní impedance předzesilovače a proudová zatížitelnost signálového výstupu.

Z hlediska návrhu zesilovače pro měřicí mikrofony jsou důležité extrémní hodnoty parametrů měřících mikrofonů. Nejnižší šumové pozadí z množiny podporovaných mikrofonů, které je možné na výstupu mikrofonu získat je  $1 \mu\text{V}$  (mikrofonní vložka Brüel & Kjær 4148). Naopak nejvyšší napětí je možno získat s použitím vložky Brüel & Kjær 4191 a jeho velikost je 32 V. Měřicí mikrofony jsou vyráběny s horní mezní frekvencí maximálně 140 kHz (mikrofonní vložka Brüel & Kjær 4138). Proudová zatížitelnost signálového výstupu je uváděna pouze v katalogových listech produktů firmy Brüel & Kjær, takže nebylo možno stanovit, který z předzesilovačů má tento parametr nejmenší.

### 2.3.2 Rozhraní měřících mikrofonů

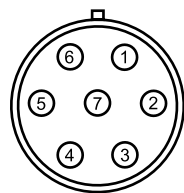
Realizovaný zesilovač je vybaven třemi druhy konektorů pro připojení měřících mikrofonů. Konektor, který používají mikrofony z produkce bývalé RFT má mezi piny 1 a 4 připojeno



**Obr. 2.1:** Nákres konektoru mikrofonů z produkce bývalé RFT, strana pájecích oček

topné tělísko pro vyhřívání mikrofonu, případně žhavení katody, pokud je předzesilovač osazen elektronikou. Pin 2 je vyhrazen pro polarizační napětí 200 V, pin 3 pro připojení napájecího napětí zesilovače. Na pin 5 je připojen signálový výstup a společný zemní potenciál je veden stíněním konektoru.

Dalším konektorem je konektor LEMO7, který využívá k propojování jak firma Microtech Gefell, tak Brüel & Kjær.



**Obr. 2.2:** Nákres konektoru LEMO7

Pin	Microtech Gefell	Brüel & Kjær
1	Žhavení	Kalibrace
2	Signálová zem	Signálová zem
3	Polarizační napětí	Polarizační napětí
4	Signálový výstup	Signálový výstup
5	Nezapojeno	Nezapojeno/TEDS
6	Napájení předzesilovače	Napájení předzesilovače
7	Zem napájení	Zem napájení

**Tab. 2.3:** Zapojení konektoru LEMO7 podle Microtech Gefell a Brüel & Kjær

Vzhledem k tomu, že realizovaný zesilovač nevyužívá ani kalibraci, ani datové rozhraní pro nahrání TEDS, zůstanou v případě použití mikrofону firmy Brüel & Kjær piny 1 a 5 nezapojeny.

Některé mikrofony od Microtech Gefell a Earthworks se připojují pomocí XLR konektoru a disponují symetrickým výstupem. Konektor je zapojen klasicky, tedy pin 1 slouží pro připojení stínění, pin 2 je „hot” a pin 3 je „cold”.

Realizovaný zesilovač je jednokanálový, proto je potřeba na jeho vstup připojit pouze ten konektor, který je právě využíván, čímž dojde automaticky k volbě režimu, tedy měli zesilovač pracovat jako symetrický nebo nesymetrický. Zároveň je potřeba připojit na patřičné vývody správný zdroj napětí. Tyto volby se provádí otočnými přepínači, které ovládají relé v signálových nebo napájecích obvodech.

### 2.3.3 Šířka pásma, vstupní obvody

Závěrem z průzkumu trhu měřících mikrofónů je požadovaná šířka pásma měřicího zesilovače alespoň 140 kHz, přičemž amplitudová i fázová frekvenční charakteristika musí být bez výrazného zvlnění. Zesilovač musí pracovat už od kmitočtů v řádu jednotek Hz. Spodní hranice kmitočtové charakteristiky může být ovlivněna především zpětnovazebními obvody pro potlačení stejnosměrného offsetu.

Dalším požadavkem je schopnost zpracovat signál o napětí až 32 V, což vyžaduje použití děliče ve vstupních obvodech. Co se týče proudové zatížitelnosti signálového výstupu

mikrofonů, je potřeba, aby vstup měřícího zesilovače umožňoval nastavit dostatečně velkou impedanci tak, aby nedocházelo ke zkreslení signálu z mikrofonu přetížením signálového výstupu předzesilovače. U profesionálních zesilovačů se vstupní impedance pohybuje v jednotkách megaohmů.

### 2.3.4 Detektor přebuzení

Realizovaný zesilovač se skládá z několika na sebe navazujících částí. Vstupy jednotlivých částí jsou schopny zpracovat napětí jen do určité velikosti. Při překročení tohoto napětí začne docházet ke zkreslení průchozího signálu vlivem saturace zesilovacích stupňů. Aby byla obsluha zesilovače informována o tom, že k takové situaci mohlo dojít, je na signálovou cestu ve vybraných místech připojen detektor přebuzení. Ten sleduje přiblížení sledovaného napětí maximálnímu dovolenému. Detektor sleduje napětí obou polarit, aby bylo vyloučeno maskování přebuzení vlivem například stejnosměrného offsetu.

K saturaci nemusí docházet trvale nebo opakovaně, ale pouze jednorázově nebo krátkodobě. Pro zachycení i krátkodobých přepětí musí být výstup detektoru opatřen tvařovačem pulsů, tedy monostabilním klopným obvodem s časovou konstantou dostatečně dlouhou (řádově sekundy), aby bylo každé překročení dovoleného napětí zaregistrovatelné obsluhou. Obsluha zesilovače je o přebuzení zesilovače informována pomocí svitu LED.

### 2.3.5 Výstupní rozhraní zesilovače

Měřící zesilovač je prostřední částí měřícího řetězce, proto je vybaven výstupy pro připojení měřící techniky. Konkrétně se jedná o XLR symetrický výstup a dále BNC a cinch nesymetrický výstup pro připojení obecné měřící techniky.

# 3

## Návrh zdrojové části

Návrh zapojení zdroje a zesilovače vychází z parametrů mikrofonů, které bude možno připojit k realizovanému měřicímu předzesilovači. Zdroje jsou navrženy tak, aby byly schopny dodat potřebné napětí pro provoz mikrofonů a jejich integrovaných předzesilovačů i při maximálním zatížení, viz tabulka 2.2. Při návrhu byl brán ohled na minimalizaci výkonových ztrát na regulačních prvcích zdrojů.

Při návrhu zesilovače bylo hlavním kritériem minimální zvlnění amplitudové a fázové frekvenční charakteristiky, stejně jako co největší dynamika zesilovače. Navrhovaná šířka pásma je 200 kHz, aby byly bezpečně pokryty frekvenční rozsahy všech dostupných měřících mikrofonů.

### 3.1 Návrh napájecího transformátoru

Pro napájecí část realizovaného zařízení byl navržen toroidní transformátor. Napětí a proudové dimenzování jeho sekundárních vinutí bylo voleno tak, aby byly pokryty požadavky stanovené v kapitole 2.2. Transformátor byl zadán do výroby s požadovanými parametry v tabulce 3.1. Požadovaná sekundární napětí i proudy jsou naddimenzovány tak, aby transformátor nepracoval na hranici svých možností, nebo aby umožnil rozšíření zesilovače o pomocné obvody nebo kanály.

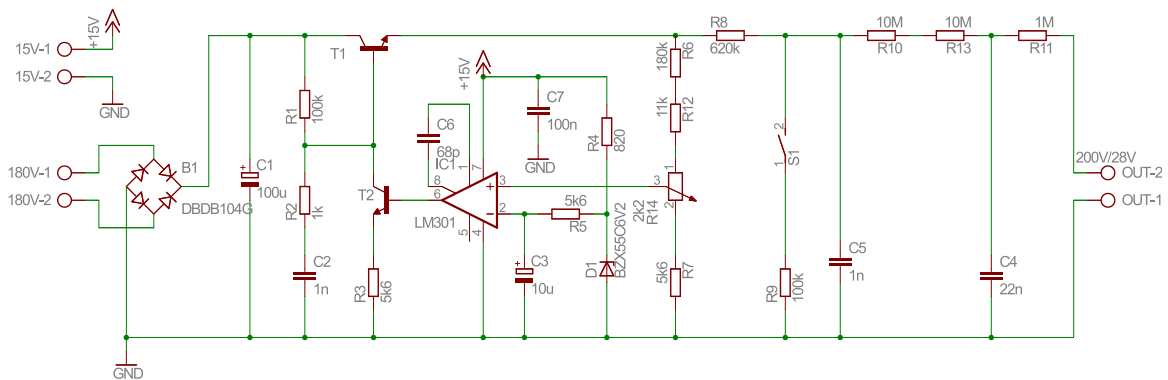
Účel	Napětí [V]	Proud [mA]
Polarizace vložky	180	40
Napájení mikr. předzes.	160	100
Napájení mikr. předzes.	50	60
Ohřev mikrofonu	14	300
Žhavení katod	8	300
Vlastní zesilovač	2 x 17	300

**Tab. 3.1:** Požadovaná napětí a proudy sekundárních vinutí toroidního transformátoru

Pro zdroj napětí pro mikrofonní předzesilovače byla navržena dvě vinutí z důvodu snížení ztrát na výkonových prvcích regulátorů. Ze sekundárního vinutí s napětím 160 V jsou napájeny zesilovače vyžadující napětí 150 V, 130 V, 120 V a 90 V. Z dalšího vinutí jsou pak napájeny předzesilovače vyžadující 48 V a 28 V.

### 3.2 Návrh zdroje polarizačního napětí

Schéma zapojení zdroje pro polarizaci vložek kondenzátorových mikrofonů bylo převzato z technické dokumentace k měřicímu zesilovači 2636 firmy Brüel & Kjær. Tato koncepce zdroje v sobě kombinuje zdroj polarizačního napětí 200 V a 28 V. V zapojení byly tranzis-



**Obr. 3.1:** Schéma zapojení zdroje polarizačního napětí kondenzátorových mikrofonních vložek.

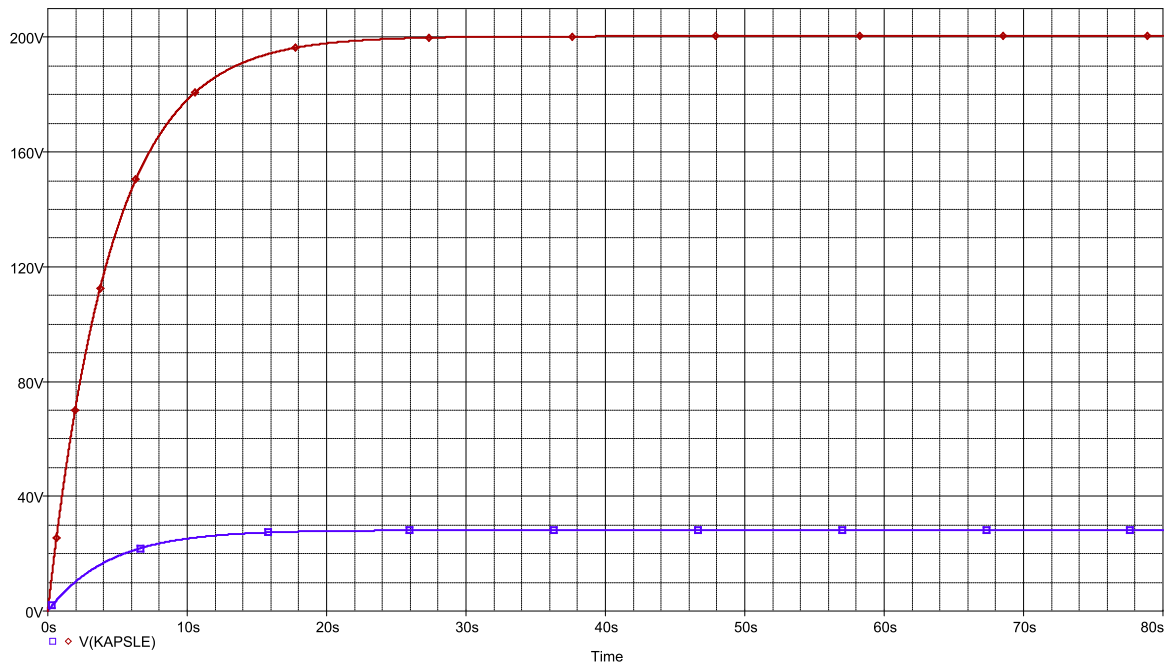
tory BF258 nahrazeny typem BF259 z důvodu jejich lepší dostupnosti. Použité tranzistory přesahují svými technickými parametry ty původní, proto nedojde k jejich zničení, ani bude-li zdroj pracovat do zkratu. Zapojení bylo doplněno o blokovací kondenzátor C7 pro operační zesilovač. Potenciometr, s označením R14 ve schématu, slouží pro přesné nastavení velikosti výstupního napětí při ožívování zdroje.

Výstupní polarizační napětí je bez zvlnění, díky dlouhým časovým konstantám způsobeným kondenzátory C4 a C5 a rezistory R10, R11 a R13. Volba výstupního napětí se provádí spínačem S1, kterým se zařazuje do obvodu napěťový dělič složený z rezistorů R8 a R9.

Zapojení zdroje bylo simulováno v programu PSpice. Zátěž byla tvořena náhradním zapojením mikrofonní vložky, tedy sériovou kombinací rezistoru s hodnotou odporu 20 M $\Omega$  a kondenzátoru s kapacitou v rozmezí 3,6 pF až 60 pF. Plného napětí je na vložce, podle simulace, dosaženo v čase 35 s (viz graf 3.2), což také odpovídá časové konstantě výstupního filtru.

Zdroj vyžaduje pomocné napájecí napětí o velikosti 15 V, odebíraný proud je podle simulace 12,4 mA. Dojde-li ke zkratu na výstupu zdroje polarizačního napětí, je velikost zkratového proudu omezena na 10  $\mu$ A díky vysokému sériovému odporu tvořícímu výstupní filtr a dělič výstupního napětí. Zkratový proud je zanedbatelně malý, jedná se tedy o měkký zdroj napětí a nehrozí tedy nebezpečí zničení připojeného zařízení při porucho-





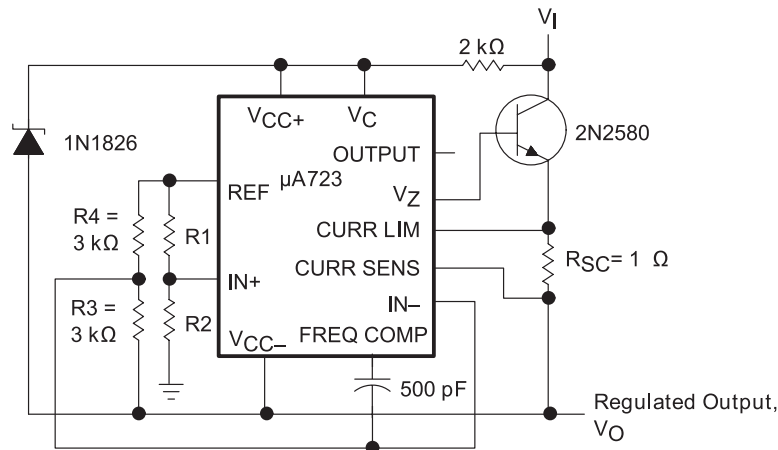
**Obr. 3.2:** Časový průběh napětí na výstupu zdroje po připojení mikrofonní kondenzátorové vložky. První průběh odpovídá sepnutému spínači S1, napětí se ustálí na 28 V. Druhý průběh zobrazuje nabíjení mikrofonní vložky s konečným napětím 200 V

vém stavu. Ztrátový výkon na regulačním tranzistoru T1 je dle simulace 75 mW i při zkratovaném výstupu, k jeho zničení tedy nedojde.

### 3.3 Návrh zdroje pro mikrofonní předzesilovače

Požadavek na velkou variabilitu výstupního napětí a výstupních proudů, při zachování minimálního zvlnění, předurčil použití lineárních stabilizátorů napětí. Na trhu je od roku 2008 k dispozici vysokonapěťový regulátor od firmy Texas Instruments, TL783 [13], na jehož výkonovém tranzistoru může být úbytek napětí až 125 V. Tento limit by byl dodržen při vhodně navrženém vstupním napětí (požadované výstupní napětí 28 V až 150 V), avšak vzhledem k dovoleným dlouhodobým energetickým ztrátám na výkonovém prvku tohoto regulátoru se stává obtížně použitelným, neboť minimální zatěžovací proud tohoto regulátoru je podle katalogového listu 15 mA. Proto bylo přistoupeno k použití precizního regulátoru  $\mu A723$  [2] v plovoucím zapojení 3.3, který dokáže regulovat výstupní napětí ve větším rozsahu a maximální dovolené výkonové ztráty se odvíjejí od použitého typu regulačního tranzistoru.

Regulátor napětí v tomto zapojení dokáže regulovat výstupní napětí v rozsahu 4 V až 250 V [2]. Pro nastavení výstupního napětí se používá odporový dělič napětí složený z rezistorů R1 a R2. Doporučené hodnoty odporů rezistorů R3 a R4 pro tuto topologii jsou 3 k $\Omega$ . Výstupní napětí je určeno vztahem 3.1, kde  $V_{out}$  je výstupní napětí a  $V_{(ref)}$  je referenční napětí o velikosti typicky 7,15 V.



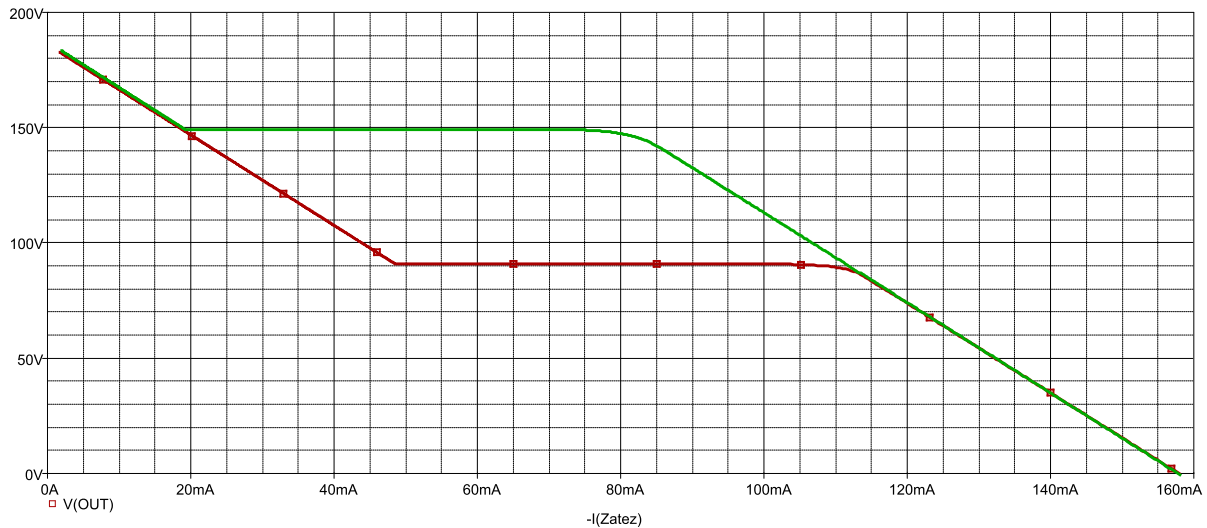
**Obr. 3.3:** Schéma zapojení plovoucího regulátoru [Převzato z [2]]

$$V_{out} = \frac{V_{(ref)}}{2} \cdot \frac{R_2 - R_1}{R_1} \quad (3.1)$$

Tento regulátor napětí je vybaven obvodem pro sledování proudu tekoucího pomocným tranzistorem. Jeho velikost je určena rovnicí 3.2. Napájecí napětí regulátoru je odvozeno od vstupního napětí použitím srážecího odporu a zenerovy diody, neboť zatímco vstupní napětí může dosahovat stovek voltů, maximální dovolené napájecí napětí obvodu  $\mu A723$  je 40 V.

$$I \approx \frac{0,65}{R_{sc}} \quad (3.2)$$

Toto zapojení má však významnou nevýhodu v podobě nutnosti zatěžovacího proudu v řádu desítek miliampér. Pokud není zdroj dostatečně zatížen, nemá lineární regulátor  $\mu A723$  dostatek proudu k řízení výkonového tranzistoru, a tedy výstupní napětí může být významně vyšší, než jaké bylo nastaveno odporovým děličem  $R_1, R_2$ . Tento nutný odebraný proud způsobuje přídavné výkonové ztráty na zatěžovacím rezistoru a předřadném srážecím rezistoru před zenerovou diodou. Volbou velikosti zatěžovacího odporu je určen pracovní bod zdroje. Pro dosažení co největší efektivity se proud zatěžovacím odporem volí co nejmenší tak, aby byl zdroj schopen udržovat výstupní napětí nastavené děličem. V simulaci je použit snímací rezistor  $R_{sc}$  s velikostí odporu  $10 \Omega$ . Přibližná hodnota proudu tekoucího přes výkonový tranzistor je tedy 65 mA. Z grafu 3.4 je vidět, že při požadovaném výstupním napětí 150 V je minimální zatěžovací proud asi 20 mA, pro 90 V je to dokonce skoro 50 mA. Do okamžiku, kdy začne zdroj regulovat požadované výstupní napětí, je tento proud hrazen z větve se zenerovou diodou a teprve od překročení této hranice je proud do zátěže dodáván přes výkonový tranzistor. Proto jsou poklesy zatěžovacích charakteristik daleko za hranicí nastavených 65 mA. Použití diody s nižším zenerovým napětím vede k posunu minimálního zatěžovacího proudu ještě výše, stejně tak, zvětšuje-li se rozdíl mezi vstupním a výstupním napětím, roste i minimální zatěžovací proud. Je-li výstupní napětí nastaveno na 120 V, zdroj začíná regulovat až od 45 mA,

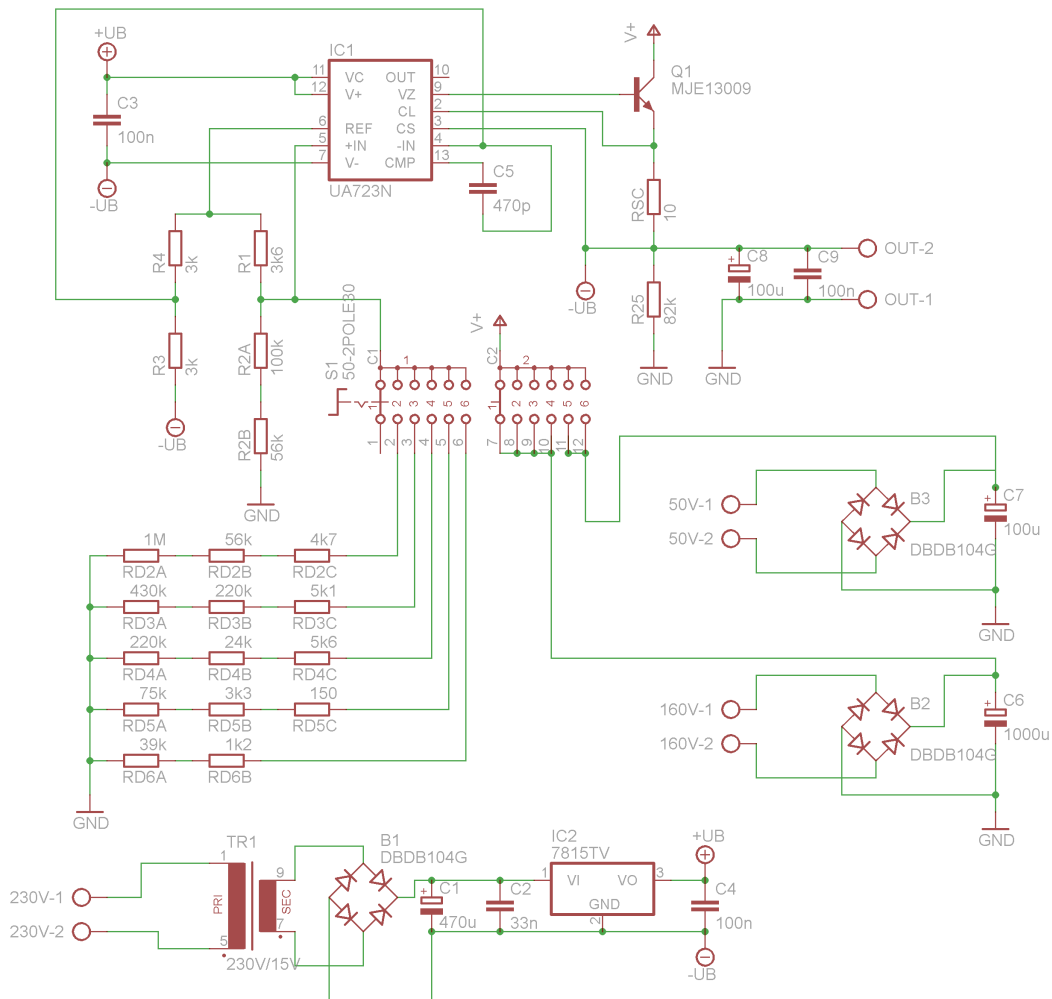


**Obr. 3.4:** Zatěžovací charakteristika zdroje napětí podle schematu 3.3. Na ose  $x$  je proud tekoucí zátěží, na ose  $y$  napětí na zátěži. Vstupní napětí regulátoru je 226 V

tedy zatěžovací odpor musí být 2,6 k $\Omega$ . Z toho vyplývají ztráty na zatěžovacím odporu téměř 5,5 W. Ztráty na srážecím odporu před zenerovou diodou jsou 4 W.

Protože provoz takového regulátoru je velice neefektivní, je potřeba změnit doporučenou topologii. Řešením je zvolit jiný způsob napájení regulátoru  $\mu A723$ . Nahrazením zenerovy diody a srážecího rezistoru pomocným zdrojem napětí odpadne výkonová ztráta na srážecím rezistoru a potřebný zatěžovací proud klesne pod 1 mA. Zůstanou tak pouze ztráty na výkonovém tranzistoru, které jsou závislé na velikosti rozdílu vstupního a výstupního napětí a proudu, který poteče do spotřebiče, v tomto případě mikrofonního předzesilovače. Jelikož se jedná o plovoucí zapojení, musí být pomocný napájecí zdroj pro lineární stabilizátor galvanicky oddělen od ostatních obvodů, neboť jeho napětí se vůči nulovému potenciálu mění s nastaveným výstupním napětím zdroje pro mikrofonní předzesilovače.

Na obrázku 3.5 je konečné schéma zdroje napětí pro mikrofonní předzesilovače. Jak je napsáno výše, napájení obvodu  $\mu A723$  je řešeno pomocným zdrojem se stabilizátorem napětí L7815. Díky tomu není potřeba zatěžovat zdroj proudem o velikosti desítek miliampér. Podle [2] je doporučená hodnota odporu rezistoru R1 3,57 k $\Omega$  a mění se jen hodnota rezistoru R2 podle požadovaného výstupního napětí. Rezistor R1 byl pro jednoduchost zvolen 3,6 k $\Omega$ , neboť je to přímo řadová hodnota. Velikost odporů druhé části odporového děliče byla určena dle vztahu 3.1. Protože však při odpojení uzeměné části děliče dojde k nárůstu výstupního napětí na maximální úroveň, což je nebezpečné pro připojená zařízení, byl dělič upraven tak, aby při přepínání otočného přepínače S1 mohlo výstupní napětí vzrůst maximálně na 150 V vlivem přepínacích pochodů. Tedy rezistor mezi pinem 6 stabilizátoru napětí a zemí byl nahrazen sériovou kombinací rezistorů R2A a R2B podle schématu 3.5 a volba výstupního napětí se provádí připojováním dalších rezistorů mezi pin 6 stabilizátoru  $\mu A723$  a zem.



**Obr. 3.5:** Schéma zdroje napětí pro mikrofonní předzesilovače

Je-li přepínač S1 v poloze 1, uplatní se v druhé části děliče pouze odpor 156 kΩ. V ostatních polohách se paralelně k tomuto odporu připojují další rezistory tak, aby výsledný odpor mezi pinem 6 a zemí odpovídal vypočteným hodnotám. Hodnoty odporů R2 a RDx jsou v tabulce 3.2. Hodnoty rezistoru RDx byly dopočteny ze vztahu pro paralelní řazení rezistorů.

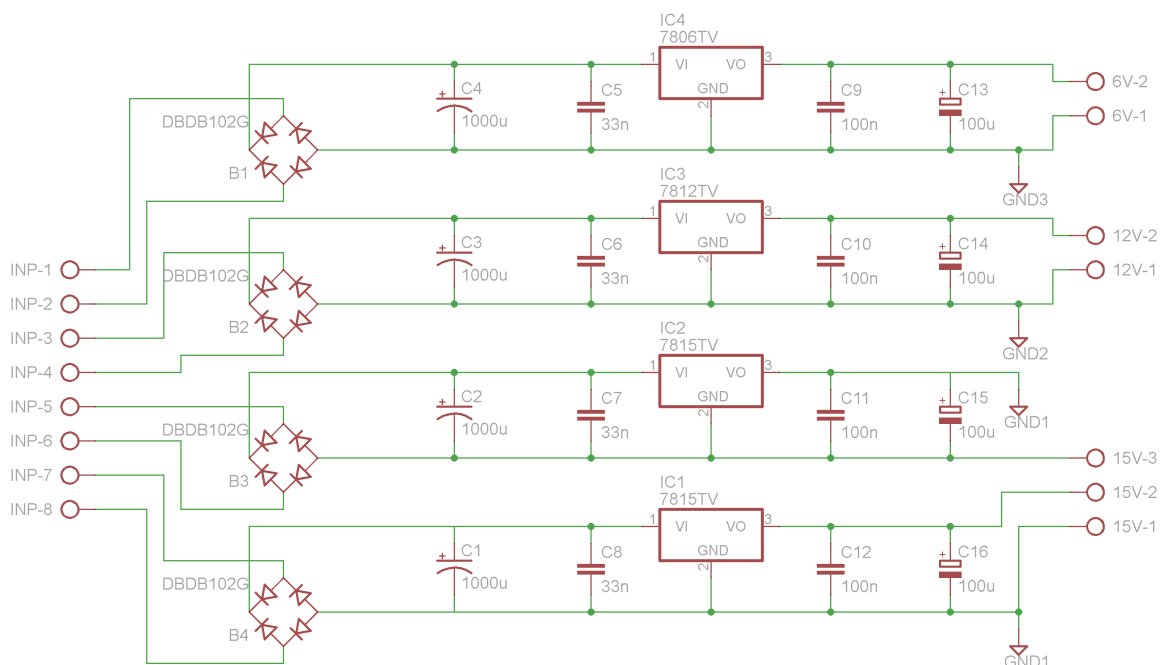
Při vstupním napětí 226 V a výstupních napětích a proudech podle tabulky 2.2 jsou ztrátové výkony na pomocném regulačním tranzistoru 461 mW, 580 mW, 4,31 W a 820 mW. Pokud by bylo toto vstupní napětí použito i pro 48 V a 28 V výstupního napětí, byl by ztrátový výkon na tranzistoru při požadovaných proudech 2,87 W a 8,11 W. Takový ztrátový výkon by byl pro tranzistor nebezpečný, viz [14], proto je použito další sekundární vinutí s nižším napětím, konkrétně 70V. Díky nižšímu vstupnímu napětí, budou ztráty na výkonovém tranzistoru při výstupním napětí 48 V 470 mW a 1,7 W při napětí 28 V. K přepínání vstupních napětí stabilizátoru dochází automaticky při volbě výstupního napětí pomocí přepínače S1. Změna vstupního napětí nastane při přechodu z 90 V na 48 V nebo zpět.

Napětí [V]	Odpor rezistorů R2 [kΩ]	Odpor rezistorů RD <sub>x</sub> [kΩ]
150	156	∞
130	136	1060.7
120	126	655.1
90	96	249.6
48	52.1	78.45
28	32	40.2

**Tab. 3.2:** Velikost odporu rezistorů R2 a RD<sub>x</sub> v závislosti na požadovaném výstupním napětí, kde  $x$  představuje polohu přepínače

### 3.4 Návrh zdrojů napětí pro žhavení katod, výhřev mikrofonů, a vlastní předzesilovač

Jako vhodné zdroje napětí pro žhavení katod i pro výhřev těl mikrofonů dobře poslouží napěťové regulátory L7806 a L7812 v základním zapojení [3]. Pakliže budou regulátory opatřeny chladiči pro odvod tepla z jejich pouzdra, dokáží na svém výstupu dodat proud až 1 A (pouzdra TO-220). Regulátory jsou vybaveny vnitřní ochranou proti zkratu a přehřátí, takže jejich zničení nehrozí. Vstupní stejnosměrné napětí smí dosahovat až 35 V a maximální dovolená teplota čipu je 150 °C.



**Obr. 3.6:** Schéma zdrojů napětí pro žhavení katod, výhřev mikrofonů a vlastní předzesilovač

Stejnoseměrné filtrované vstupní napětí pro zdroj napětí 6 V je 10,5 V (odvozeno od sekundárního napětí navrženého transformátoru). To znamená úbytek na regulátoru 4,5 V.

Při navrhovaném proudu jsou tepelné ztráty 0,9 W. Pakliže bude regulátor zatěžován maximálním dovoleným proudem sekundárním vinutím, budou tepelné ztráty 1,35 W za předpokladu, že nebude docházet k poklesu vstupního napětí vlivem zatížení. V tom případě by ztrátový výkon klesl.

V případě 12 V regulátoru je vstupní napětí 19 V. Napěťový úbytek je tak 7 V. Tepelný výkon, který bude třeba z pouzdra odvést bude 1,4 W pro 200 mA výstupního proudu a 2,1 W pro proud 300 mA, při vstupním napětí nezávislém na zatěžovacím proudu. Napětí z tohoto zdroje je využíváno i jako pomocné napětí pro ovládání relé v obvodu zesilovače, viz kapitola 4.

Realizovaný zesilovač je vyžaduje symetrické napájecí napětí  $\pm 15$  V. Z toho důvodu byly použity dva regulátory L7815 pro získání napětí 15 V. Každý regulátor je napájen z vlastního vinutí usměrněným filtrovaným napětím 24 V. Výstupy těchto regulátorů byly spojeny tak, aby celkové výstupní napětí bylo 30 V symetricky okolo nulového potenciálu. Ztrátový výkon na jednom regulátoru je 4,5 W při maximálním proudu sekundárním vinutím.

Regulátory typu L7800 v pouzdře TO-220 mají tepelný odpor čip-okolí  $50$  °C/W. Při spočítaných ztrátových výkonech by byly regulátory provozovány na hranici  $150$  °C nebo by byly jeho polovodičové přechody velkou teplotou zničeny. Proto musí být použity chladiče pro odvod tepla z pouzdra regulátoru.

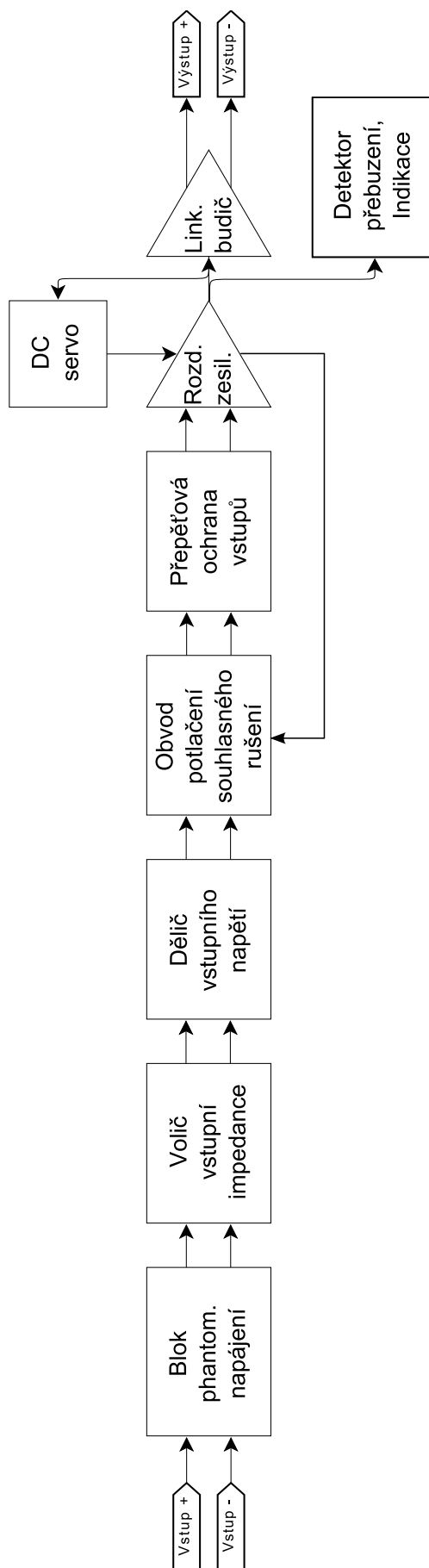
Použitím rovnice 3.3 vyjadřující vazbu mezi teplotou čipu a okolí bylo zjištěno, že provozní parametry regulátorů nebudou překročeny, pakliže bude použita teplovodivá pasta s tepelným odporem  $4$  °C/W a chladič s tepelným odporem maximálně  $17$  °C/W protože tepelný odpor čip-pouzdro je u těchto regulátorů  $5$  °C/W. Uvažovaná teplota okolí je  $25$  °C.

$$T_{cip} - T_{okoli} = (R_{cip-pouzdro} + R_{pouzdro-chladic} + R_{chladic-okoli}) \cdot P \quad (3.3)$$

## 4

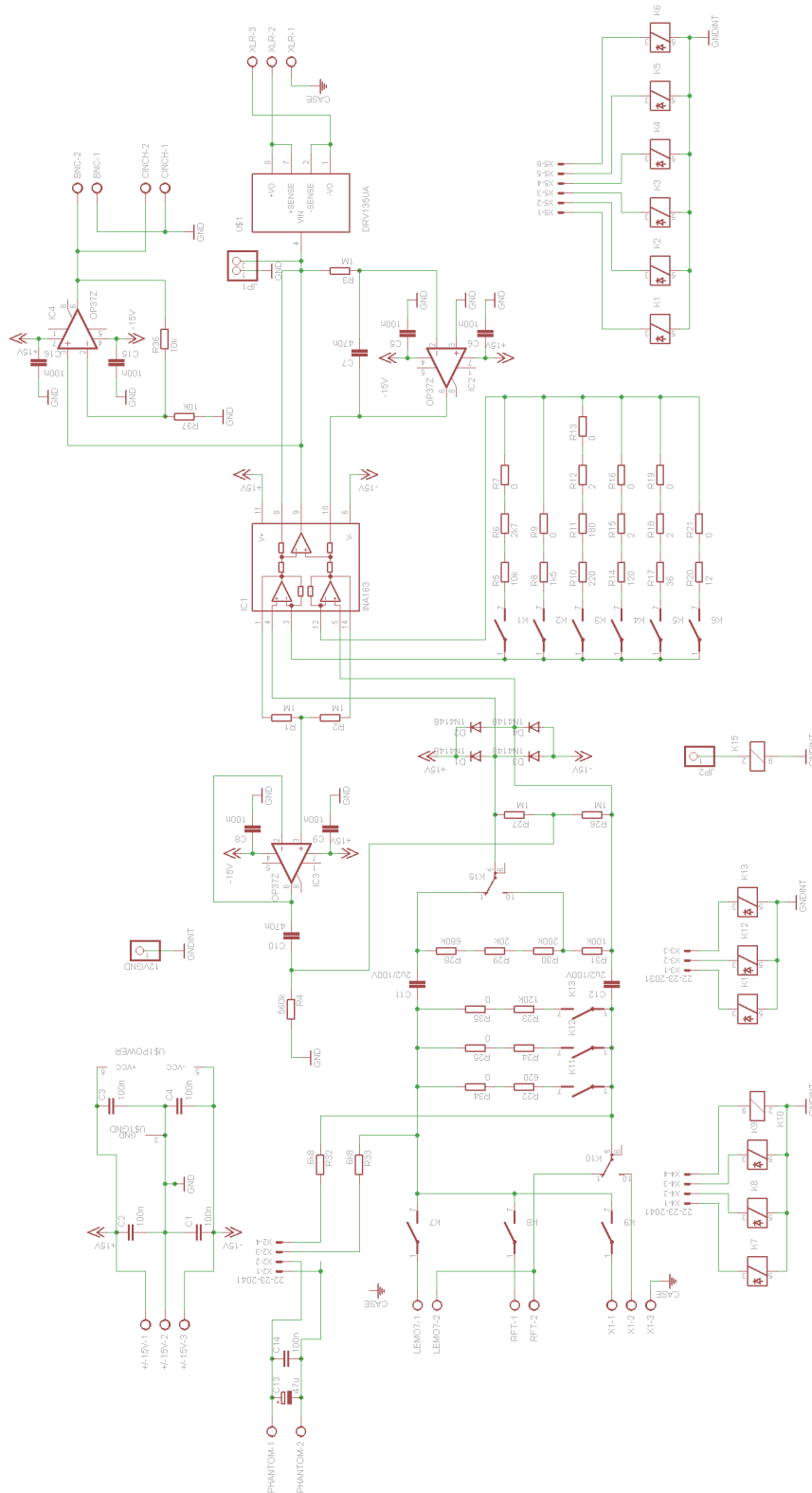
# Návrh zesilovače a pomocných obvodů

Navrhovaný zesilovač lze principiálně rozdělit do několika bloků, které zajišťují jeho vazbu s prvky měřicího řetězce, jeho ochranu nebo zlepšení jeho technických parametrů. Celé zapojení pracuje jako symetrický zesilovač se ziskem od  $-14$  dB do  $60$  dB se šířkou pásma  $200$  kHz. Pro získání představy, jak se bude celé zapojení chovat ve skutečnosti byl použit simulační program PSpice. Simulace jsou v něm prováděny na základě modelů součástek a vstupních parametrů. Modely použitých integrovaných obvodů byly získány od výrobce, který v jejich popisu uvádí, že nepřebírá odpovědnost za správnost popisu skutečného obvodu pomocí ideálních součástek, ze kterých se takový model skládá.



Obr. 4.1: Blokové schéma zesilovače





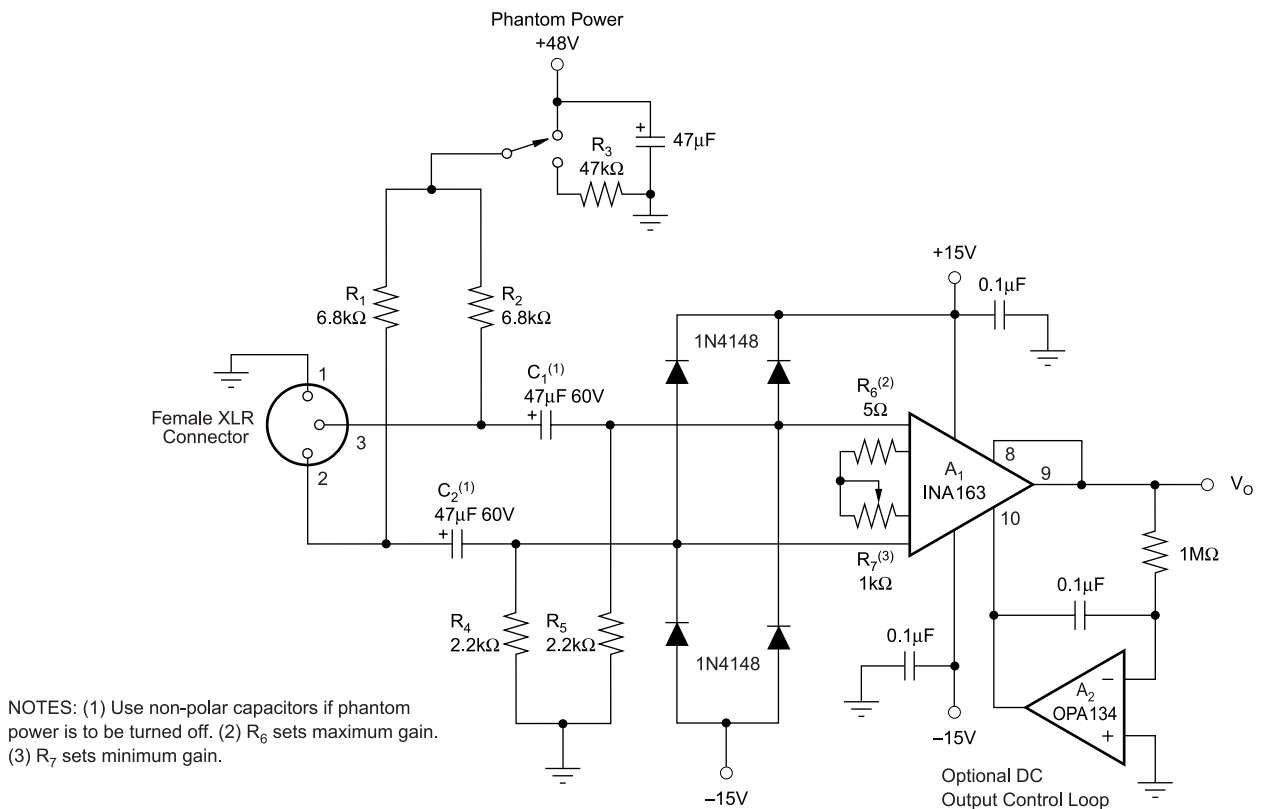
Obr. 4.2: Schéma měřícího zesilovače

## 4.1 Zesilovač

Jádrem měřicího zesilovače je obvod INA163. Jedná se o přístrojový zesilovač, určený pro audio aplikace, s nízkým šumem ( $1 \frac{nV}{\sqrt{Hz}}$  při 1 kHz a zisku 40 dB), nízkým celkovým harmonickým zkreslením (0,002%), šířkou pásma 800 kHz a vstupní impedancí 60 M $\Omega$  [15]. Zisk zesilovače se nastavuje externím rezistorem  $R_G$ , zesílení zesilovače je určeno vztahem 4.1.

$$G = 1 + \frac{6000}{R_G} \quad (4.1)$$

Tento integrovaný obvod se skládá ze tří operačních zesilovačů a přesné odporové sítě. Výhodou je, že má vyvedeny výstupy vstupních OZ. Toho je využito v bloku pro potlačení souhlasného rušení. Základní topologie měřicího předzesilovače je založena na doporučeném zapojení mikrofonního zesilovače podle obrázku 4.3. Zesilovač je zde doplněn DC



**Obr. 4.3:** Základní zapojení mikrofonního zesilovače [Převzato z [15]]

servem, které zajišťuje minimalizaci výstupního stejnosměrného offsetu. Protože obvod pro potlačení offsetu není zařazen v signálové cestě, nedegraduje kvalitu signálu.

Na výstup přístrojového zesilovače je připojen symetrický linkový budič pro symetrický výstup zesilovače a oddělovací zesilovač pro nesymetrické výstupy. Linkový budič je použit DRV135 firmy Texas Instruments s rozkmitem výstupního napětí 24 V<sub>pp</sub> a šířkou pásma 700 kHz. Tento budič má zisk 6 dB a jeho výstup je optimalizován pro zatěžovací impedanci 600  $\Omega$ . Symetrický výstup bude použit pro připojení profesionální měřicí

techniky, například audioanalyzátoru. Oddělovací zesilovač pro nesymetrické výstupy měřicího předzesilovače je tvořen nízkošumovým, nízkooffsetovým operačním zesilovačem OP-37 v neinvertujícím zapojení se ziskem 6 dB, aby byla zajištěna stejná úroveň výstupního signálu na symetrickém i nesymetrickém výstupu.

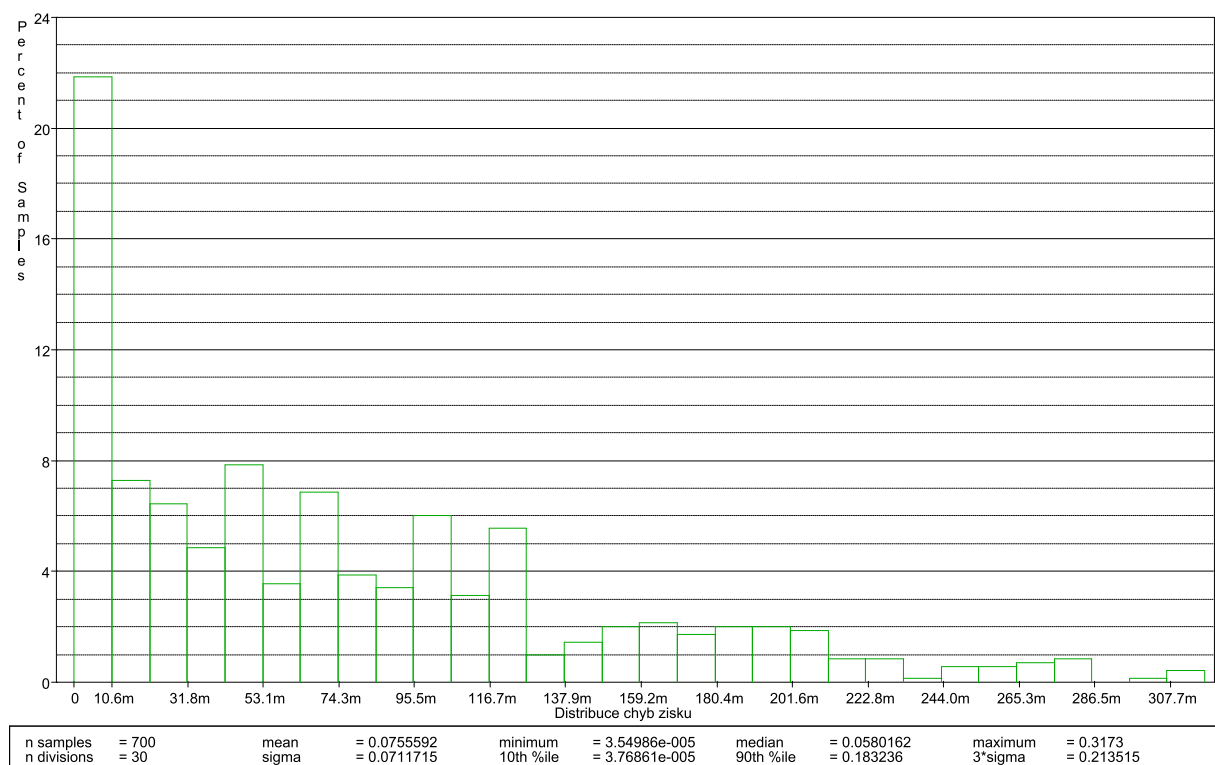
Zisk přístrojového zesilovače je volen maximálně 54 dB, protože tak je pokles amplitudové charakteristiky na frekvenci 200 kHz pouze 0,5 dB. Celé zapojení má tak maximální zisk 60 dB. Další zisky jsou odstupňovány po 10 dB směrem dolů, tedy první stupeň zesilovače zesiluje vstupní signál o 4, 14, 24, 34, 44 a 54 dB. Jelikož má linkový budič zisk 6 dB a rozkmit výstupního napětí maximálně 24 V<sub>pp</sub>, může mít jeho vstupní napětí rozkmit maximálně 12 V<sub>pp</sub>, aby se nedostával do saturace. Maximální napětí na vstup bude možno přivést v případě nejnižšího zisku prvního stupně. Pro zisk 4 dB bude moci vstupní napětí mít velikost 2,67 V efektivních. Doplněním možnosti volby zisku 0 dB prvního stupně umožníme zesilovat vstupní signál o napětí až 4,24 V efektivních bez toho, aby se některý ze zesilovacích stupňů dostal do saturace. Díky tomu bude možno měřit s mikrofonom s citlivostí 50 mV/Pa tlak až 132 dB. Podle vzorce 4.1 byly určeny hodnoty odporů rezistoru  $R_G$  pro jednotlivé zisky.

Požadovaný zisk [dB]	Odpor rezistoru $R_G$ [ $\Omega$ ]
0	$\infty$
4	10250
14	1500
24	404
34	122
44	38
54	12

**Tab. 4.1:** Velikosti odporů rezistoru  $R_G$  určující zisk přístrojového zesilovače

Rezistory určující zisk přístrojového zesilovače jsou k obvodu připojovány pomocí relé, zisku 0 dB se dosáhne odpojením všech rezistorů. V zapojení jsou použity rezistory s 1 % odchylkou od jmenovité hodnoty, to znamená, že přístrojový zesilovač může vykazovat mírnou odchylku zisku od nastavené hodnoty. Grafické znázornění distribuce chyby zisku je vidět na následujícím histogramu. Analýza byla provedena v simulačním programu PSpice, pro všech sedm zisků s tolerancí odchylky 1 % od jmenovité hodnoty odporu. Parametry Monte Carlo analýzy byly nastaveny na Gaussovo rozložení odchylek, počet běhů 100. Vyšší počet běhů analýzy neovlivnil výsledné rozložení chyb.

Svislá osa histogramu vyjadřuje procentuální zastoupení, na vodorovné ose je vidět velikost odchylky. Ze simulace vyplývá, že pro 22 % případů bude chyba zisku pouze 10,6 mdB. Střední hodnota chyby zisku je 75,5 mdB.



Obr. 4.4: Distribuce chyby zisku

### 4.1.1 Dělič vstupního napětí

Jak je zmíněno v sekci výše, zesilovač může zesilovat vstupní efektivní napětí o maximální velikosti 4,24 V, aniž by se dostal do saturace. Jelikož na výstupu mikrofonů může být napětí i výrazně vyšší, je potřeba zařadit před samotný zesilovač vstupní dělič s vhodným dělicím poměrem. Nejvyšší efektivní napětí lze získat z mikrofonních předzesilovačů firmy Brüel & Kjær [6], konkrétně 39 V efektivních. Takového napětí lze při daných citlivostech dosáhnout tlakem přesahujícím 132 dB. Vhodný dělicí poměr je 1:10. Vstupní impedance děliče je zvolena 1 M $\Omega$ . Vzhledem k velikosti vstupní impedance přístrojového zesilovače musí mít menší z rezistorů odporového děliče velikost odporu 100,17 k $\Omega$ . Bude-li vstup zesilovače přepnut na sledování napětí na celém děliči, bude mít zapojení vstupní impedanci 983,771 k $\Omega$ , jinak bude impedance 983,606 k $\Omega$ .

## 4.2 Phantomové napájení

Prvním blokem je blok phantomového napájení, který umožňuje připojit napětí ze zdroje pro mikrofonní předzesilovače mezi signálové vodiče a zemní svorku. Phantomové napětí může být tedy 28, 48, 90, 120, 130 nebo 150 V. Napětí je na signálové vodiče přiváděno přes rezistory s hodnotou odporu 6,8 k $\Omega$ . Využití tohoto bloku má opodstatnění pouze při volbě symetrického zdroje signálu. Aby se phantomové napájení nedostalo na vstupy zesilovače, je od něj odděleno foliovými kondenzátory  $C_{11}$  a  $C_{12}$ . Oddělovací kondenzátory jsou umístěny v signálové cestě ještě před děličem, aby jím netekl stejnosměrný proud.

### 4.3 Vstupní impedance zesilovače

Ve druhém bloku je možnost zvolit vstupní impedanci zesilovače, tedy zatěžovací impedanci zdroje signálu. Tento blok umožňuje nastavit vstupní impedanci 600  $\Omega$ , 100 k $\Omega$  a 500 k $\Omega$ . Vstupní impedance 600  $\Omega$  má využití především pro klasické kondenzátorové nebo elektretové mikrofony, je to také minimální zatěžovací impedance mikrofonů firmy Earthworks [12]. Vyšší impedance se volí při použití měřicích mikrofonů. Důvodem je menší proudové zatěžování signálových výstupů zesilovačů integrovaných v měřicích mikrofonech. Například při použití mikrofonního předzesilovače firmy Brüel & Kjær 2669, jehož výstupní napětí může být maximálně 110 V<sub>pp</sub> a špičkový proud 20 mA musí být zatěžovací impedance minimálně 2750  $\Omega$ , aby nedošlo k přetěžování zdroje signálu, bez uvažování přívodního kabelu.

### 4.4 Ochrana vstupů zesilovače

Pro zajištění ochrany vstupní části přístrojového zesilovače INA163 je použita čtveřice diod 1N4148. Jedná se o rychlé diody s maximálním závěrným napětím 100 V. Jejich zapojení na signálové vodiče je převzato z katalogového listu [15], schéma je na obrázku 4.3. Na diodě 1N4148 je maximální napětí 1 V, teče-li jí proud 100 mA [16] v propustném směru, z čehož vyplývá, že na vstupech přístrojového zesilovače nemůže být proti zemní svorce větší napětí než  $\pm 16$  V.

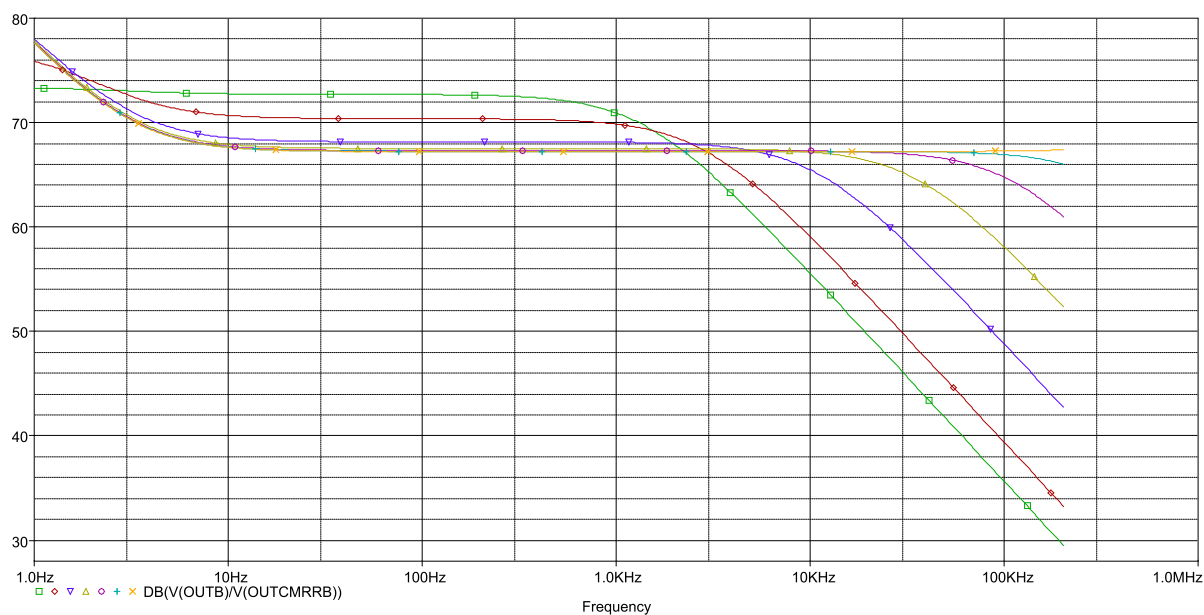
### 4.5 Kompenzace stejnosměrného offsetu

Potlačení stejnosměrného offsetu na výstupu přístrojového zesilovače je důležité kvůli zachování dynamiky zesilovače. K tomu účelu slouží invertující integrátor s nastavenou zlomovou frekvencí 1,6 Hz. Integrátor je zapojen na výstup přístrojového zesilovače a kompenzuje tak stejnosměrnou složku výstupního napětí včetně střídavé složky do frekvence 1,6 Hz. Bez použití DC serva je výstupní stejnosměrné napětí 6,495 mV. S jeho použitím se toto napětí sníží na 1,275 mV.

### 4.6 Obvod potlačení souhlasného rušení

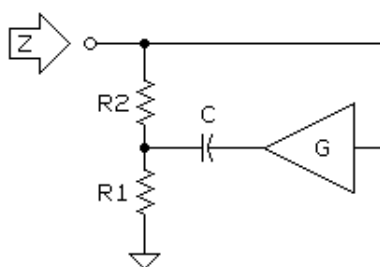
V měřicím zesilovači je využit obvod pro zlepšení činitele potlačení souhlasného rušení. Realizovaný zesilovač má průběh tohoto činitele vyobrazený v grafu 4.5, jednotlivé křivky reprezentují průběh činitele zkreslení pro zisky zesilovače 0, 6, 10, 20, 30, 40, 50 a 60 dB. Simulace byla provedena pro vstupní nesymetrii 10  $\Omega$ .

Obvod pro zlepšení CMRR je založen na technice bootstrappingu rezistoru. Princip je vidět na obrázku 4.6. Vstupní impedance je popsána vztahy 4.2, 4.2 a 4.2. Zvětšením vstupní impedance pro užitečný signál klesá míra nesymetrie způsobená například



Obr. 4.5: Průběh CMRR v závislosti na frekvenci

přechodovými odpory konektorů.



Obr. 4.6: Základní princip techniky zvané bootstrapping

$$Z_{vst} = (R_1 + R_2) \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{f}{f_N}\right)^2}{1 + (1 - G)^2 \left(\frac{f}{f_D}\right)^2}} \quad (4.2)$$

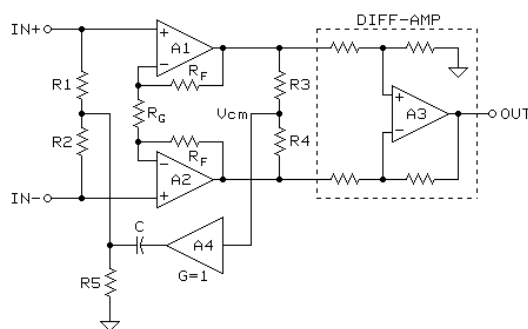
$$f_N = \frac{1}{2\pi \left(\frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}\right) \cdot C} \quad (4.3)$$

$$f_D = \frac{1}{2\pi R_1 C} \quad (4.4)$$

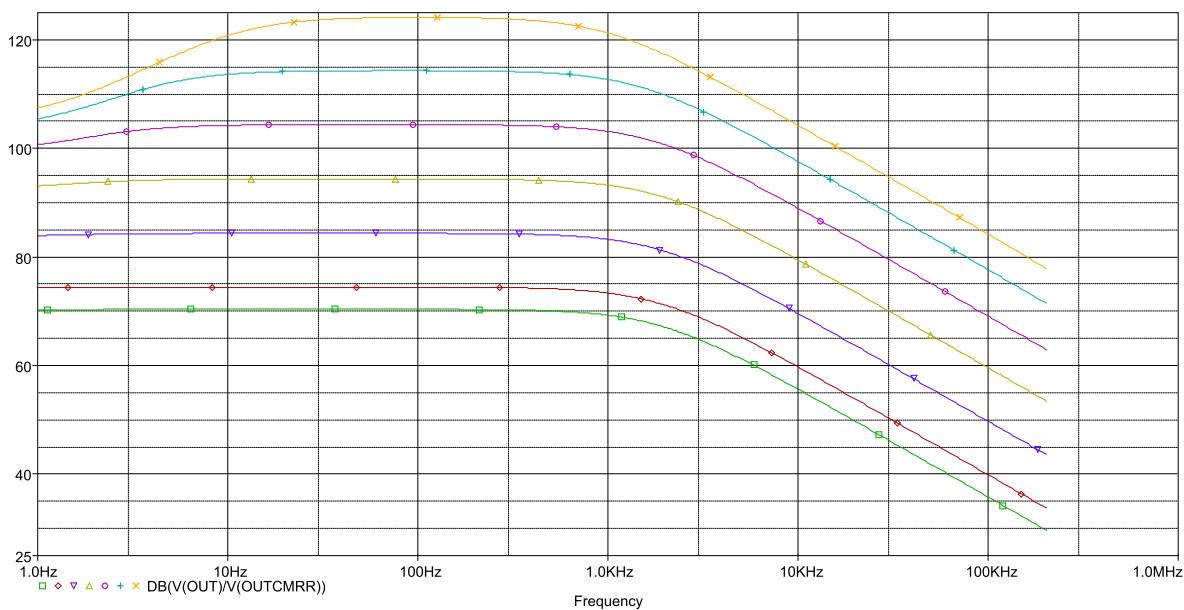
Frekvenční závislost impedance obvodu z obrázku 4.6 je pro hodnoty  $R_1=1 \text{ M}\Omega$ ,  $R_2=560 \text{ k}\Omega$  a  $C=470 \text{ nF}$  spočtena v následující tabulce.

Frekvence [kHz]	Vstupní impedance [MΩ]
0.01	9,23
0.1	83.54
1	842,35
10	1704,22
100	2319,69
200	1318,72

Tab. 4.2: Velikost vstupní impedance v závislosti na frekvenci

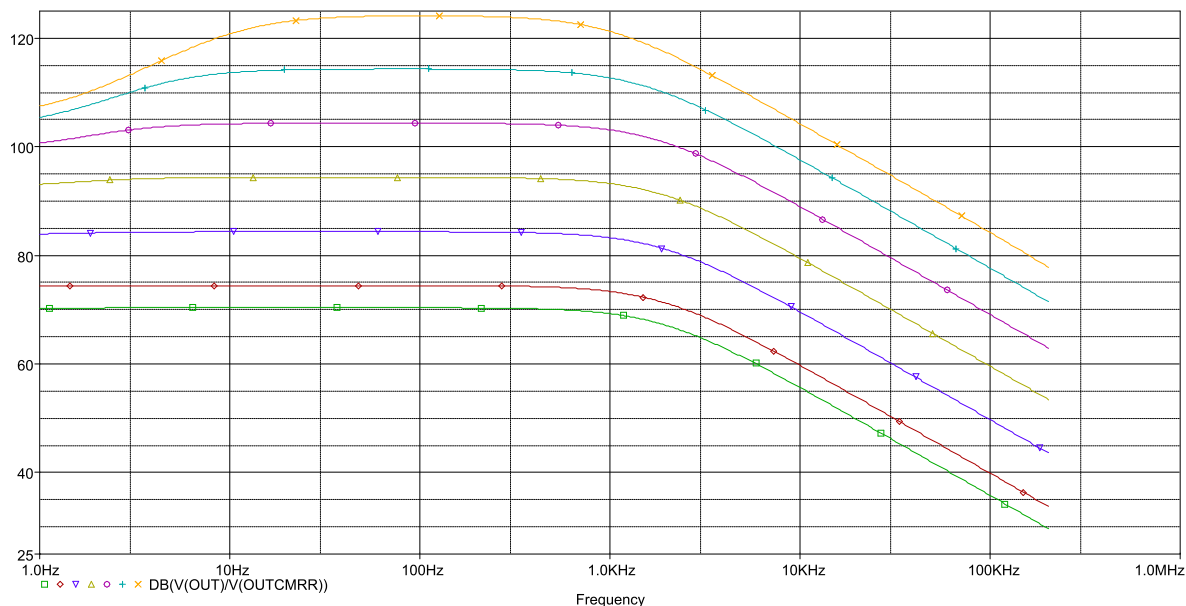


Obr. 4.7: Způsob připojení bootstrapového obvodu k přístrojovému zesilovači



Obr. 4.8: Průběh CMRR v závislosti na frekvenci s použitím bootstrapového obvodu

Na obrázku 4.7 je znázorněn způsob připojení bootstrapového obvodu k přístrojovému zesilovači. V tomto zapojení funguje obvod tak, že před diferenčním zesilovačem z děliče získá napětí a vnutí ho do odporového děliče R1, R2. Tím zajistí symetrii vstupního signálu kolem nulového potenciálu. Na obrázku 4.9 jsou vidět průběhy činitele potlačení souhlasného rušení v závislosti na frekvenci pro zisky 0 dB až 60 dB. Průběhy se shodují pro symetrický u nesymetrický výstup.



**Obr. 4.9:** Průběh CMRR v závislosti na frekvenci s použitím bootstrapového obvodu

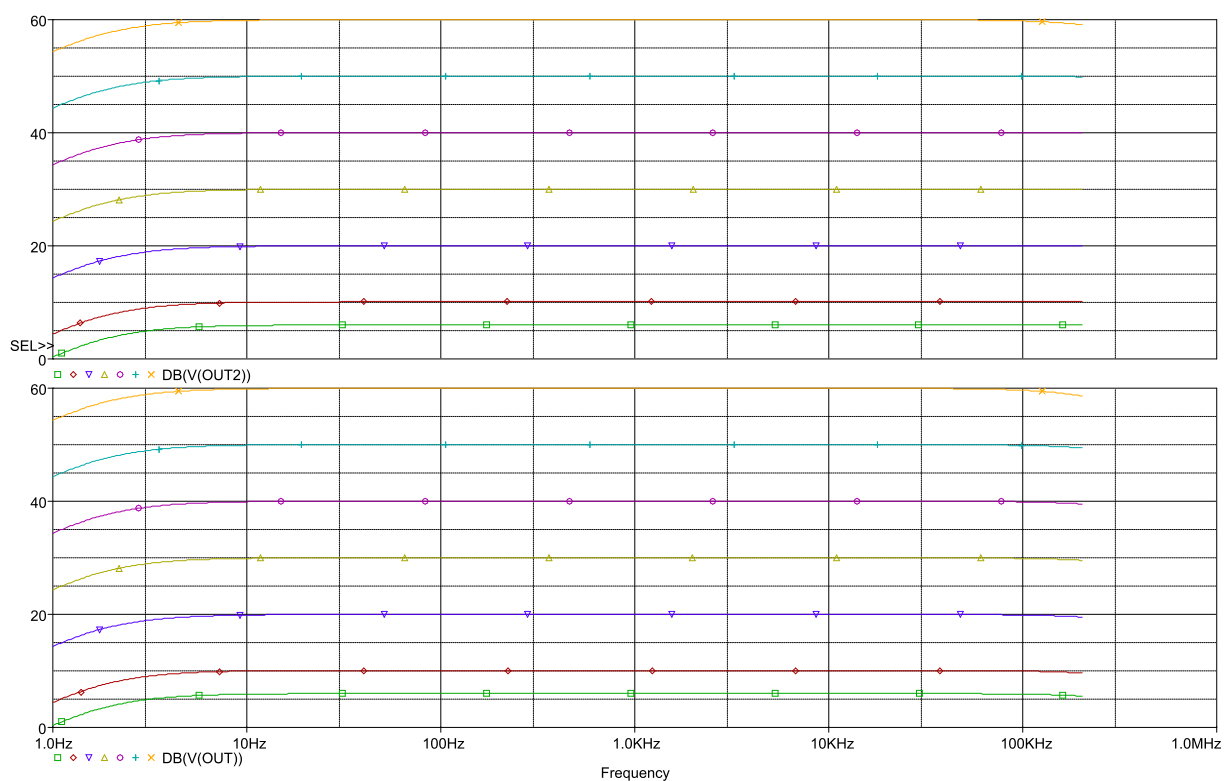


## 4.7 Simulace zapojení

### 4.7.1 Amplitudové a fázové frekvenční charakteristiky

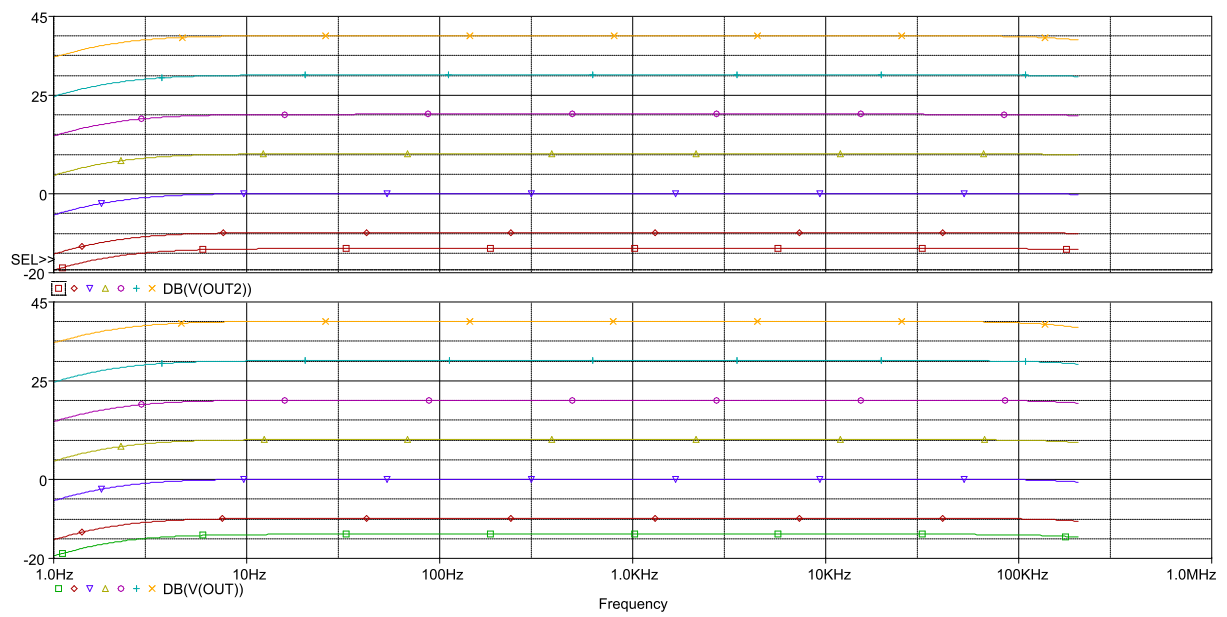
V programu PSpice byly odsimulovány amplitudové a fázové frekvenční charakteristiky a skupinové zpoždění v závislosti na frekvenci.

Na obrázku 4.10 je vidět simulace amplitudové frekvenční charakteristiky pro symetrický (spodní graf) i nesymetrický výstup (horní graf). Křivky v obou grafech odpovídají ziskům 6, 10, 20, 30, 40, 50 a 60 dB, bráno odspodu. Uvažujeme-li 3 dB šířku pásma, zesilovač má spodní mezní frekvenci 1,63 Hz. Na konci frekvenčních charakteristik (200 kHz) jsou patrné poklesy, pro symetrický zesilovač jsou maximálně 2 dB, pro zisk 60 dB. Pokles frekvenční charakteristiky nesymetrického výstupu pro zisk 60 dB je 0,9 dB. Frekvenční charakteristika pro zesilovač se zařazeným vstupním odporovým děličem je vidět na obrázku 4.11. Vstupní dělič zajišťuje útlum signálu 20 dB. Poklesy frekvenčních charakteristik jsou stejné jako v předchozím případě, protože nedošlo ke změně zisku samotného zesilovače, ale jen ke snížení úrovně vstupního signálu.

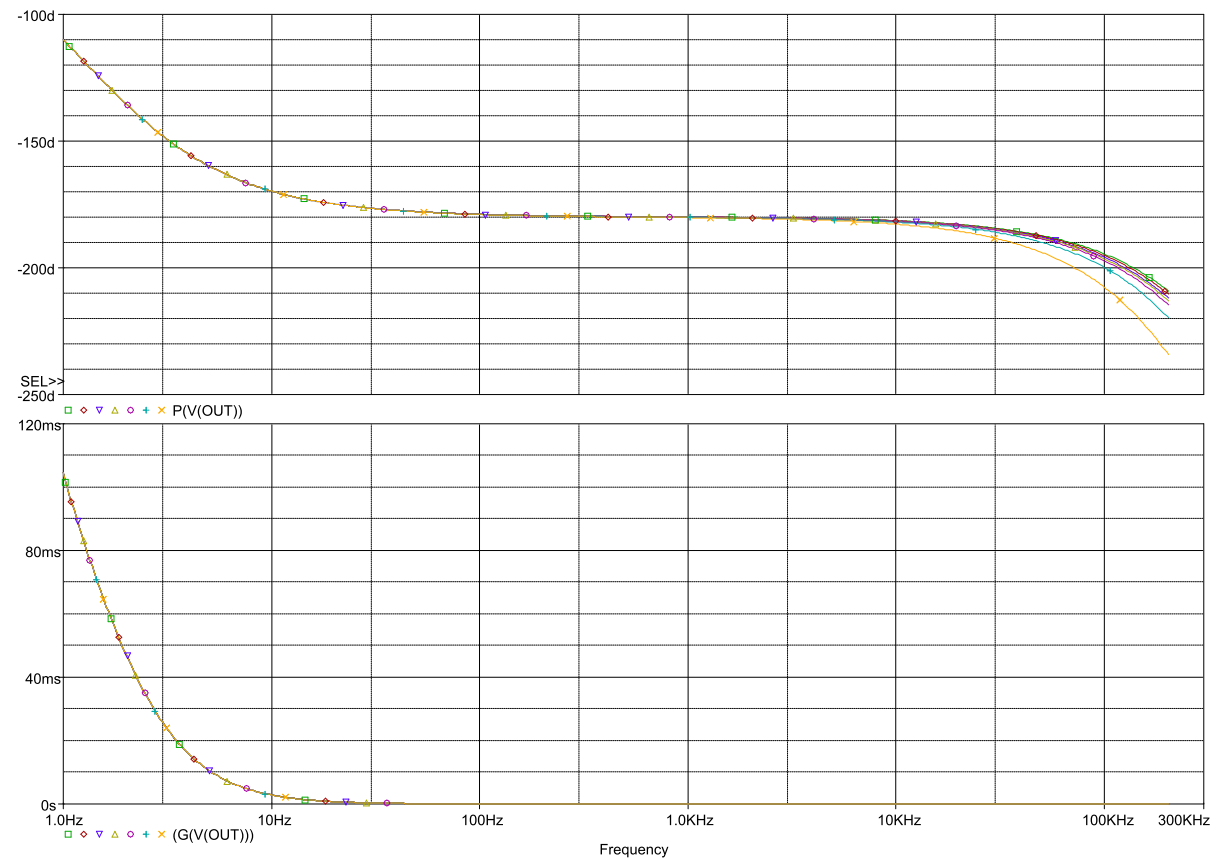


**Obr. 4.10:** Amplitudová frekvenční charakteristika zesilovače bez vstupního děliče

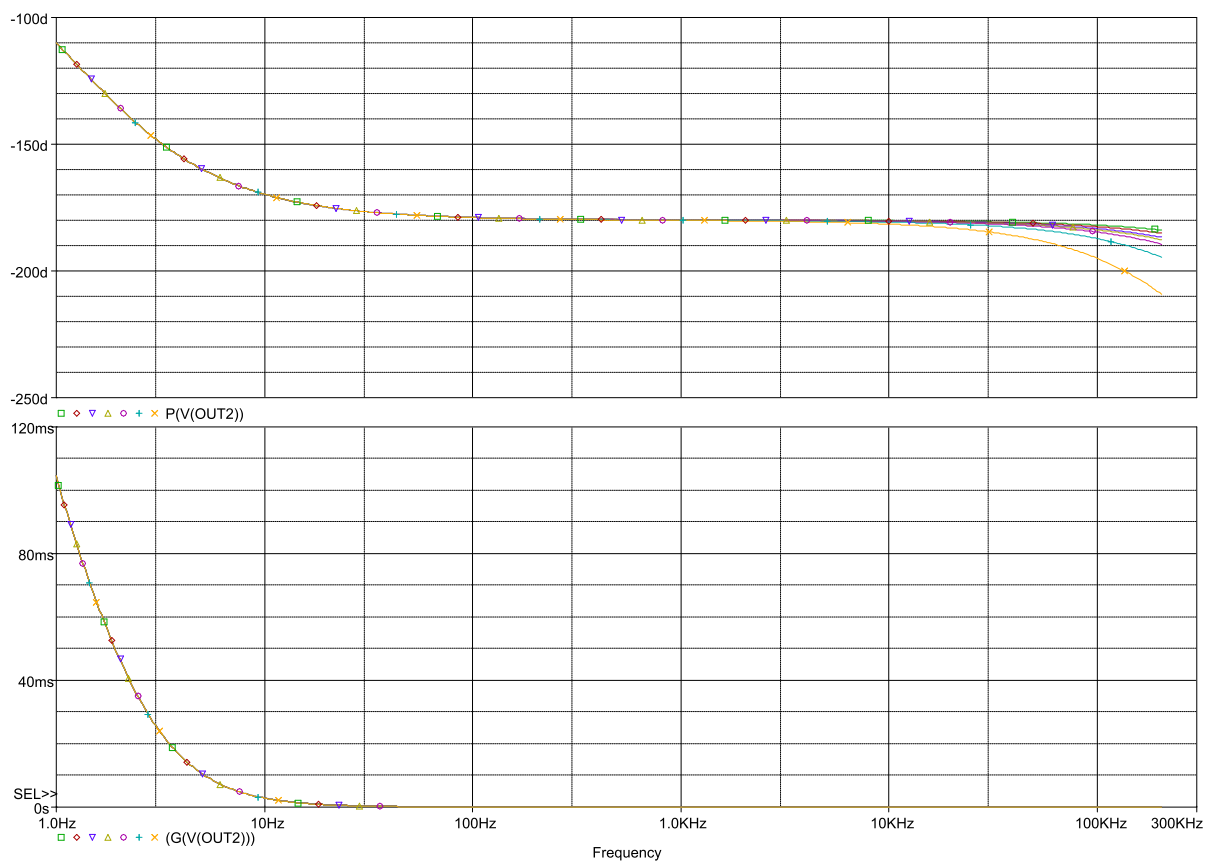
Na grafu 4.12 je vidět fázová charakteristika a skupinové zpoždění symetrického výstupu a na grafu 4.13 je vidět fázová charakteristika a skupinové zpoždění nesymetrického výstupu. Detail skupinového zpoždění od frekvence 1 kHz do konce pásma je vidět na grafu 4.13, skupinové zpoždění symetrického výstupu je v horní části.



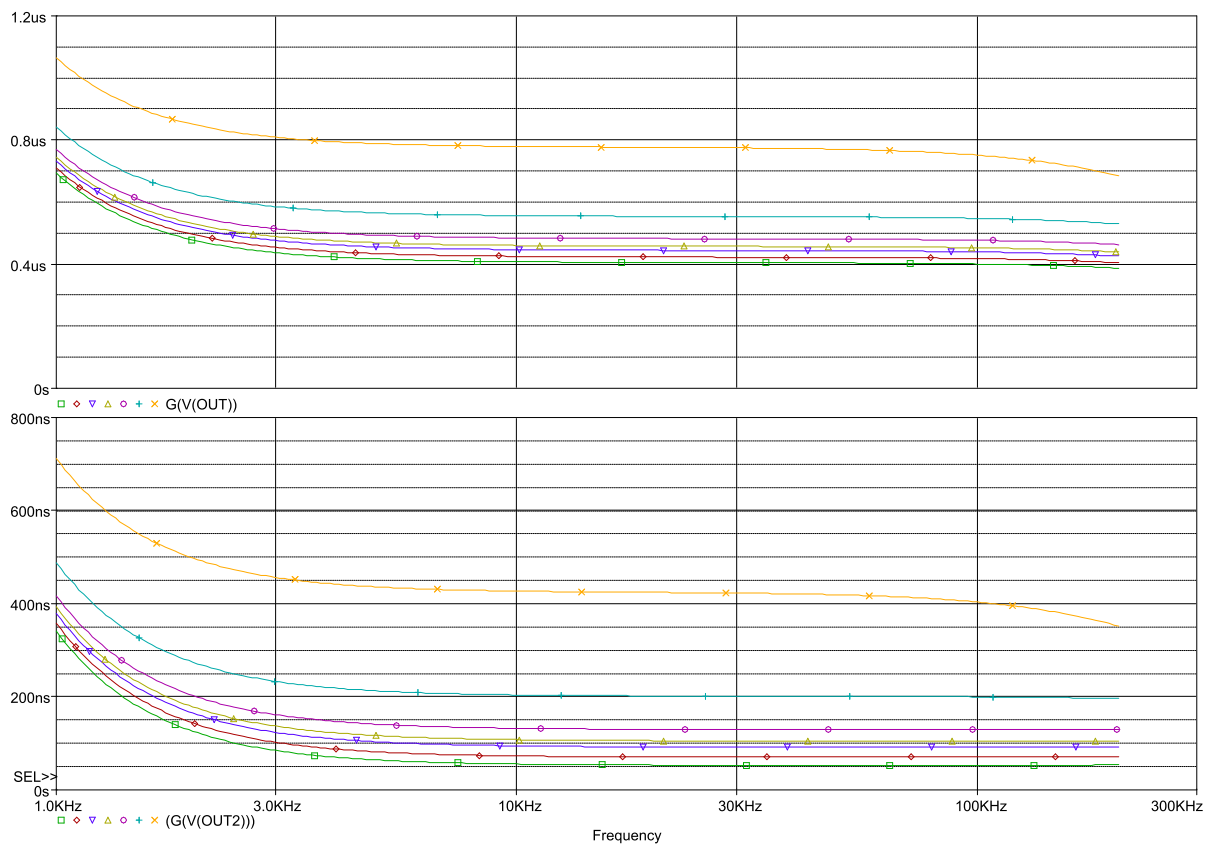
Obr. 4.11: Amplitudová frekvenční charakteristika zesilovače se zařazeným vstupním děličem



Obr. 4.12: Fázová frekvenční charakteristika a skupinové zpoždění symetrického výstupu



**Obr. 4.13:** Fázová frekvenční charakteristika a skupinové zpoždění nesymetrického výstupu



**Obr. 4.14:** Detail skupinových zpoždění symetrického (nahore) a nesymetrického výstupu

## 4.7.2 Šumové parametry zesilovače

V programu PSpice byly provedeny šumové analýzy, jejichž výsledky jsou v následujících tabulkách. Simulace byla provedena pro vnitřní impedanci zdroje signálu  $25 \Omega$  [6] a vstupní impedanci měřicího zesilovače  $600 \Omega$ .

Symetrický výstup Ekvív. vstup. šum $[\frac{\mu V}{\sqrt{Hz}}]$	Výstup. šum. napětí $[\frac{\mu V}{\sqrt{Hz}}]$	Nesymetrický výstup Ekvív. vstup. šum $[\frac{\mu V}{\sqrt{Hz}}]$	Výstup. šum. napětí $[\frac{\mu V}{\sqrt{Hz}}]$
30.5	56.7	24.3	45.8
19.2	57.2	15.4	46.4
6.5	60.3	5.4	50.3
2.7	74.2	2.4	66.7
1.7	136.2	1.7	133.2
1.5	361.3	1.5	362.7
1.4	1077.7	1.4	1084.9

**Tab. 4.3:** Velikost šumových napětí pro zesilovač bez použití vstupního děliče

Symetrický výstup Ekvív. vstup. šum $[\frac{\mu V}{\sqrt{Hz}}]$	Výstup. šum. napětí $[\frac{mV}{\sqrt{Hz}}]$	Nesymetrický výstup Ekvív. vstup. šum $[\frac{\mu V}{\sqrt{Hz}}]$	Výstup. šum. napětí $[\frac{mV}{\sqrt{Hz}}]$
412.8	0.112	394.2	0.109
379.1	0.164	371.3	0.164
356.9	0.482	356.3	0.491
354.1	1.514	354.2	1.546
353.6	4.798	353.9	4.899
353.5	15.283	353.8	15.600
353.5	48.335	353.9	49.273

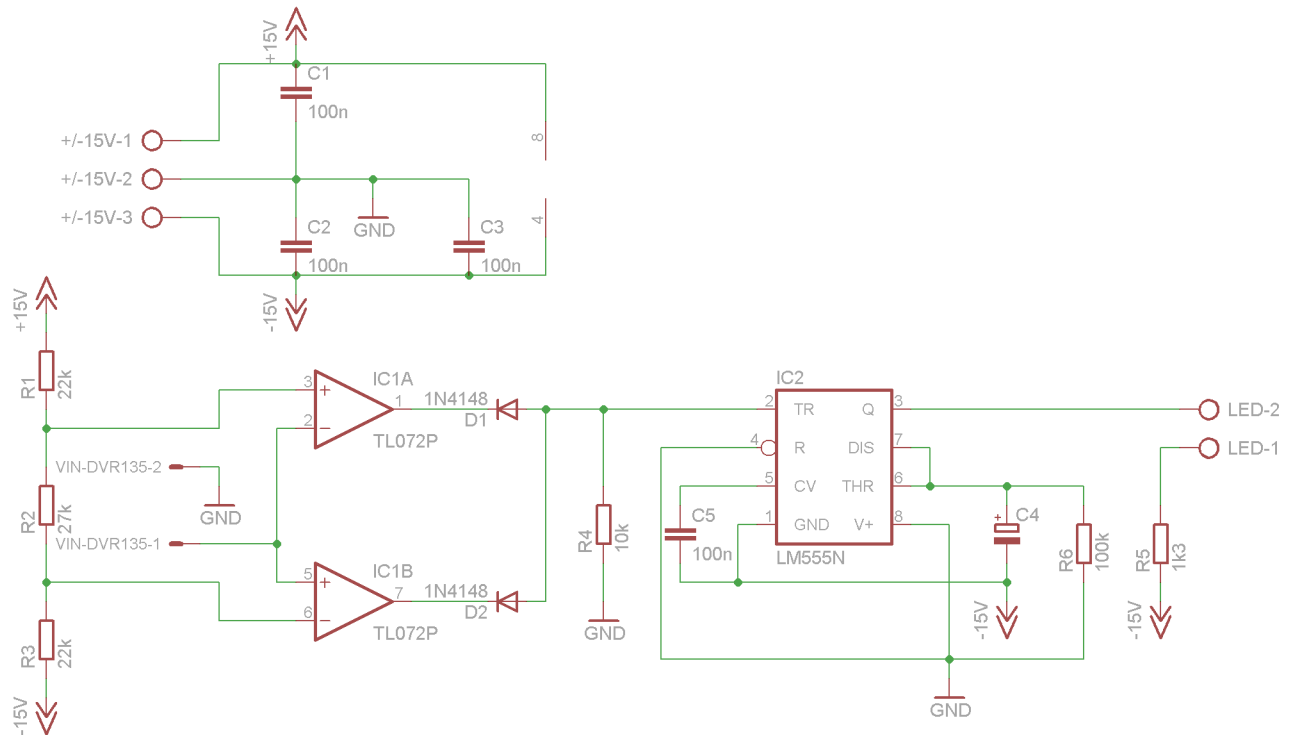
**Tab. 4.4:** Velikost šumových napětí pro zesilovač při použití vstupního děliče

Šumový činitel zesilovače vychází nejmenší pro zisk 6 dB, nesymetrický výstup, konkrétně 26,64 dB. Činitel byl určen na základě znalosti odstupů signál-šum mikrofonu (132 dB) a odstupů signál-šum na výstupu zesilovače (104,35 dB). Nejhorší činitele šumu vychází při použití vstupního děliče napětí.

## 4.8 Detektor přebuzení

Detektor pro indikaci přebuzení zesilovače je v obvodu připojen před vstup linkového budiče a koncového stupně pro nesymetrický výstup. Právě zde bylo určeno kritické místo,

viz kapitola 4.1. Maximální dovolený rozkmit vstupního napětí, aby se koncové stupně nedostaly do saturace je 12 V. Vůči nulovému potenciálu napájecího zdroje může mít toto napětí amplitudu maximálně 6 V. Na signálovém vodiči se tedy může objevit napětí obou polarit, a proto je nutné sledovat překročení dovoleného napětí v obou polaritách, jelikož velikost napětí signálového vodiče může vůči nulovému potenciálu vykazovat, byť malý, stejnosměrný offset.



**Obr. 4.15:** Schéma detektoru přebuzení s MKO

Pro sledování přepětí na vstupech koncových stupňů je použit okénkový komparátátor realizovaný z dvojitého operačního zesilovače TL072. Referenční napětí je získáno z napájecího napětí použitím odporového děliče. Z něj jsou získána napětí  $\pm 5,7$  V. Výstupy operačních zesilovačů jsou opatřeny diodami tak, aby nebylo možné na rezistoru R4 získat kladné napětí. Rezistor R4 slouží k udržení spouštěcího vstupu obvodu NE555 na definovaném potenciálu. Obvod NE555 je zapojen jako monostabilní klopný obvod s délkou výstupního pulsu 5 sekund. Tato doba trvání je určena velikostí kapacity kondenzátoru C4 a odporu rezistoru R6. Velikost kapacity byla zvolena  $47 \mu\text{F}$  a velikost odporu dopočítána ze vzorce 4.5, kde C je velikost kapacity kondenzátoru C4, R velikost odporu R6 a T doba trvání výstupního pulsu. Vypočtená hodnota odporu byla zaokrouhlena na  $100 \text{ k}\Omega$ , čímž se teoretická doba trvání pulsu prodloužila na 5,17 sekundy.

$$R = \frac{C \cdot \ln 3}{T} \quad (4.5)$$

Na výstupu MKO je zapojena červená LED s předřadným rezistorem R5 omezujícím proud diodou na 10 mA vůči zápornému napájecímu potenciálu. Zapojení bylo simulováno

v programu PSpice a sledována byla především rychlost reakce na dané přepětí. Zpoždění mezi vznikem přepětí 0,1 V a vyvoláním překlopení výstupu MKO je  $5,2 \mu\text{s}$ , což odpovídá frekvenci 192,307 kHz.

# 5

## Výsledky měření

### 5.1 Měření zdroje polarizačního napětí

Vzhledem k vysokému výstupnímu odporu zdroje, nemohlo být výstupní napětí změřeno běžnými voltmetry. Správná velikost výstupního napětí byla nastavena potenciometrem R14 tak, že bylo změřeno vstupní usměrněné filtrované napětí a úbytek na výkonovém regulačním tranzistoru T1. Trimrem bylo otáčeno dokud rozdíl těchto dvou napětí nebyl roven 200 V. Napětí 28 V nebylo měřeno, neboť rezistor R9, který tvoří dělič napětí má vysokou hodnotu odporu, a tak by do měření byla zanesena chyba vlivem nedostatečně vysoké impedance.

### 5.2 Měření zdroje napětí pro mikrofonní předzesilovače

Napětí na výstupu bylo měřeno osciloskopem Rigol DS1052E. Napětí bylo měřeno při zatížení proudem stanoveným v tabulce 2.2. Zároveň byla určena velikost zvlnění výstupního napětí. Výsledky jsou zaznamenány v tabulce 5.2

Nastavené napětí [V]	Výstupní napětí [V]	Zvlnění [mV]
150	149,72	3,27
130	129,52	3,27
120	119,81	4,12
90	89,64	3,81
48	47,81	2,12
28	27,73	2,81

**Tab. 5.1:** Výstupní napětí a zvlnění při dané zátěži

### 5.3 Měření zdroje žhavicího napětí, napětí pro výhřev mikrofonu a vlastní zesilovač

U zdrojů napětí pro žhavení katod elektronek, zdrojů napětí pro výhřev mikrofonů a zesilovač bylo změřeno zvlnění výstupního napětí naprázdno a při navrhované zátěži 200 mA. Výsledky měření jsou v následující tabulce.

Výstupní napětí [V]	Zvlnění napětí naprázdno [mV]	Zvlnění napětí při proudu 200 mA [mV]
6	7	2,32
12	129,52	3,27
15	119,81	4,12

**Tab. 5.2:** Výstupní napětí a zvlnění při dané zátěži



# 6

## Závěr

Analýza trhu s profesionálními měřícími zesilovači byla provedena v kapitole 2. Dále byla provedena rešerše parametrů kondenzátorových měřících mikrofونů. Následně byly stanoveny požadavky na zdroje napětí pro provoz těchto mikrofونů a nároky kladené na měřící zesilovač.

Na základě požadavků z kapitoly 2 byl proveden napájecí částí realizovaného zařízení včetně návrhu síťového toroidního transformátoru. Při návrhu byly použity simulace v programu PSpice pro získání představy o reálném chování zapojení.

V kapitole 4 je popsán postup návrhu měřícího zesilovače a jeho částí včetně pomocných obvodů např. pro zvýšení činně potlačení souhlasného rušení nebo detekci přebuzení posledního stupně tvořícího linkový budič symetrického výstupu.

Technické parametry zesilovače byly simulovány v programu PSpice, zejména byly použity simulace pro zjištění zvlnění amplitudových a frekvenčních charakteristik, sumových parametrů zesilovače a činitele potlačení souhlasného rušení. Byl simulován také obvod detekce přebuzení zesilovače pro zjištění rychlosti reakce na přebuzení o definované velikosti.

Realizovaná zapojení byla oživena a podrobena měření kritických technických parametrů.

Výsledky řešení diplomové práce lze stručně shrnout do následujících bodů:

- byla provedena analýza trhu s profesionálními měřícími zesilovači
- byla provedena rešerše technických parametrů dostupných měřících kondenzátorových mikrofونů
- byl proveden návrh a realizace obvodů napájecího zdroje a zesilovače a pomocných obvodů
- parametry napájecích zdrojů byly změřeny

Při porovnání stanovených cílů diplomové práce, které měly být dosaženy a jsou uvedeny v zadání, s výsledky diplomové práce, je možné konstatovat, že byl proveden návrh

zesilovače a napájecích obvodů i detektoru přebuzení, ale nebylo provedeno měření obvodu zesilovače. Důvodem je, že se nepodařilo oživit obvod zesilovače v dostatečném předstihu před odevzdáním diplomové práce.

# Literatura

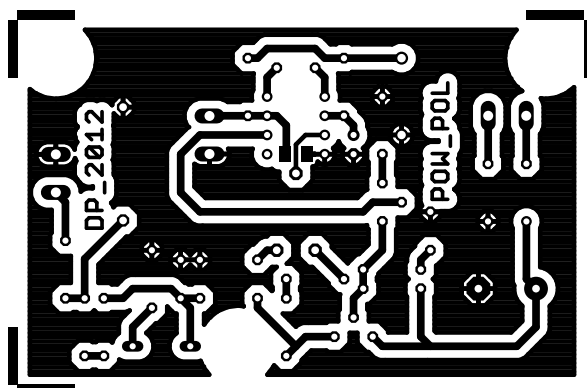
- [1] BRÜEL & KJAER. Microphone handbook [online]. 1996 [cit. 2012-05-01]. Dostupné z: <http://www.bksv.com/doc/be1447.pdf>
- [2] TEXAS INSTRUMENTS. UA723 Precizní napěťový regulátor [online]. 1999 [cit. 2012-05-01]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ua723.pdf>
- [3] FAIRCHILD SEMICONDUCTORS. Třívývodový regulátor napětí [online]. 2011 [cit. 2012-05-01]. Dostupné z: <http://www.fairchildsemi.com/ds/LM/LM7805.pdf>
- [4] BRÜEL & KJAER. Katalogový list *Cathode follower type 2615*.
- [5] BRÜEL & KJAER. Katalogový list *Type 2619 preamplifier*.
- [6] BRÜEL & KJAER. Katalogový list *Microphone preamplifier - type 2669*.
- [7] BRÜEL & KJAER. Katalogový list *Microphone preamplifier - type 2670*.
- [8] BRÜEL & KJAER. Katalogový list *Microphone preamplifier - type 2673*.
- [9] MICROTECH GEFELL. Katalogový list *Messmikrofonvorverstärker MV 302*
- [10] MICROTECH GEFELL. Katalogový list *Messmikrofonvorverstärker MV 203 / MV 204*
- [11] MICROTECH GEFELL. Katalogový list *Messmikrofonvorverstärker MV 220 P48*
- [12] EARTHWORKS. Katalogový list *M50 Measurement Microphone* Owner's Manual
- [13] TEXAS INSTRUMENTS. TL783 Precizní napěťový regulátor [online]. 1999 [cit. 2012-05-01]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/TL783.pdf>
- [14] MOTOROLA. NPN křemíkový výkonový tranzistor MJE13009 [online]. 1999 [cit. 2012-05-01]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/dokumentace/211/211-103/dsh.211-103.1.pdf>
- [15] TEXAS INSTRUMENTS. Nízkošumový přístrojový zesilovač s nízkým zkreslením [online]. 2005 [cit. 2012-05-01]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina163.pdf>

- [16] NXP. Vysokorychlostní diody 1N4148 a 1N4448 [online]. 2004 [cit. 2012-05-01]. Dostupné z: [http://www.nxp.com/documents/data\\_sheet/1N4148\\_1N4448.pdf](http://www.nxp.com/documents/data_sheet/1N4148_1N4448.pdf)
- [17] WHITLOCK, Bill. A NEW BALANCED AUDIO INPUT CIRCUIT FOR MAXIMUM COMMON-MODE REJECTION IN REAL-WORLD ENVIRONMENTS. A NEW BALANCED AUDIO INPUT CIRCUIT FOR MAXIMUM COMMON-MODE REJECTION IN REAL-WORLD ENVIRONMENTS. 1996, č. 1. Dostupné z: <http://www.jensen-transformers.com/an/ingenaes.pdf>

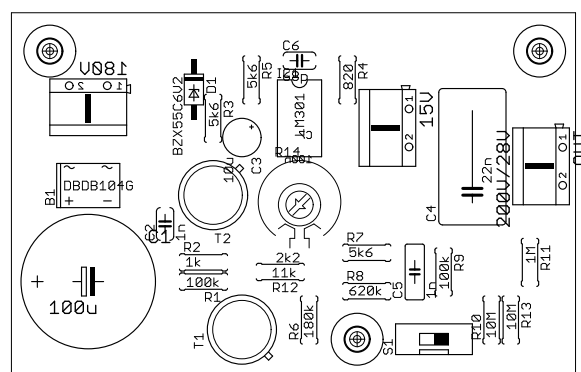
# Příloha A

## Motivy desek plošných spojů a osazovací plány

### A.1 Zdroj polarizačního napětí

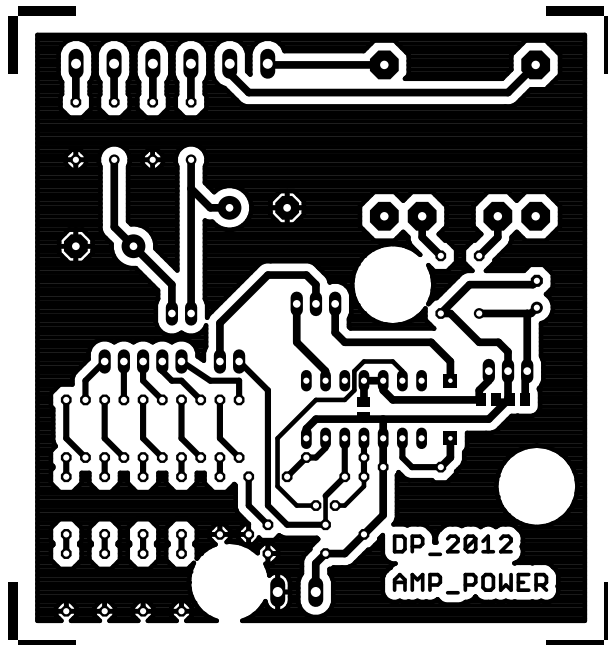


Obr. A.1: Motiv plošného spoje zdroje polarizačního napětí

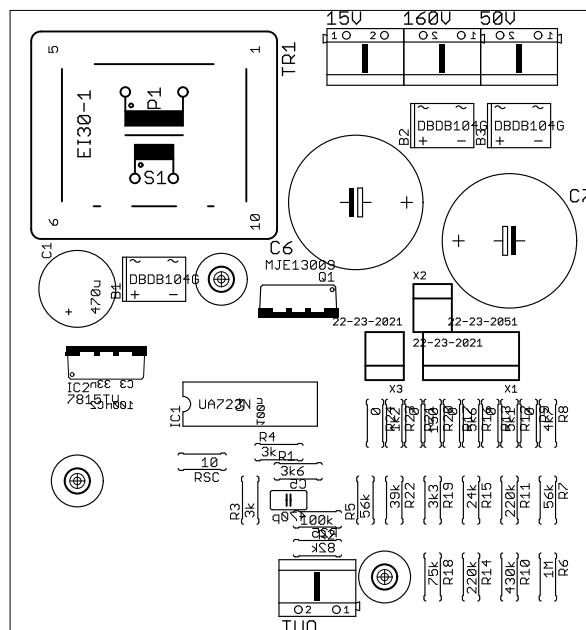


Obr. A.2: Osazovací plán desky zdroje polarizačního napětí

## A.2 Zdroj napětí pro napájení mikrofonních předzesilovačů

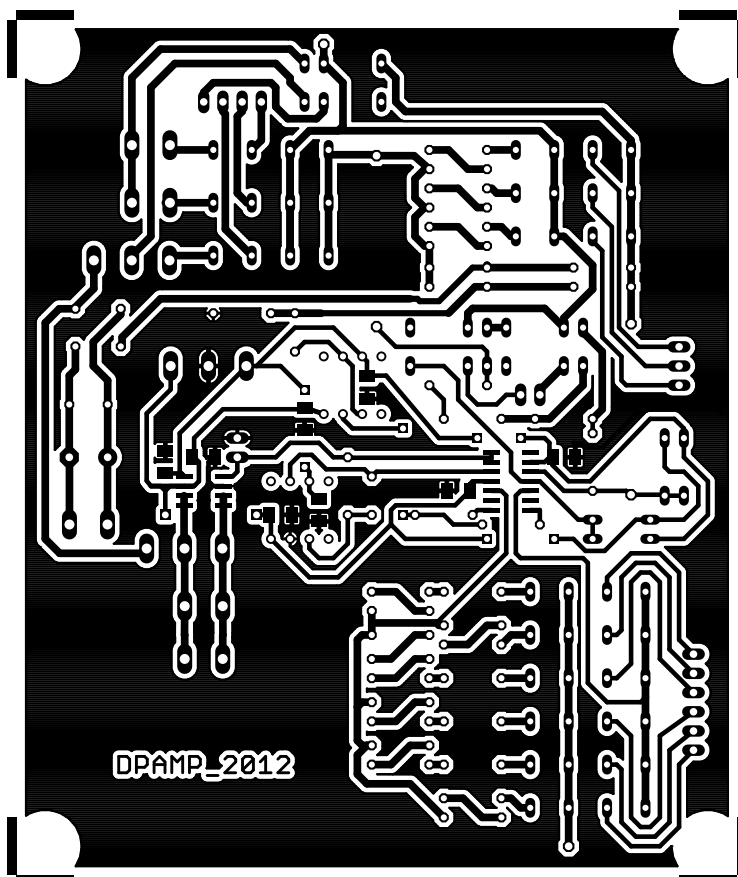


Obr. A.3: Motiv plošného spoje zdroje napětí pro mikrofonní předzesilovače



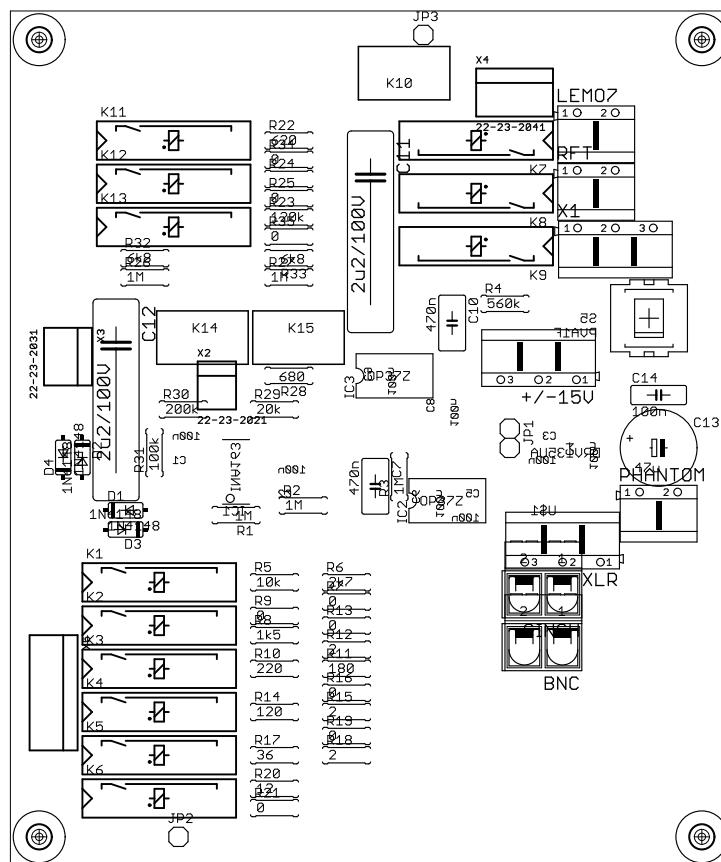
Obr. A.4: Osazovací plán desky zdroje napětí pro mikrofonní předzesilovače

### A.3 Zdroj napětí pro žhavení katod elektronek, výhřev mikrofonů a napájení zesilovače



Obr. A.5: Motiv plošného spoje





Obr. A.6: Osazovací plán