

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



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

SLUCHÁTKOVÝ ZESILOVAČ S NÍZKOU VÝSTUPNÍ IMPEDANCÍ

HEADPHONE AMPLIFIER WITH LOW OUTPUT IMPEDANCE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Petr Zavřel

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Pavel Hanák, Ph.D.

BRNO 2018

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Audio inženýrství**

Ústav telekomunikací

Student: Petr Zavřel

ID: 186643

Ročník: 3

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Sluchátkový zesilovač s nízkou výstupní impedancí

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte sluchátkový zesilovač s přepínatelným zesílením a nízkou výstupní impedancí, která bude konstantní v celém audio pásmu (20 Hz až 20 kHz). Současně se snažte dosáhnout co nejnižšího šumu a zkreslení ($<0,1\%$), souběh obou kanálů musí být lepší než 0,1 dB. Vstup musí umožňovat připojení symetrických i nesymetrických zdrojů signálu (XLR kombo) a musí být chráněn před poškozením. Zesilovač doplňte nízkošumovým napájecím zdrojem z 230 V. Všechny komponenty umístěte na desku plošných spojů a vyrobte funkční vzorek zabudovaný do vhodné krabičky. Na vzorku změřte dosažené parametry.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] SLONE, G., R., The Audiophile's Project Sourcebook: 80 High-Performance Audio Electronics Projects. McGraw-Hill Education, 2001, 361s. ISBN 007137929

[2] Tangentsoft PPA Project, open-source headphone amplifier. Dostupné online na <https://tangentsoft.net/audio/ppa/amp2/>

Termín zadání: 5.2.2018

Termín odevzdání: 29.5.2018

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

Konzultant:

prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Práce se zabývá návrhem sluchátkového zesilovače s nízkou výstupní impedancí v celém slyšitelném spektru. Řeší zpracování symetrického i nesymetrického signálu přiváděného na vstup s implementovanou ochranou proti poškození zesilovače. V návrhu je brán zřetel na co nejlepší parametry harmonického zkreslení a šumu zesilovače. Práce je dále doplněna návrhem nízkošumového napájecího zdroje z 230 V. V práci je z části vycházeno z již dříve vytvořených obvodů, které jsou podrobeny testování a vylepšovány. Podle jejich vlastností je vybráno nejlepší možné řešení. U návrhu je řešeno i umístění do vhodné krabičky.

Klíčová slova

Sluchátkový zesilovač, nízká výstupní impedance, diamantový buffer, NE5534, THAT1200.

Abstract

Semestral thesis deals with design of headphone amplifier with low output impedance in audible spectre suitable for laboratory measurement. Amplifier can proces balanced and unbalanced input signal with implemented protection against damage to amplifier. Concept is designed for the lowest total harmonic distortion and signal to noise ratio of amplifier. Thesis also contains design of low-noise power supply. It works with already known circuits which was tested, improved and discused in the thesis. Thesis also deals with placement into suitable box.

Keywords

Headphone amplifier, low output impedance, diamond buffer, NE5534, THAT1200.

Bibliografická citace:

ZAVŘEL, P. *Sluchátkový zesilovač s nízkou výstupní impedancí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 67 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Pavel Hanák, Ph.D..

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Sluchátkový zesilovač s nízkou výstupní impedancí jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrálního projektu 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 29. května 2018

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Pavlu Hanákovi Ph.D. za věcné rady, pomoc a podmětným otázkám při vypracování, mé rodině a přátelům za trpělivost a psychickou podporu při práci na tomto projektu.

V Brně dne 29. května 2018

.....
podpis autora

Obsah

1	TEORETICKÝ ÚVOD.....	3
1.1	POŽADOVANÉ VLASTNOSTI NA SLUCHÁTKOVÝ ZESILOVAČ	3
1.2	INTEGROVANÉ ŘEŠENÍ SLUCHÁTKOVÉHO ZESILOVAČE.....	4
1.3	SLUCHÁTKOVÝ ZESILOVAČ Z DISKRÉTNÍCH SOUČÁSTEK	4
1.4	LINKOVÉ PŘIJÍMAČE	6
2	NÁVRH SIGNÁLOVÉ CESTY ZESILOVAČE.....	7
2.1	NÁVRH OBVODU PŘEDZESILOVAČE	7
2.1.1	<i>Návrh vstupu předzesilovače</i>	<i>7</i>
2.1.2	<i>Převodník symetrického signálu na signál nesymetrický</i>	<i>9</i>
2.1.3	<i>THAT 1206.....</i>	<i>10</i>
2.1.4	<i>Výběr OZ pro předzesilovač.....</i>	<i>10</i>
2.2	NÁVRH OBVODU KONCOVÉHO STUPNĚ	11
2.2.1	<i>Dispre II</i>	<i>12</i>
2.2.2	<i>PPA 2</i>	<i>13</i>
2.2.3	<i>Diamond42 v1.1</i>	<i>14</i>
2.3	NÁVRH VÝSTUPU ZESILOVAČE.....	15
2.4	NÁVRH OBVODU ZPĚTNÉ VAZBY.....	15
2.4.1	<i>Celkové zesílení obvodu.....</i>	<i>17</i>
3	MĚŘENÍ JEDNOTLIVÝCH NÁVRHŮ	18
3.1	POUŽITÉ PŘÍSTROJE A SCHÉMA ZAPOJENÍ.....	19
3.2	AUDIO PRECISION APx525	19
3.3	MĚŘENÍ OZ VHODNÝCH PRO PŘEDZESILOVAČ.	20
3.4	ZMĚNY PARAMETRŮ PŮVODNÍCH OBVODŮ	21
3.4.1	<i>Změna velikosti proudu v klidovém stavu</i>	<i>21</i>
3.4.2	<i>Změna napájecího napětí.....</i>	<i>23</i>
3.5	MĚŘENÍ ZÁVISLOSTI THD+N NA KMITOČTU.....	23
3.5.1	<i>Měření bez zátěže</i>	<i>23</i>
3.5.2	<i>Měření na zátěži 32 Ω.....</i>	<i>25</i>
3.6	MĚŘENÍ ZÁVISLOSTI THD+N NA VELIKOSTI VSTUPNÍHO NAPĚTÍ.....	26
3.6.1	<i>Měření bez zátěže</i>	<i>26</i>
3.6.2	<i>Měření na zátěži 32 Ω.....</i>	<i>27</i>
3.7	MĚŘENÍ VÝSTUPNÍ IMPEDANCE.....	29
3.8	POROVNÁNÍ MĚŘENÍ.....	29
3.8.1	<i>Výběr nejlepšího zařízení.....</i>	<i>30</i>
4	NÁVRH NAPÁJECÍ ČÁSTI ZESILOVAČE	31

4.1	VOLBA TRANSFORMÁTORU	31
4.2	STABILIZACE NAPĚTÍ.....	31
4.2.1	<i>Zapojení stabilizátorů napětí</i>	32
4.3	ZAPOJENÍ NAPÁJECÍ ČÁSTI	32
5	NÁVRH DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ	33
5.1	ROZLOŽENÍ SOUČÁSTEK NA PLOŠNÉM SPOJI	33
5.2	ODDĚLENÍ ZEMÍ NA DPS	34
5.3	UMÍSTĚNÍ DPS DO KRABÍČKY	35
6	MĚŘENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ	37
6.1	RUŠIVÝ SIGNÁL	37
6.2	PŘENOS A FÁZE ZESILOVAČE	38
6.3	MĚŘENÍ ZÁVISLOSTI THD+N NA KMITOČTU.....	40
6.4	MĚŘENÍ ZÁVISLOST THD+N NA VSTUPNÍM NAPĚTÍ	41
6.5	MĚŘENÍ VÝSTUPNÍ IMPEDANCE.....	43
7	ZÁVĚR	44

Seznam obrázků

Obr. 1.1: Blokové schéma zesilovače	5
Obr. 2.1: Blokové schéma ochranných prvků.....	7
Obr. 2.2: Vstupní ochranné obvody zesilovače.....	9
Obr. 2.3: Diamantový buffer Dispre II [10]	12
Obr. 2.4: Diamantový buffer PPA 2 [12]	13
Obr. 2.5: Diamantový buffer Diamond42 [13]	14
Obr. 2.6: Zapojení zpětné vazby.....	17
Obr. 3.1: Blokové schéma zapojení měření	18
Obr. 3.2: Schéma zapojení měření.....	19
Obr. 3.3: Rezistor pro změnu proudu v klidovém stavu u Diamond 2.....	21
Obr. 3.4: Potenciometr pro změnu proudu v klidovém stavu u PPA 2	22
Obr. 3.5: Prvky pro změnu proudu v klidovém stavu u Diamond42	22
Obr. 3.6: Blokové schéma měření výstupního odporu	29
Obr. 4.1: Zapojení napájecí části	32
Obr. 5.1: Umístění součástek na desce plošných spojů	34
Obr. 5.2: Rozvod zemí na DPS.....	35
Obr. 5.3: Blokové schéma rozvodu zemí	35
Obr. 6.1: Rušivý signál na výstupu.....	37
Obr. 6.2: Přenos pro 1x zesílení a sym. vstupu na zátěži.....	38
Obr. 6.3: Přenos pro 1x zesílení a nesym. vstupu na zátěži	38
Obr. 6.4: Přenos pro 10x zesílení a sym. vstupu na zátěži	38
Obr. 6.5: Přenos pro 10x zesílení a nesym. vstupu na zátěži	39
Obr. 6.6: Přenos fáze zesilovače.....	39
Obr. 6.7: Závislost THD+N na kmitočtu, 0 dB, bez zátěže	40
Obr. 6.8: Závislost THD+N na kmitočtu, 20 dB, zátěž.....	40
Obr. 6.9: Závislost THD+N na vstupním napětí, sym. vstup, 0 dB, bez zátěže.....	41
Obr. 6.10: Závislost THD+N na vstupním napětí, sym. vstup, 0 dB, zátěž.....	42
Obr. 6.11: Závislost THD+N na vstupním napětí, nesym. vstup, 20 dB, zátěž	42
Obr. 7.1: Zapojení signálové části zesilovače.....	50
Obr. 7.2: Zapojení napájecí části zesilovače	51
Obr. 7.3: Návrh DPS.....	52
Obr. 7.4: Osazená deska plošných spojů.....	56
Obr. 7.5: Finální podoba výrobku, pohled zepředu	56
Obr. 7.6: Finální podoba výrobku, pohled zezadu	57

Seznam tabulek

Tab. 2.1: Porovnání vlastností OZ	11
Tab. 3.1: Použité přístroje	19
Tab. 3.2: Závislost THD+N na vstupním napětí	20
Tab. 3.3: Závislost THD+N na frekvenci	20
Tab. 3.4: Závislost THD+N na kmitočtu bez zátěže u Dispre II a PPA2	23
Tab. 3.5: Závislost THD+N na kmitočtu bez zátěže u Diamond42 s tranzistorem ...	24
Tab. 3.6: Závislost THD+N na kmitočtu bez zátěže u Diamond42 bez tranzistoru ..	24
Tab. 3.7: Závislost THD+N na kmitočtu při $R_z = 32\ \Omega$ u Dispre II a PPA 2.....	25
Tab. 3.8: Závislost THD+N na kmitočtu při $R_z = 32\ \Omega$ u Diamond42 s tranzistorem	25
Tab. 3.9: Závislost THD+N na kmitočtu při $R_z = 32\ \Omega$ u Diamond42 bez tranzistoru	25
Tab. 3.10: Závislost THD+N na vstupním napětí bez zátěže u Dispre II a PPA2	26
Tab. 3.11: Závislost THD+N na vstupním napětí bez zátěže u Diamond42 s tranzistorem	26
Tab. 3.12: Závislost THD+N na vstupním napětí bez zátěže u Diamond42 bez tranzistoru	27
Tab. 3.13: Závislost THD+N na vstupním napětí při $R_z = 32\ \Omega$ u Dispre II a PPA 2 ..	27
Tab. 3.14: Závislost THD+N na vstupním napětí při $R_z = 32\ \Omega$ u Diamond42 s tranzistorem	28
Tab. 3.15: Závislost THD+N na vstupním napětí při $R_z = 32\ \Omega$ u Diamond42 bez tranzistoru	28
Tab. 7.1: Seznam součástek pro Dispre II	53
Tab. 7.2: Seznam součástek pro PPA2	53
Tab. 7.3: Seznam součástek pro Diamond42	54
Tab. 7.4: Seznam součástek pro realizaci zapojení	54

Úvod

V dnešní době se setkáváme se sluchátkovými zesilovači prakticky denně v zařízeních, které umožňují připojit sluchátka. V této souvislosti se jedná o velmi význačnou skupinu zesilovačů. Jsou to například naše mobilní telefony, notebooky nebo televize. V komerčním využití je hlavním kritériem těchto zesilovačů ve většině případů pouhá funkčnost a nedbá se tolik na kvalitu reprodukce zvukového signálu, i když s rozvojem technologie jsou tyto nároky čím dál tím vyšší.

Hlavním cílem této práce je navrhnout a sestavit plně funkční model sluchátkového zesilovače se zadanými parametry sloužícího ve školní laboratoři pro měřicí účely. Jelikož bude sluchátkový zesilovač využíván hlavně k měření, měl by mít co nejlepší vlastnosti v oblasti kvality reprodukce. Jedná se zejména o hodnoty v oblasti celkového harmonického zkreslení v závislosti na kmitočtu a velikosti vstupního napětí. Dalšími důležitými vlastnostmi zesilovače jsou odstup signálu od šumu, souběh obou kanálů a nízká výstupní impedance zesilovače.

Všechny tyto požadavky vylučují použití běžných integrovaných řešení, a proto bylo zvoleno řešení s použitím diskrétních součástek, konkrétně s použitím diamantového bufferu. Tento koncový budič zajistí dostatečné vybuzení výstupu při stále stejně kvalitních parametrech signálu a vhodně přizpůsobí výstup pro připojení sluchátek.

Součástí práce je také návrh napájecí části zesilovače. To zahrnuje kompletní návrh převodu síťového napětí na požadované stejnosměrné napětí, které je dostatečně stabilizováno.

Vstup do sluchátkového zesilovače by měl umožňovat připojení jak symetrických, tak nesymetrických zdrojů signálu pomocí konektoru XLR kombo a měl by být opatřen ochranami vstupů proti přepětí a nežádoucím vysokofrekvenčním signálům.

Zesilovač by měl splňovat všechny tyto požadavky v celém slyšitelném pásmu (20 Hz – 20 kHz).

Konstrukce a zpracování využívá již známých a osvědčených zapojení, které byly testovány, modulovány a změřeny na nepáživém poli. Z naměřených výsledků byla zvolena nejlepší varianta a pomocí kombinací jednotlivých částí sestaven kompletní návrh zesilovače. Jako zdroj těchto zapojení bylo využito seznamu doporučené literatury a vlastního hledání na internetu.

Následný obsah práce je zahájen teoretickým úvodem do nastíněné problematiky sluchátkových zesilovačů. Dále je pokračováno rozбором jednotlivých částí zesilovače a jejich realizací, seznámením s výsledky měření, výběrem

výsledného řešení, návrh napájecí části. Práce pokračuje návrhem desky plošných spojů a výsledným měřením hotového výrobku.

1 TEORETICKÝ ÚVOD

V následujícím textu je představena problematika sluchátkových zesilovačů a jejich možná realizace. Jsou zde ukázány konkrétní příklady jednotlivých řešení pro všechny části sluchátkového zesilovače.

Sluchátkové zesilovače se od výkonových zesilovačů liší hlavně v rozdílném přizpůsobení elektroakustickému měniči a nárokem na kvalitu reprodukce. Proto je u většiny sluchátkových zesilovačů kladen největší důraz na kvalitu výstupního signálu, který je hodnocen měřením nebo subjektivním hodnocením na sluchátkách různých druhů.

1.1 Požadované vlastnosti na sluchátkový zesilovač

Speciálním využitím sluchátkového zesilovače může být v laboratoři. Na tento druh sluchátkového zesilovače jsou kladeny vysoké nároky v oblasti kvality reprodukce a různým, až extrémním, speciálním vlastnostem, které by v komerčním využití buď neměly smysl, nebo by je běžný uživatel nevyužil.

K zesilovači musí být možnost připojit jak symetrické, tak nesymetrické zdroje signálu pomocí konektoru XLR kombo, který kombinuje vstup pomocí 6,3 TRS Jacku a klasického XLR konektoru. Takovýto zesilovač by měl být opatřen ochranou vstupních obvodů, protože při neopatrném zacházení by se mohly vstupní obvody jednoduše poškodit.

Další požadovanou vlastností je nízká výstupní impedance. S nízkou hodnotou výstupní impedance je tento zesilovač spíše vhodný pro připojení sluchátek s vyšší impedancí nebo k měřicím účelům. Při připojení obyčejných sluchátek s nízkou impedancí ($32\ \Omega$) může při neopatrném zacházení s výstupní úrovní signálu dojít k poškození sluchu nebo akustického měniče. Nevýhodou nízké výstupní impedance je absence ochrany proti zkratu. Bohužel je možné, že při nevhodném zacházení a zkratu výstupu se mohou některé vnitřní části zesilovače nevratně poškodit.

Zesilovač by měl být opatřen přepínačem zisku na pevné dvě hodnoty, 0 dB a 20 dB.

Současně s těmito parametry je důležité dosáhnout co možná nejnižšího celkového harmonického zkreslení a šumu. Při dodržení všech vlastností musí být dodržen parametr souběhu obou kanálů menší než 0,1 dB. Naopak od komerčních zesilovačů je zde kladen mnohem menší důraz na design, kompaktnost, energetickou účinnost, hmotnost a rozměry celého přístroje. Samozřejmostí je bráno, že všechny parametry v ideálním případě nebudou frekvenčně závislé a zachovají si své hodnoty pro celé slyšitelné spektrum (20 Hz – 20 kHz).

1.2 Integrované řešení sluchátkového zesilovače

Jedním z řešení sluchátkového zesilovače je použití integrovaného sluchátkového zesilovače. Tento typ sluchátkového zesilovače se dnes používá běžně a je nejrozšířenějším používaným typem sluchátkového zesilovače. Je tomu tak, protože v zařízeních, které nejsou primárně určené pro kvalitní poslech hudby ze sluchátek, je hlavním kritériem cena.

Toto řešení zahrnuje kompletní realizace sluchátkového zesilovače do malého integrovaného obvodu. Z velké většiny je tento obvod napájený bezpečným napětím, které se pohybuje do ± 20 V. Díky tomu se může integrovaný obvod použít jako součást větších obvodů, které mají sluchátkové výstupy. Může se jednat o zařízení jako jsou televize, počítače, mobilní telefony, ale také například u výstupů z hudebních zařízení nebo instrumentů.

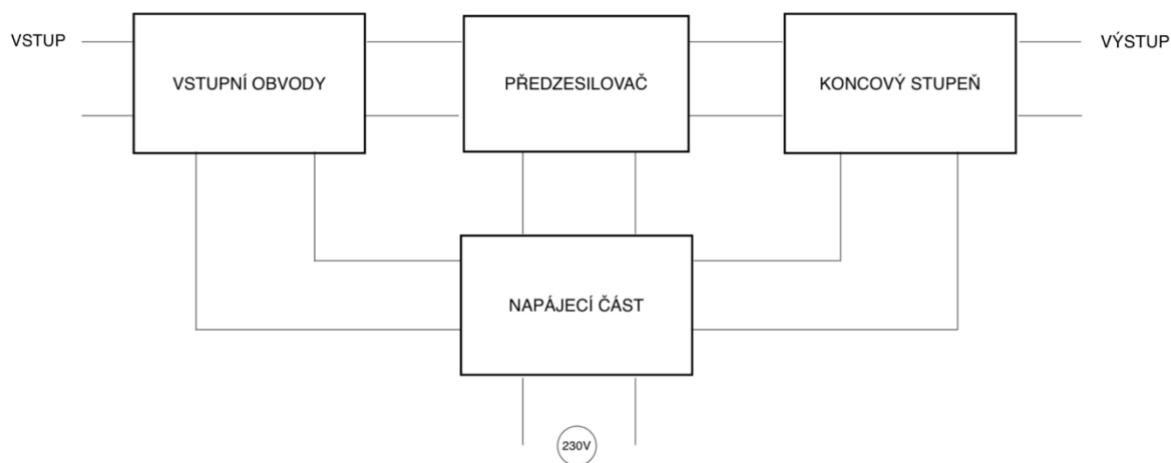
Integrovaný obvod obsahuje komplexní řešení podle složitosti v závislosti na ceně daného obvodu. Bývá pravidlem, že čím dražší je celý integrovaný obvod, tím více možností a kvalitnější parametry nabízí. V nejdělnějších řešení se jedná pouze o zesílení signálu a nepatrnému impedančnímu přizpůsobení sluchátkového výstupu, s vysokým celkovým harmonickým zkreslením, vysokým přeslechem kanálů a dalšími nežádoucími vlastnostmi. V dražších zařízeních se můžeme setkat s integrovanými obvody, které umožňují měnit i nejrůznější parametry signálu. Od nejzákladnějšího zesílení, až po třípásmový ekvalizér, ovladače balance nebo mute. S vyšší cenou většinou klesají i nežádoucí vlastnosti. Tím můžeme chápat například celkové harmonické zkreslení, přeslech mezi jednotlivými kanály nebo souběh obou kanálů.

I přes velmi rostoucí technologický posun ve vývoji integrovaných obvodů se většina jeho parametrů nevyrovná řešení takového obvodu pomocí diskrétních součástek nebo použitím více specializovaných součástek spojených v jedno funkční zařízení.

1.3 Sluchátkový zesilovač z diskrétních součástek

Realizace sluchátkového zesilovače s použitím diskrétních součástek je kvalitnější, ale také náročnější. Díky použití diskrétních součástek můžeme dosáhnout lepších

parametrů nebo naopak mnohem horších. Při realizaci sluchátkového zesilovače pomocí diskrétních součástek lze zesilovač pomyslně rozdělit na několik bloků.



Obr. 1.1: Blokové schéma zesilovače

Předzesilovač je většinou řešený operačním zesilovačem, který má vhodné parametry pro celé audio zařízení. Jelikož tento prvek má největší podíl na výsledných hodnotách zesilovače, volí se co možná nejkvalitnější operační zesilovač, vzhledem k ceně kompletního zařízení. Správnou volbou kvalitního operačního zesilovače zajistíme na vstupu co nejnižší šum, vysokou vstupní impedanci, vysokou hodnotu odstupů signálu od šumu nebo velmi nízké harmonické zkreslení.

Dalším pomyslným blokem struktury sluchátkového zesilovače je koncový stupeň. Koncový stupeň je možno řešit několika způsoby. Nejjednodušším způsobem realizace je použití výkonového tranzistoru. Takové řešení je ale k dnešním možnostem velmi nevýhodné. Další možností a dnes jedno z nejčastějších bývá použití operačního zesilovače. Operační zesilovače se volí podle katalogových hodnot a zesilovače s jejich řešením jsou kvalitní, avšak v našem řešení je stále nedostačující. Jedním z dalších možných řešení je použití takzvaného diamantového bufferu. Diamantový buffer zajišťuje lepší přizpůsobení k připojeným sluchátkům v zátěži a je vhodnější pro realizaci zadání této práce.

Napájení obou částí zesilovače se realizuje pomocí stabilizovaného stejnosměrného napětí. Toto napětí se pohybuje v rozmezí od ± 5 V do ± 25 V v závislosti na potřebném napětí pro operační zesilovače a tranzistory. Toto napětí zajistíme napájecím blokem celého zesilovače. Při jednotlivém návrhu napájení pracujeme vždy s požadavky na jeho konstrukci, zadání. V některých případech neřešíme převod síťového napětí na požadovanou hodnotu a předpokládáme převod v externím zařízení, které není součástí zesilovače.

Protože v zadání se pracuje s návrhem připojení sluchátkového zesilovače přímo do sítě (230 V), je potřeba vyřešit napájení a převod napětí přímo v zesilovači.

Dalšími možnými bloky, které můžeme do schématu zařadit jsou různá vylepšení. Jedná se spíše o prvky v závislosti na speciálních požadavcích nebo zadáních. Jedním z takových požadavků může být ochrana vstupních prvků zesilovače, frekvenční korekce – nejčastěji třípásmový ekvalizér nebo obvod pro potlačení přechodových zkreslení. Umístění jednotlivých specializovaných bloků do obvodu se liší podle jejich typu použití.

1.4 Linkové přijímače

Speciálním druhem integrovaných obvodů jsou takzvané linkové přijímače. Linkové přijímače jsou zařízení konstruovaná na příjem symetrického signálu na vstupu s výstupem signálu nesymetrickým. Přijímání symetrického signálu na vstupu zařízení vykazuje řadu výhod. Nejzákladnější vlastností obvodu je, že signály s opačnou polaritou na obou vstupech jsou zesíleny zesilovací konstantou, avšak souhlasné napětí na obou vstupech má jednotkové zesílení. Této vlastnosti se využívá k odrušení nežádoucích signálů na vstupu zařízení. Základní zapojení linkového přijímače můžeme realizovat pomocí zapojení takzvaného přístrojového rozdílového zesilovače, který je tvořen ze dvou navzájem vázaných neinvertujících zesilovačů, které tvoří diferenciální stupeň s diferenčním výstupem. Uvedené uspořádání se třemi operačními zesilovači je tak výhodné, že ho ve svém výrobním programu využívá téměř každý výrobce lineárních integrovaných obvodů. [3]

2 NÁVRH SIGNÁLOVÉ CESTY ZESILOVAČE

Při návrhu signálové cesty bylo využito již známých a ověřených zapojení. V mém případě bylo vyhledáno několik zapojení, postaveny prototypy a jejich parametry změřeny. V některých případech nebylo potřeba testování různých druhů, ale byl postaven přímo jediný funkční model. K tomu bylo využito znalostí z předchozích předmětů, doporučená zapojení výrobců a katalogové zapojení z datasheetů.

Tato část obsahuje návrh ochrany vstupu zesilovače, převod symetrického signálu na signál nesymetrický, návrh předzesilovače a koncového stupně se zpětnou vazbou.

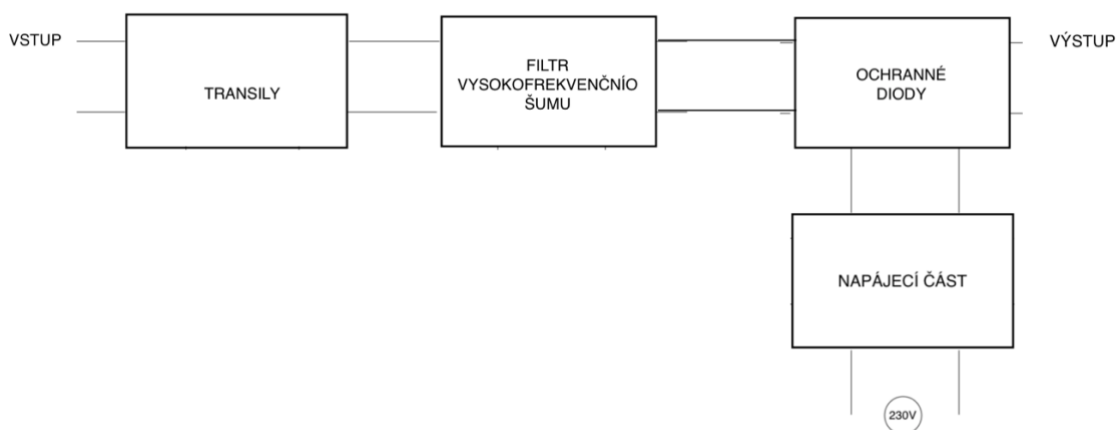
2.1 Návrh obvodu předzesilovače

2.1.1 Návrh vstupu předzesilovače

Obvodové prvky, které můžeme najít na samotném vstupu zesilovače jsou:

- Filtr vysokofrekvenčního šumu
- Ochranné diody a transily
- Převodník symetrického signálu na signál nesymetrický

Návrh obvodu pro ochranu vstupu do zesilovače byl převzatý z doporučeného zapojení ochrany vstupů linkového přijímače THAT corporation, série 1200 [3]. Jelikož se jedná o standardní a odzkoušenou verzi zapojení, nebylo nutné hledat alternativu na jiných místech. Zapojení bylo pouze doplněno o jednu část, aby došlo k ještě vyšší ochraně vstupů.



Obr. 2.1: Blokové schéma ochranných prvků

Jedním z prvních „bloků“ při vstupu do zesilovače je blok pro filtrování parazitních vysokofrekvenčních signálů (dále jen RFI – z anglického Radio Frequency Interference).

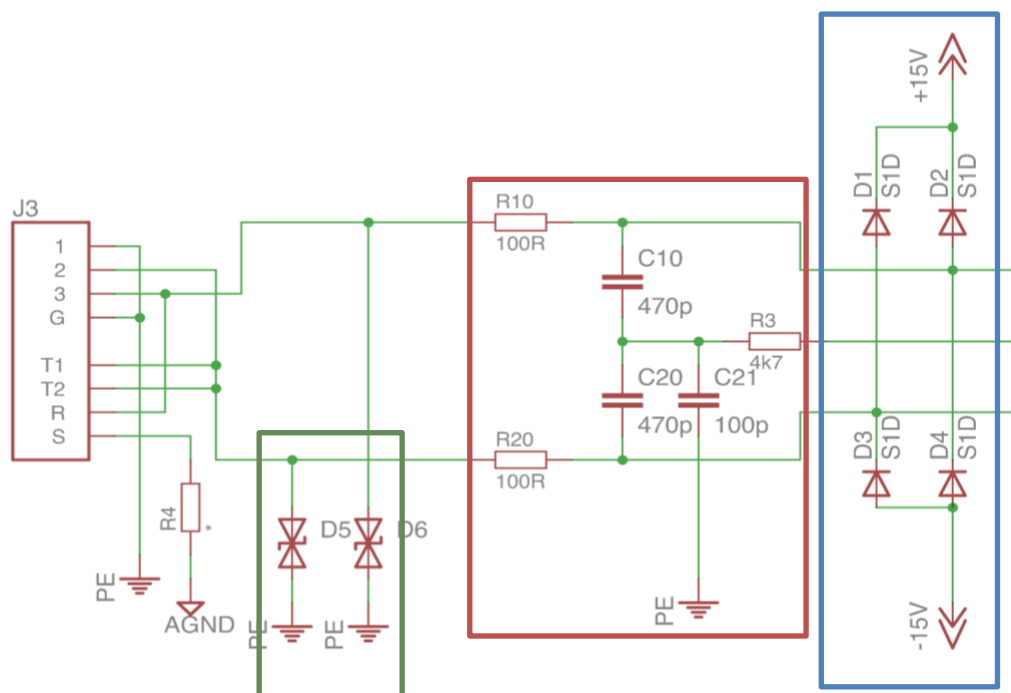
Jako u většiny polovodičových součástek, u kterých se na vstupních svorkách objeví vysoké RFI, se mohou stát nelineárními, což může způsobit vznik slyšitelných interferencí. Proto je dobré se zabývat filtrováním vysokých frekvencí v jakémkoli hudebním zařízení. Cílem je předejít rádiovým frekvencím na kostře přístroje, zejména ale zabránění tomuto signálu vstupu do obvodu, který zpracovává audio signál. Obecně se tomuto jevu dá zabránit připojením kondenzátorů (100 pF) mezi signálové vstupy a kostru přístroje, kde jsou kondenzátory připojeny a umístěny na desku plošných spojů (dále jen DPS) co nejbližší vstupu do zařízení. Toto řešení ale skýtá některé nevýhody. Kondenzátory připojené na vstup proti kostře způsobí zmenšení vstupní impedance zařízení na $\sim 80 \text{ k}\Omega$ na 20 kHz. Navíc jakýkoli rozdíl těchto kapacit může způsobit nerovnováhu mezi signály.

Návrh zařízení však pracuje s více robustním obvodem pro ochranu před RFI. Zprvč, kondenzátory C1 a C2 mají větší kapacitu než u předešlého řešení. Protože jsou zapojeny v sérii, chovají se jako kondenzátor o hodnotě 235 pF mezi piny 2 a 3 konektoru XLR. To umožňuje vyšší efektivitu na nižších frekvencích. Zadruhé, jejich „středový“ bod je připojen přes menší kondenzátor (100 pF) ke kostře přístroje, jakákoli odchylka mezi kapacitami má mnohem menší tendenci k vyvolání nerovnováhy na vstupu oproti předešlému zapojení. Zatřetí, rezistory R10 a R20 poskytují další impedanci a tím i efektivnější potlačení silnějších RF viz obrázek 2.3 červeně.

Dalším pomyslným „blokem“ na vstupu zařízení je ochrana proti elektrostatickým výbojům (dále jen ESD z anglického Electro Static Disscharge). Zařízení zapojené za tímto blokem (That1206) sice obsahuje ochranné obvody, ale výrobce udává pouze ochranu před slabým ESD. Pro ochranu před silnými ESD výrobce zařízení doporučuje zapojení s připojením diod mezi signálovou a napájecí cestu viz obrázek 2.3 modře. To zaručí převedení jakéhokoli napětí vyššího než napájecího napětí do zdroje a tím zaručí přímou ochranu vstupů zařízení. Výrobce linkového přijímače THAT1200 doporučuje použít diody typu 1N4148. Pro naše řešení byly vybrány diody typu S1D. Tyto diody jsou konstruovány, aby měly nízký šum v závěrném směru.

Posledním bezpečnostním blokem v návrhu je zapojení transilů na každou ze signálových cest, jak můžeme pozorovat na obrázku 2.3 zeleně. Transily se svým principem velmi podobají zenerovým diodám. Zabraňují vyššímu napětí, než je prahové napětí transilu, průchodu do signálové části zesilovače. Když se aktivují, vyšší napětí je přivedeno na kostru přístroje. Transily se volí s prahovým napětím

vyšším, než je předpovídané vstupní napětí, protože v oblasti jejich prahového napětí se může objevit nepříjemný šum zanesený přímo na vstup zařízení. Proto byly vybrány transily typu SMBJ12CA s prahovým napětím 12 V.



Obr. 2.2: Vstupní ochranné obvody zesilovače

2.1.2 Převodník symetrického signálu na signál nesymetrický

Složitějším zapojením na vstupu zesilovače je pomyslný „blok“, který převádí signál symetrický na signál nesymetrický, jelikož zbytek zesilovače pracuje pouze se signálem nesymetrickým. Při návrhu bylo zvažováno mezi integrovaným řešením a řešením pomocí diskretních součástek a OZ.

Zapojení přístrojového rozdílového zesilovače bylo navrženo jako první řešení. Vzhledem k povaze a vlastnostem celého zapojení bylo toto řešení dlouho považované za nejvýhodnější. Bohužel zapojení není tak výhodné pro případy, kdy signál na vstupu není dokonale symetrický a pro případ, kdy je na vstup připojen nesymetrický signál. V tom případě je na výstupu signál o 6 dB slabší a tím pádem je zmiňované zapojení nevýhodné.

Z tohoto důvodu bylo zvoleno integrované řešení, které využívá principu přístrojového rozdílového zesilovače od firmy THAT corporation. Konkrétně linkový přijímač z řady 1200.

2.1.3 THAT 1206

THAT 1206 je integrovaný obvod firmy THAT Corporation z řady 1200, který dokáže přijímat symetrický i nesymetrický signál na vstup. Linkový přijímač se vyznačuje velmi dobrými vlastnostmi, které jsou vhodné pro audiozařízení. Speciální a rozhodující vlastností pro výběr tohoto zařízení byla vlastnost InGenius®, která zaručuje stále stejný zisk i v případě nevyvážení vstupní impedance. Další velmi výhodnou vlastností řady 1200 je ta, že nabízí linkový přijímač v různých provedení zesílení. Díky vlastnostem v následujícím výčtu jsou představeny některé důležité parametry obvodu [5]:

- Vysoká vstupní impedance: 10 MΩ při 60 Hz, 3,2 MΩ při 20 kHz
- CMRR: 90 dB při 60 Hz, 85 při 20 kHz
- Šířka pásma: >22 MHz
- Rychlost přeběhu: 12 V/μs
- Nízké zkreslení: 0,0005 % THD
- Nízký vlastní šum: -106 dB
- Verze se zesílením: -6 dB
- Vstupní rozsah napětí: 24,5 dBu
- Napájecí napětí: od ±3 V do ±20 V
- Napájecí proud: 4,7 mA

Nevýhodou tohoto obvodu je cena, která se pohybuje od 150 Kč za kus. To ovšem příliš nevadí, jelikož postavení linkového přijímače ze tří kusů vyjde okolo 90 Kč.

2.1.4 Výběr OZ pro předzesilovač

Pro realizace předzesilovače je nutné klást důraz na výběr vhodného OZ. Volba tohoto zařízení bude mít klíčový vliv na výsledné hodnoty celého zařízení, a proto je nutné se tímto výběrem blíže zabírat. Při výběru OZ je třeba porovnávat několik zásadních vlastností. Zde je jejich výčet:

- Velký rozsah napájecího napětí
- Co nejnižší harmonické zkreslení

- Veliká šířka pásma
- Vysoká rychlost přeběhu
- Vysoký odstup signálu od šumu
- Dostatečné zesílení

Při volbě OZ byly od vedoucího práce doporučeny tři typy, ze kterých se vybíralo nejlepší možné řešení. Doporučené typy OZ byly NE5534, OP275 a LM4562. Pro jejich lepší srovnání byla vytvořena tabulka 2.1. [6][7][8].

Tab. 2.1: Porovnání vlastností OZ

Typ OZ	Ucc [$\pm V$]	THD+N [%]	Input noise density [nV/sqrt(Hz)]	Gain Bandwidth [MHz]	Open loop gain [dB]	Slew rate [V/ μs]
NE5534	3 to 20	0,002	3,5	10	100	13
LM4562	2,5 to 17	0,00003	2,7	55	140	20
OP275	4,5 to 22	0,0006	6	9	-	22

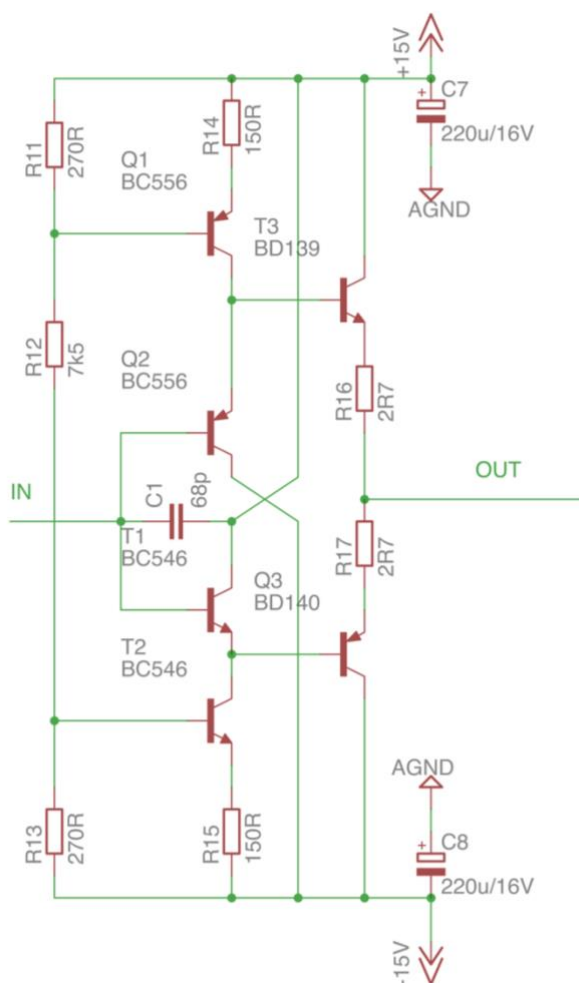
2.2 Návrh obvodu koncového stupně

Koncový stupeň sluchátkového zesilovače tvoří tzv. budič (buffer). V tomto případě je zvolen koncový stupeň složený z diskrétních součástek a zapojen do tzv. diamantového bufferu. V řešení problematiky diamantového bufferu bylo nejdříve představeno k diskusi několik typů již dříve sestrojených a navržených zapojení. Následně bylo rozhodnuto o sestrojení vybraných prototypů a jejich parametry byly změřeny. Následně proběhlo několik úprav obvodu a jeho změny byly změřeny. V potaz se bralo nejlepší možné řešení, které se bude následně realizovat.

V následné kapitole jsou jednotlivá zapojení ukázána, popsána a porovnána. Je zde vysvětlena jejich funkce.

2.2.1 Dispre II

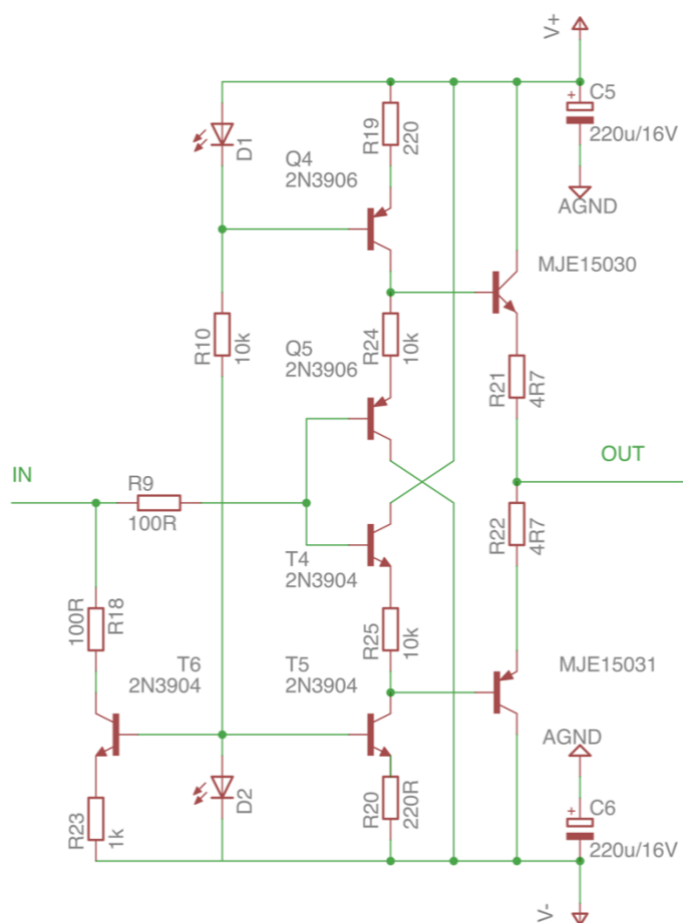
Zapojení diamantového bufferu bylo převzato z návrhu Pavla Macury. Konkrétně se mluví o verzi SSE. Jeho projekt Dispre II je známý mezi amatérskými konstruktéry sluchátkových zesilovačů. Jedná se o klasické zapojení diamantového bufferu s napájením obvodu $\pm 15\text{ V}$ a výstupními rezistory $R16, R17 = 2,7\ \Omega$, které určují výstupní impedanci bufferu. Pro nastavení proudu obvodem je zde umístěn napěťový dělič pomocí rezistorů $R11, R12$ a $R13$. [9]



Obr. 2.3: Diamantový buffer Dispre II [10]

2.2.3 Diamond42 v1.1

Posledním z testovaných variant diamantového bufferu je varianta převzatého od korejského autora, vystupujícího pod přezdívkou Sijosae. Jde o klasické zapojení diamantového bufferu. Na rozdíl od předchozích zapojení, v tomto schématu je konstantní zdroj proudu vyřešen zapojením dvou LED diod, kde využívá jejich referenčního napětí. Výstupní odpor bufferu je dán rezistorem 4R7. Rezistor s hodnotou $47\ \Omega$ slouží pouze jako ochranný rezistor zařízení, který se připojuje na výstup zařízení. Celý buffer je oproti ostatním zapojením navržen na napájení mnohem menším napětím, konkrétně $\pm 6\text{ V}$.



Obr. 2.5: Diamantový buffer Diamond42 [13]

2.3 Návrh výstupu zesilovače

Výstup celého zařízení je třeba chránit proti zkratu na výstupu. Z toho důvodu se na výstup zpravidla umísťuje ochranný rezistor o různých hodnotách. Pro měření dle normy ČSN EN 60268-7 [14] se hodnota výstupního ochranného rezistoru rovná hodnotě 120 Ω.

V případě zadání této práce je přímo definován požadavek na výstupní impedanci, a to na co nejnižší hodnotu. Z logiky věci vyplývá, že velikost výstupního rezistoru velmi ovlivňuje celkovou výstupní impedanci. Z tohoto důvodu bylo rozhodnuto o zařazení výstupních odporů na desku, ale jejich přímé nezapojení. Výstupní rezistory jsou pomocí propojek zkratovány. Tím pádem je možné kdykoli do obvodu rezistory zapojit vytažením zkratovací propojky. Při nezařazení výstupních rezistorů do obvodu poskytují ochranu před zkratem pouze rezistory zařazené na výstup jednotlivých bufferů. Dosažení požadavku na nízkou výstupní impedanci je navíc podpořeno zavedením zpětné vazby, která hodnotu výsledné výstupní impedance ještě sníží. Bohužel toto řešení je velmi náchylné na zkrat zařízení na výstupu. Při zkratu výstupu je dost pravděpodobné, že výstupní tranzistory budou nevratně poškozeny.

2.4 Návrh obvodu zpětné vazby

Pro dosažení lepších vlastností zesilovače je zde zavedena zpětná vazba, která je tvořena tzv. Jung Multiloop topologií. Jedná se o zpětnou vazbu zesilovače tvořenou čtveřicí rezistorů o různých hodnotách.

U tohoto zapojení je vstupní impedance rovna paralelní kombinaci rezistoru R2 se vstupní impedancí OZ, což je velmi vysoké číslo, které se pohybuje v řádech stovek kΩ.

Jelikož je požadavek na přepínání zesílení zesilovače na hodnoty 0 dB a 20 dB, bylo potřeba provést výpočet pro dvě různá zesílení. Řešení změny zesílení je řešeno změnou odporu ve zpětné vazbě, protože změna na jiných místech, např. napěťový dělič na vstupu, by mohlo negativně ovlivnit jiné parametry a tím pádem i vlastnosti celého zesilovače. Pro výpočet zesílení Jung Multiloop topologie platí [15]

$$A_U = \frac{R7 \cdot (R8 + R6 + R5) + R8 \cdot (R6 + R5)}{R7 \cdot (R8 + R6 + R5) + R8 \cdot R6} \quad (2.1)$$

Kde A_U reprezentuje napěťové zesílení a rezistory odpovídají označení z obrázku 2.6.

S použitými hodnotami rezistorů můžeme ověřit hodnotu zesílení:

$$A_{U1} = \frac{6800 \cdot (10^6 + 4700 + 6800) + 6800 \cdot (4700 + 10^6)}{6800 \cdot (10^6 + 4700 + 6800) + 4700 \cdot 6800} = 1,98 \quad (2.2)$$

$$A_{U2} = \frac{326,53 \cdot (10^6 + 4700 + 6800) + 6800 \cdot (4700 + 10^6)}{326,53 \cdot (10^6 + 4700 + 6800) + 4700 \cdot 6800} = 19,77 \quad (2.3)$$

Kde A_{U1} vyjadřuje zesílení při jednom zapojení rezistorů a A_{U2} reprezentuje hodnotu zesílení při změně rezistorů ve zpětné vazbě.

Jedná se o modifikované zapojení neinvertujícího zesilovače, kde největší podíl na zesílení mají rezistory R5 a R6 a rezistory R7 a R8 tvoří napěťový dělič. Mimochodem z dalších výpočtů platí, že rezistory R3, R5 a R6 určují šířku pásma zpětné vazby [15].

$$f_l = \frac{f_0 \cdot (R7 + R6)}{(R5 + R6 + R8)} \quad (2.4)$$

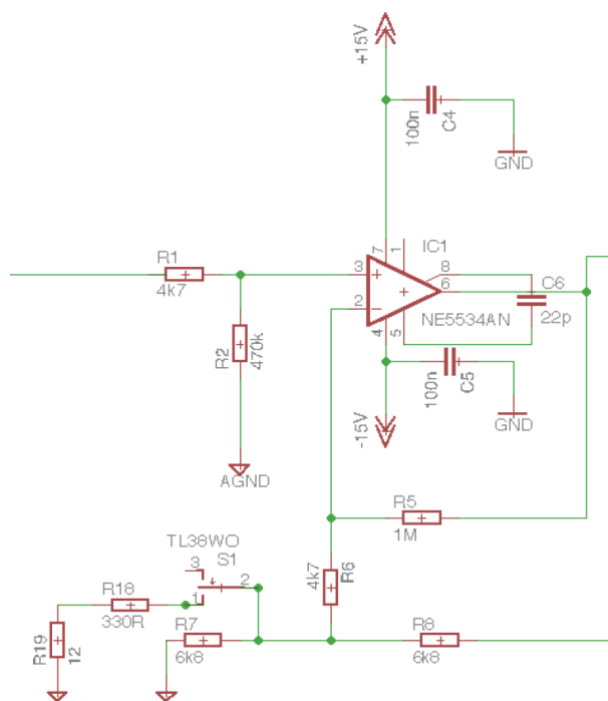
Kde f_l je šířka pásma zpětné vazby, f_0 šířka pásma OZ a názvy rezistorů odpovídají obrázku 2.6. Po dosazení můžeme ověřit šířku pásma navrhnutého zapojení.

$$f_{l1} = \frac{10^7 \cdot (6800 + 4700)}{(10^6 + 6800 + 4700)} = 113 \text{ kHz} \quad (2.5)$$

$$f_{l2} = \frac{10^7 \cdot (326,53 + 4700)}{(10^6 + 326,53 + 4700)} = 50 \text{ kHz} \quad (2.6)$$

Kde f_{l1} odpovídá šířce pásma při jedno zapojení rezistorů a f_{l2} odpovídá druhému zapojení rezistorů.

Dalším bodem při návrhu rezistorů ve zpětné vazbě byla skutečnost omezit co nejvíce nežádoucí jevy, které může zapojení limitovat. Jedním z nežádoucích jevů je impedanční nesymetrie vstupů [16]. Tomuto problému je snaha předcházet zvolením shodné hodnoty rezistorů R1 a R6.



Obr. 2.6: Zapojení zpětné vazby

2.4.1 Celkové zesílení obvodu

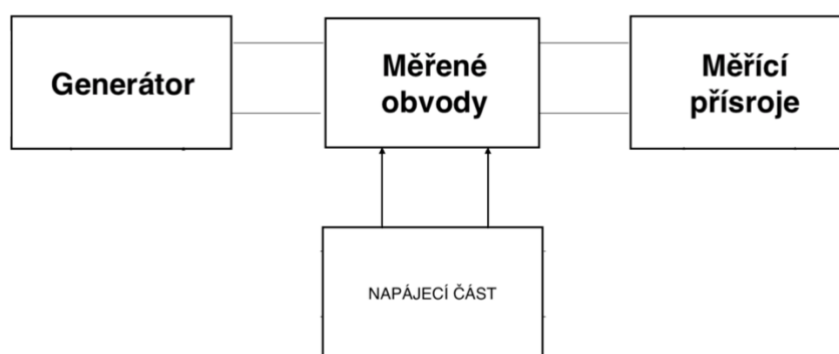
Jelikož s neinvertujícím zapojením je možné vytvořit minimální zesílení 2x a v zadání práce je požadováno celkové zesílení pouze jednou, je nutné v některé části zesilovače dosáhnout polovičního zesílení, tedy dvakrát zeslabit signál. Diamantový buffer má z principu svého chování a zapojení hodnotu zesílení $A_u = 1$. Z toho vyplývá, že je vhodné použít dělič napětí na polovinu. Bohužel dělič napětí má některé nevýhody. Tou hlavní nevýhodou je zhoršení odstupu signálu od šumu. V případě řešení tohoto obvodu je velikou výhodou možnosti využití linkový přijímač THAT z řady 1200. Konkrétně jde o typ 1206, kde koncovka číselného označení reprezentuje celkové zesílení obvodu, tedy zesílení o -6 dB. Díky tomuto zeslabení se celkový přenos zesilovače rovná jedné.

3 MĚŘENÍ JEDNOTLIVÝCH NÁVRHŮ

K porovnání vybraných obvodů v reálných podmínkách bylo zapotřebí sestavit prototypy jednotlivých zapojení. K zdánlivě jednoduché realizaci prototypů byl vybrán způsob sestavení kompletních obvodů na nepájivém poli. Pro sestavení bylo vybráno zapojení tří uvedených diamantových bufferů a dvou obvodů předzesilovače s OZ a zpětnou vazbou, která byla u každého obvodu odlišná.

Před samotným zapojením obvodů byly sestaveny seznamy součástek (tab. 5.1, 5.2, 5.3, 5.4) pro jednotlivé zapojení a předány vedoucímu práce na objednání. Po kompletaci všech potřebných součástek byly všechny obvody zapojeny na napájecí pole. Při zapojování se bohužel projevíly některé nedostatky nepájivého pole. Nejvýraznějším nedostatkem nepájivého pole při realizaci tohoto zadání byla absence třetí „řady“ pro zemní svorku (GND z anglického ground), která se využívá pro realizaci symetrického napájení a k připojení některých částí zapojení. Bohužel u audio zařízení, na které jsou kladeny vysoké nároky v oblasti kvality reprodukce, je absence kvalitní a masivní zemní svorky nevýhodou. Absence této „řady“ nebyla zprvu tolik řešena a pro realizaci zemní svorky se využívaly pouze „sloupce“ nepájivého pole. Po upozornění, od vedoucího práce, na změřené hodnoty, na možné ovlivnění výsledků absencí právě této zemní svorky byla zapojení na nepájivém poli kompletně přestavena. Zemní svorka byla vytvořena uprostřed nepájivého pole místo „řad“ určených pro napájecí napětí. Následně byla všechna měření opakována.

Všechna měření probíhala na přístroji a v laboratoři studiové hudební elektroniky při stejných podmínkách pro každý měřený obvod. Jediný rozdíl, který mohl při měření nastat, je vliv teploty na parametry jednotlivých zapojení, protože jednotlivá měření byla prováděna za sebou. Teplota jednotlivých součástek se ale pohybovala v rozmezí 30 °C a nikdy nepřesáhla pracovní teploty jednotlivých součástek stanoveny výrobcem.

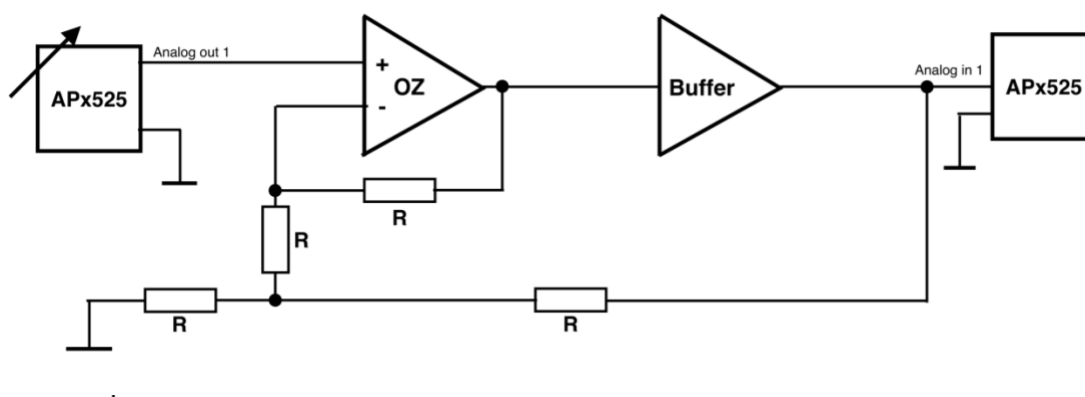


Obr. 3.1: Blokové schéma zapojení měření

3.1 Použité přístroje a schéma zapojení

Tab. 3.1: Použité přístroje

Druh přístroje	Výrobce	Typ	VUT SAP
Generátor	Audio Precision	APx525	0000000316312-0000
Měřené obvody			
Měřicí přístroj	Audio Precision	APx525	
Napájecí zdroj	Agilent	E3631A	001000206238-0000



Obr. 3.2: Schéma zapojení měření

3.2 Audio Precision APx525

Firma Audio Precision je světovým lídrem ve výrobě audio analyzátorů pro audio aplikace. S více než 30 letou zkušeností s designem a budováním nejpřesnějších analyzátorů na světě, Audio Precision současně vede s vícekanálovým analyzátelem, jediným 24-bitovým, 1 MHz FFT analyzátelem, nejnižším THD+N a s nejrovnější charakteristikou odezvy mezi analyzáteři a jediným HDMI analyzátelem na světě.

Konkrétně typ APx525 použitý při měření disponuje dvěma analogovými výstupy opatřené generátorem. Generátor umí pracovat se signálem v rozsahu 0,1 Hz až 80,1 kHz, s maximální amplitudou 21,21 V_{rms} a umožňuje připojit jak symetrické, tak nesymetrické přístroje na výstup. Dva analogové vstupy opatřené audio analyzátelem, které umožňují připojit na vstup až 230 V_{pp}, s měřitelným

frekvenčním rozsahem 90 kHz se zvlněním $\pm 0,008$ dB ve slyšitelném spektru a přesnosti amplitudy $\pm 0,03$ dB. Zařízení obsahuje také digitální rozhraní pro digitální vstup i výstup a možností rozšíření kartami.

Při měření analyzérem je pracováno s počítačovým programem, kde je možné nastavit rozsáhlé množství měření. [17]

3.3 Měření OZ vhodných pro předzesilovač.

Pro ověření katalogových hodnot bylo provedeno měření na stejném přípravku i obvodu při stejných podmínkách a hodnoty porovnány. Byly zkoumány průběhy THD+N v závislosti na velikosti vstupního napětí a závislost THD+N na frekvenci. Pro porovnání výsledků byla vytvořena tabulka s nejdůležitějšími hodnotami.

Tab. 3.2: Závislost THD+N na vstupním napětí

Typ OZ	U ₁	1m	10m	100m	1V	2V	3V
NE5534	THD+N [%]	1,3	0,15	0,015	0,0015	0,001	0,0008
LM4562		1,3	0,15	0,015	0,0015	0,001	0,001
OP275		10	1	0,1	0,01	0,01	0,02

Jak můžeme vidět, NE5534 i LM4562 dosáhlo stejných výsledků, naopak OP275 dosahovalo hodnot průměrně 10x vyšších než u předešlých OZ a v tomto měření byla naprosto nejhorší.

Tab. 3.3: Závislost THD+N na frekvenci

Typ OZ	f [Hz]	20	200	2k	20k	50k
NE5534	THD+N [%]	0,001	0,0002	0,0003	0,002	0,005
LM4562		0,001	0,0002	0,0005	0,005	0,013
OP275		0,0033	0,0045	0,0045	0,015	0,03

Při tomto měření byla ověřena závislost THD+N na kmitočtu. Jak můžeme vidět, nejlepší hodnoty vykazoval OZ NE5534, s velmi podobnými hodnotami vyšel i LM4562. Nejhorší hodnoty opět dosáhl OP275.

Je velmi zajímavé, jaké hodnoty byly změřeny. Operační zesilovač s nejhoršími hodnotami v katalogových listech při měřeních vykazoval nejlepší výsledky. Velmi podobné výsledky dosáhl i OZ LM4562. Ten ale podle katalogových údajů měl vykazovat výsledky nejlepší. Bohužel OZ OP275 dosáhl mnohem horších hodnot, než je udáváno v katalogových listech. Je velmi pravděpodobné, že výsledky měření byly ovlivněny zapojením na nepájivém poli a okolními podmínkami.

Vzhledem k naměřeným hodnotám, dostupnosti a ceně bylo rozhodnuto použít OZ NE5534. Je podivuhodné, že kdyby neproběhlo testovací měření, tento OZ by byl vyhodnocen jako nejhorší a ve výsledném řešení nepoužit.

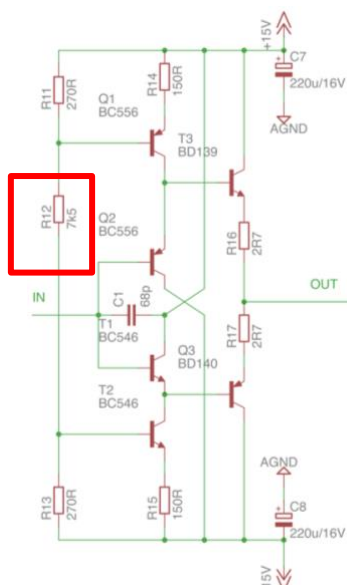
3.4 Změny parametrů původních obvodů

Při měření jednotlivých obvodů koncového bufferu proběhly úpravy některých parametrů součástek a tím pádem i parametry obvodu. Při každé změně parametru byl obvod opakovaně proměřen a výsledky uloženy k pozdějšímu porovnání.

3.4.1 Změna velikosti proudu v klidovém stavu

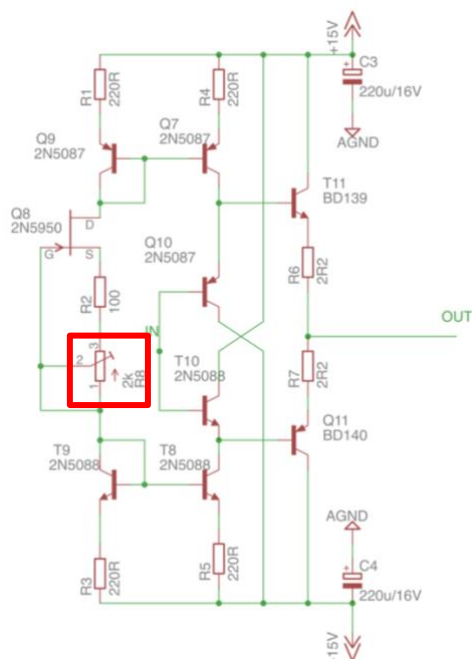
Při měření jednotlivých obvodů bylo v testování zahrnuto i testování různého klidového proudu obvodem. Při zjednodušeném výkladu je možno říci, že jsou nastavovány různé pracovní body jednotlivých součástek. Celý proces testování změny proudu v klidovém stavu probíhá z důvodu snahy dosažení co nejvyššího proudu do zátěže sluchátek ($32\ \Omega$) při zachování co možná nejlepších parametrů obvodu, jelikož některé testované obvody, v našem případě obvod Dispre II, jsou navrženy jako předzesilovače pro koncové zesilovače jejichž vstupní impedance dosahuje řádů $k\Omega$.

Nastavování různých proudů v klidovém stavu probíhalo u všech diamantových bufferů velmi podobně. Proud protékající větví, která nastavuje proud celého zapojení, se dá měnit několika způsoby. U zapojení Dispre II bylo rozhodnuto měnit proud v klidovém stavu změnou hodnoty rezistoru R12.



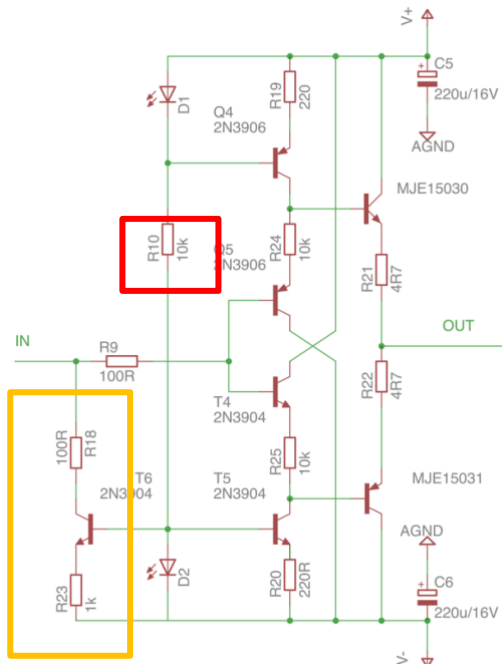
Obr. 3.3: Rezistor pro změnu proudu v klidovém stavu u Diamond 2

U zapojení PPA 2 se proud obvodu v klidovém stavu nastavuje pomocí potenciometru R8.



Obr. 3.4: Potenciometr pro změnu proudu v klidovém stavu u PPA 2

U obvodu Diamond42 změna proudu probíhala změnou hodnoty rezistoru R10 **červeně**. O nastavení proudu se zaslouhuje také tranzistor 2N904 označen na obrázku 3.5. **žlutě**, a proto bylo vyzkoušeno celý tento blok v zapojení vynechat.



Obr. 3.5: Prvky pro změnu proudu v klidovém stavu u Diamond42

3.4.2 Změna napájecího napětí

Tato změna se nejvíce týkala zapojení Diamond42, kde bylo v původním návrhu počítáno s napájecím napětím ± 6 V. Takto nízké napájecí napětí neumožňuje vysoký rozkmit na výstupu zařízení, a proto byly odzkoušeny a změřeny varianty s vyšším napájecím napětím, konkrétně s ± 10 V a ± 15 V. Další zvyšování napájecího napětí nemělo význam, protože napájecí napětí OZ NE5534 je doporučeno na max. hodnotu právě zmíněných ± 15 V.

U zbylých dvou obvodů se změna napájecího napětí neprováděla, protože jak bylo zmíněno, zvyšování napětí není vhodné pro chod OZ a snižování napětí je kontraproduktivní vůči výslednému rozkmitu napětí na výstupu zařízení. Navíc předchozí návrhy byly designovány přímo na napájení ± 15 V.

3.5 Měření závislosti THD+N na kmitočtu

Jako prvním druhem měření bylo zvoleno měření závislost celkového harmonického zkreslení a šumu na kmitočtu. Toto měření je velmi zásadní pro stanovení celkového THD zesilovače. Měření probíhalo napětím 1 V_{rms} na vstupu předzesilovače. Všechna měření probíhala nejprve naprázdno a poté na zátěži $32\ \Omega$.

3.5.1 Měření bez zátěže

Pro jednoduchý přehled byly vytvořeny tabulky s hodnotami a nejlepší/nejhorší hodnoty byly zvýrazněny.

Tab. 3.4: Závislost THD+N na kmitočtu bez zátěže u Dispre II a PPA2

					f [Hz]			
typ DB	U _{cc} [±V]	R [kΩ]	I [mA]		20	200	2k	20k
Dispre II	15	3		THD+N [%]	0,2	0,18	0,18	0,18
	15	4,3			0,004	0,007	0,007	0,005
	15	7,5			0,05	0,05	0,05	0,05
PPA	15		6		0,001	0,0005	0,001	0,003
	15		16		0,005	0,005	0,005	0,005

Tab. 3.5: Závislost THD+N na kmitočtu bez zátěže u Diamond42 s tranzistorem

Diamond42	s tranzistorem		f [Hz]			
U _{cc} [±V]	R [kΩ]		20	200	2k	20k
6	2,5	THD +N [%]	0,008	0,008	0,006	0,006
6	5		0,01	0,01	0,01	0,01
6	10		0,006	0,008	0,008	0,01
10	2,5		0,003	0,007	0,006	0,006
10	5		0,03	0,03	0,03	0,01
10	10		0,015	0,015	0,015	0,015
15	2,5		0,001	0,0004	0,0005	0,002
15	5		0,05	0,05	0,03	0,03
15	10		0,004	0,004	0,005	0,005

Tab. 3.6: Závislost THD+N na kmitočtu bez zátěže u Diamond42 bez tranzistoru

Diamond42	bez tranzistoru		f [Hz]			
U _{cc} [±V]	R [kΩ]		20	200	2k	20k
6	5	THD+N [%]	0,005	0,01	0,01	0,008
6	10		0,01	0,01	0,01	0,01
10	5		0,05	0,05	0,06	0,06
10	10		0,01	0,01	0,01	0,002
15	5		0,05	0,02	0,01	0,01
15	10		0,02	0,02	0,02	0,015

Jak můžeme pozorovat, nejlepších výsledků dosáhl zesilovač PPA se zapojením Diamond42, které bylo napájené vyšším napětím, než původně uváděl designér obvodu. Bohužel tyto výsledky nejsou tak směrodatné, protože jsou měřeny bez zátěže.

3.5.2 Měření na zátěži 32 Ω

Tab. 3.7: Závislost THD+N na kmitočtu při $R_z = 32 \text{ R}$ u Dispre II a PPA 2

				f [Hz]				
typ DB	U _{cc} [±V]	R [k Ω]	I [mA]		20	200	2k	20k
Dispre II	15	3		THD+N [%]	0,01	0,015	0,015	0,03
	15	4,3			0,01	0,012	0,012	0,025
	15	7,5			0,01	0,012	0,012	0,025
PPA	15		6		0,015	0,015	0,015	0,02
	15		16		0,015	0,015	0,015	0,02

Tab. 3.8: Závislost THD+N na kmitočtu při $R_z = 32 \text{ R}$ u Diamond42 s tranzistorem

Diamond42	s tranzistorem		f [Hz]			
U _{cc} [±V]	R [k Ω]		20	200	2k	20k
6	2,5	THD+N [%]	0,003	0,003	0,003	0,005
6	5		0,02	0,02	0,02	0,018
6	10		0,003	0,003	0,003	0,008
10	2,5		0,003	0,0025	0,0025	0,005
10	5		0,003	0,0025	0,0025	0,004
10	10		0,003	0,0025	0,0025	0,005
15	2,5		10	9	9	15
15	5		0,002	0,002	0,002	0,004
15	10		0,008	0,01	0,006	0,006

Tab. 3.9: Závislost THD+N na kmitočtu při $R_z = 32 \text{ R}$ u Diamond42 bez tranzistoru

Diamond42	bez tranzistoru		f [Hz]			
U _{cc} [±V]	R [k Ω]		20	200	2k	20k
6	2,5	THD+N [%]	0,2	0,2	0,2	0,15
6	5		0,003	0,004	0,004	0,005
6	10		0,02	0,02	0,025	0,02
10	5		0,003	0,003	0,004	0,005
10	10		0,007	0,007	0,005	0,006
15	5		0,05	0,04	0,04	0,04
15	10		0,07	0,07	0,07	0,07

Nejlepších výsledků dosáhlo zapojení Diamond42. Je zajímavé, že nejlepších výsledků bylo dosaženo při napájecím napětí ± 10 V.

3.6 Měření závislosti THD+N na velikosti vstupního napětí

V druhém měření byla změřena závislost THD+N na velikosti vstupního napětí. To nám ukáže, při jakém napětí začne zesilovač „ořezávat“ vstupní napětí. Ve výsledcích pak můžeme pozorovat rapidní nárůst THD+N.

3.6.1 Měření bez zátěže

Tab. 3.10: Závislost THD+N na vstupním napětí bez zátěže u Dispre II a PPA2

					U1 [Vrms]			
typ DB	U _{cc} [±V]	R [kΩ]	I [mA]		0,01	0,1	1	max
Dispre II	15	3		THD+N [%]	0,2	0,02	0,003	7,5
	15	4,3			0,2	0,02	0,0025	7,5
	15	7,5			0,2	0,02	0,0025	7,5
PPA	15		6		0,6	0,06	0,008	7,5
	15		16		0,6	0,06	0,006	7,5

Tab. 3.11: Závislost THD+N na vstupním napětí bez zátěže u Diamond42 s tranzistorem

Diamond42	s tranzistorem		U1 [Vrms]			
U _{cc} [±V]	R [kΩ]		0,01	0,1	1	max
6	2,5	THD+N [%]	0,25	0,025	0,0025	2
6	5		0,25	0,025	0,004	2
6	10		0,2	0,02	0,0025	2
10	2,5		0,025	0,02	0,003	4
10	5		0,2	0,02	0,004	4
10	10		0,2	0,02	0,004	4
15	2,5		0,2	0,02	0,004	7,5
15	5		0,2	0,02	0,003	7,5
15	10		0,2	0,02	0,004	7,5

Tab. 3.12: Závislost THD+N na vstupním napětí bez zátěže u Diamond42 bez tranzistoru

Diamond42	bez tranzistoru		U1 [Vrms]			
Ucc [±V]	R [kΩ]		0,01	0,1	1	max
6	5	THD+N [%]	0,2	0,02	0,0025	2
6	10		0,2	0,02	0,003	2
10	5		0,2	0,02	0,004	4
10	10		0,2	0,02	0,0025	4
15	5		0,2	0,02	0,0025	7,5
15	10		0,2	0,02	0,003	7,5

Z výsledků naprázdno můžeme vidět, že všechna zapojení jsou si velmi podobná. V případě maximálního napětí můžeme vidět, že je velmi závislé na napájecím napětí, což se dalo očekávat.

3.6.2 Měření na zátěži 32 Ω

Tab. 3.13: Závislost THD+N na vstupním napětí při $R_z = 32\ \Omega$ u Dispre II a PPA 2

					U1 [Vrms]			
typ DB	Ucc [±V]	R [kΩ]	I [mA]		0,01	0,1	1	max
Dispre II	15	3		THD+N [%]	0,25	0,02	0,01	5,5
	15	4,3			0,3	0,025	0,01	7,5
	15	7,5			0,25	0,025	0,015	7,5
PPA	15		6		0,6	0,06	0,02	0,7
	15		16		2	0,2	0,2	0,4

Tab. 3.14: Závislost THD+N na vstupním napětí při $R_z = 32 R$ u Diamond42 s tranzistorem

Diamond42	s tranzistorem		U1 [Vrms]			
Ucc [$\pm V$]	R [k Ω]		0,01	0,1	1	max
6	2,5	THD+N [%]	0,3	0,02	0,005	1,2
6	5		0,25	0,02	0,004	0,9
6	10		0,25	0,025	0,005	1
10	2,5		0,25	0,025	0,004	1
10	5		0,25	0,03	0,004	1
10	10		0,25	0,025	0,004	1
15	2,5		50	50	50	-
15	5		0,25	0,03	0,004	1
15	10		0,25	0,025	0,004	1

Tab. 3.15: Závislost THD+N na vstupním napětí při $R_z = 32 R$ u Diamond42 bez tranzistoru

Diamond42	bez tranzistoru		U1 [Vrms]			
Ucc [$\pm V$]	R [k Ω]		0,01	0,1	1	max
6	2,5	THD+N [%]	0,2	0,02	0,005	1
6	5		0,2	0,02	0,004	1
6	10		0,2	0,02	0,005	1
10	5		0,2	0,02	0,005	1
10	10		0,2	0,02	0,004	1
15	5		0,2	0,02	0,004	1
15	10		0,2	0,02	0,005	1

Jak můžeme pozorovat, nejlepších výsledků dosahovalo zapojení Diamond42, ale pouze do 1 V, což je krajní hodnota pro naše zadání. Zajímavé bylo pozorovat, že zapojení bez tranzistoru dosahovalo lepších výsledků než zapojení s tranzistorem. Červeně je označená situace, kdy byl proud v klidovém stavu nastaven moc vysoko a velmi znehodnotil výsledky měření.

3.7 Měření výstupní impedance

Při měření různých parametrů bylo také potřeba změřit výstupní impedanci obvodu, aby bylo splněno zadání práce. Výpočet výstupní impedance probíhal pomocí modelu děliče napětí, viz obrázek 3.6, podle vzorce:

$$U_2 = \frac{R_z}{(R_i + R_z)} \cdot U_1 \quad (3.1)$$

Kde U_2 je napětí na zátěži R_z , U_1 je napětí na výstupu zesilovače na prázdko a R_i je výstupní impedance zesilovače. Ze vzorce (3.1) pak můžeme vyjádřit:

$$R_i = \left(\frac{U_1}{U_2} - 1 \right) \cdot R_z \quad (3.2)$$

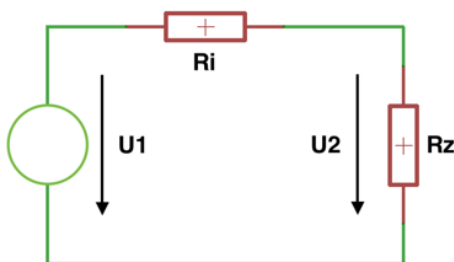
Po dosazení výsledků měření pro jednotlivá zapojení dostaneme výsledky.

Dispre II: $R_i = \left(\frac{7,105}{7,074} - 1 \right) \cdot 32 = 0,14 \, \Omega$ (3.3)

PPA: $R_i = \left(\frac{4,703}{4,643} - 1 \right) \cdot 32 = 0,194 \, \Omega$ (3.4)

Diamond42: $R_i = \left(\frac{2,821}{2,805} - 1 \right) \cdot 32 = 0,183 \, \Omega$ (3.5)

Z naměřených výsledků můžeme říci, že Dispre II dosáhlo nejlepšího výsledku, ale ostatní výsledky jsou také velice dobré.



Obr. 3.6: Blokové schéma měření výstupního odporu

3.8 Porovnání měření

Z naměřených hodnot jsou nejdůležitější a nejvíce směrodatné výsledky naměřené na zátěži $32 \, \Omega$, protože odpovídají provozu zesilovače při připojení klasických sluchátek.

Z naměřených hodnot závislosti THD+N na vstupní úrovni napětí můžeme také vidět, že zapojení Diamond42 mělo při hodnotě 1 V nejlepší výsledky a tím pádem i nejlepší výsledky v měření závislosti THD+N na kmitočtu, protože probíhalo při napětí 1 V.

Velkou zajímavostí je, že zapojení Diamond42 mělo nejlepší výsledky při vypojení tranzistoru, snížením hodnoty rezistoru na polovinu a při napájecím napětí ± 10 V.

3.8.1 Výběr nejlepšího zařízení

Z výsledků měření bylo třeba vybrat jedno zapojení, které se bude realizovat a navrhovat na desku plošných spojů. Vzhledem k tomu, že všechny výsledky si byly velice podobné, bylo při výběru zařízení zvaženo jeho využití.

Jako první k návrhům bylo vyřazeno zapojení PPA. Ve všech výsledcích s napětím na prázdko mělo dobré výsledky, ale při připojení zátěže se jeho parametry výrazně zhoršily.

Další rozhodnutí bylo ovlivněno výsledným použitím zesilovače. Kdyby bylo vyžadováno nejmenší THD asi by bylo s nejvyšší pravděpodobností vybráno zapojení Diamond42 s napájecím napětím ± 10 V a rezistorem o hodnotě 5 k Ω . Největší nevýhodou a rozhodujícím parametrem, proč tento druh zapojení nebyl vybrán, byla velikost maximálního vstupního napětí před limitací. Zapojení Diamond42 dosáhlo maximální úrovně vstupního napětí do zátěže před zkreslením pouze 1 V, což není málo, ale je to hraniční hodnota.

Naopak zapojení Dispre II dokázalo do zátěže fungovat s konstantním zkreslením až do hodnoty vstupního napětí 7,5 V. Toto zapojení nedosahovalo nejlepší parametry v oblasti závislosti THD+N na kmitočtu, ale jeho výsledky také nebyly špatné. Dá se předpokládat, že v případě zvýšení testovacího napětí by výsledky zůstaly podobné. Naopak u zapojení Diamond42 se to nedá předpokládat, protože jeho křivka závislosti THD+N na vstupní úrovni napětí dosahovala nejlepších výsledků pouze při napětí 1 V a při vyšších napětích prudce stoupala.

Proto bylo vybráno zapojení obvodu Dispre II. Při porovnání jednotlivých výsledků s hodnotami rezistorů můžeme pozorovat nepatrné změny. Největší rozdíl můžeme vidět v maximálním nezkresleném napětí na vstupu do zátěže, a to o rovné 2 V. Největším rozdílovým faktorem jsou hodnoty THD+N v závislosti na kmitočtu naprázdno. Tam zapojení s rezistorem o hodnotě 4,2 k Ω dosáhlo výsledků 10x lepších než při jiných hodnotách rezistorů.

Z těchto důvodů bylo vybráno zapojení diamantového bufferu Dispre II s rezistorem o hodnotě 4,2 k Ω , kterému odpovídá klidový proud 36 mA s použitím OZ NE5534.

4 NÁVRH NAPÁJECÍ ČÁSTI ZESILOVAČE

Druh návrhu napájecí části zdroje se odvíjela hlavně od povahy zadání práce. V té stojí, že zdroj má být používán v laboratoři a napájen síťovým napětím. Z toho vyplývá, že se práce musí zabývat kompletním převodem síťového napětí (~ 230 V), jeho usměrnění a stabilizaci na potřebném stejnosměrném napětí (± 15 V). Výhodou tohoto zadání je, že se nemusí výrazně sledovat celkový odběr zařízení, protože je napájen ze sítě. Další výhodou je použití „větších“ součástek pro stabilizaci napětí, protože na zařízení nejsou kladeny tak vysoké požadavky na mobilitu.

4.1 Volba transformátoru

Při volbě transformátoru bylo vycházeno z několika parametrů obvodu, které specifikovaly výběr vhodného typu. Prvním parametrem můžeme považovat výstupní napájení ± 15 V. Na výstupní napětí transformátoru nejsou kladeny tak vysoké nároky, protože napětí je dále stabilizováno. Druhým parametrem transformátoru je jeho výstupní proud dodávaný do zátěže. Při měření obvodu byl naměřen, při výstupu zesilovače $10 V_{\text{rms}}$, proud dodávaný do obvodu 206 mA. Při měření byl zapojen pouze jeden kanál bez linkového přijímače. Dá se tedy očekávat, že maximální proud dodávaný do obvodu se bude pohybovat do 0,5 A.

Protože návrh obvodu počítá s malými rozměry zařízení, je vhodné zvolit transformátor, který je možné upevnit na desku plošných spojů. Po zvážení všech parametrů byl nakonec zvolen transformátor BREVE TUFVASSONS TTS10/Z230/12-12V. Jedná se o toroidní transformátor, který lze díky vyplnění středu připevnit do DPS. Jedná se o levnější transformátor, který má naprázdno vyšší napětí, než je požadováno.

4.2 Stabilizace napětí

Zdroje realizované pouze pomocí usměrňovače a vyhlazovacího kondenzátoru by měly několik nevýhod, především tu, že se jejich výstupní napětí bude měnit se změnou odporu zátěže i se změnou vstupního (síťového) napětí. Abychom kolísání výstupního napětí zabránili, je zapotřebí napájecí zdroj doplnit stabilizátorem napětí.

Pro stabilizaci napětí na výstupu dvoucestného usměrňovače byla zvolena kombinace vyhlazovacích kondenzátorů a stabilizátorů napětí.

Kapacita vyhlazovacích kondenzátorů byla vypočítána podle vzorce [18].

$$C = \frac{I_{MAX}}{2f \cdot (U_{MAX} - U_{MIN})} \quad (4.1)$$

Kde I_{MAX} je maximální proud odebíraný ze zdroje, f je síťový kmitočet, U_{MAX} je maximální napětí na výstupu a U_{MIN} minimální napětí na výstupu.

Po dosazení konkrétních hodnot do vzorce (4.1) dostaneme výslednou kapacitu vyhlazovacího kondenzátoru.

$$C = \frac{0,5}{2 \cdot 50(15,5 - 14,5)} = 5 \text{ mF} \quad (4.2)$$

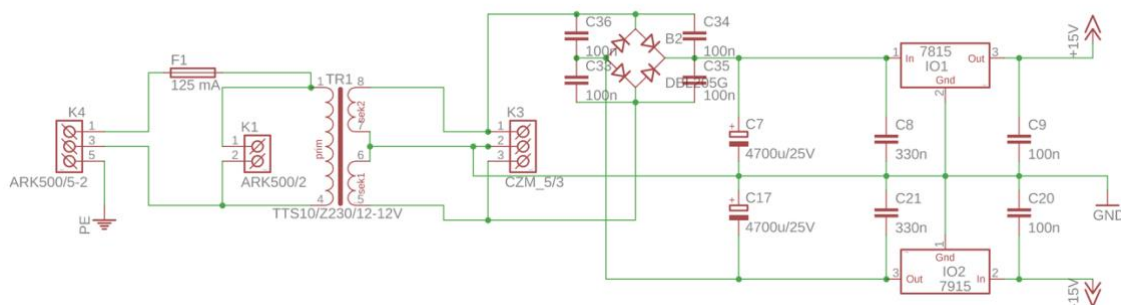
Kondenzátor byl zvolen o hodnotě 4,7 mF, jelikož autor v textu [18] uvádí, že postačí nižší kapacita. Zároveň rozkmit 1 V je pro stabilizátor napětí dostačující. Jmenovité napětí kondenzátorů bylo zvoleno 25 V z důvodu rezervy maximálního napětí na kondenzátorech.

Jako stabilizátory napětí byla zvolena kombinace třísvorkových stabilizátorů v pouzdře TO220 z typové série 7800 pro kladné napětí a ze série 7900 pro záporné napětí. [19]

4.2.1 Zapojení stabilizátorů napětí

Zapojení stabilizátoru do obvodu je podle doporučeného zapojení výrobce z datasheetu [20]. Ten doporučuje doplnit zapojení kondenzátoru s kapacitou 100 nF na výstup pro zlepšení stability při skokovém napětí. Druhý kondenzátor o kapacitě 330 nF je doporučen zapojit na vstup stabilizátoru, jestliže se stabilizátor nachází na DPS ve větší vzdálenosti od filtru napájecího napětí.

4.3 Zapojení napájecí části



Obr. 4.1: Zapojení napájecí části

5 NÁVRH DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ

Při návrhu desky plošných spojů bylo vycházeno z již používaných standardů. Hlavním zdrojem informací ke správnému návrhu plošného spoje byla skripta z předmětu BKEZ [21] a konzultace s vedoucím práce. Plošný spoj byl vytvořen v programu Eagle 9.0.0 společnosti Autodesk. Pro plošný spoj byla zvolena čtvrtá konstrukční třída a má rozměr 160 x 100 mm.

5.1 Rozložení součástek na plošném spoji

V důsledku dosažení co nejmenšího rozměru výrobku, bylo potřeba umístit všechny komponenty do jedné krabičky. Pro další ušetření místa, byly všechny komponenty umístěny na jednu DPS – Obr. 5.1. Při návrhu byla snaha umístit oba kanály podobně vedle sebe.

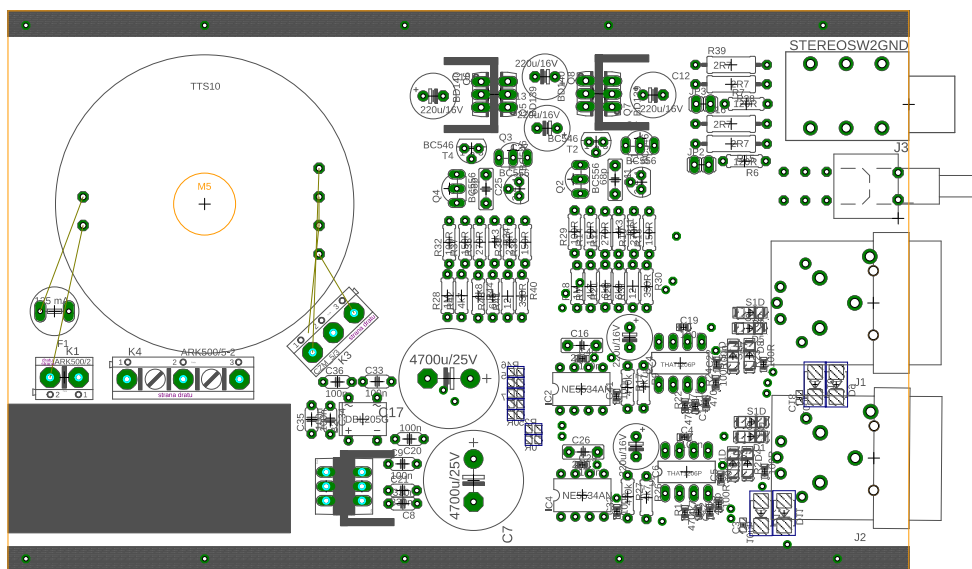
Prvním blokem na desce jsou konektory. Konektory jsou umístěny podle používaných standardů na přední straně krabičky. Tzn. vstupní konektory vlevo, výstupní vpravo. Mezi vstupními a výstupními konektory je umístěn přepínač zesílení.

Bezprostředně za vstupními konektory jsou umístěny ochrany zesilovače. Jejich pozice je zvolena záměrně co nejbližší vstupu a potenciálu země, aby došlo k co možná nejvíce zmenšení potenciální smyčky s nebezpečným napětím. Pro realizaci vstupních obvodů byly zvoleny SMD součástky z důvodu co nejvíce zmenšit plochu na DPS.

Následnými součástkami v signálové cestě jsou integrované obvody. Oba integrované obvody jsou umístěny blízko sebe, oddělené odpory, které tvoří vstupní dělič na vstupu IO NE5534. U napájecích pinů IO jsou co nejbližší umístěny blokovací SMD kondenzátory. Z důvodu využití zesilovače ve školní laboratoři jsou integrované obvody umístěny do patič, aby mohli být, v případě poškození, jednoduše nahrazeny jiným kusem.

Dalším blokem na desce plošných spojů je koncový stupeň zesilovače. Na začátku bloku jsou dvě řady rezistorů, které jsou zapojeny ve zpětné vazbě zesilovače a výstupním bufferu. Dále následují tranzistory z výstupního bufferu, které jsou pro jistotu opatřeny chladičem. Blízko tranzistorů jsou umístěny filtrační elektrolytické kondenzátory.

Posledním a největším blokem na desce plošných spojů je napájecí část zesilovače. Z důvodu nutnosti umístění transformátoru na stejnou DPS, zabírá napájecí část nejvíce místa. Dalším problémem bylo najít vhodné stabilizační kondenzátory, které by se vešly do krabičky a zároveň na DPS. Bílé místo pod transformátorem naznačuje potřebné místo pro napájecí IEC konektor.



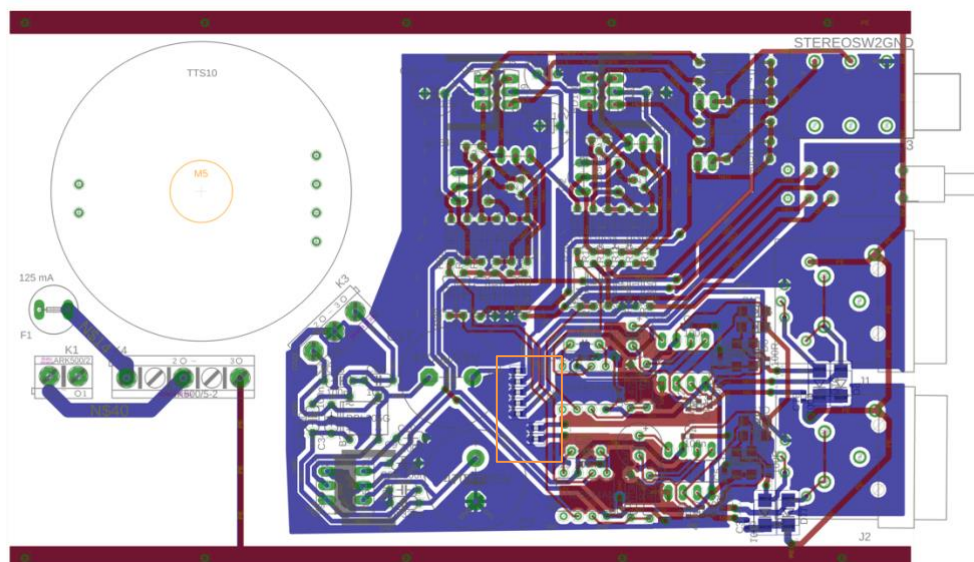
Obr. 5.1: Umístění součástek na desce plošných spojů

5.2 Oddělení zemí na DPS

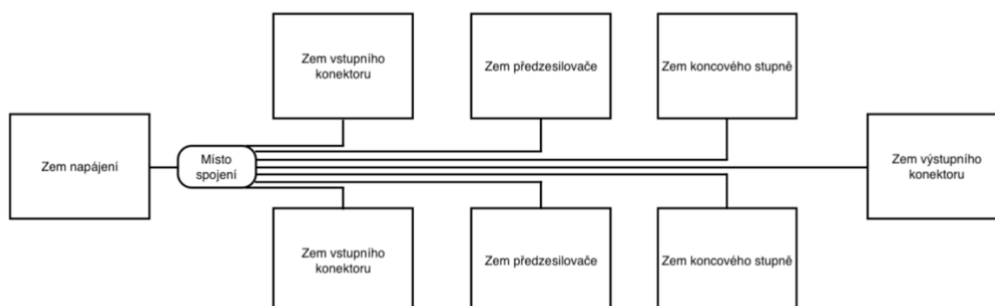
V audio zařízeních je kladen veliký důraz na eliminaci zemních smyček a průniku nežádoucích signálů k užitečnému signálu. To se v drtivé většině řeší rozlitím zemního potenciálu po celé desce, tzv. polygonem. Dalším tématem v rozvodu zemí je místo spojení jednotlivých druhů zemí. Pro každé zařízení platí jiná doporučení, které vycházejí ze zkušeností a obecných vlastností zařízení. V mém případě jsem tuto problematiku vyřešil rozvodem několika druhů zemí, viz. Obr. 5.2 a Obr. 5.3, kde obrázek 5.2 představuje reálné zapojení na DPS, obrázek 5.3 kopíruje uspořádání a ukazuje všechny druhy zemí. Pro každou část zesilovače byl vytvořen jiný druh země, který byl polygonem rozlit pod celou plochu dané části zesilovače. Následně byly všechny polygony vyvedeny do jednoho bodu a spojeny. Místo spoje bylo zvoleno mezi částí napájecí a částí signálovou, které je znázorněno na Obr. 5.2 **žlutě** a je realizováno rezistory s nulovým odporem. Polygon s zemním potenciálem není veden pouze pod částmi desky, kde se vyskytuje napětí sítě.

Speciální náležitosti obnáší rozvod zemního potenciálu PE vodiče z elektrické sítě. Ten byl veden co nejdále od součástek, které by mohl případný výboj do vstupních konektorů poškodit. V případě tohoto návrhu byl PE vodič umístěn i po okrajích plošného spoje a v programu Eagle byl překryt vrstvami tStop a bStop. Tyto vrstvy zde byly přidány z důvodu možnosti výroby DPS v externí firmě. Tyto vrstvy zaručují, že se při výrobě plošného spoje na tyto vrstvy nenanese vrstva nepájivé masky. To je z důvodu umístění celého výrobku do hliníkové krabice, kde musí být každá její vodivá část spojena s vodičem PE. Jelikož se DPS zasouvá do krabice, je touto vrstvou zaručeno spojení krabice s potenciálem PE.

Po konzultaci s vedoucím práce se rozhodlo, že se DPS vyrobí na VUT z dílny UTKO, protože návrh neobsahuje malé a složité spoje, a proto se dá vytvořit ve školní dílně. Tím pádem se vrstvy tStop a bStop nevyužijí, protože na VUT se nepájivá maska nedá vyrobit.



Obr. 5.2: Rozvod zemí na DPS



Obr. 5.3: Blokové schéma rozvodu zemí

5.3 Umístění DPS do krabičky

Jako pouzdro celého zesilovače byla zvolena krabička od firmy Hammond, která je z hliníku s plastovými čely. Velikou výhodou zvolené krabičky je ten, že je přímo vyráběna s ližinami pro zasunutí DPS a tím se dá velmi elegantně vyhnout vrtání a umisťování desky na distanční sloupky.

Krabička, s přesným označením Hammond 1455N1602, má vnější rozměry 160x103x53, tím pádem se dá považovat zesilovač za relativně malý.

Vzhledem k použití hliníkové krabičky je potřeba každý vodivý kus šasi spojit s zemnicím vodičem PE z důvodu ochrany před dotykem s neživými částmi. Toho bylo dosaženo napájením drátku na hliník a spojen s vodičem PE. Při pájení na hliník bylo využito pistole na horký vzduch k nahřátí hliníkové krabičky. Dále pro lepší lokální zahřátí bylo využito horkovzdušné pistole určené pro pájení mikročipů a nakonec napájení cínu pomocí mikropájky. Aby bylo možné pájení uskutečnit, bylo ještě nutné místo pájení polít kapalinou pro pájení na hliník. Ta je složena z velmi silné kyseliny, a při pájení se musí dbát velmi důležitých bezpečnostních opatření.

6 MĚŘENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

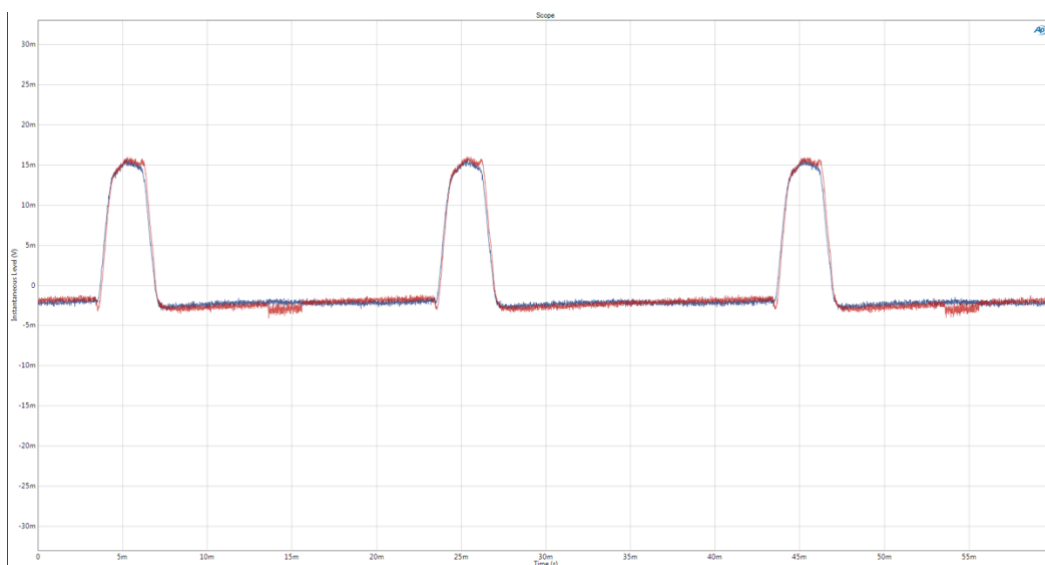
Finální výrobek umístěný do krabičky byl změřen, stejně jako v předešlých měřeních, v laboratoři studiové hudební elektroniky na přístroji Audio Precision APx525. Schéma zapojení i použité přístroje se neliší od předchozího měření, vyjma použití externího stejnosměrného zdroje napájení, viz. Kapitola 3.1. V tomto případě je obvod již napájen z obvodu na DPS.

Obvod byl měřen při zesílení 1x a 10x, naprázdno, při zátěži 30Ω , která simuluje připojení zátěže 36Ω sluchátek, a v připojení symetrického a nesymetrického zdroje napájení. V dalších kapitolách je zobrazen pouze výčet nejdůležitějších grafů a hodnot. Ve většině případů jsou hodnoty uváděny při zátěži 30Ω , protože jsou při používání zesilovače nejvíce směrodatné.

Je nutno podotknout, že měření probíhalo s použitím průměrných kabelů s absencí kvalitního stínění, vstup a výstup byl několikrát redukován, aby bylo dosaženo požadovaných konektorů.

6.1 Rušivý signál

Při měření bylo zjištěno, že se na výstup zesilovače dostává škodlivé napětí, které má přibližně tento průběh viz Obr. 6.1

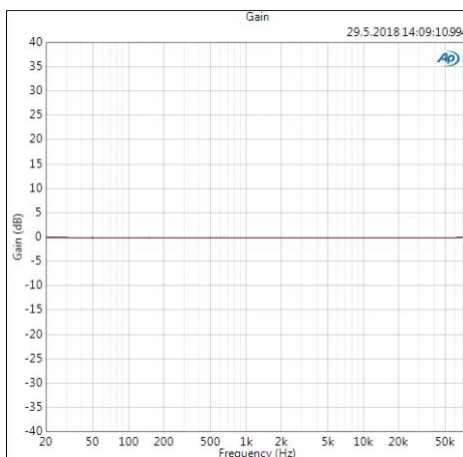


Obr. 6.1: Rušivý signál na výstupu

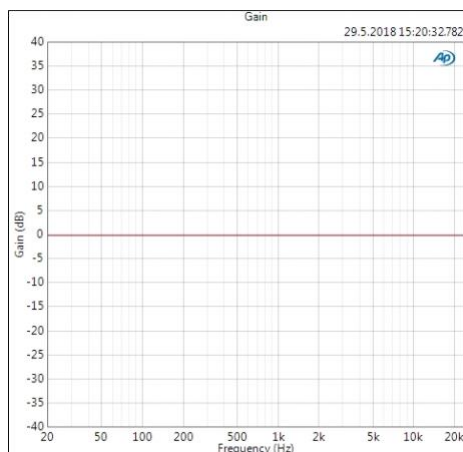
Z obrázku se dá vyčíst, že rušivý signál má frekvenci 50 Hz a pochází z napájecí části zesilovače. Tato skutečnost velmi ovlivnila naměřené hodnoty. Obrázek 6.1 je velikost rušivého napětí po zesílení o 20 dB.

6.2 Přenos a fáze zesilovače

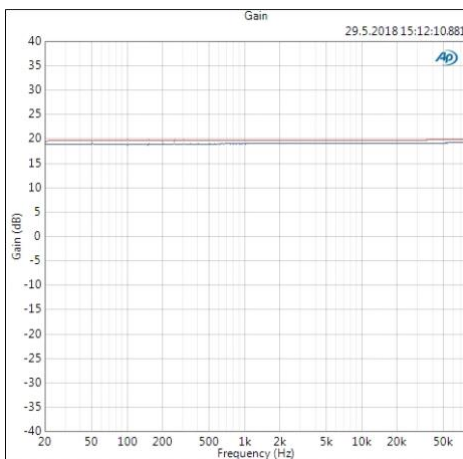
Sluchátkový zesilovač byl sestaven pro zesílení o 0 dB a 20 dB při symetrickém i nesymetrickém zdroji signálu.



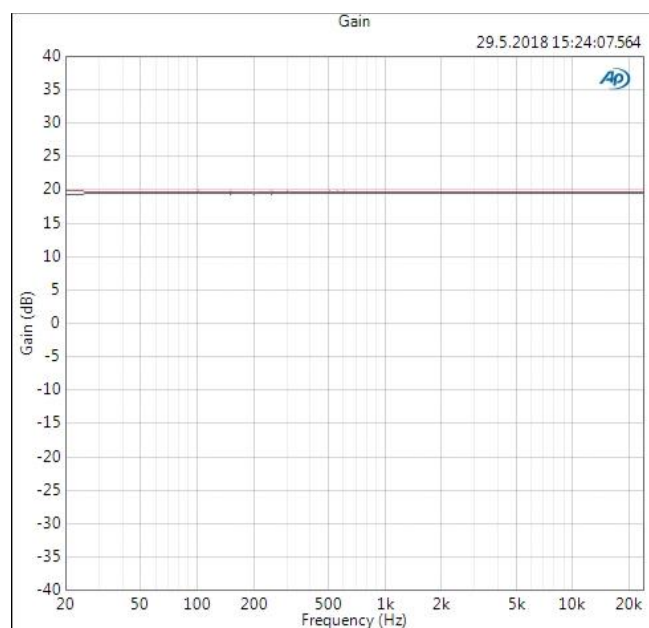
Obr. 6.2: Přenos pro 1x zesílení a sym. vstupu na zátěži



Obr. 6.3: Přenos pro 1x zesílení a nesym. vstupu na zátěži

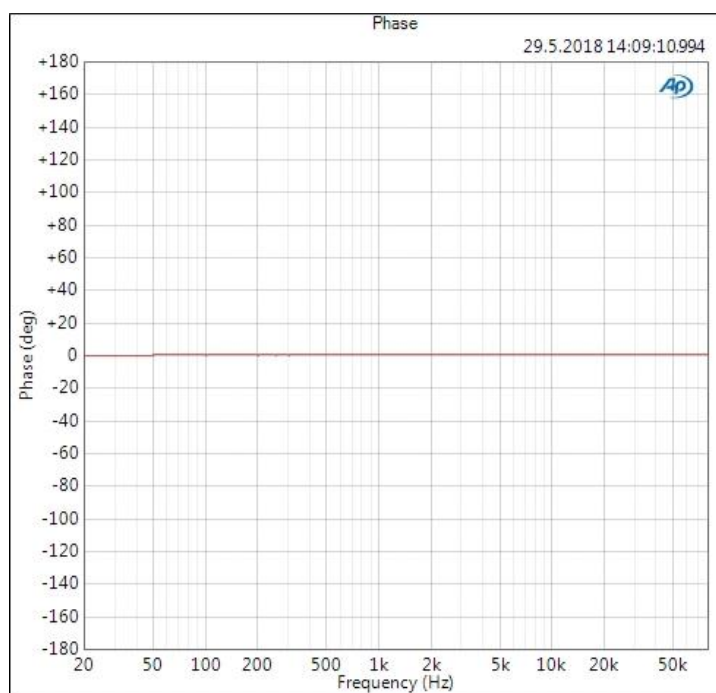


Obr. 6.4: Přenos pro 10x zesílení a sym. vstupu na zátěži



Obr. 6.5: Přenos pro 10x zesílení a nesym. vstupu na zátěži

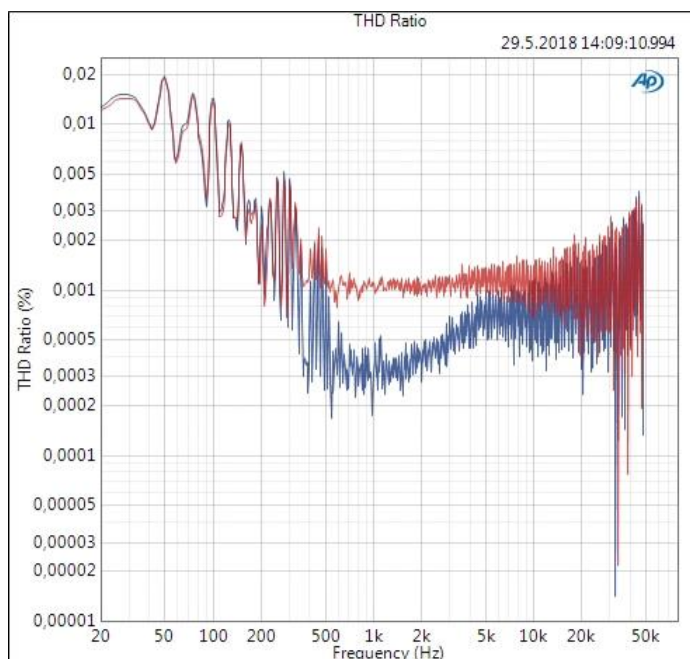
Fáze byla pro všechny měření shodná a její výsledný průběh je zobrazen na Obr. 6.6.



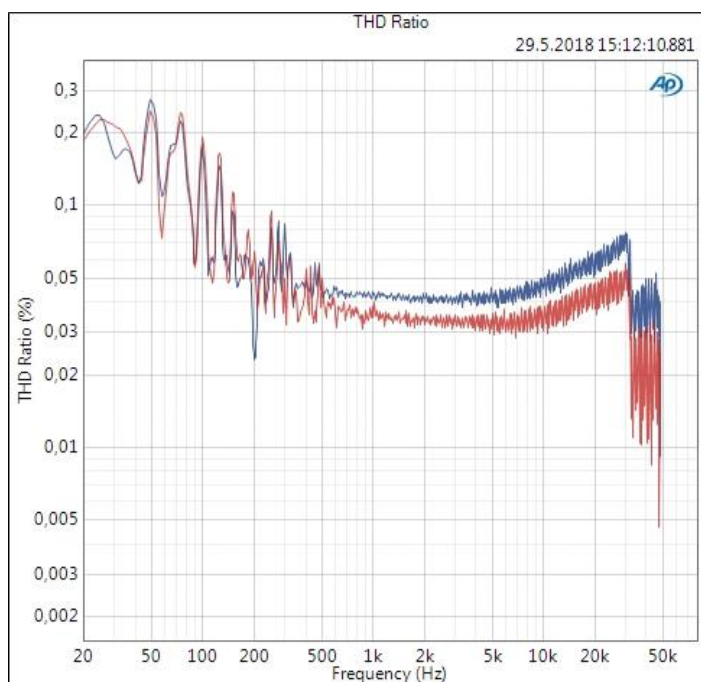
Obr. 6.6: Přenos fáze zesilovače

6.3 Měření závislosti THD+N na kmitočtu

Jako dalším bodem měření bylo měření závislosti THD+N na kmitočtu. Výsledky se pro symetrické a nesymetrické zapojení liší pouze v jednotkách, a proto zde nebude zobrazen rozdíl.



Obr. 6.7: Závislost THD+N na kmitočtu, 0 dB, bez zátěže

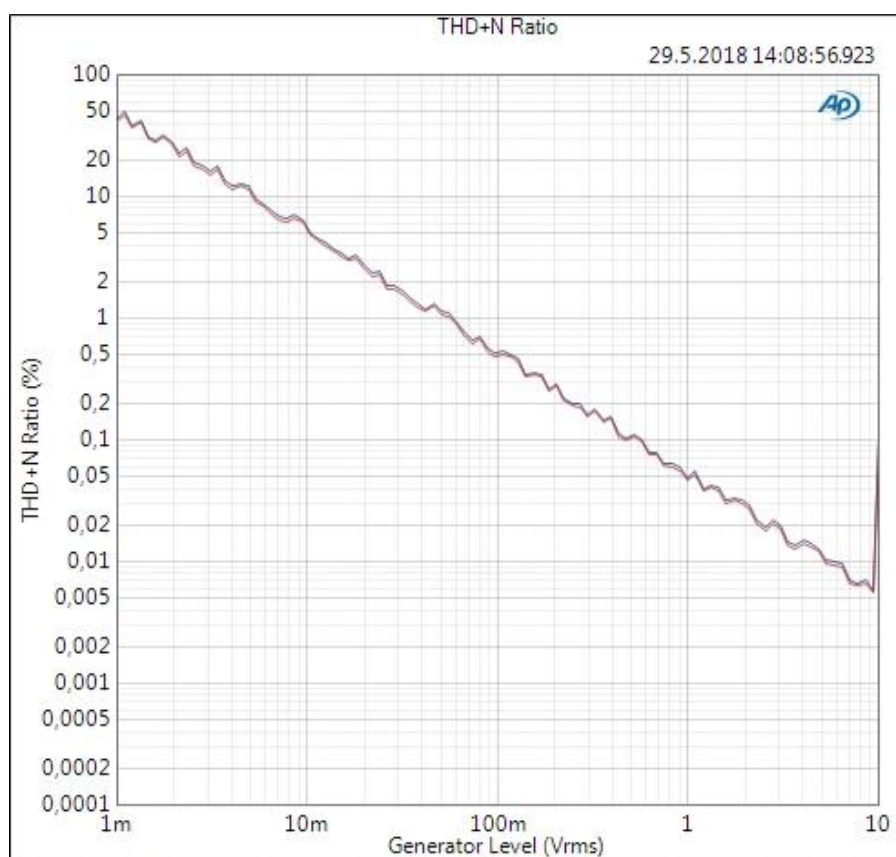


Obr. 6.8: Závislost THD+N na kmitočtu, 20 dB, zátěž

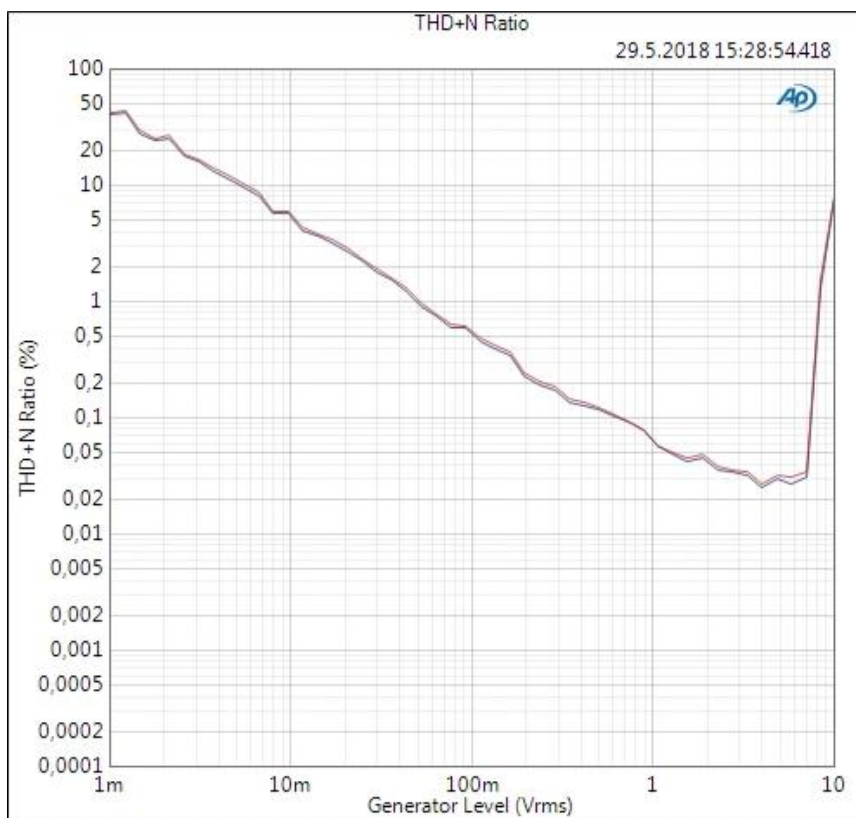
Při porovnání obou kanálů je možno vidět rozdíl. Je zajímavé, že ve výsledcích „lepší“ kanál byl zprovozněn až po několikahodinových bádáních, kdežto první kanál byl zapojen hned napoprvé. V obou případech je lepší jeden kanál, pouze byly přehozeny vstupy při měření z důvodu otočení desky, aby vznikl prostor pro napájení zátěže.

6.4 Měření závislost THD+N na vstupním napětí

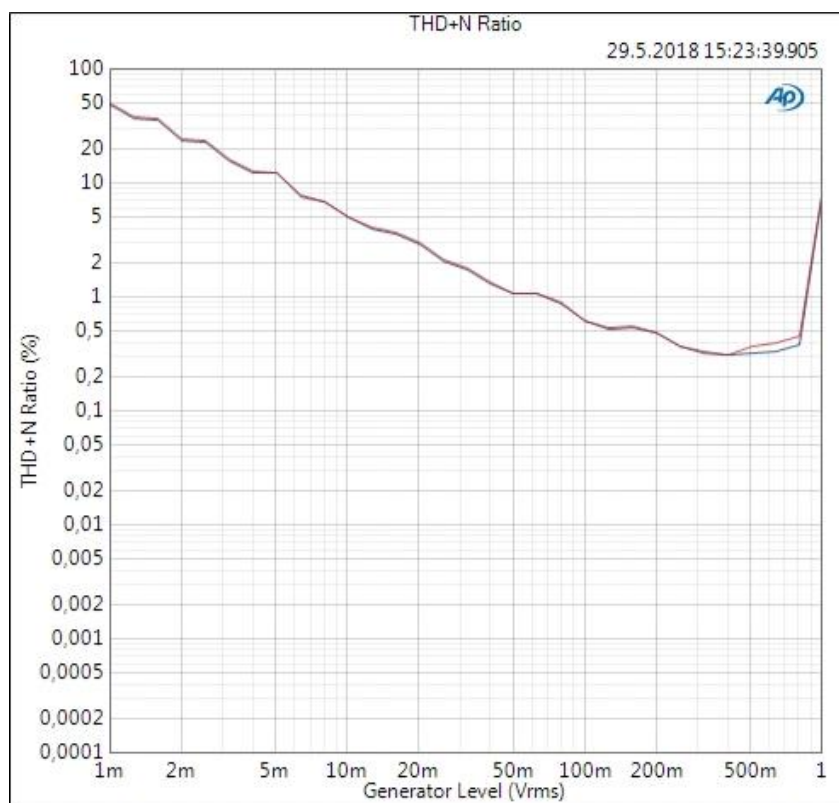
Následným bodem měření bylo měření závislost THD+N na vstupním napětí. Při měření zesílení o 0 dB se rozkmit vstupního napětí pohyboval od 1 mV až po 10 V. Při měření zesílení 10x se rozkmit pohyboval v rozmezí od 1 mV až po 100 mV, aby bylo dosaženo stejného maximálního napětí na vstupu před přebuzením.



Obr. 6.9: Závislost THD+N na vstupním napětí, sym. vstup, 0 dB, bez zátěže



Obr. 6.10: Závislost THD+N na vstupním napětí, sym. vstup, 0 dB, zátěž



Obr. 6.11: Závislost THD+N na vstupním napětí, nesym. vstup, 20 dB, zátěž

Jak můžeme vidět, zkreslení je při zesílení o 20 dB výrazně vyšší. Jeden z mnoha důvodů je i výskyt rušivého napětí na vstupu, který je mnohonásobně zesílen. Je ale velmi dobré, že výsledky nezaznamenávají rozdíl mezi hodnotami na zátěži a bez zátěže. Dalším velmi dobrým parametrem je ten, že zesilovač dokáže bez zkreslení zesílit vstup o velikosti 9 V.

6.5 Měření výstupní impedance

Výstupní impedance byla měřena naprosto stejně jako v měření popsaném v kapitole 3.7. Výstupní impedance byla opět stanovena výpočtem ze vzorce 6.1 pro oba kanály.

$$R_i = \left(\frac{U_1}{U_2} - 1 \right) \cdot R_Z \quad (6.1)$$

Po dosazení můžeme spočítat výsledky.

$$R_1 = \left(\frac{7,819}{7,782} - 1 \right) \cdot 30 = 0,14 \, \Omega \quad (6.2)$$

$$R_i = \left(\frac{7,820}{7,776} - 1 \right) \cdot 32 = 0,17 \, \Omega \quad (6.3)$$

Jak můžeme vidět, impedance jednotlivých kanálů se liší, to ale může být způsobeno stylem měření, protože byla pouze přikládána zátěž na výstup zesilovače a mohl vzniknout velký přechodový odpor.

7 ZÁVĚR

V této práci byly popsány sluchátkové zesilovače, jejich principy a struktura. Začátek práce se zabýval různými možnostmi realizace sluchátkových zesilovačů, kde bylo vybráno řešení nejlépe odpovídající kritériím zadání. Následně byly zvoleny tři různé typy již známých bufferů a zapojení předzesilovačů. Parametry těchto zapojení byly pečlivě změřeny na nepájivém poli. Při měření jednotlivých uspořádání byly testovány změny některých parametrů a součástek původně navržených obvodů, aby bylo možné dosáhnout co nejlepších výsledků. Podle naměřených hodnot bylo zvoleno konkrétní zapojení, které bylo doplněno návrhem vstupních ochranných obvodů a napájecí části zesilovače. Poté byl celý návrh přenesen do programu Autodesk Eagle, kde byl vytvořen návrh desky plošných spojů. Současně s návrhem desky byla vyhledána vhodná krabice, do které je celý zesilovač umístěn.

Do zesilovače je možné připojit jak symetrický, tak nesymetrický zdroj signálu pomocí konektoru XLR kombo a na výstup připojit sluchátka pomocí 6,3 stereo Jacku.

Realizovaný zesilovač dosáhl následných parametrů. Výstupní impedance byla vypočítána na $0,14\ \Omega$ jednoho kanálu a druhého kanálu na $0,17\ \Omega$. Vzniklá odchylka může být způsobena stylem měření, protože oba kanály jsou totožné. Na výstupu jsou umístěny zkratované rezistory o hodnotě $120\ \Omega$ v případě realizace měření podle ČSN EN 60268-7 na sluchátkovém zesilovači.

Zesílení zesilovače lze přepínat mezi hodnotami 0 a 20 dB přepínačem umístěným na předním panelu krabice. Přenos se s kmitočtem ani s velikostí vstupního napětí nemění bez rozdílu použití symetrického a nesymetrického zdroje signálu v celém slyšitelném spektru pro oba kanály. Jedinou výjimkou je stav při zesílení o 20 dB, symetrickém vstupu na zátěži, kdy se zesílení kanálů odlišovalo o přibližně 1 dB. Přenos fáze se pro jakékoli zapojení nemění a fázový posun je roven nule v celém slyšitelném spektru.

Průměrná hodnota harmonického zkreslení v závislosti na kmitočtu se pohybovala okolo 0,001 % pro zesílení o 0 dB a 0,04 % pro zesílení o 20 dB. Bohužel i přes všechny opatření v zapojení i na DPS se na výstup zařízení dostává signál z napájení o kmitočtu 50 Hz a velikosti přibližně 2 mV, který naměřené hodnoty zkresluje. Je ale nutno podotknout, že i přes nechtěný signál na výstupu, zesilovač dosahuje relativně dobré úrovně THD.

Zesilovač dosahuje hodnot THD+N v závislosti na vstupním napětí od 5 % při vstupním napětí 10 mV, kde následně lineárně s velikostí vstupního napětí klesá až do hodnoty 0,03 % při vstupním napětí 7 V. Poté zkreslení rapidně stoupá z důvodu ořezání signálu uvnitř zesilovače. Z naměřených hodnot se vypočítalo, že

zesilovač dosahuje celkového harmonického zkreslení 0,03 % při napětí 7 V do zátěže $30\ \Omega$, což odpovídá výkonu 1,63 W.

Literatura

- [1] Tangentsoft PPA Project, open-source headphone amplifier. Dostupné online na <https://tangentsoft.net/audio/ppa/amp2/>
- [2] SLONE, G.,R., The Audiophile's Project Sourcebook: 80 High-Performance Audio Electronics Projects. McGraw-Hill Education, 2001, 361s. ISBN 007137929
- [3] VRBA, Kamil. *Lineární obvody s OZ*. Brno, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2015. Skripta BANA. VUT Brno.
- [4] ČACKÝ, A. *Hybridní sluchátkový zesilovač pro vysoce jakostní reprodukci*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2012. 43 s., 26 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.
- [5] THAT corporation Inc. [online]. Datasheet THAT 1200 series datasheet – *InGenius High-CMRR Balanced Input Line Receiver ICs* [cit. 10.12.2017]. Dostupné z: http://www.thatcorp.com/datashts/THAT_1200-Series_Datasheet.pdf
- [6] Texas Instruments Inc. [online]. Datasheet NE5534 – *NE5534x, SA5534x Low-Noise Operational Amplifiers* [cit. 10.12.2017]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lme49600.pdf>
- [7] Texas Instruments Inc. [online]. Datasheet LM4562 – *LM4562 Dual High-Performance, High-Fidelity Audio Operational Amplifier* [cit. 10.12.2017]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm4562.pdf>
- [8] Analog Devices Inc. [online]. Datasheet OPA275 - *Dual Bipolar/JFET, Audio Operational Amplifier* [cit. 10.12.2011]. Dostupné z: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/OP275.pdf>
- [9] MACURA, Pavel. Dispre II. In: *Pmacura* [online]. 2009 [cit. 2017-12-11]. Dostupné z http://pmacura.cz/dispre2_cz.htm
- [10] MACURA, Pavel. Dispre II. In: *Pmacura* [online]. 2009 [cit. 2017-12-11]. Dostupné z: <http://pmacura.cz/schema.pdf>
- [11] PPA 2. In: *Tangentsoft* [online]. 2009 [cit. 2017-12-11]. Dostupné z: <https://tangentsoft.net/audio/ppa/amp2/pguide.html>
- [12] PPA 2. In: *Tangentsoft* [online]. 2009 [cit. 2017-12-11]. Dostupné z: <https://tangentsoft.net/audio/ppa/amp2/misc/schematic8.pdf>
- [13] Sijosae. Diamond42 v1.1. In: *Headphoneamp* [online]. [cit. 2017-12-11]. Dostupné z: http://www.headphoneamp.co.kr/index.php?mid=diy_sijosae&page=7&document_srl=18589

- [14] Elektroakustická zařízení - Část 7: Náhlavní sluchátka a sluchátka. 2011.
- [15] JUNG, Walt. *Op-Amp Audio Minimizing Input Errors* [online]. [cit. 2017-12-11]. Dostupné z: <https://web.archive.org/web/20080917000828/http://electronicdesign.com:80/Articles/Index.cfm?ArticleID=7206>
- [16] PPA 2. In: *Tangentsoft* [online]. 2009 [cit. 2017-12-11]. Dostupné z: <https://tangentsoft.net/audio/calc.html>
- [17] Audio Precision APx52x. *Audio Precision* [online]. [cit. 2017-12-11]. Dostupné z: <https://www.ap.com/analyzers-accessories/apx52x/>
- [18] OLEJÁR, Martin. *Návrh stejnosměrného zdroje napětí: transformátor, dvojcestný usměrňovač: Filtrační kondenzátory* [online]. [cit. 2017-12-12]. Dostupné z: <http://www.elweb.cz/clanky.php?clanek=65>
- [19] VRBA, Kamil. *Napájecí zdroje OZ*. Brno, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2015. Skripta BANA. VUT Brno.
- [20] STMicroelectronics Inc. [online] Datasheet L7800 series - *Positive voltage regulators* [cit. 10.12.2017] Dostupné z: <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/41/4f/b3/b0/12/d4/47/88/CD00000444.pdf/files/CD00000444.pdf/jcr:content/translations/en.CD00000444.pdf>
- [21] HANÁK, Pavel. *Návrh plošných spojů v Autodesk Eagle v8*. Brno, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2018. Skripta BKEZ. VUT Brno.

Seznam symbolů, veličin a zkratek

CMRR Common-mode rejection ratio – schopnost diferenciálního zesilovače potlačit souhlasné napětí

DPS Deska plošných spojů

ESD Electro static discharge – elektrostatický výboj

FET Field effect tranzistor – tranzistor řízený elektrickým polem

FFT Fast Fourier transformation – rychlá fourierova transformace

JFET Junction FET – Junction Gate FET

OZ Operační zesilovač

RFI Radio Frequency Interference - rušení rádiovými frekvencemi

THD Total harmonic distortion – celkové harmonické zkreslení

THD+N Total harmonic distortion + noise – celkové harmonické zkreslení + šum

TRS Tip-Ring-Sleeve – druh konektoru

Vpp Voltage peak-peak – napětí špička-špička

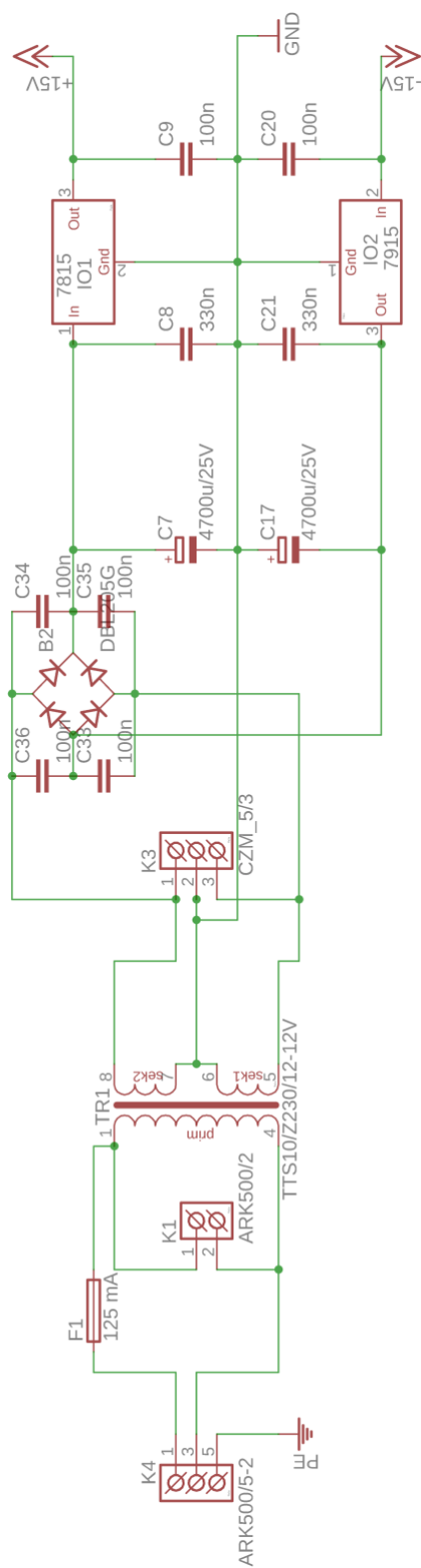
Vrms Voltage root mean square – efektivní napětí

XLR Live-return – druh konektoru

Seznam příloh

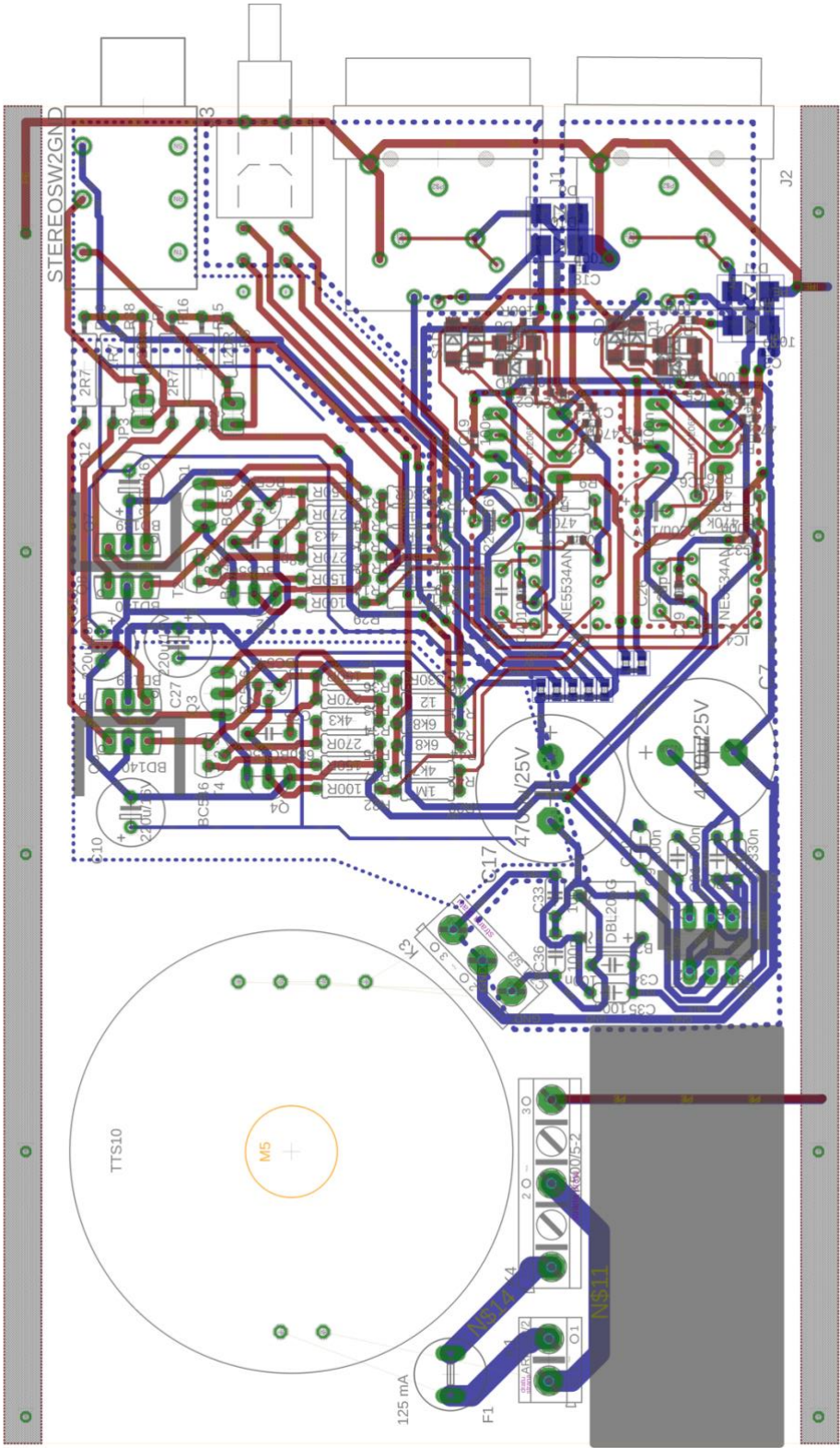
A	OBVODOVÉ ZAPOJENÍ.....	50
A.1	OBVODOVÉ ZAPOJENÍ SIGNÁLOVÉ ČÁSTI	50
A.2	OBVODOVÉ ZAPOJENÍ NAPÁJECÍ ČÁSTI	51
B	NÁVRH DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ	52
C	SEZNAM SOUČÁSTEK	53
C.1	DISPRE II	53
C.2	PPA2.....	53
C.3	DIAMOND42.....	54
C.4	REALIZOVANÝ NÁVRH.....	54
D	FOTOGRAFIE VÝROBKU	56

A.2 Obvodové zapojení napájecí části



Obr. 7.2: Zapojení napájecí části zesilovače

B NÁVRH DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ



Obr. 7.3 Návrh DPS

C SEZNAM SOUČÁSTEK

C.1 Dispre II

Tab. 7.1: Seznam součástek pro Dispre II

číslo	druh	hodnota	počet
1.	Tranzistor	BD139	1
2.	Tranzistor	BD140	1
3.	Tranzistor	BC556	2
4.	Tranzistor	BC546	2
5.	rezistor	2R7	2
6.	rezistor	150R	2
7.	rezistor	270R	2
8.	rezistor	7k5	1
9.	kondenzátor	68p	1

C.2 PPA2

Tab. 7.2: Seznam součástek pro PPA2

číslo	druh	hodnota	počet
1.	Tranzistor	BD139	1
2.	Tranzistor	BD140	1
3.	Tranzistor	2N5087	3
4.	Tranzistor	2N5088	3
5.	Tranzistor	PN4392	1
6.	rezistor	220R	4
7.	rezistor	10R	2
8.	rezistor	100R	1
9.	rezistor	2R2	2
10.	potenciometr	2k	1

C.3 Diamond42

Tab. 7.3: Seznam součástek pro Diamond42

číslo	druh	hodnota	počet
1.	Tranzistor	2N3906	2
2.	Tranzistor	2N3904	2
3.	Tranzistor	MJE15030	1
4.	Tranzistor	MJE25031	1
5.	rezistor	4R7	2
6.	rezistor	24R	2
7.	rezistor	100R	2
8.	rezistor	220R	2
9.	rezistor	1M	1
10.	rezistor	10K	1
11.	LED červená		2

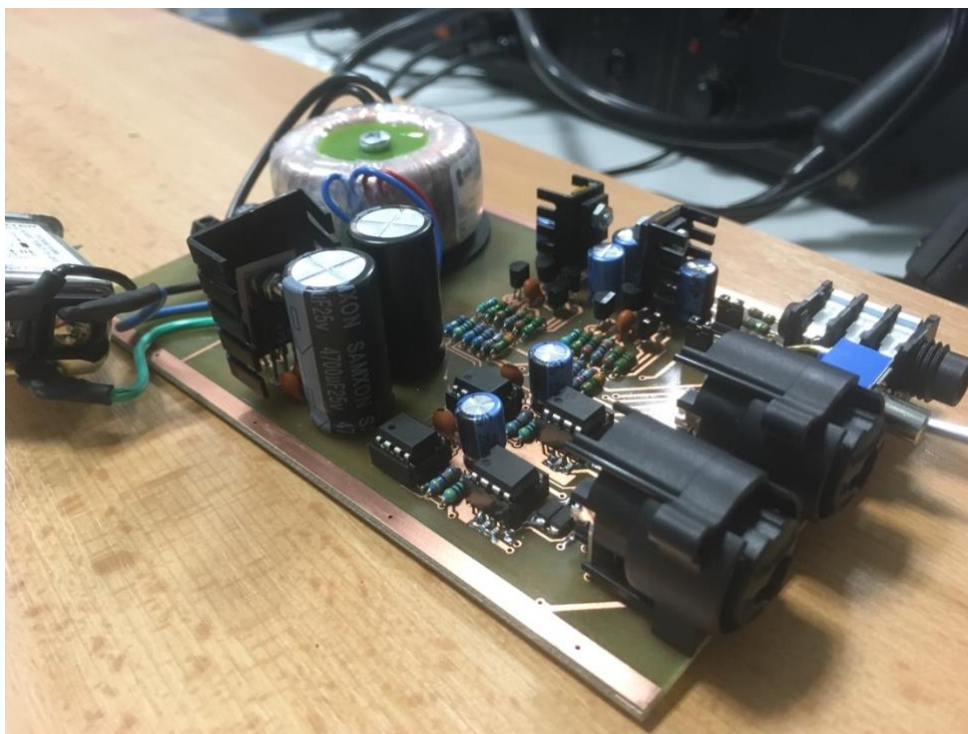
C.4 Realizovaný návrh

Tab. 7.4: Seznam součástek pro realizaci zapojení

číslo	druh	hodnota	Počet	Schéma
1.	Jumper		2	JP2, JP3
2.	XLR Kombo konektor		2	J1, J2
3.	Transil		4	D9, D10, D11, D12
4.	Rezistor	0R	7	R4, R5, R8, R25, R45, R46, R47
5.	Rezistor	100R	2	R29, R32
6.	Rezistor	100R	4	R2, R3, R23, R24
7.	Kondenzátor	100n	6	C9, C20, C33, C34, C35, C36
8.	Kondenzátor	100n	8	C4, C5, C19, C22, C29, C32, C40, C41
9.	Kondenzátor	100p	2	C3, C18
10.	Rezistor	12R	2	R31, R41
11.	Rezistor	120R	2	R6, R7
12.	Pojistka	125 mA	1	F1
13.	Rezistor	150R	4	R13, R14, R36, R37
14.	Rezistor	1M	2	R18, R28

15.	Elektrolytický kondenzátor	220u/16V	6	C6, C10, C12, C13,C24,C27
16.	Kondenzátor	22p	2	C16, C26
17.	Rezistor	270R	4	R10, R12, R33, R35
18.	Rezistor	2R7	4	R15, R16, R38, R39
19.	Rezistor	330R	2	R30, R40
20.	Kondenzátor	330n	2	C8, C21
21.	Elektrolytický kondenzátor	4700u/25V	2	C7, C17
22.	Rezistor	470k	2	R17, R27
23.	Kondenzátor	470p	4	C1, C2, C14, C15
24.	Rezistor	4k3	2	R11, R34
25.	Rezistor	4k7	4	R9, R19, R26, R42
26.	Rezistor	4k7	2	R1, R22
27.	Kondenzátor	68p	2	C11, C25
28.	Rezistor	6k8	4	R20, R21, R43, R44
29.	Stabilizator - 1A a 1,5A	7815	1	IO1
30.	Stabilizator - zaporný - 1A a 1,5A	7915	1	IO2
31.	Svorkovnice - roztec 5mm - dvojita	ARK500/2	1	K1
32.	Svorkovnice - roztec 5mm - 5 pinu	ARK500/5	1	K4
33.	NPN Transistor	BC546	4	T1, T2, T3, T4
34.	PNP Transistor	BC556	4	Q1, Q2, Q3, Q4
35.	NPN Transistor	BD139	2	Q5, Q7
36.	PNP Transistor	BD140	2	Q6, Q8
37.	Svorkovnice - roztec 5,08mm - trojita	CZM_5/3	1	K3
38.	Usměrňovací můstek	DBL205G	1	B2
39.	Operační zesilovač	NE5534AN	2	IC2, IC4
40.	Přepínač		1	U\$2
41.	Dioda	S1D	8	D1, D2, D3, D4, D5,D6,D7,D8
42.	6,3 Stereo Jack	STEREOSW2GN D	1	J3
43.	Linkový přijímač	THAT1206P	2	U1, U2
44.	Transformátor	TTS10/Z230/12-12V	1	U\$1

D FOTOGRAFIE VÝROBKU



Obr. 7.4: Osazená deska plošných spojů



Obr. 7.5: Finální podoba výrobku, pohled zepředu



Obr. 7.6: Finální podoba výrobku, pohled zezadu