



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

## ZESILOVAČ S KOMPRESNÍM VSTUPEM PRO KOMPENZAČNÍ MĚŘENÍ MIKROFONŮ

AUTOMATIC VARIABLE GAIN AMPLIFIER FOR MEASURING FREQUENCY CHARACTERISTIC OF  
MICROPHONE

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Václav Bařinka

Ing. Pavel Hanák, Ph.D.

BRNO 2023

# Bakalářská práce

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

**Student:** Václav Bařínka

**ID:** 230455

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2022/23

**NÁZEV TÉMATU:**

## Zesilovač s kompresním vstupem pro měření kmitočtové charakteristiky mikrofonu

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s komorou pro kompenzační měření kmitočtových charakteristik mikrofonů. Navrhněte a vyrobte zesilovač, jehož zesílení se bude automaticky měnit podle signálu z referenčního mikrofonu tak, aby v komoře udržoval stálý akustický tlak. Rozsah ladění musí být nejméně 60 dB a zesilovač musí být schopen pracovat v pásmu od 100 Hz do 20 kHz. Zpěťovazební smyčka musí být odladěna pro rychlé ustálení a opatřena obvody, které zamezí poškození reproduktoru v nestandardních situacích. Všechny vstupy a výstupy budou symetrické, mikrofonní vstup musí mít odbočku pro externí měřič úrovně NTI AL1 a volitelné fantomové napájení. Všechny napájecí a signálové vstupy musejí mít ochrany proti rušení, přepětí atd. Zesilovač zabudujte do kovové skříňky a změřte jeho parametry. Následně vytvořte návod pro novou laboratorní úlohu.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] DOBKIN, B., Analog Circuit Design: A Tutorial Guide to Applications and Solutions. Elsevier Science & Technology, 2011. ISBN 9780123851857
- [2] SELF, D. Small Signal Audio Design. Focal Press, 2010. ISBN 978-0-240-52177-0.

**Termín zadání:** 6.2.2023

**Termín odevzdání:** 26.5.2023

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

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

### UPOZORNĚNÍ:

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

## **Abstrakt**

Tato práce se zabývá návrhem a realizací přípravku pro kompenzační měření mikrofonů pro laboratoř předmětu Elektroakustika. Tento přípravek umožní uživateli proměření frekvenční charakteristiky libovolného mikrofonu skrz známé charakteristiky mikrofonu referenčního a regulační smyčky. Práce obsahuje úvod do problematiky, zvolení součástek a jejich obvodové řešení, simulace a návrh přípravku, včetně jeho čelního panelu. Práce také klade důraz na teplotní kompenzaci zařízení. Simulace probíhaly v softwaru LTspice, pro obvodové řešení byl zvolen program EAGLE a pro návrh čelního panelu Fusion360.

## **Klíčová slova**

Kmitočet, kompander, mikrofon, regulační smyčka, RMS, VCA, zesilovač.

## **Abstract**

This thesis deals with design and implementation of device for measuring characteristics of microphone for a laboratory of subject Elektroakustika. This device provides user with measurement of frequency characteristic of chosen microphone, via known characteristics of reference microphone and regulation loop. Thesis contains of introduction to the problem, parts selection and circuit completion, simulations and draft of the device, including it's front panel. Thesis also deals with a problem of temperature compensation. Simulations were ran in software LTspice, circuit completion in EAGLE and for front panel draft Fusion360 was used.

## **Keywords**

Frequency, compander, microphone, regulation loop, RMS, VCA, amplifier.

## **Bibliografická citace**

BAŘINKA, Václav. Zesilovač s kompresním vstupem pro měření kmitočtové charakteristiky mikrofonu. Brno, 2023.

Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/151112>.

Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací.

Vedoucí práce Pavel Hanák.

# Prohlášení autora o původnosti díla

<b>Jméno a příjmení studenta:</b>	Václav Bařinka
<b>VUT ID studenta:</b>	230455
<b>Typ práce:</b>	Bakalářská práce
<b>Akademický rok:</b>	2022/23
<b>Téma závěrečné práce:</b>	Zesilovač s kompresním vstupem pro kompenzační měření mikrofonů

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné 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 závěrečné 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 části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 22. května 2023

-----  
podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Pavlu Hanákovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc při zpracování mé bakalářské práce. Dále Matěji Kadlecovi za cenné rady a praktické tipy.

V Brně dne: 22. května 2023

-----  
podpis autora

# Obsah

<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>8</b>
<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>9</b>
<b>ÚVOD .....</b>	<b>10</b>
<b>1. ÚVOD K MIKROFONŮM.....</b>	<b>11</b>
1.1 MIKROFON .....	11
1.2 FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA.....	11
1.2.1 Měření frekvenčních charakteristik.....	12
1.3 REGULAČNÍ SMYČKA.....	13
<b>2. VÝBĚR SOUČÁSTEK .....</b>	<b>14</b>
2.1 VCA .....	14
2.2 KOMPANDER .....	15
2.2.1 THAT4320.....	17
2.3 MĚŘICÍ VÝSTUP .....	18
2.4 MIKROFONNÍ PŘEDZESILOVAČ .....	18
2.5 ZVYŠUJÍCÍ MĚNIČ PRO FANTOMOVÉ NAPÁJENÍ.....	19
2.6 INDIKACE NESTANDARDNÍCH SITUACÍ.....	20
<b>3. SIMULACE .....</b>	<b>22</b>
3.1 SCHÉMA .....	22
3.2 PRVNÍ SIMULACE.....	23
3.3 VÝSLEDNÁ ZÁVISLOST .....	24
<b>4. TEPLOTNÍ KOMPENZACE .....</b>	<b>26</b>
4.1 TEPLOTNÍ KOMPENZACE OBVODU THAT4320 .....	26
<b>5. NÁVRH .....</b>	<b>32</b>
5.1 ZDROJE.....	32
5.2 ZVYŠUJÍCÍ MĚNIČ PRO FANTOMOVÉ NAPÁJENÍ.....	33
5.3 MIKROFONNÍ PŘEDZESILOVAČ .....	35
5.4 LINKOVÝ PŘIJÍMAČ.....	35
5.5 KOMPANDER A TEPLOTNÍ KOMPENZACE.....	36
5.6 VÝSTUP .....	37
5.7 NEDÍLNÉ SOUČÁSTI OBVODU .....	38
<b>6. NÁVRH DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ .....</b>	<b>40</b>
6.1 DPS ZAŘÍZENÍ PRO KOMPENZAČNÍ MĚŘENÍ MIKROFONŮ .....	40
<b>7. ČELNÍ PANEL.....</b>	<b>43</b>
7.1 POPISKY NA ČELNÍM PANELU.....	43
<b>8. ZÁVĚR.....</b>	<b>44</b>
<b>SEZNAM CITACÍ.....</b>	<b>45</b>
<b>SEZNAM ZKRATEK .....</b>	<b>47</b>

# SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1:	Frekvenční charakteristika mikrofonu.....	12
1.2:	Frekvenční odezva reproduktoru.....	13
1.3:	Regulační smyčka.....	13
2.1:	Blokové schéma kompenzační metody.....	14
2.2:	Popis funkce VCA.....	15
2.3:	Blokový diagram obvodu THAT4320.....	17
2.4:	Usměrňovač THAT1646.....	18
2.5:	Mikrofonní předzesilovač THAT1510.....	19
2.6:	Zapojení OZ TL082D pro detekci velkého výstupního signálu.....	20
3.1:	Simulační schéma.....	23
3.2:	První simulační schéma.....	24
3.3:	Simulační schéma.....	25
3.4:	Přiblížené simulační schéma.....	25
4.1:	Nekompenzované výstupní napětí pro různé teploty.....	26
4.2:	První pokus kompenzace.....	27
4.3:	Druhý pokus kompenzace.....	28
4.4:	Měření v teplotní komoře.....	29
4.5:	Teplotní závislost $V_{PTAT}$ pro různé čipy a katalogovou hodnotu.....	30
4.6:	Správně kompenzovaná simulace.....	31
4.7:	Přiblížená správně kompenzovaná simulace.....	31
5.1:	Návrhové schéma zdrojové části.....	33
5.2:	Návrhové schéma měniče LT8362.....	34
5.3:	Návrh předzesilovače.....	35
5.4:	Návrh linkového přijímače.....	36
5.5:	Návrh kompanderu a teplotní kompenzace.....	37
5.6:	Návrh výstupního bloku.....	38
6.1:	Návrh DPS.....	41
6.2:	Měděné cesty „top“.....	41
6.3:	Měděné cesty „bottom“.....	42
6.4:	Vykreslené polygony na DPS.....	42
7.1:	Čelní panel.....	43
7.2:	Popisky čelního panelu.....	43



## SEZNAM TABULEK

Tab. 1:	Porovnání kompanderů .....	16
Tab. 2:	Porovnání fantomových měničů .....	20
Tab. 3:	Naměřené hodnoty z teplotní komory pro 3 čipy a katalogová hodnota.....	29

# ÚVOD

Jedním ze základních parametrů mikrofonů je jejich kmitočtová charakteristika. Ta udává citlivost mikrofonu v závislosti na frekvenci, tedy pro jaké aplikace je daný mikrofon vhodný, respektive nevhodný.

Existuje několik metod, pomocí kterých se dá tato kmitočtová charakteristika určit, jako třeba metoda substituční, nebo specifické měření v blízkém poli pomocí simulátoru umělých úst a torza.

Tato práce má za úkol vytvořit přípravek měřící svou úroveň zesílení podle efektivní úrovně signálu referenčního mikrofonu. Očekávané napětí z tohoto mikrofonu je 3 až 12 mV, přípravek bude napájen generátorem vysílající sinusový signál o velikosti  $1 V_{ef}$  a v měřícím boxu se bude udržovat nastavitelný akustický tlak na požadavek doc. Jiřího Schimmela, a to v rozsahu odpovídajícímu vstupnímu napětí koncového zesilovače 20 až 350 mV, s tím že pro 220 mV je při 1 kHz tento tlak 80 dB<sub>(SPL)</sub>.

Dále bude toto zařízení obsahovat fantomové napájení a měřeno bude pomocí externího měřicího přístroje.

V této práci budou nejprve rozebrány měřící metody kmitočtových charakteristik, následně bude popsán výběr součástek a simulace hlavních funkčních bloků přípravku. Bude věnován důraz na problematiku teplotní kompenzace a následně popsána tvorba schématu a návrh desky plošných spojů v návrhové aplikaci EAGLE. Následně bude ukázán čelní panel přípravku navržen v prostředí Fusion360.

# 1. ÚVOD K MIKROFONŮM

Aby byl lépe pochopen význam měření frekvenčních charakteristik, je třeba nejprve uvést pilíře této problematiky.

## 1.1 Mikrofon

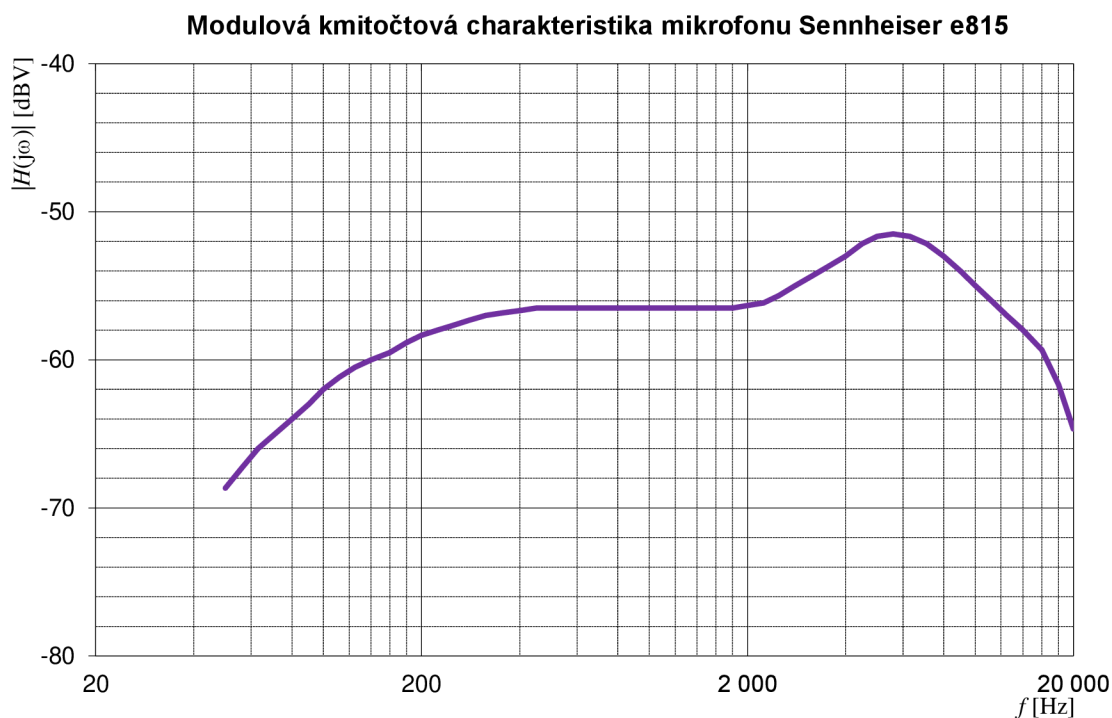
Mikrofon je elektroakustický přijímač. Jeho výstupem je napětí, jehož okamžitá hodnota je úměrná okamžité hodnotě akustického tlaku (nebo jiné veličiny zvukového pole) na něj působící. Jeho základní parametry jsou:

- typ mikrofonu: jeho vnitřní konstrukce,
- citlivost: poměr výstupního napětí a akustického tlaku na mikrofon působící,
- směrová charakteristika: citlivost v daném úhlu dopadu,
- vzdálenostní charakteristika: závislost citlivosti na vzdálenosti od zdroje,
- ekvivalentní hladina šumu: jaké napětí mikrofon produkuje, když na něj nepůsobí žádné vnější pole,
- sound pressure level (SPL): maximální hodnota akustického tlaku, kterou je mikrofon schopen zpracovat při daném zkreslení,
- dynamický rozsah: poměr SPL k ekvivalentní hladině šumu,
- signal to noise ratio (SNR): poměr jednoho pascalu ( $94 \text{ dB}_{(\text{SPL})}$ ) k ekvivalentní hladině šumu,
- frekvenční charakteristika: závislost citlivosti na kmitočtu.

## 1.2 Frekvenční charakteristika

Údaj o frekvenční charakteristice mikrofonu přímo udává, na kterých kmitočtech může dojít k nežádoucímu zkreslení. Téměř vždy se udává relativně k 1 kHz. Pro běžná použití, jako jsou pro příklad zpěvové mikrofony, stačí linearita této charakteristiky pouze v používané oblasti, tedy pro lidský hlas přibližně 200 Hz až 3 kHz. Typický pokles pro nižší frekvence a nárůst s následným poklesem pro vyšší frekvence zde není překážkou. Měřicí mikrofony by měly mít rovnou charakteristiku prakticky přes celý graf, tedy stejnou citlivost pro všechny frekvence.

Pro ukázkou frekvenční charakteristiky běžného zpěvového mikrofonu na obrázku 1.1 byl zvolen graf zobrazující výrobcem udávanou frekvenční charakteristiku mikrofonu Sennheiser e815, na kterém je vidět výše popsany průběh.



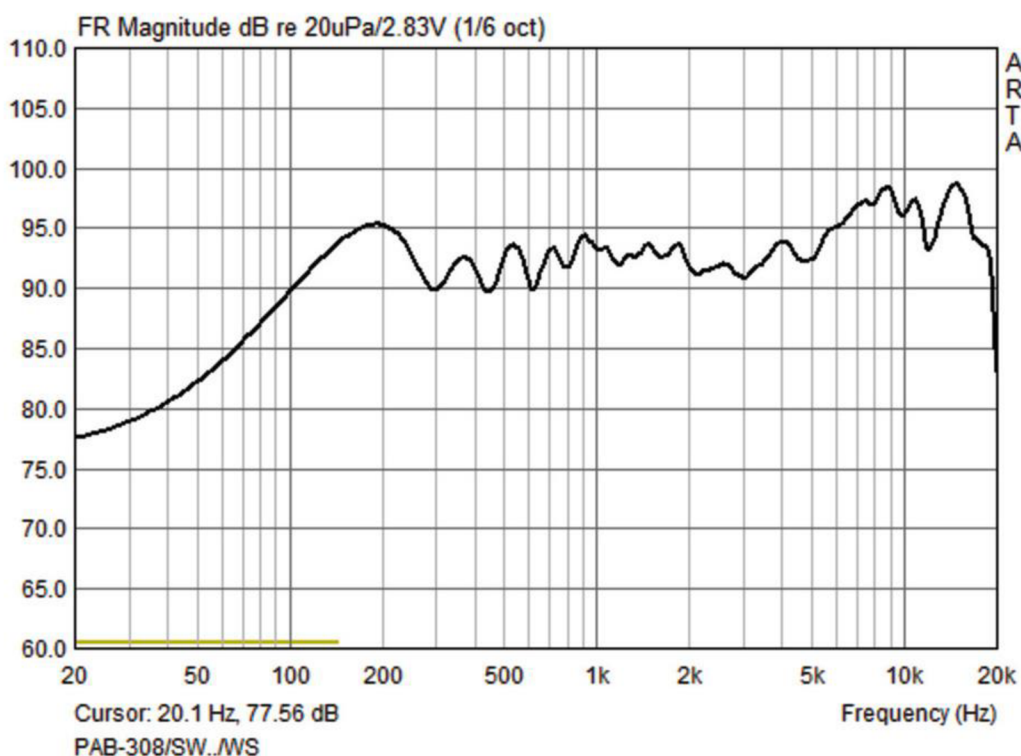
Obr. 1.1: Frekvenční charakteristika mikrofonu.

### 1.2.1 Měření frekvenčních charakteristik

Pro měření kmitočtové charakteristiky mikrofonů existuje několik metod, různé podle typu pole, ve kterém se měří. Charakteristiky elektrostatických mikrofonů se měří s využitím reciprocity měniče (mikrofon se může do určité míry chovat jako mikrofon i jako reproduktor) podle normy ČSN EN 61094-3.

U jiných typů mikrofonů je otázkou, jak zajistit konstantní akustický tlak, když je kmitočtová charakteristika reproduktorů obecně velice nelineární, jak je vidět na obrázku 1.2. To se řeší měřením hladiny akustického tlaku úzkopásmového šumu, nebo harmonického signálu, který generuje reproduktor.

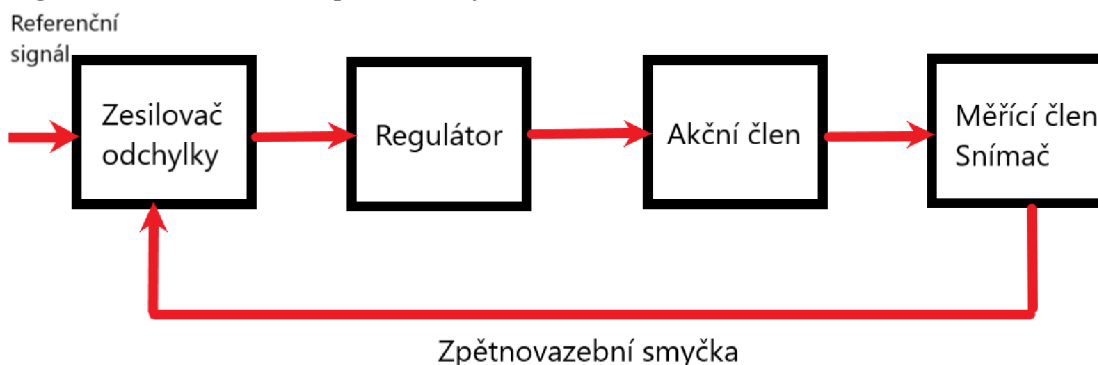
V této práci bude rozebrána metoda kompenzační. Tato metoda využívá generátoru se zpětnou vazbou, který reguluje výstupní napětí tak, aby na vstupu referenčního mikrofonu bylo stále stejné napětí. Referenční mikrofon je umístěn ve stejné vzdálenosti od zdroje zvuku (reproduktoru) jako měřený, respektive jsou na stejné vlnoploše. Výstupní napětí referenčního mikrofonu se přepočítá na akustický tlak a následně se vypočte citlivost měřeného mikrofonu. Tím, že jsou oba mikrofony již umístěny v komoře, probíhá pouze jedno měření, což je asi největší výhoda oproti metodě substituční, kdy je v komoře vždy jen jeden mikrofon, proto je zde třeba více měření.



Obr. 1.2: Frekvenční odezva reproduktoru.

### 1.3 Regulační smyčka

Přípravek bude fungovat na principu zpětnovazebné regulační smyčky. Blokové schéma je ukázáno na obrázku 1.3. Zesilovač odchylky je buzen referenčním signálem (požadovanou hodnotou). Když se do něj obecně dostane nějaký signál, vyšle impuls do regulátoru, aby provedl změnu. Ten nastaví akční člen na nové hodnoty a přes měřicí člen (nebo taky snímač) vysílá informaci zpět do zesilovače odchylky, který porovná nové hodnoty s těmi požadovanými a vyšle do regulátoru takové informace, aby bylo dosaženo regulace vedoucí k zisku požadovaných hodnot v členu měřícím.

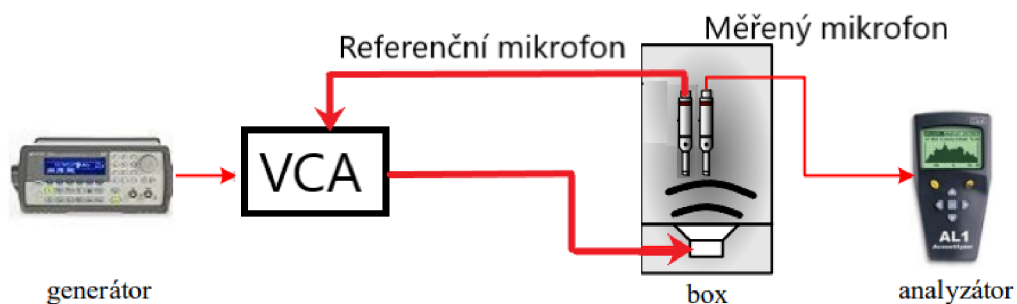


Obr. 1.3: Regulační smyčka.

## 2. VÝBĚR SOUČÁSTEK

Jak bylo vysvětleno v podkapitole 1.2.1, klíčové pro metodu kompenzační je udržování stálého napětí na vstupu referenčního mikrofonu. Tuto funkci by mohl správně plnit vhodně zapojený napětím řízený zesilovač (dále VCA). Blokové schéma na obrázku 2.1 zobrazuje zjednodušený princip této měřicí metody. VCA zde bude plnit funkci regulátoru, reproduktor v boxu je akčním členem a referenční mikrofon v boxu je měřicím členem. Pro zesilovač odchylky bude třeba nějaký vhodný operační zesilovač. Výrobci součástek dnes již nabízejí hotové integrační obvody s vhodně zapojeným VCA, a proto byla zvolena právě tato cesta.

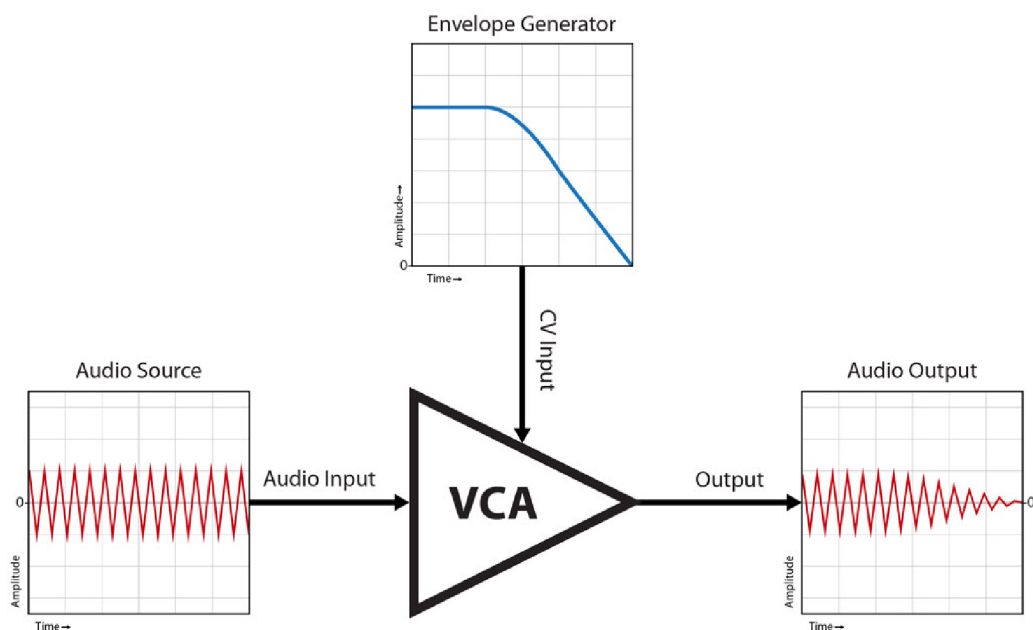
V následující kapitole je popsána volba součástek, doplněna o obrázky pro lepší pochopení a jsou uvedeny typické problémy, se kterými je třeba počítat při výběru součástek.



Obr. 2.1: Blokové schéma kompenzační metody.

### 2.1 VCA

Voltage controlled amplifier (VCA) je zesilovač, který mění své zesílení v závislosti na řídicím napětí. Rozsah jeho využití je opravdu velký, od přijímačů ve smartphonech až po lékařské využití v ultrazvuku. Pro kompenzační metodu je jeho funkce jednoznačná, a to udržování konstantního napětí na výstupu při změnách na vstupu. Tyto změny budou způsobovány převážně vysoce nelineární frekvenční charakteristikou reproduktoru a odrazy zvuku v komoře, což vede k zesílení, nebo zeslabení na určitých frekvencích. Zjednodušený popis jeho funkce je vidět na obrázku 2.2. Tím, že je před jeho vstupem, na obrázku značený jako CV input, později v simulaci značen jako EC+, vložen PI regulátor regulační odchylky, je dosaženo obráceného výsledku. Když dojde k zeslabení signálu, VCA začne ze svého výstupu vysílat větší napětí a tím dojde k vyrovnání hladiny. Funguje samozřejmě i v opačném případě, pokud dojde k zesílení signálu, VCA vyšle menší napětí.



Obr. 2.2: Popis funkce VCA.

## 2.2 Kompander

Samotné VCA by ovšem pro požadovanou funkci nestačilo. Proto bylo třeba najít vhodný integrovaný obvod, na doporučení vedoucího práce „compandor.“ Jedná se o obvod, který může fungovat jako compresor (začátek „comp“), tedy jako součástka využívající se k zeslabení signálu, nebo jako expander (konec „pandor“), k jeho zesílení, podle toho, jak je zapojen. Tento integrovaný obvod nutně obsahuje také detektor efektivní hodnoty (RMS). Je třeba vzít v potaz, že RMS detektor a VCA pro účely této práce nesmí být interně propojeny, jelikož jak již bylo naznačeno v kapitole 2.1, do tohoto prostoru musí být zapojen PI regulátor regulační odchylky. Detektor zároveň nutně musí být typu „true RMS,“ jelikož v usměřňovačích vznikají pro neharmonické signály nezanedbatelné chyby. V tabulce 1 je porovnáno devět kompanderů od tří různých výrobců a to Onsemi, THATcorp a SANYO. Porovnávané prvky jsou:

- typ detektoru: zda obvod vlastní usměřňovač, nebo „true RMS“,
- RMS výstup: zda obvod obsahuje samostatný výstup pro RMS,
- RMS – VCA: zda je v obvodu RMS přímo připojen do VCA,
- rozsah VCA: dynamický rozsah VCA,
- rozsah napájení: rozsah napájecích napětí,
- symetrické napájení: zda je obvod možné napájet symetricky,
- zkreslení: typická velikost THD obvodu,
- teplotní kompenzace: zda má obvod možnost teplotní kompenzace přenosu VCA.

Tab. 1: Porovnání kompanderů.

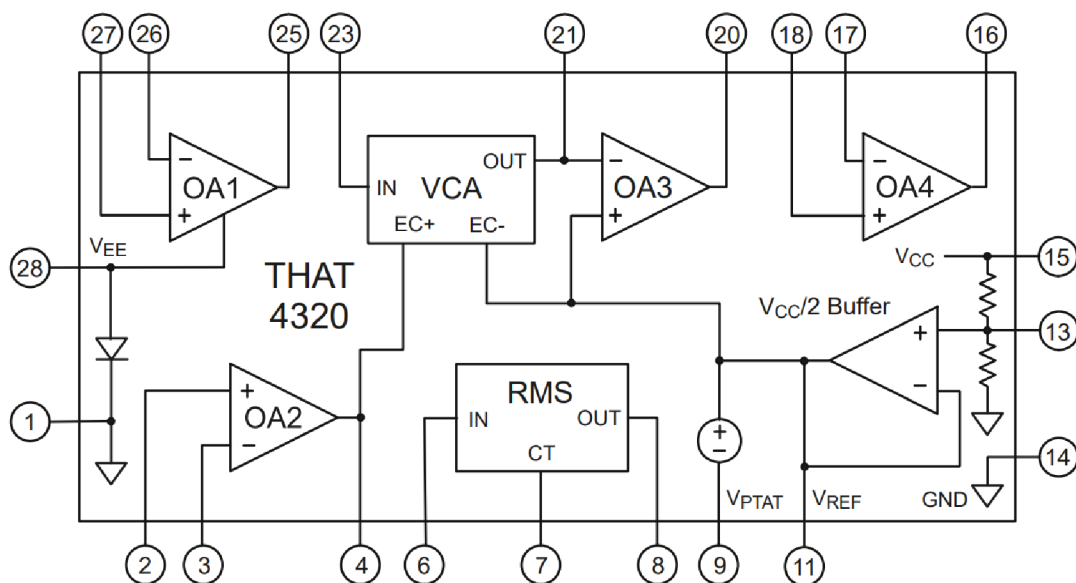
	Typ detektoru	RMS výstup	RMS – VCA	Rozsah VCA	Rozsah napájení	Symetrické napájení	Zkreslení	Teplotní kompenzace
SA571	Usměrňovač	Ano	Ne	110 dB	6 – 18 V	Ne	0,5 %	Ano
SA572	Usměrňovač	Ne	Ano	110 dB	6 – 22 V	Ne	0,25 %	Ano
SA575	Usměrňovač	Ano	Ne	60 dB	3 – 7 V	Ne	0,12 %	Ne
LA8630MC	Usměrňovač	Ano	Ano	60 dB	2,2 – 6 V	Ne	0,35 %	Ne
LA8638NV	Usměrňovač	Ne	Ano	90 dB	1,8 – 5,5 V	Ne	0,45 %	Ne
THAT4305	True RMS	Ano	Ne	117 dB	4,5 – 16 V	Ano	0,07 %	Ne
THAT4315	True RMS	Ano	Ne	118 dB	4,5 – 16 V	Ne	0,07 %	Ano
THAT4316	True RMS	Ano	Ne	115 dB	2,7 – 5,5 V	Ne	0,03 %	Ano
THAT4320	True RMS	Ano	Ne	120 dB	4,5 – 16 V	Ano	0,05 %	Ano

Jak je vidět z tabulky, vhodný pro požadovanou funkci by byl nějaký integrovaný obvod z firmy THAT, převážně kvůli zabudovanému „true RMS.“ Z této firmy byl nakonec zvolen THAT4320. Nejen proto, že splňuje všechny požadavky, ale také kvůli dostupnosti, jelikož většina ze zmíněných integrovaných obvodů byla nedostupná.

Blokový diagram je vidět na obrázku 2.3. Jedná se o integrovaný obvod vlastní RMS detektor, VCA a 4 operační zesilovače, vytvořen typicky pro externě napájené audio aplikace, jako in-ear monitory, nebo bezdrátové mikrofony. Je optimalizován pro nízká napětí (rozsah napájecího napětí 4,5 – 16 V) a je možné jej napájet symetricky, což je pro zvolené napájecí napětí  $\pm 6$  V vhodné. Tato hodnota byla zvolena převážně proto, že se nepodařilo najít žádný vhodný skladem dostupný transformátor se sekundárním vinutím  $\pm 5$  V, což byla původní hodnota zvolená pro semestrální práci. Jak je vidět z tabulky, THAT4320 by mohl být napájen symetricky minimálně  $\pm 2,25$  V a maximálně  $\pm 8$  V.  $\pm 6$  V bylo nakonec zvoleno jako nejmenší hodnota sekundárního vinutí transformátoru, která se podařila najít skladem.

Za zmínku stojí, že interní řídicí veličina tohoto obvodu je proud (RMS má proudový vstup a VCA zase proudový výstup). I proto je vhodná přítomnost operačních zesilovačů, které když získají na svůj vstup proud, převedou ho ve výstupu na napětí.





Obr. 2.3: Blokový diagram obvodu THAT4320.

### 2.2.1 THAT4320

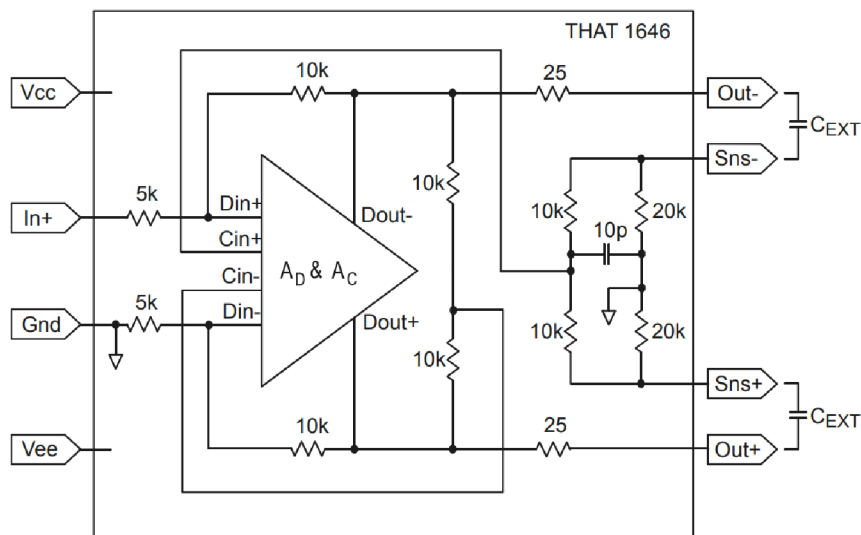
V následující krátké podkapitole jsou popsány dále použité bloky zvoleného integrovaného obvodu.

- Root mean square (RMS) detektor, tedy detektor efektivní hodnoty, který přepočítává hodnotu signálu za určitý čas (nastavitelný přes kondenzátor CT) na jeho efektivní hodnotu. V obvodu THAT4320 má proudový vstup a výstupem je stejnosměrné napětí.
- Operational amplifier (OA), česky operační zesilovač, v obvodu THAT4320 značen OA2, plní funkci „control voltage buffer“, dochází v něm k zesílení signálu a zeslabení impedance na jeho výstupu. Pro tuto práci je použit jako PID (respektive PI) regulátor regulační odchylky vlastníci pouze proporcionální a integrační složku (derivační nebyla třeba), což znamená, že na jeho výstupu bude zinvertovaná (obrácená) hodnota vstupu, klíčová pro správnou funkci VCA v tomto použití, jak již bylo zmíněno v kapitole 2.1. Z blokového schématu 1.3. plní funkci zesilovače odchylky.
- OA3 je použit jako jednotkový zesilovač. Slouží hlavně k převodu výstupního proudu z VCA na napětí.

## 2.3 Měřicí výstup

V zadání práce bylo povinností, aby zařízení obsahovalo pomocný symetrický výstup pro měřicí přístroj, který bude součástí úlohy. Jelikož obvody od stejného výrobce jsou mezi sebou téměř vždy kompatibilní, bylo rozhodnuto i další prvky volit od výrobce THAT. Na doporučení vedoucího byl pro přídatný výstup vybrán THAT1646, který z nesymetrického vstupu vytvoří výstup symetrický. Jeho vnitřní struktura je vidět na obrázku 2.4.

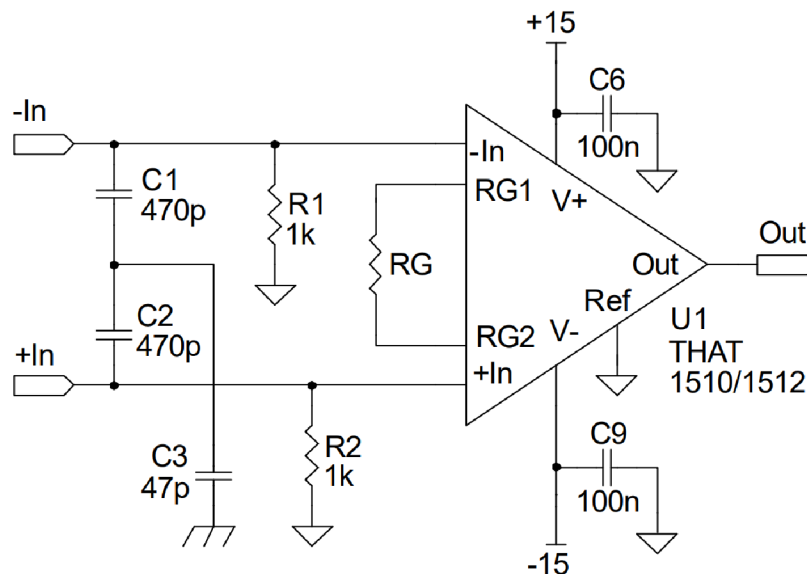
Jelikož bylo během práce na bakalářské práci rozhodnuto pro změnu pozice výstupu pro měřicí přístroj již před předzesilovač, tedy do části, kde je signál veden ještě symetricky, tento usměrňovač nakonec nebyl použit vůbec, protože ztrácel na významu. Nicméně pokud by jiný konstruktér potřeboval vložit měřicí přístroj do části, kde je signál veden nesymetricky, tento integrovaný obvod je možností.



Obr. 2.4: Usměrňovač THAT1646.

## 2.4 Mikrofonní předzesilovač

Firma THAT nabízí 4 mikrofonní předzesilovače a to 1510, 1512, 1580 a 1583. Největší rozdíl párů 151x a 158x je jejich výstup. Zatímco 151x mají výstup „single-ended“, tedy nesymetrický, 158x jsou „differential“, tedy symetrické. Jelikož pro účely této práce stačil nesymetrický výstup, byl zvolen předzesilovač THAT1515. Schéma jeho zapojení je vidět na obrázku 2.5.



Obr. 2.5: Mikrofonní předzesilovač THAT1510.

## 2.5 Zvyšující měnič pro fantomové napájení

Jelikož kondenzátorové mikrofony potřebují externí napájení +48 V, známé jako „fantom“ nebo „fantomové napájení“, a pro tuto práci bylo zvoleno napájení jen  $\pm 6$  V, bylo třeba najít vhodný napěťový měnič. Podstatné bylo najít takový měnič, který pracuje na principu „spread spectrum“, což znamená, že nepracuje na jednom pevném kmitočtu, ale náhodně ho rozmítá. Rušení pak díky tomu není na jednom kmitočtu, ale rozprostře se po větším kmitočtovém pásmu, díky čemuž dojde k jeho adekvátnímu zeslabení.

Nejvhodnější a nejvíce doporučovaný se (nejen) pro audio aplikace udával měnič LT8362. Jedná se o speciálně navržený měnič slibující velmi nízký klidový proud, proud tekoucí ze zemních (GND) zakončení, kde by měla být ideálně 0. Toto je velká výhoda pro bateriově napájené aplikace. Dále má tento obvod vysokou spínací frekvenci (až 2,15 MHz) a pracuje s již zmíněným rozmítaným spektrem. Jeho funkce byla objevena na webu AnalogDialogue (viz 45). Jelikož zprvu nebyl nikde k sehnání, stojí za zmínku i následná rešerše podobných měničů, i když se nakonec opět LT8362 dostal na trh a byl zvolen právě on.

Jako náhrada byla objevena rodina měničů LM515x a měnič LM5001, taktéž fungující na „spread spectrum“ principu. Jsou to velmi podobné čipy, lišící se mezi sebou převážně maximálním možným výstupním napětím. Jejich rozdíly i s měničem LT8362 jsou přehledně zobrazeny v tabulce 2.

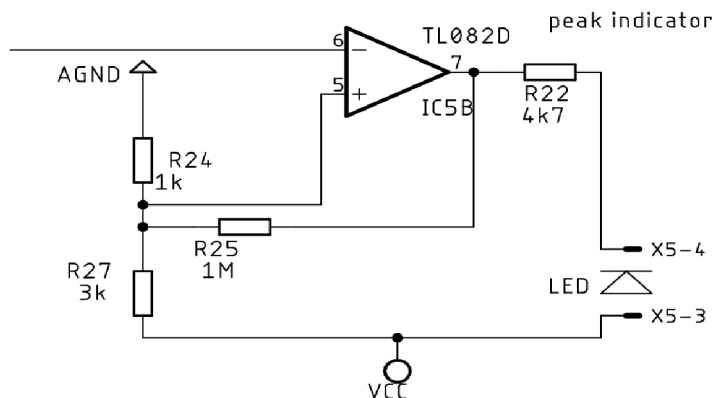
Tab. 2: Porovnání fantomových měničů.

	LT8362	LM5156	LM5157	LM5158	LM5001
Minimální vstupní napětí	2,8 V	3,5 V	2,9 V	3,2 V	3,1 V
Maximální výstupní napětí	60 V	65 V	50 V	85 V	75 V
Minimální pracovní kmitočet	300 kHz	100 kHz	100 kHz	100 kHz	50 kHz
Maximální pracovní kmitočet	2,15 MHz	2,2 MHz	2,2 MHz	2,2 MHz	1,5 MHz

Jelikož vstupní napětí pro tuto práci je rozhodně vyšší než nejvyšší v tabulce a výstupní bylo třeba 48 V, tedy nižší, než je nejnižší v tabulce, mohl být zvolen prakticky jakýkoliv z těchto měničů. Jak už ale bylo zmíněno, nakonec byl vybrán LT8362 hlavně kvůli dostupnosti.

## 2.6 Indikace nestandardních situací

Indikaci nestandardních situací, a to malého vstupního signálu (No signal) a velkého výstupního signálu (Peak indicator) zprostředkovává OZ TL082D zapojený jako jakýsi komparátor, zobrazeno na obrázku 2.6. Když do jeho vstupu vstoupí kritická hodnota spočítaná přes odporový dělič (pro No signal 0,5 V nebo méně, pro Peak indicator 1 V nebo více) sepne se a rozsvítí diodu. Tento obvod byl nalezen na webu Sound-au jako „Schmitt trigger indicator circuit“ (viz 45).



Obr. 2.6: Zapojení OZ TL082D pro detekci velkého výstupního signálu.

Pro zvolené kladné napájení  $V_{CC} = 6 \text{ V}$  a indikaci, co má proběhnout pro hodnotu  $\geq 1 \text{ V}$ , byly odpory vypočítány podle rovnice:

$$V_{out} = \frac{R_{24}}{R_{24} + R_{27}} V_{in}, \quad (2.1)$$

kde  $V_{out} = 1 \text{ V}$  a  $V_{in} = 6 \text{ V}$ .

Jelikož pro druhý nestandardní případ, a to malý vstupní signál („no-signal“) není třeba hodnoty větší nebo rovno, ale naopak menší nebo rovno, bylo třeba funkci OZ pro tuto indikaci invertovat, čehož bylo dosaženo jednoduchým prohozením invertujícího a neinvertujícího vstupu OZ.

LED je na obrázku 2.6 nezapojena a pouze nakreslena ručně, jelikož na čelním panelu už nezbylo místo pro další komponenty, což bude více rozebráno v kapitole 4.

## 3. SIMULACE

U obvodů s dražšími součástkami je vhodné jejich funkci simulovat pomocí softwarových simulátorů, aby nedošlo k jejich poškození. Pro tuto práci byl zvolen simulátor Ltspice. Kompatibilní modely pro simulaci firma THAT nabízí na svých stránkách volně ke stažení. V této kapitole jsou ukázány výsledky simulací.

### 3.1 Schéma

Požadovaným výsledkem simulace bylo dosažení stability obvodu v rozumných mezích výstupního napětí, jinými slovy ustálení regulační smyčky, následně i za dodržení teplotní kompenzace. Obrázek 3.1 zobrazuje celé finální simulační schéma obvodu. Obvod obsahuje prvky popsané v kapitole 2 (jen ty nutné pro simulaci). Většina součástek byla zapojena podle doporučených zapojení udávaných v jejich náležitých katalogových listech. Textové příkazy začínající „options“ byly použity převážně pro zrychlení výpočtů programu. Příkaz „trans“ značí, že program provede časovou analýzu. Příkaz „temp“ udává teploty, pro které simulace proběhne, což bude zobrazeno v kapitole 4.

Dle analogie z kapitoly 1.3:

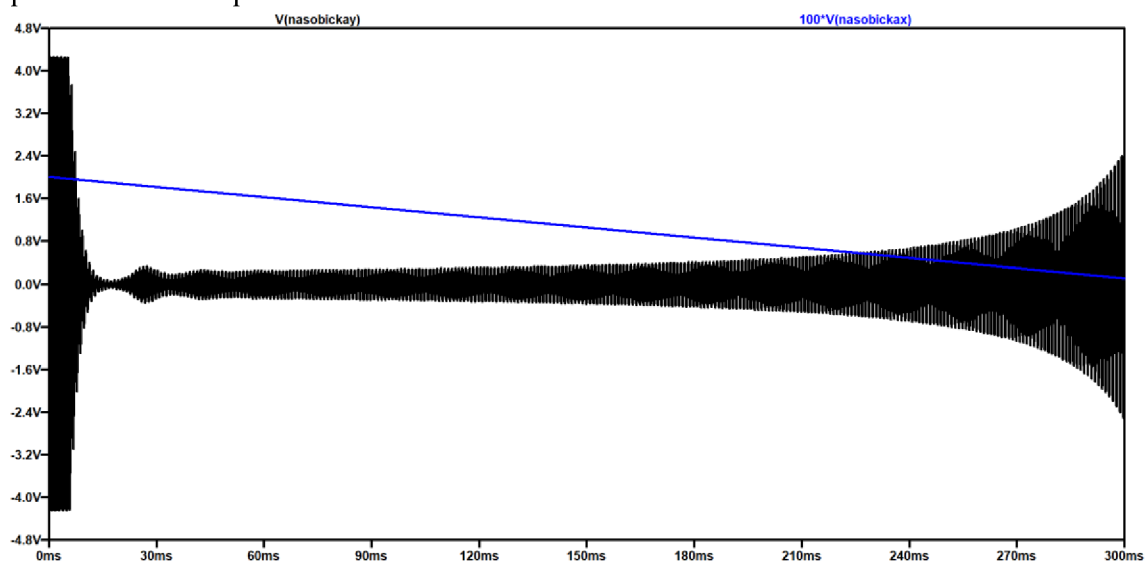
- Regulátor je v simulačním schématu VCA 4320.
- Akční člen je reproduktor v boxu, v simulaci ho jaksí zastupuje behaviorální zdroj B1, jehož jedna část je výstup z U4, což bude výstup do koncového zesilovače a následně reproduktoru.
- Měřicí člen je v simulačním schématu zdroj V4, simulován od 3 do 13 mV (ve schématu zobrazen případ maxima).
- Funkci zesilovače odchylky plní PI regulátor, a to ve schématu ideální zesilovač U5.

Další části simulačního schématu jsou:

- Generátor V3 poskytující referenční signál pro VCA, díky němu byla mimo jiné otestována i frekvenční nezávislost obvodu, a to změnou jeho frekvence (ve schématu zobrazeno 500 Hz).
- Zesilovač OA3 integrovaného obvodu THAT4320 simulován jako ideální OZ U4.
- Behaviorální zdroj B1 násobí signál z výstupu U4 se signálem z mikrofonu V4 a následně tento součin ještě stokrát zvětší. Toto zvětšení simuluje předzesilovač THAT1510 a jeho zesilovací činitel zvolený  $\times 100$ .
- U2 je RMS detektor integrovaného obvodu THAT4320. Na něm byla simulována mimo jiné změna offsetu výstupu při změně jeho vstupního rezistoru R1, což bude dále zmíněno v kapitole 4.



Stojí zde za zmínku první dosažený pozitivní výsledek simulace, a to obrázek 3.2, který zobrazuje prvně simulované extrémy výstupu z referenčního mikrofonu, a to pomocí pulsního zdroje, který klesal s rezervou zvolených 20 mV do 2 mV (modrá přímka). Na obrázku je 100× zesílen, aby byl dobře vidět, pro simulace ale byly jeho hodnoty skutečně 20 mV až 2 mV. Černou barvou je pak zobrazen výstupní uzel obvodu, který byl sledován až od nějakých 30 ms, do této doby totiž jaksi nabíhá časový kondenzátor RMS detektoru, proto jsou do tohoto času vidět počáteční překmity. Na obrázku je jasně vidět, že čím menší signál se dostává do kontrol pinu EC+ VCA, tím větší signál vyjde na svůj výstup. Jeho funkce popsána v kapitole 2.2 byla tímto ověřena a simulace dále probíhaly pouze pro konstantní napětí z mikrofonu.



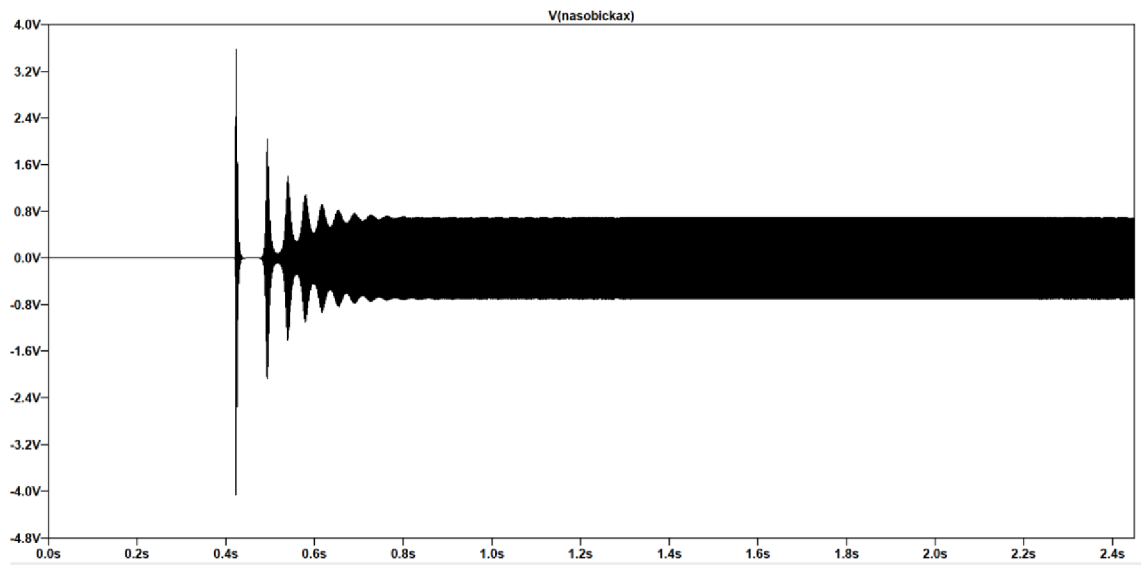
Obr. 3.2: První simulační schéma.

### 3.3 Výsledná závislost

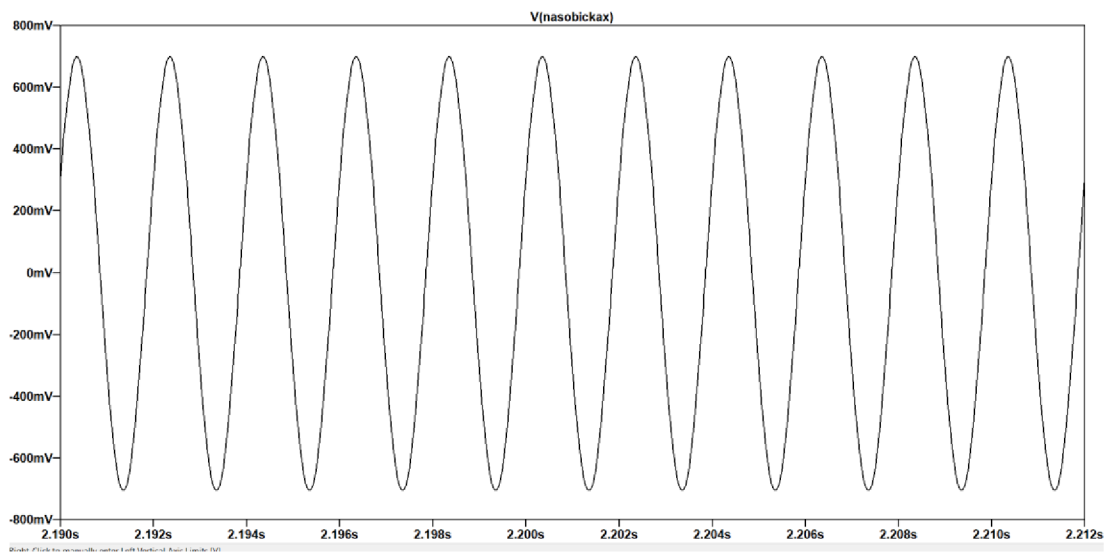
Na obrázku 3.3 je zobrazena výsledná závislost simulačního schématu z 3.1, a to napětí na čase v uzlu „nasobickax“, tedy v uzlu výstupním. Simulační analýza byla zvolena „transient“, tedy časová po dobu 2,5 s.

Jak už bylo zmíněno, pro simulaci byly zvoleny ideální operační zesilovače, dochází proto ze začátku k velkým překmitům, a k požadované stabilizaci dochází až po přibližně 1 s. Při přiblížení, jak zobrazuje obrázek 3.4, je vidět, že došlo ke stabilizaci obvodu na přibližně 700 mV. Pro různé změny napětí na zdroji V4 a pro změny polohy potenciometru U7 dochází dle očekávání ke změně napětí, při kterém dojde ke stabilizaci, respektive k ustálení regulační smyčky. Ovšem vždy k ní bezpečně dojde, finální simulace tedy byly úspěšné.





Obr. 3.3: Simulační schéma.



Obr. 3.4: Přiblížené simulační schéma.

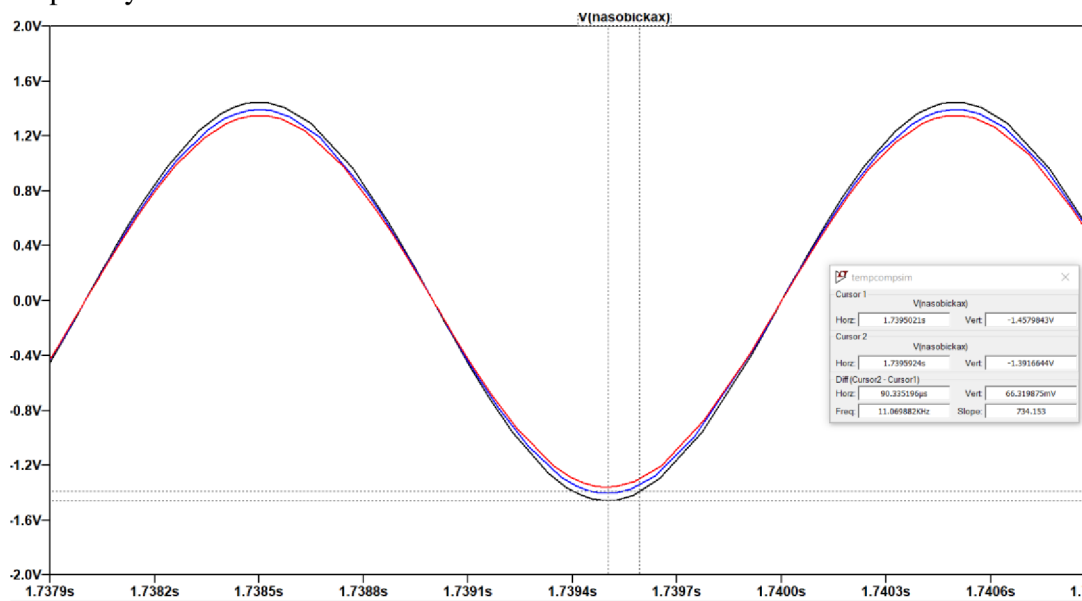
## 4. TEPLOTNÍ KOMPENZACE

Většina integrovaných obvodů potřebuje stálou teplotu pro to, aby fungovaly správně. Dosažení konstantní teploty je ale bohužel složitá problematika, čip jako takový se téměř vždy bude po přivedení napájení zahřívat, což může mít negativní vliv na různé funkční části obvodu. Výrobci integrovaných obvodů si jsou této problematiky vědomí, a proto občas nabízí nějaké kompenzační napětí, nebo podobnou pomůcku, přes kterou se dá odchylka způsobená teplotní změnou minimalizovat.

Pokud integrovaný obvod obsahuje teplotně ovlivnitelné části, vysílají ze svého výstupu signál s odchylkou, vznikající změnami teplot. Do tohoto signálu je přivedeno kompenzační napětí, přesně vypočítané napětí měnící svou velikost v závislosti na vnější teplotě, které se sečte (respektive odečte) se signálem původním, a tím se do dalšího prvku obvodu dostane signál s odchylkou způsobenou změnou teploty minimální, nebo ideálně žádnou.

### 4.1 Teplotní kompenzace obvodu THAT4320

Při řešení této práce zabrala teplotní kompenzace značnou část času, při návrhu citlivých zařízení je proto potřeba s ní počítat. Změna teplot nepříznivě ovlivňuje RMS detektor, který je přes operační zesilovač (PI regulátor) propojen s EC+ vstupem VCA, který přímo udává změnu zesílení. Kvůli tomu i malé změny RMS způsobovaly poměrně velké změny na výstupu VCA. Tyto nezanedbatelné změny jsou vidět na obrázku 4.1, zobrazující výstupní napětí VCA (respektive OA3, jak bylo vysvětleno v podkapitole 2.2.1) pro teploty 20 °C (černá), 40 °C (modrá) a 60 °C (červená). Kurzory jsou zobrazeny amplitudy 20 °C a 40 °C.

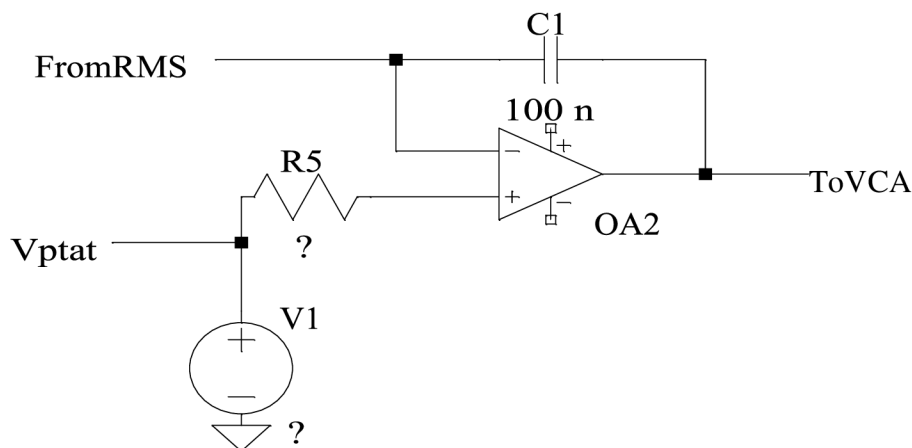


Obr. 4.1: Nekompenzované výstupní napětí pro různé teploty.

Jak je vidět, napětí pro různé teploty se od sebe pro tento případ liší o přibližně 0,06 V. Jelikož VCA pracuje v decibelech s konstantou 6 mV/dB, způsobila by tato odchylka značný rozdíl v komoře, a to 10 dB.

Integrovaný obvod THAT4320 vlastní pomocné kompenzační napětí „ $V_{PTAT}$ “, což je napětí generované čipem, které kopíruje teplotní drift RMS detektoru, a to 0,33 %/°C. I proto teplotní kompenzaci ze začátku nebyla věnována větší pozornost. Jak ale bylo později zjištěno, výrobce měl toto napětí v katalogovém listu navržené pro jakési obecné zapojení, které se od zapojení použité pro tuto práci liší. Velice jednoduchá teplotní kompenzace doporučená výrobcem, kde se pouze toto  $V_{PTAT}$  injektuje přes jeden rezistor za výstup z RMS, byla tedy pro účely této práce bohužel nepoužitelná, což bylo i ověřeno přes simulace, výsledná závislost vycházela v podstatě stejně jako je vidět na obrázku 4.1.

První pokus o řešení tohoto problému byl najít nějaké malé řídicí napětí, do kterého by se  $V_{PTAT}$  injektovalo. Za část obvodu, do které se bude toto řídicí napětí vkládat, byl zvolen neinvertující vstup OA2, což byl jediný správný výstup z tohoto pokusu. Tento pokus je zobrazen na obrázku 4.2.

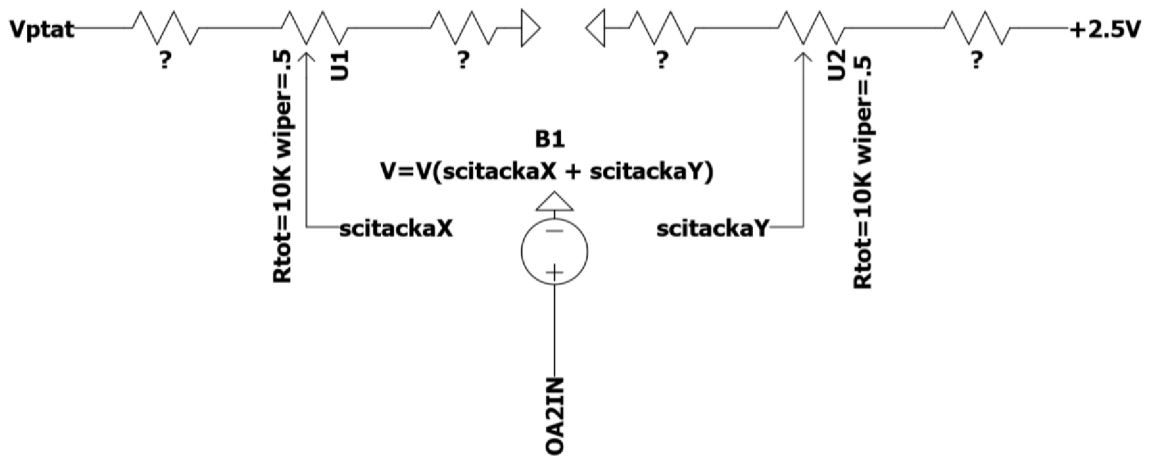


Obr. 4.2: První pokus kompenzace.

Jak bylo zjištěno, neexistuje žádné řídicí napětí, které by po přičtení k  $V_{PTAT}$  vytvořilo vykompenzovaný signál na výstupu. Navíc, čím větší je toto napětí oproti  $V_{PTAT}$ , tím větší vzniká odchylka. Byla zde vynaložena snaha o vytvoření různých odporových děličů a zesilovačů, aby odchylka zmizela, žádná ale neměla pozitivní závěr.

Druhý pokus byl na radu vedoucího vymyslet kompenzaci přes dvojitý potenciometr, který by současně ovládal velikost  $V_{PTAT}$  a pomocného řídicího napětí. Zde byla vynaložena opět nemalá snaha o vypočítání odporů a zesilovačů (bylo předpokládáno, že záporné  $V_{PTAT}$  bude muset být pravděpodobně invertováno a násobeno) tak, aby při otáčení potenciometru docházelo ke zvyšování výstupního signálu za udržení teplotní kompenzace. Toto je pro ujasnění zobrazeno na obrázku 4.3. Behaviorální zdroj na obrázku plní funkci sčítačky, v realitě to měl být tzv. přístrojový

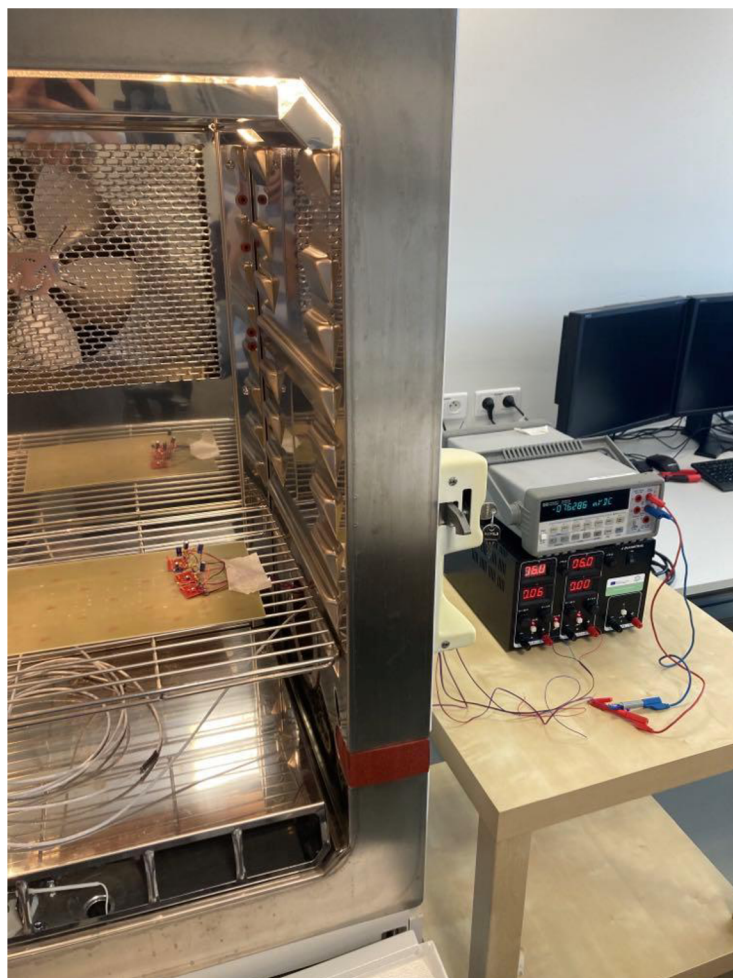
zesilovač, což je rozdílový zesilovač s uzavřenou smyčkou zpětné vazby zesilující rozdíl vstupních napětí.



Obr. 4.3: Druhý pokus kompenzace.

Jak ale bylo zjištěno, ani zde se nedala udržet konstantní hodnota pro různé teploty, jelikož pokud je přičteno jakékoliv jiné napětí, které má konstantní hodnotu pro různé teploty k  $V_{PTAT}$ , které kopíruje teplotní drift RMS detektoru, nutně se musí objevit nějaká odchylka, a to tím větší, čím je poměrově  $V_{PTAT}$  menší. Proto došlo k závěru, že žádné pomocné řídicí napětí využito být nemůže a celá teplotní kompenzace musí nutně být vytvořena pouze přes nějak násobené  $V_{PTAT}$ .

Toto řešení v simulacích fungovalo okamžitě, nicméně nesetkalo se s velkou oblibou u vedoucího práce, který upozorňoval na to, že hodnota  $V_{PTAT}$  bude pro různé čipy různá, a proto není nejvhodnější postavit celou kompenzaci jen na jeho hodnotě, jinými slovy, že by tento přístup byl nereprodukovatelný. Jelikož integrované obvody THAT4320 byly pořízeny 3 kusy, bylo možné tuto obavu proměřit. V laboratoři byly na testovací destičku připájeny nutné prvky pro proměření velikosti  $V_{PTAT}$ , a to nejen napájecí kabely a keramické kondenzátory, ale pro oddělení napájení bylo třeba zvolit kondenzátory elektrolytické, jelikož výstup  $V_{PTAT}$  byl bez nich utopen v šumu. Jelikož je toto zařízení napájeno symetricky, jeho napětí  $V_{ref}$  musí být uzemněno, tudíž má hodnotu ideálně 0 V. Poté, co byly na výstupu  $V_{PTAT}$  měřeny očekávané hodnoty, a to kolem  $-72$  mV, jelikož jeho katalogová hodnota je  $V_{ref} - 0,072$  V, byly všechny tři čipy propojeny k sobě a vloženy do teplotní komory. Toto měření je vidět na obrázku 4.4.

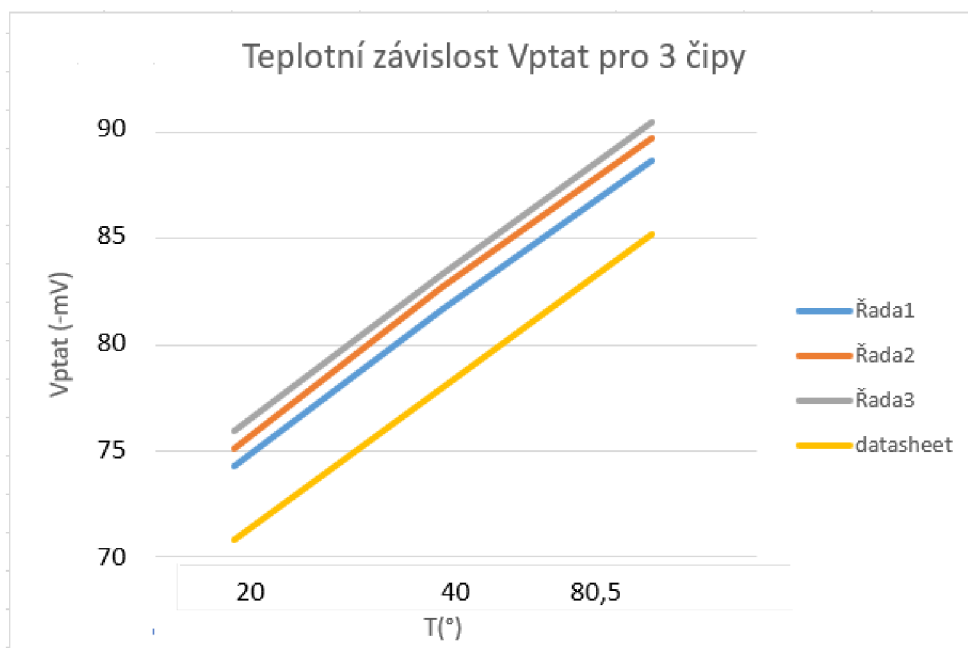


Obr. 4.4: Měření v teplotní komoře.

V komoře byly postupně nastaveny teploty 20, 50 a 80,5 °C. Symetrické napájení  $\pm 6$  V bylo dodáváno ze zdroje a multimetrem bylo měřeno napětí na výstupu pinu  $V_{PTAT}$ . Naměřené výsledky a katalogová hodnota jsou zobrazeny v tabulce Tab. 3 a vidět jsou na obrázku 4.5.

Tab. 3: Naměřené hodnoty z teplotní komory pro 3 čipy a katalogová hodnota.

°C	kus (- mV)			
	1	2	3	datasheet
20	74,25	75,13	75,97	70,812
50	81,65	82,69	83,33	77,94
80,5	88,65	89,7	90,47	85,1868

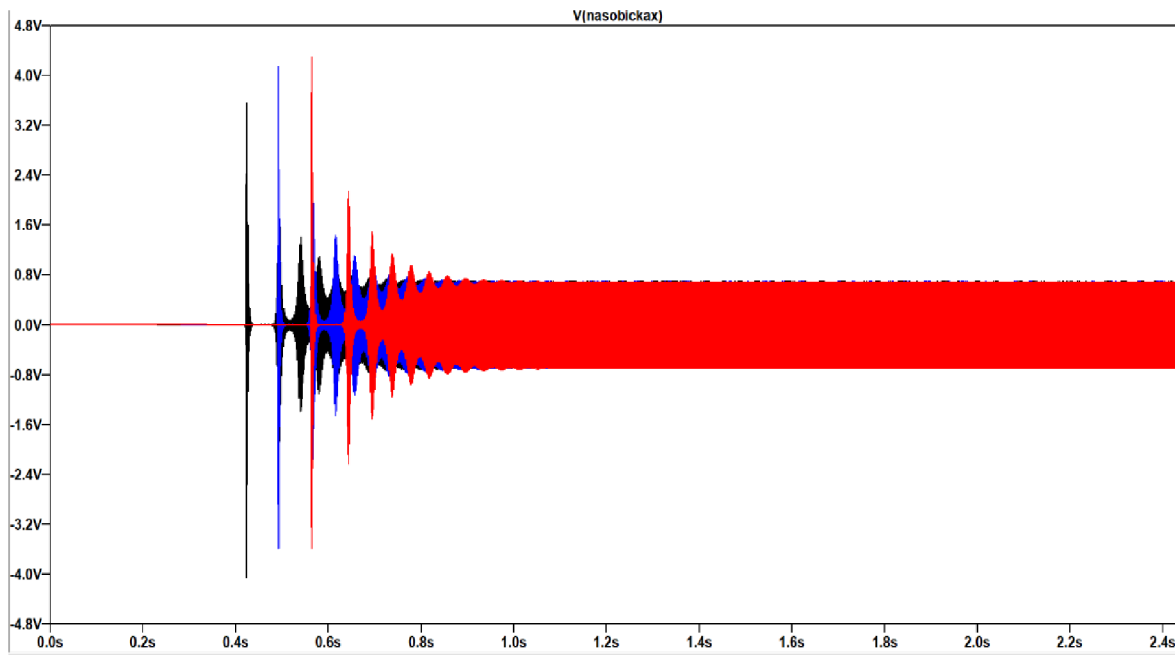


Obr. 4.5: Teplotní závislost  $V_{PTAT}$  pro různé čipy a katalogovou hodnotu.

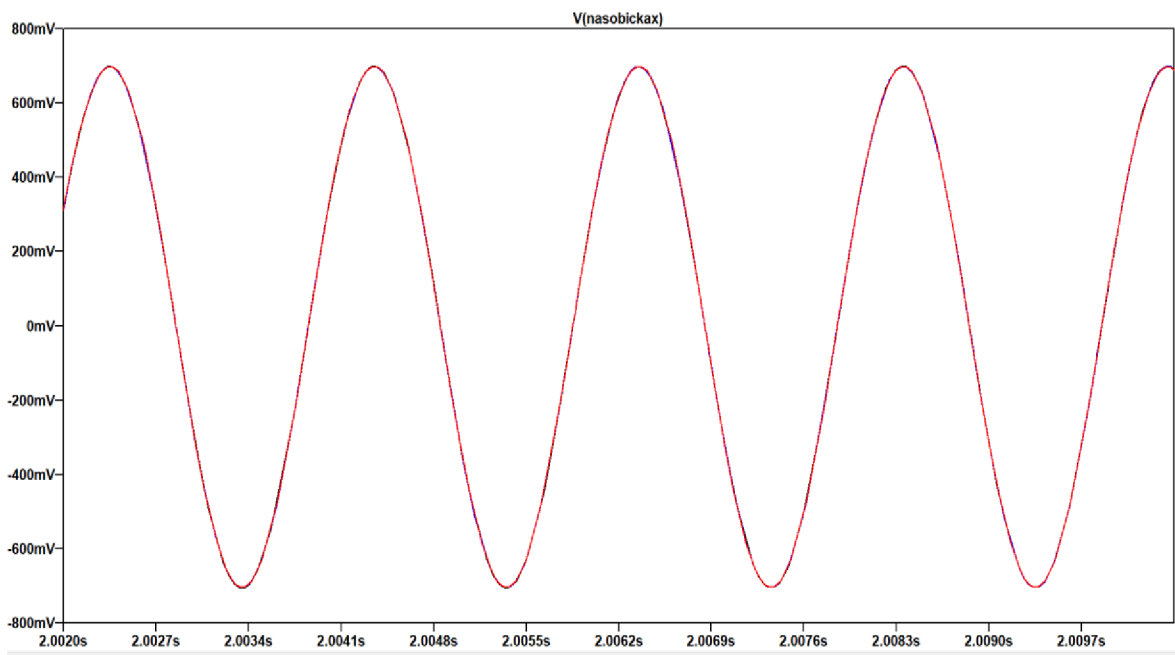
Je vidět, že obava o nestálosti této hodnoty byla zcela oprávněná, integrované obvody mají mezi sebou rozdíly hodnot kolem 1,5 mV, a rozdíl od katalogové hodnoty je průměrně přibližně 4 mV. Pozitivní výstup tohoto měření byl fakt, že všechny závislosti rostou se stejnou konstantou. Bylo tedy třeba vymyslet, jak by šel zařídit nějaký stejnosměrný offset, kterým by šly tyto závislosti vyrovnat, aby byly, pokud možno, totožné. Jak bylo zjištěno, tento stejnosměrný offset poskytuje třeba změna hodnoty odporu vstupního rezistoru RMS detektoru. Proto je na tomto místě připraven jumper a ladění bude probíhat právě zde.

Výsledná správně vykompenzovaná simulace (dle zapojení na obrázku 3.1) je zobrazena na obrázku 4.6 a přiblížená na obrázku 4.7. Simulace byla nastavena pro teploty 20 °C (černá), 40 °C (modrá) a 60 °C (červená). Je jasně vidět, že barvy se překrývají, jinými slovy pro různé teploty dochází ke stabilizaci při stejném napětí. Teplotní kompenzace je tím pádem úspěšná.

Implementace bude dále rozebrána v kapitole 5.5.



Obr. 4.6: Správně kompenzovaná simulace.



Obr. 4.7: Přiblížená správně kompenzovaná simulace.

## 5. NÁVRH

V této kapitole bude zobrazen návrh zařízení, pro který byl využit software EAGLE a dovysvětleny části, které ještě nebyly popsány.

### 5.1 Zdroje

Na obrázku 5.1 je vidět schéma návrhu zdrojové části přípravku. Pro vytvoření obou napětí je signál přiveden přes transformátor HAHN 230/2×6 se sekundárním vinutím 6 V, dále Graetzovým můstkem, soustavou čtyř diod, které ze střídavého signálu tvoří stejnosměrný.

Pro napětí ±6 V je signál veden přes nastavitelné stabilizátory LM317 a LM337 (dále popsány v kapitole 5.7). Ochranné elektrolytické kondenzátory byly vypočítány ze vzorce

$$C = I \frac{\Delta t}{\Delta U}, \quad (5.1)$$

kde  $I$  je proudový odběr, který pro toto zařízení vyšel přibližně 60 mA,  $\Delta t$  je půl periody, pro 50 Hz ze sítě tedy 10 ms a  $\Delta U$  zvlnění napětí. Po dosazení:

$$C = \left(0,06 \frac{0,01}{1,5}\right) F. \quad (5.2)$$

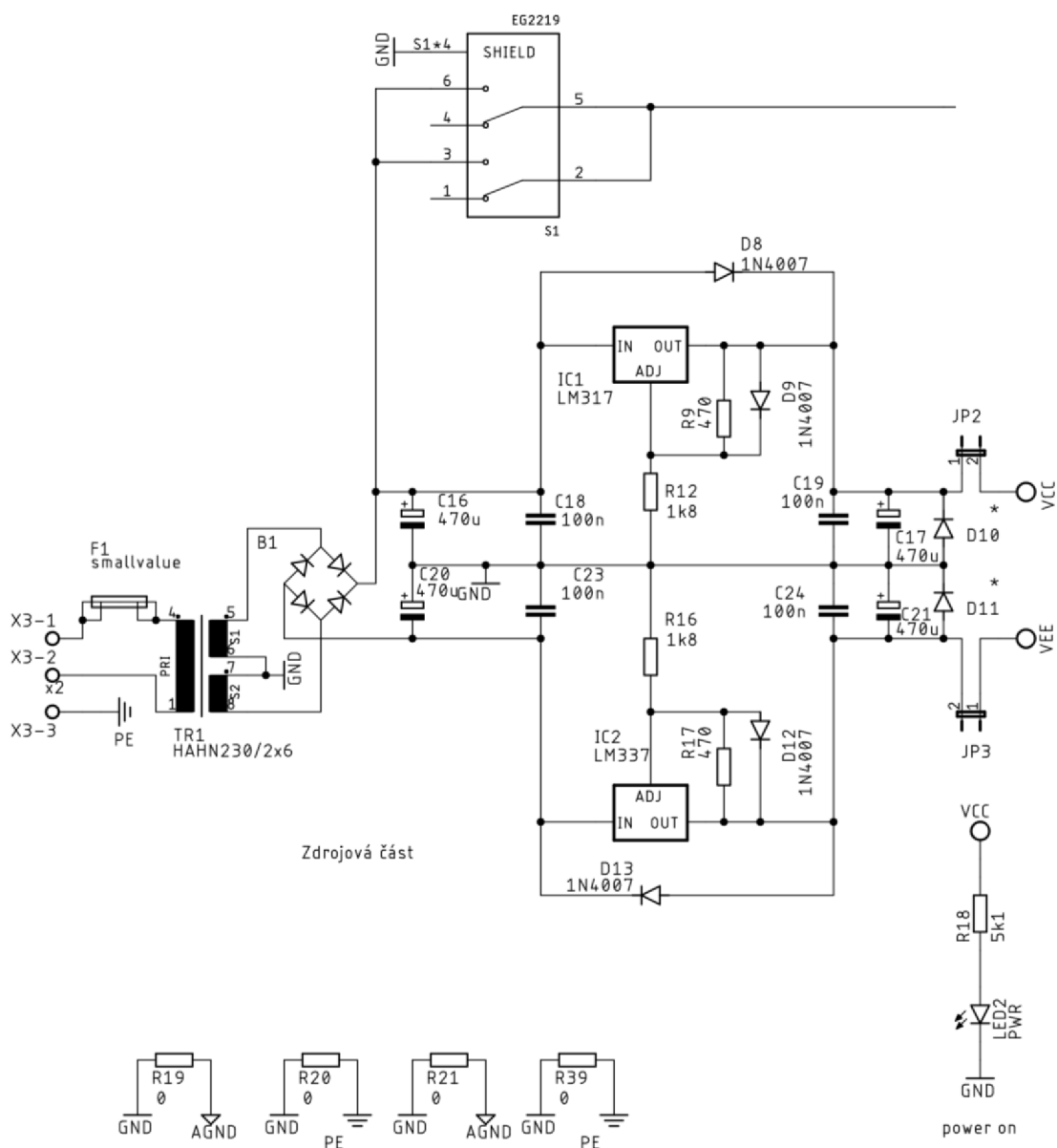
S ohledem na zvlnění a s dostatečnou rezervou byly raději zvoleny větší kondenzátory z řady E12 o velikosti 470  $\mu$ F. Kondenzátory jsou zde třeba, aby vyhladily zvlněné napětí z můstku. Diody slouží jako ochrana proti přepólování.

Dioda LED2 slouží pro indikaci zapnutí obvodu, rezistor R18 nastavuje proud procházející touto diodou na 1 mA, což je pro vysokosvitivé LED diody dostačující.

Nulové rezistory R19, R20, R21 a R39 slouží ke spojení zemních vrstev na desce plošných spojů. AGND (alternative GND) je signálová zem, zem, ke které jsou vztaženy všechny citlivé signály a PE (protective earth) je zem ochranná, ke které jsou připojeny především části šroubované k desce.

Spínač EG2219 spíná cestu signálu k měniči LT8362, aby pracoval pouze, když je třeba.



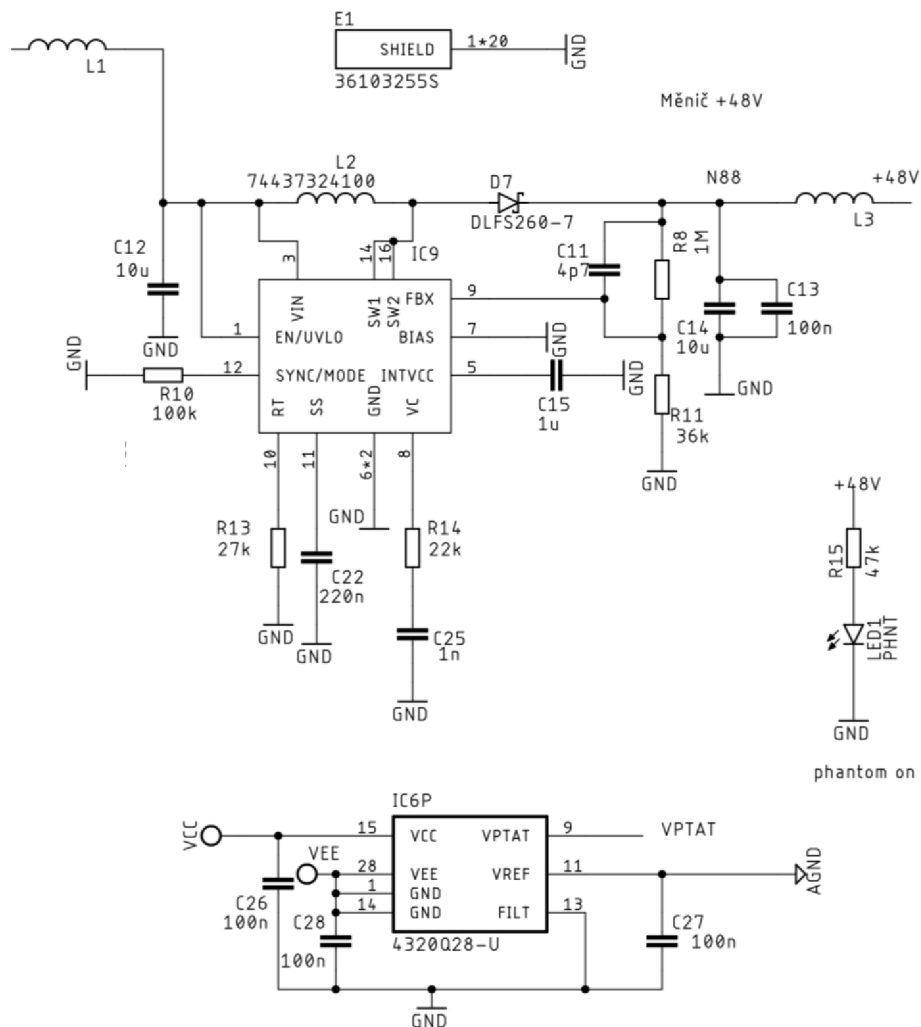


Obr. 5.1: Návrhové schéma zdrojové části.

## 5.2 Zvyšující měnič pro fantomové napájení

Na obrázku 5.2 je vidět schéma měniče LT8362. Vstupní kondenzátor C12 a výstupní C13 a C14 slouží k filtraci napětí. Rezistor R13 nastavuje pracovní frekvenci na 2 MHz. Díky rezistoru R10 zapojeného do pinu SYNC/MODE je ale tato frekvence pro vyšší odběry rozmítána na již zmíněném „spread spectrum“ principu. Pro nižší odběry funguje v takzvaném „burst“ módu, což znamená, že je prolínán pauzami mezi jednotlivým kmitáním, které se zmenšují při zvětšování odběrů. R11, R8 a C11 tvoří zpětnou vazbu, která dodává při 48 V na výstupu napětí potřebné do FBX pinu. Velikosti součástek byly navrženy přes program LTpowerCAD®. Požadavky návrhu byly následující:

- vstupní napětí: 7 – 10 V,
- výstupní napětí: 48 V,
- výstupní proud z měniče: do 30 mA,
- kmitočet: ideálně co nejvyšší, měnič funguje do 2,15 MHz.



Obr. 5.2: Návrhové schéma měniče LT8362.

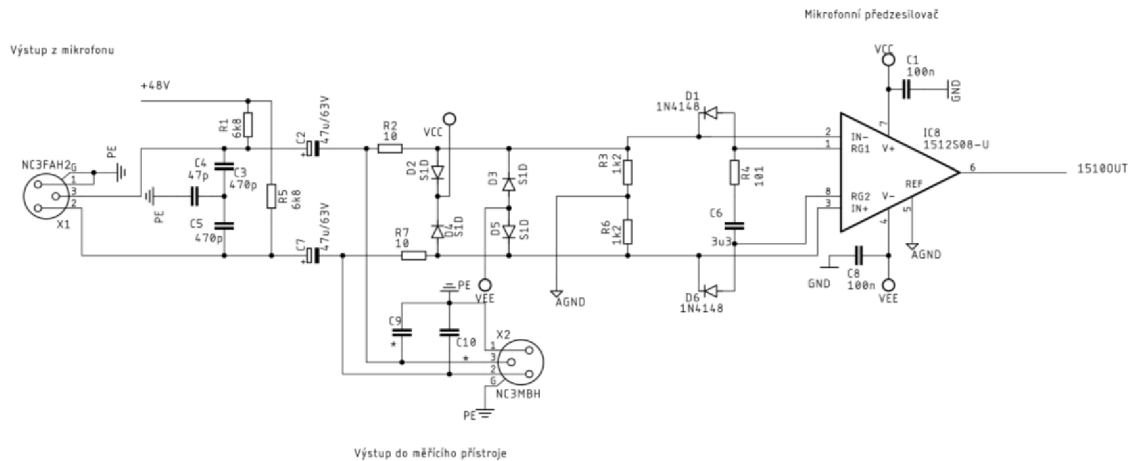
Měnič je chráněn štítem 36103255S, a také feritovými perlami L1 a L3 typu HI0805O121R-10 na vstupu i výstupu proti vysokofrekvenčnímu rušení.

Dioda LED1 indikuje zapnutí fantomového napájení +48 V, rezistor R15 nastavuje proud procházející touto diodou na přibližně 1 mA, což je pro diody s vysokou svítivostí dostatečné.

IC6P je zdrojový blok integrovaného obvodu THAT4320, kondenzátory v něm slouží k oddělení napájení.  $V_{PTAT}$  je pomocné kompenzační napětí popisováno v kapitole 4.

## 5.3 Mikrofonní předzesilovač

Obrázek 5.3 zobrazuje schéma předzesilovače THAT1510. Navrženo bylo podle oficiálního katalogového listu a zesílení bylo zvoleno 100×, tedy 40 dB pomocí rezistoru R4. Výstupní pin 6 je připojen na vstupní pin 6 RMS detektoru (viz 1).



Obr. 5.3: Návrh předzesilovače.

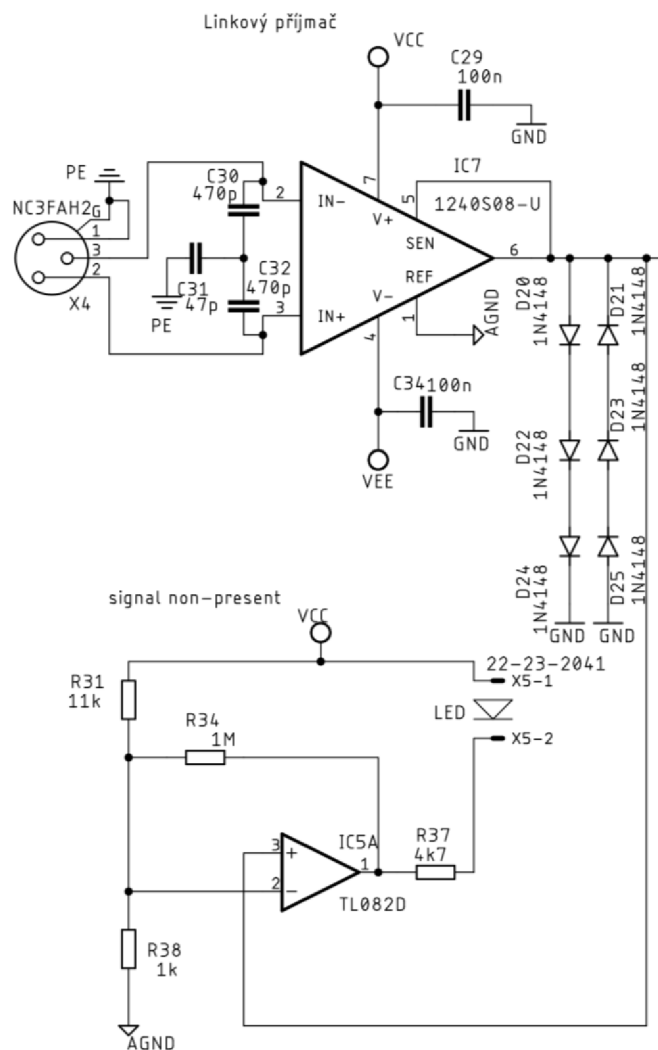
Přes rezistory R1 a R5 je do obvodu injektováno fantomové napájení +48 V, kondenzátory C2 a C7 ho oddělují od měřicího výstupu přes XLR konektor NC3MBH.

## 5.4 Linkový přijímač

Jelikož je třeba ze symetrického signálu z generátoru vytvořit signál nesymetrický pro vstup VCA, bylo třeba užití vhodného linkového přijímače. Firma THAT nabízí linkový přijímač THAT1240, speciálně navržený zesilovač pro audio aplikace s velmi nízkým klidovým proudem (2 mA) a extrémně nízkým zkreslením (THD = 0,0006 %).

Na obrázku 5.4 je vidět schéma tohoto integrovaného obvodu, opět navrženo podle oficiálního katalogového listu. Výstup z pinu 6 vede do vstupu VCA (viz 1). Diody hlídají, aby výstup zesilovače nepřekročil limitní hodnoty.

Je zde zobrazen i indikační prvek „no-signal“, popsáný v 2.6.

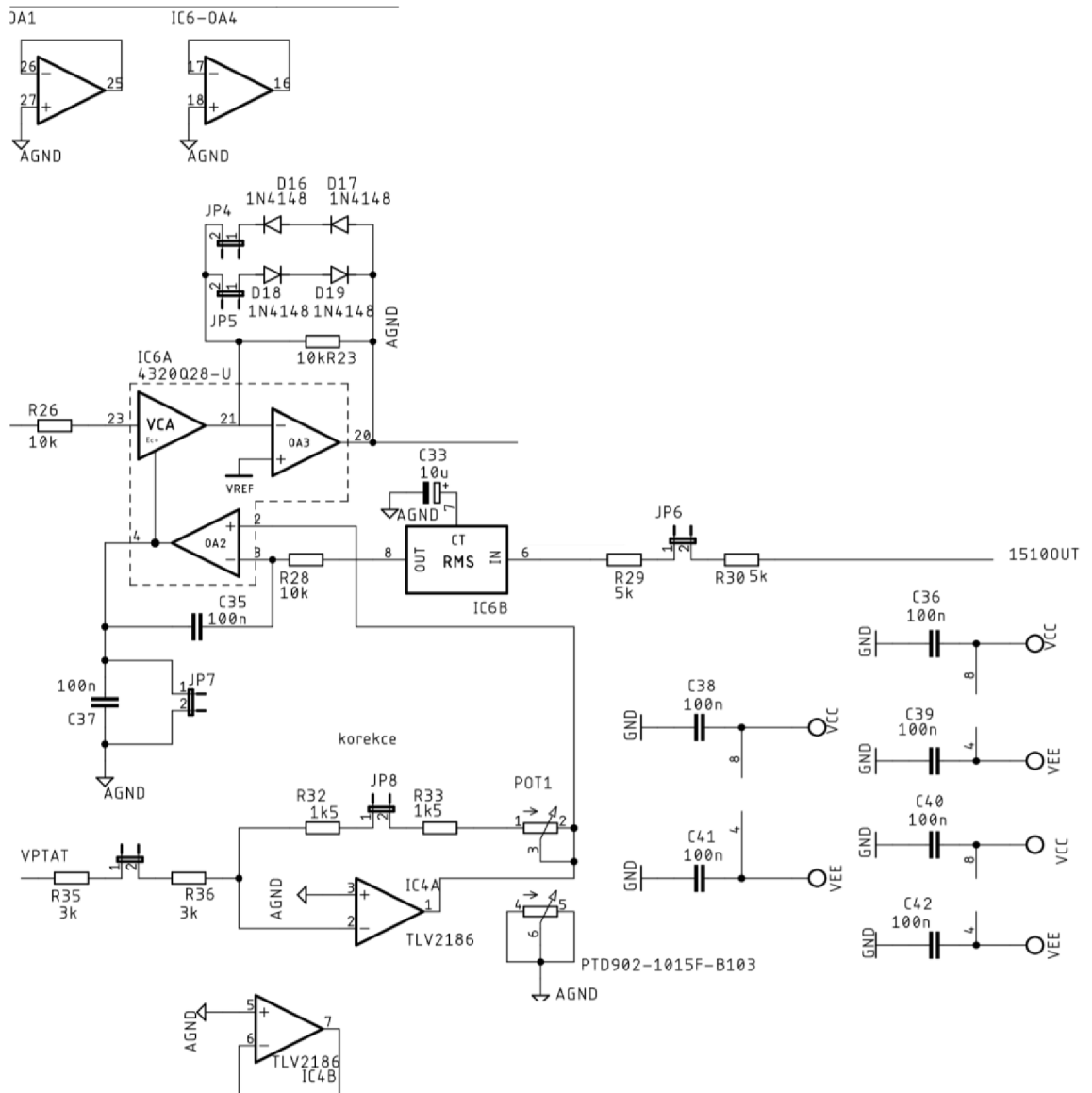


Obr. 5.4: Návrh linkového přijímače.

## 5.5 Kompander a teplotní kompenzace

Na obrázku 5.5 je vidět obvod THAT4320 s návrhem teplotní kompenzace. Do neinvertujícího vstupu OA2 vstupuje obvod teplotní kompenzace popsán v kapitole 4. Mezi rezistory R35 + R36 a R32 + R33 byl pro jistotu vložen jumper, kdyby se jejich hodnota musela měnit. Stejně tak je jumper vložen i mezi rezistory R29 + R30, zde je prostor pro ladění offsetu popsáného v kapitole 4. Teplotní kompenzace tedy byla vymyšlena následovně: do neinvertujícího vstupu OA2 integrovaného obvodu THAT4320 bude vstupovat kompenzační napětí  $V_{PTAT}$  invertováno a zesíleno pomocí operačního zesilovače TLV2186, který byl zvolen hlavně pro svou přesnost a teplotní stálost. Pomocí potenciometru PTD902 je možné nastavovat úroveň tohoto napětí, v rozsahu zesilovací konstanty  $-0,4$  až  $-2$ .

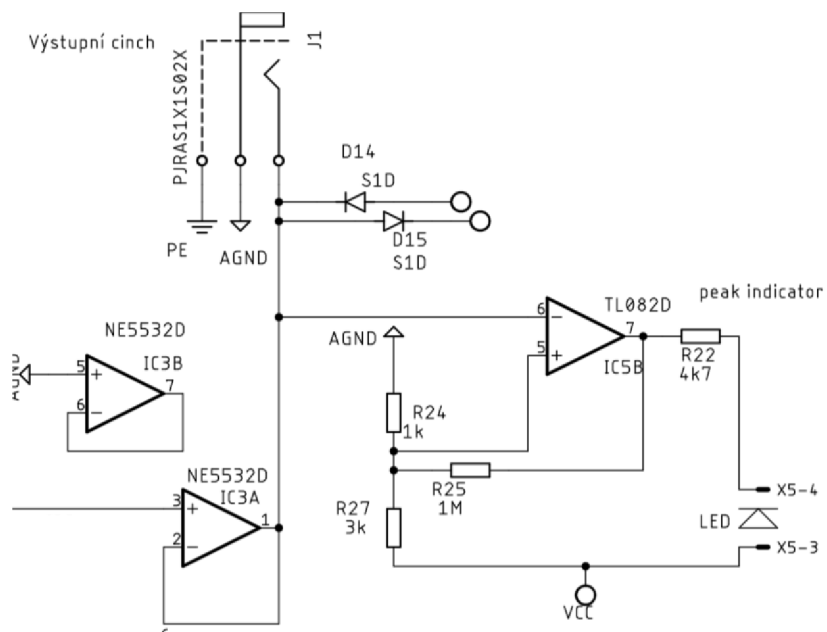
Integrovaný obvod THAT4320 je chráněn diodami D16 až D19, dle doporučení výrobce. Výstupní pin 20 z OA3 vstupuje do bufferu NE5532D (viz 1).



Obr. 5.5: Návrh komponderu a teplotní kompenzace.

## 5.6 Výstup

Obrázek 5.6 zobrazuje zesilovač NE5532D zapojený jako buffer, vstupující přes ochranné diody a indikaci limitace popsanou v 2.6 do výstupního konektoru RCA (cinche), který propojí zařízení s výkonovým zesilovačem a reproduktorem do komory, a tím bude uzavřena zpětnovazební regulační smyčka.



Obr. 5.6: Návrh výstupního bloku.

## 5.7 Nedílné součásti obvodu

Tato podkapitola blíže popisuje další části obvodu, většinou již zmíněné výše v kapitole 5.

- Přípravek bude napájený pomocí adaptéru ze sítě přes „snap-in“ filtr 080S.00100.00. Ten bude vstupovat přes pojistku do transformátoru HAHN 230/2×6 poskytující na výstupu (sekundárním vinutí) 6 V. Tento transformátor byl zvolen pro svou dostupnost, jelikož síťové transformátory se sekundárním vinutím 6 V dostupné skladem se na trhu téměř nenachází.
- Jelikož pro vytvoření hlavního napájení VCC a VEE byla potřeba poměrně netypická hodnota  $\pm 6$  V nebyly nalezeny vhodné lineární regulátory přesně na tyto hodnoty. Proto bylo třeba zvolit regulátory nastavitelné. Zvoleny byly LM337 a LM317, jelikož jsou pro své nízké šumové vlastnosti (dle katalogového listu 0,003 %) doporučovány audio hobby komunitou. Také jsou levné a dostupné. LM337 umožňuje přes nastavení dvou odporů produkovat na svém výstupu od  $-1,2$  do  $-37$  V. Hodnoty odporů byly vypočítány dle následující rovnice:

$$V_{out} = -1,25 \left( -1 + \frac{R_2}{R_1} \right).$$

- Úplně stejně, akorát pro kladné hodnoty, funguje měnič LM317. I hodnoty odporů pro požadovaných 6 V na výstupu se počítají velice podobně dle rovnice:

$$V_{out} = 1,25 \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right). \quad (5.4)$$

- Pro zapínání fantomového napájení +48 V byl vybrán spínač EG2219, který je dvojitý, pro účely této práce je zapojen paralelně.
- Zvyšující měnič pro fantomové napájení bude chráněn stínícím štítem 36103255S pro omezení vyzařovaného rušení. Doporučen byl vedoucím práce.
- Před a za měničem pro fantomové napájení je umístěna vždy jedna feritová perla typu HI0805O121R-10 proti vysokofrekvenčnímu rušení.
- Pro indikaci zapnutí (Power on) a zapnutí fantomového napájení (Phantom on) jsou využity 3 mm vysokosvítivé diody.
- K výstupu do výkonového zesilovače bude sloužit konektor RCA (známý také jako Cinch) PJRAS1X1S02X.
- Impedanční oddělení a také jakousi ochrannou funkci pro integrovaný obvod THAT4320 zprostředkovává OZ NE5532D zapojený jako buffer za OA3 čipu THAT4320. Zvolen byl vedoucím práce.
- Všechny ochranné diody byly vybrány typu S1D a všechny anti-saturační typu 1N4148.
- Pro symetrické vstupní a výstupní konektory byly zvoleny XLR konektory od firmy NEUTRIK a to NC3FAH (samice) a NC3MBH (samec).

## 6. NÁVRH DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ

Po úspěšném výběru součástek, simulaci funkčnosti obvodu a zakreslení schématu přichází na řadu návrh desky plošných spojů. I pro tuto práci byl použit návrhový program EAGLE. Návrh DPS (desky plošných spojů) spočívá v rozmístění modelů součástek na ideálně co nejmenším prostoru, následně vykreslení jejich signálových cest, ale i cest napájecích a zemních, případně vykreslení zemních polygonů. Tyto součástky je třeba rozmísťovat promyšleně, po funkčních blocích blízko u sebe, aby nedocházelo k nadbytečnému křížení, nebo vykreslování zbytečně dlouhých signálových cest, což může vést k nárůstu chyby v signálu.

### 6.1 DPS zařízení pro kompenzační měření mikrofonů

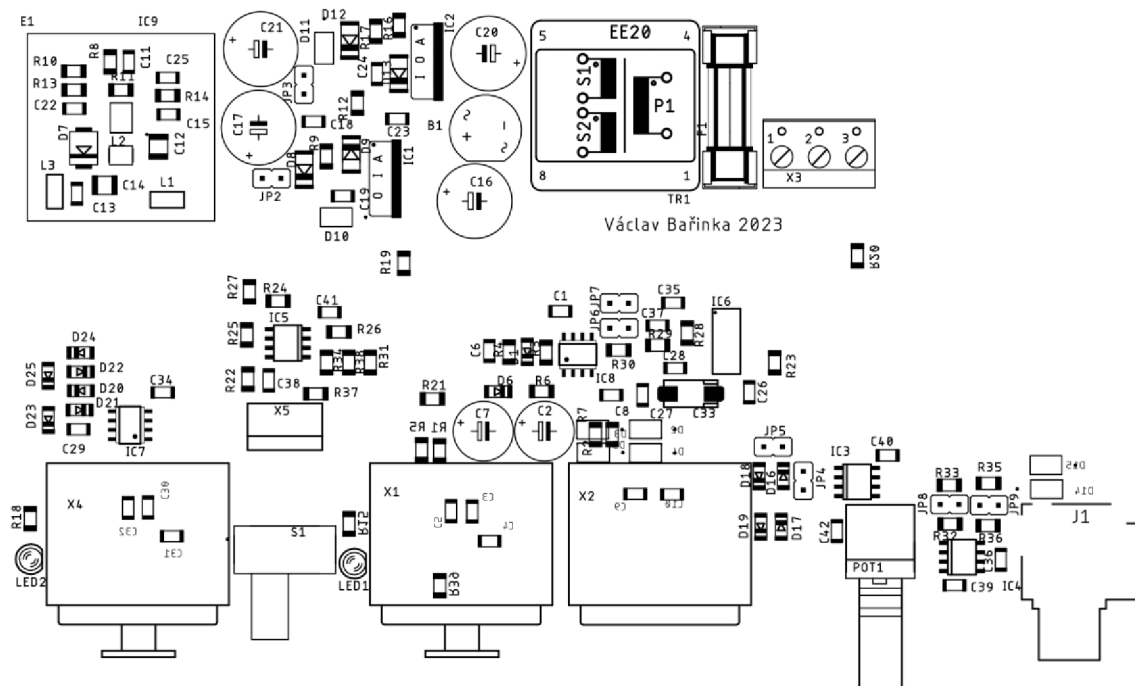
Obrázek 6.1 zobrazuje návrh DPS tohoto zařízení. Zařízení bude umístěno do krabičky 1455T1201, odtud je šířka desky 165 mm. Výška je menší, jelikož nebylo třeba využít celých 120 mm kolik měří tato krabička, ale stačilo 83 mm. Krabička se bude ořezávat na pile.

Na horní části obrázku je vidět napájecí část zařízení, a to zleva měnič pro fantomové napájení LT8362 se všemi svými komponenty (popsáno v 5.2) chráněn štítem. Dále je vidět celý napájecí blok VCC a VEE popsán v kapitole 5.1. Kolem TR1 a síťového vstupu X3 je jasně pozorovatelná izolační mezera, mezera rozdělující vysokonapěťovou část od té nízkonapěťové. Je zde nutná, aby nedošlo k proražení vysokých napětí do části, u kterých může dojít ke kontaktu s uživatelem.

Při pohledu na spodní část desky, opět zleva, je vidět nejprve LED pro indikaci zapnutí zařízení (připojení do sítě), následně XLR vstupní konektor pro generátor, dále spínač zvyšujícího měniče pro fantomové napájení a jeho indikační LED. Následně se vedle sebe nachází vstupní XLR konektor pro měřený mikrofon a výstupní XLR konektor do měřicího zařízení. Za nimi je na desce vidět korekční potenciometr (popsáno v kapitole 5.5) a na závěr výstupní RCL (cinch) konektor. Nad konektory se nachází jejich příslušné funkční bloky, a to linkový přijímač THAT1240 nad vstupem X4 pro generátor, mikrofonní předzesilovač THAT1510 nad mikrofonním vstupem X1, vedle něj THAT4320 a na závěr zesilovač TL2186 u potenciometru POT1. Tato cesta zleva doprava simuluje cestu signálu zleva doprava, tedy nalevo jsou bloky vstupní a napravo bloky výstupní.

Je patrné, že místo na čelním panelu je kompletně vyčerpáno, od kraje desky musí být mezera minimálně 3 mm kvůli zasouvacím kolejničkám krabičky. Proto je na desce svorkovnice X5, sloužící k vyvedení drátku pro LED indikující nestandardní situace, popsány v kapitole 2.6, které už se na čelní panel nevešly. Nad ní je její příslušný funkční blok OZ TL082D, který LED spíná. Tyto LED se na krabičku budou lepit.

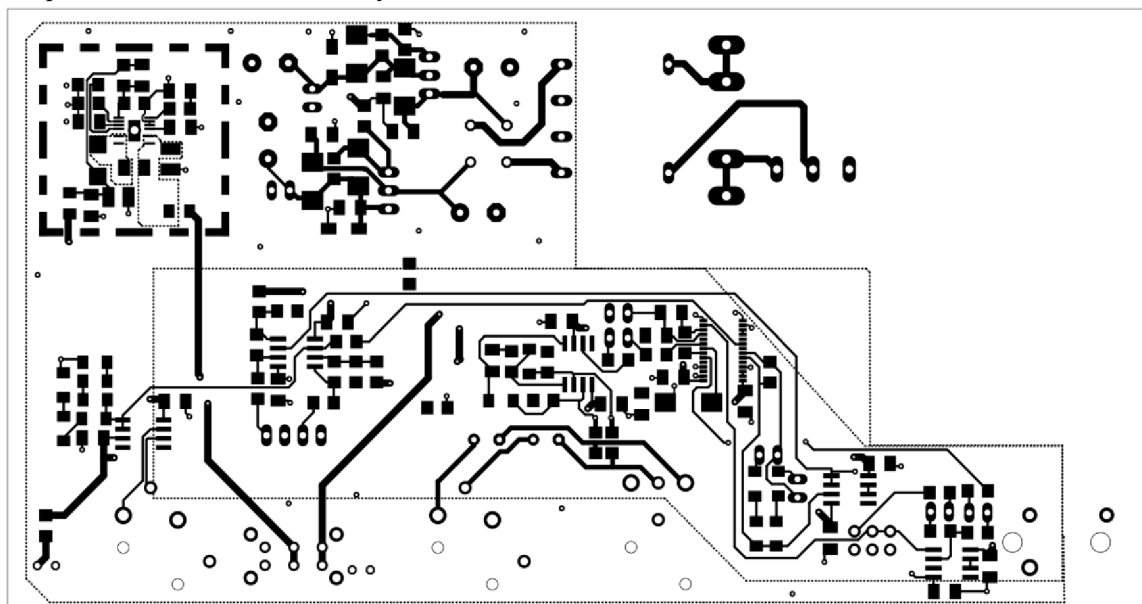




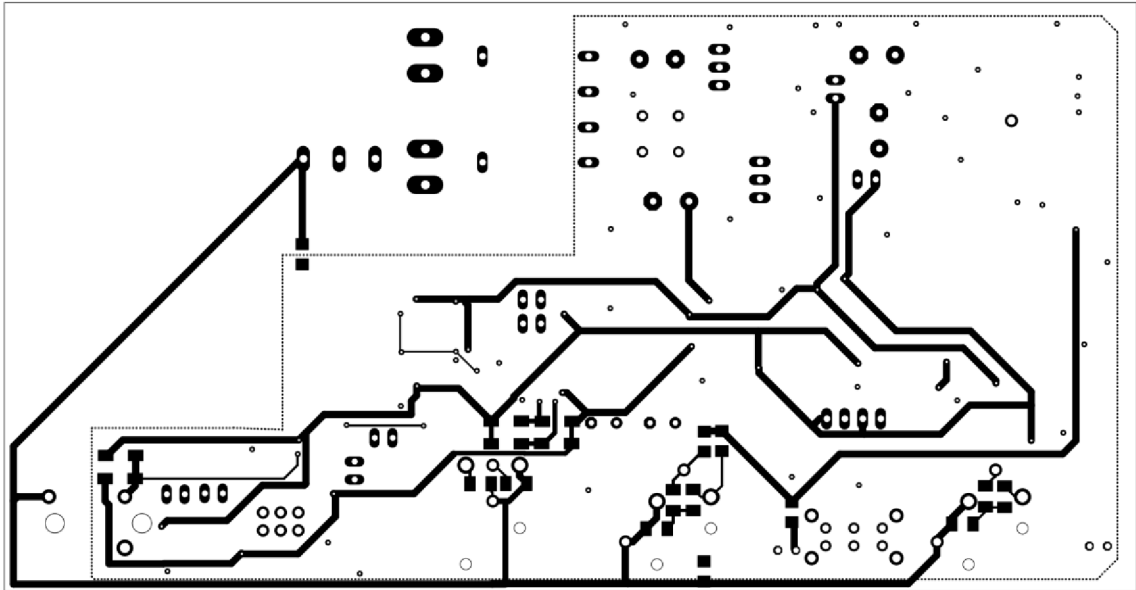
Obr. 6.1: Návrh DPS.

Nad výstupním konektorem RCA je poměrně velká prázdná část bez součástek. Ta je zde z důvodu velkého volného prostoru, co vyžaduje vstupní filtr 080S.00100.00, který bude přiveden právě na toto místo.

Naprostá většina cest signálových je tažena ve vrstvě „top“ (červená) a napájecích „bottom“ (modrá), deska je tedy dvouvrstvá. Obrázek 6.2 zobrazuje měděné cesty vrstvy „top“, obrázek 6.3 zase vrstvy „bottom“.

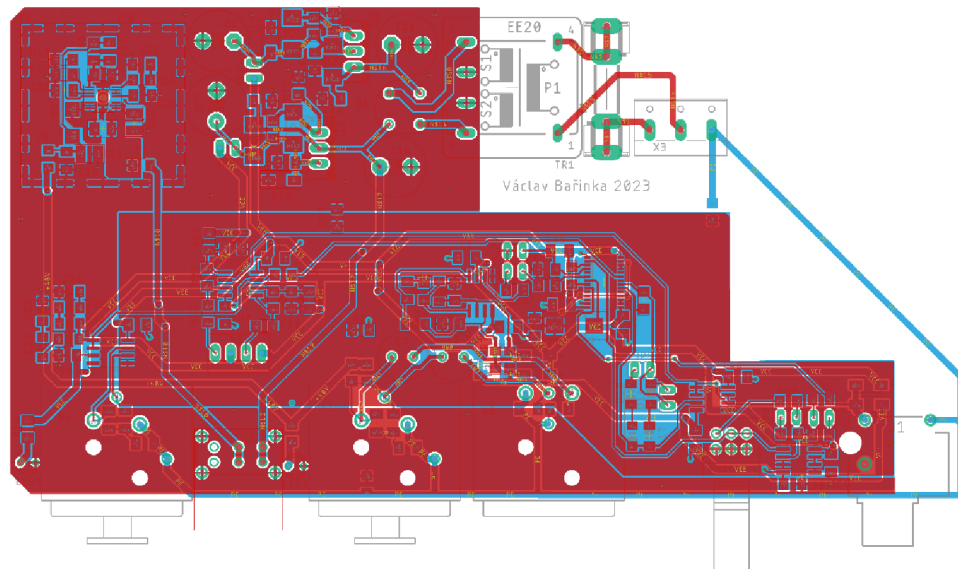


Obr. 6.2: Měděné cesty „top“.



Obr. 6.3: Měděné cesty „bottom“.

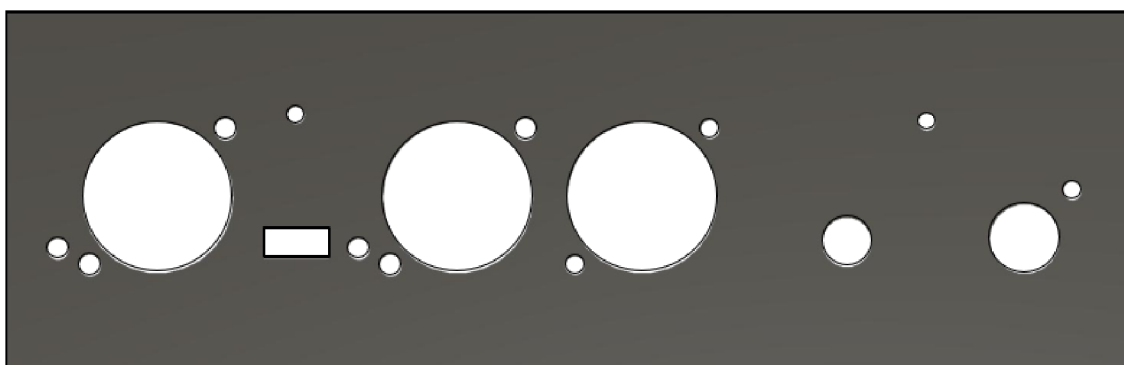
Zemní vrstva PE byla tažena jako měděná cesta spodkem desky, vrstvy GND a AGND pak vykresleny polygony, což jsou souvislé plochy mědi potlačující rušení a vyrovnávající teploty na desce. Tyto polygony jsou na obrázcích výše značeny čárkovaně, pro ilustraci plně vykresleny na obrázku 6.4. I zde je jasně pozorovatelná nutná izolační mezera zmíněná výše.



Obr. 6.4: Vykreslené polygony na DPS.

## 7. ČELNÍ PANEL

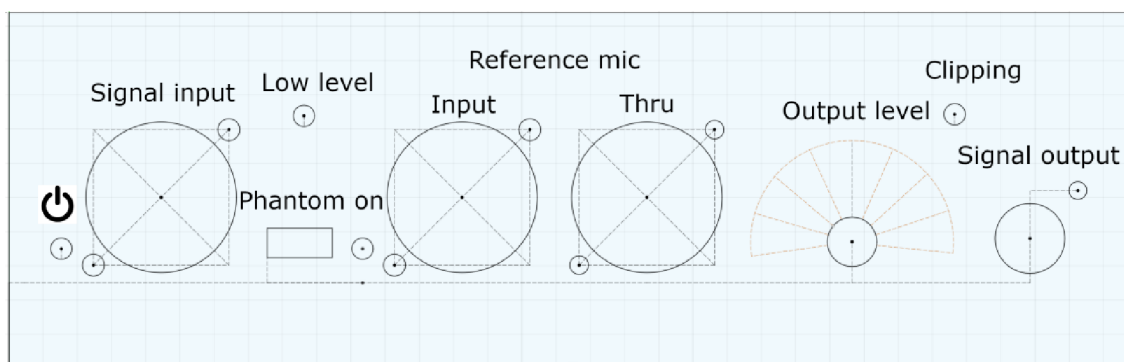
V této kapitole bude předveden návrh čelního panelu zařízení. Jak již bylo zmíněno, deska bude chráněna krabičkou 1455T1201. Pro konektory, indikační prvky a korekční potenciometr, jinými slovy pro součásti obvodu, které musí být v kontaktu s uživatelem, je třeba připravit díry na čelním panelu krabičky. Návrh čelního panelu proběhl v aplikaci Fusion360 a je vidět na obrázku 7.1. Deska bude umístěna na druhou kolejnici krabičky od spodu, odtud byla určena vzdálenost spodní pomocné čáry od dolní hrany krabičky (12,5 mm). Velikosti děr byly převzaty z katalogových listů výrobců, u některých prvků bylo přidáno pár desetin milimetru pro vůli. Horizontální vzdálenosti prvků jsou pevně dány návrhem DPS. Díry byly řezány na strojní pile UTKO VUT.



Obr. 7.1: Čelní panel.

### 7.1 Popisky na čelním panelu

Aby uživatel věděl, který konektor je který, je třeba na čelní panel přidat i popisky pro přehlednost. Tyto popisky ukazuje obrázek 7.2.



Obr. 7.2: Popisky čelního panelu.

## 8. ZÁVĚR

Během času odevzdání této bakalářské práce nedošlo ke kompletaci ani otestování zařízení, jak bylo zadáno. Je tomu tak kvůli dlouhému času stráveného řešením problémů vzniklých při simulacích při práci semestrální a problematikou teplotní kompenzace při práci bakalářské. Navržená deska plošných spojů přišla do Česka až dva dny před odevzdáváním práce. Nicméně díky důkladným simulacím a vyřešením teplotní kompenzace ještě před příchodem desky se dá očekávat, že zařízení bude po kompletaci bez větších problémů fungovat správně. To bude ostatně pevně věřím předvedeno při obhajobě této práce.

Podářilo se zvolit všechny součástky potřebné pro správnou funkci zařízení a vymyslet jejich vzájemné propojení včetně výpočtů/odhadů pasivních součástek, které nutně potřebují. Stejně tak byly zvoleny součástky pro ochranu zařízení při nestandardních situacích, dle zadání.

V simulacích byla ověřena správná funkce jednotlivých bloků a následně i celého obvodu zařízení pro typické, ale i nestandardní situace. Zároveň byl změřen koeficient pro teplotní kompenzaci, která byla následně taktěž vyřešena a ověřena přes simulace.

Bylo zhotoveno schéma a následně navržena deska plošných spojů v návrhové aplikaci EAGLE.

Navržen v aplikaci Fusion360 a připraven byl i čelní panel zařízení i se svými popisky.

Ve zbylém čase bude tedy následovat kompletace a proměření zařízení, na čemž je již pracováno.

## SEZNAM CITACÍ

- [1] (22. 11. 2022). *Učební text k předmětu Elektroakustika*. Schimmel Jiří, doc. Ing., Ph.D.
- [2] (3. 12. 2022). *MONACOR*. Načteno z Monacor magazine, frequency response: <https://www.monacor.com/magazine/frequency-response>
- [3] (25. 11. 22). *ON Semiconductor*. Načteno z ALLDATASHEETS.com: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/863201/ONSEMI/LA8630MC.html>
- [4] (23. 11. 2022). *That Corporation Datasheets*. Načteno z That Corporation 4320 datasheet: <https://www.thatcorp.com/datashts/4320data.pdf>
- [5] (25. 11. 22). *Cadence PCB design and analyzis*. Načteno z Blog, Variable Gain Amplifiers: Types and Applications: <https://resources.pcb.cadence.com/blog/2020-variable-gain-amplifiers-types-and-applications>
- [6] (25. 11. 2022). *The Synthesizer Academy*. Načteno z Voltage-Controlled Amplifier (VCA): <http://synthesizeracademy.com/voltage-controlled-amplifier-vca/>
- [7] (26. 11. 22). *That Corporation*. Načteno z THAT Corporation 1606/1646 Datasheet: [https://www.thatcorp.com/datashts/THAT\\_1606-1646\\_Datasheet.pdf](https://www.thatcorp.com/datashts/THAT_1606-1646_Datasheet.pdf)
- [8] (29. 11. 2022). *Texas Instruments*. Načteno z LM5156x 2.2-MHz Wide VIN 65-V Non-synchronous Boost/SEPIC/Flyback Controller: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm5156.pdf?ts=1662558401306>
- [9] (29. 11. 2022). *Texas Instruments*. Načteno z LM5158x-Q1 2.2-MHz Wide VIN 85-V Output Boost/SEPIC/Flyback Converter with Dual: [https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm51581-q1.pdf?ts=1662641298600&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FLM51581-Q1](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm51581-q1.pdf?ts=1662641298600&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FLM51581-Q1)
- [10] (29. 11. 2022). *Texas Instruments*. Načteno z LM5157 2.2-MHz Wide VIN 50-V Boost/SEPIC/Flyback Converter with Dual Random: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm5157.pdf?ts=1662639871780>
- [11] (29. 11. 2022). *Analog Devices, ADI Power by Linear*. Načteno z LT8362, Low IQ Boost/SEPIC/Inverting Converter with 2A, 60V Switch: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/datasheets/lt8362.pdf>
- [12] (11. 12. 2022). *LTPowerCad, Analog Devices*. Načteno z <https://www.analog.com/en/design-center/ltpowercad.html>
- [13] (11. 12. 2022). *THAT Corporation*. Načteno z THAT Corporation datasheets: <https://www.thatcorp.com/datashts/1500data.pdf>

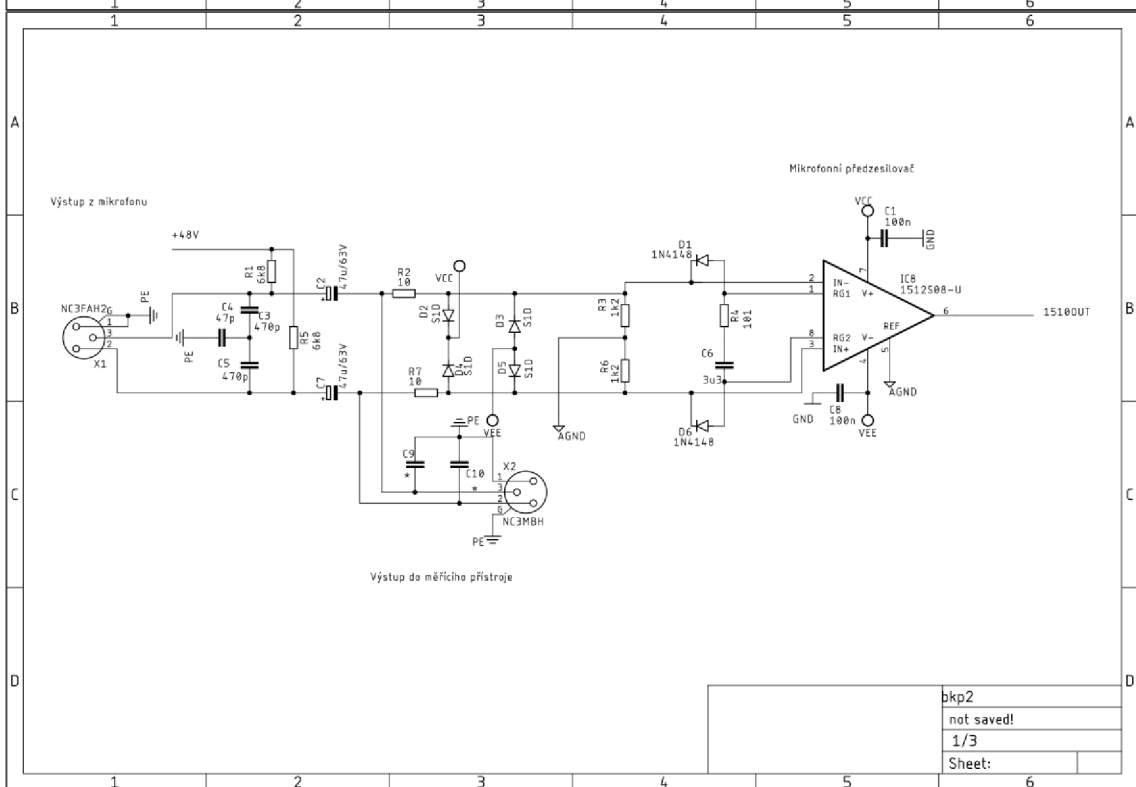
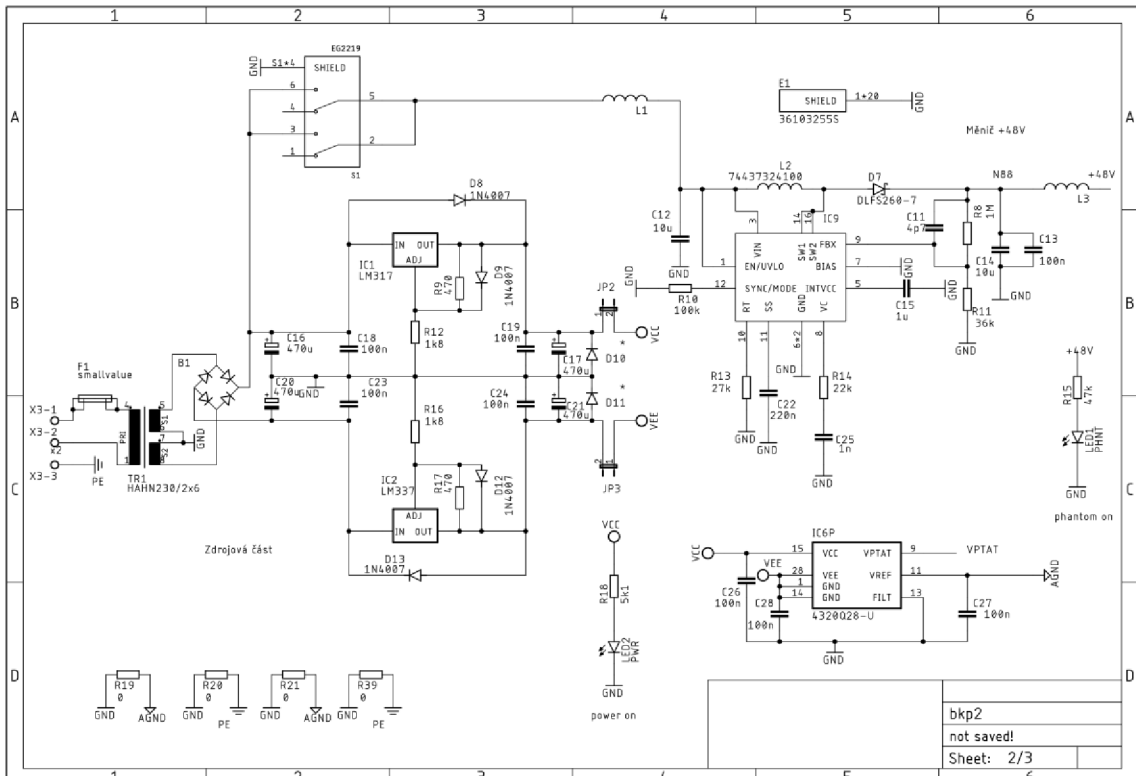
- [14] (17. 5. 2023). *AnalogDialogue*. Načteno z Ultralow Noise, 48 V, Phantom Microphone Power Supply Using a Tiny DC-to-DC Boost Converter:  
[https://www.analog.com/en/analog-dialogue/raqs/raq-issue-176.html?fbclid=IwAR0I0mh2K\\_SI\\_b6gdRC5iQpwcNRHKqP2plsNFCOLmuoq4eOIT-Cyd9Lgknw](https://www.analog.com/en/analog-dialogue/raqs/raq-issue-176.html?fbclid=IwAR0I0mh2K_SI_b6gdRC5iQpwcNRHKqP2plsNFCOLmuoq4eOIT-Cyd9Lgknw)
- [15] (17. 5. 2023). *sound-au*. Načteno z Elliott Sound Products, project 67:  
<https://sound-au.com/project67.htm?fbclid=IwAR3uPlyCS3vTSE011XDDVIOXkOySkqip3GAnuMSIJs9S93iCDBcduq5b2x0>

# SEZNAM ZKRATEK

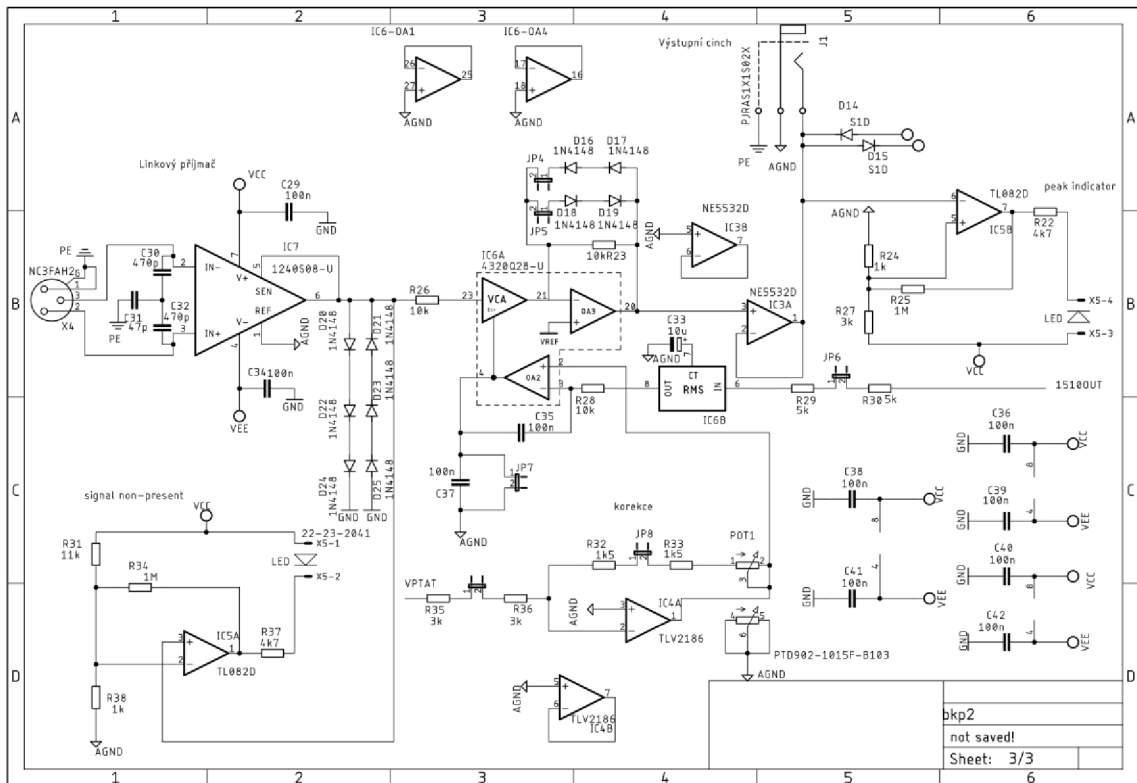
Zkratky:

dB(SPL)	jednotka hladiny akustického tlaku
VCA	napětím řízený zesilovač
RMS	detektor efektivní hodnoty
THD	celkové harmonické zkreslení
OA	operační zesilovač
LED	light emitting diode (světlo vyzařující dioda)

# Příloha A - Návrhové schéma







Příloha 1 Návrhové schéma.