



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

NÁVRH AKTIVNÍHO SUBWOOFERU

DESIGN AND REALIZATION OF AN ACTIVE SUBWOOFER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

ROBIN HRDINA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. PAVEL ŠTEFFAN, Ph.D.

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav mikroelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Mikroelektronika a technologie

Student: Robin Hrdina

ID: 146833

Ročník: 3

Akademický rok: 2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

Návrh aktivního subwooferu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte a realizujte jednokanálový zesilovač pro aktivní subwoofer. V návrhu se zaměřte na aktivní korekční předzesilovač a výkonový koncový stupeň. Návrh ověřte pomocí simulací a následně realizujte. Dosažené parametry zesilovače ověřte zkušebními měřeními.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle doporučení vedoucího

Termín zadání: 10.2.2014

Termín odevzdání: 5.6.2014

Vedoucí práce: doc. Ing. Pavel Šteffan, Ph.D.

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem a realizací jednokanálového zesilovače pro aktivní subwoofer o maximálním výkonu 200 W na 8 Ω zátěž. Návrh sestává z aktivního korekčního předzesilovače a koncového stupně. Předzesilovač je tvořen integrovanými operačními zesilovači a je ovládán dvěma potenciometry, přepínačem vstupů a přepínačem fáze. Koncový stupeň je tvořen integrovanými obvody LM3886T od firmy Texas Instruments. Oba bloky byly zrealizovány na desky plošných spojů a byly změřeny jejich parametry.

Abstract

This bachelor thesis describes the design and construction of a one-channel amplifier 200 W into 8 Ω load for an active subwoofer. The design consists of an active correction preamplifier and output stage. Preamplifier is created of integrated operational amplifiers and is controlled by two potentiometers, input switch and phase switch. Output stage is created of integrated circuits LM3886T by Texas Instruments. Both stages were constructed on PCBs and were measured their parameters.

Klíčová slova

Audio zesilovač, jednokanálový, subwoofer, integrovaný obvod, korekční předzesilovač, nízkofrekvenční zesilovač.

Keywords

Audio amplifier, one-channel, subwoofer, integrated circuit, correction preamplifier, low-frequency amplifier.

Bibliografická citace

HRDINA, R. *Návrh aktivního subwooferu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 62 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Pavel Šteffan, Ph.D..

Prohlášení autora o původnosti díla:

Prohlašuji, že jsem tuto vysokoškolskou kvalifikační práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce, s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení.

V Brně dne 2. 6. 2014

.....

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Pavlu Šteffanovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce. Dále děkuji prof. Ing. Vladislavu Musilovi, CSc. za zapůjčení nezbytné výkonové zátěže, bez které by měření zesilovače nebylo možné.

Obsah

| | |
|---|----|
| Úvod..... | 10 |
| 1. Subwoofer..... | 11 |
| 2. Teorie zesilovače | 12 |
| 2.1 Historie..... | 12 |
| 2.2 Definice..... | 12 |
| 2.3 Rozdělení zesilovačů..... | 13 |
| 2.4 Třídy zesilovačů | 14 |
| Třída A..... | 15 |
| Třída B..... | 16 |
| Třída AB..... | 17 |
| Třída C..... | 18 |
| Třída D..... | 18 |
| Ostatní třídy | 19 |
| Třída této práce | 19 |
| 2.5 Základní parametry zesilovačů | 20 |
| Přenosové pásmo | 20 |
| Zkreslení | 20 |
| Jmenovitý výstupní výkon..... | 21 |
| Vstupní impedance zesilovače..... | 22 |
| Výstupní impedance zesilovače..... | 22 |
| Vstupní citlivost..... | 22 |
| 2.6 Integrované obvody..... | 23 |
| Operační zesilovače | 24 |
| Speciální integrované obvody..... | 25 |
| 3. Návrh předzesilovače..... | 27 |
| 3.1 Blokové schéma | 27 |
| 3.2 Návrh jednotlivých bloků | 28 |
| Směšovač | 28 |
| Regulátor hlasitosti | 30 |
| Vstupní zesilovač..... | 30 |
| Subsonický filtr..... | 30 |
| Laditelná dolní propust'..... | 31 |

| | |
|--|----|
| Výstupní zesilovač | 32 |
| 4. Návrh koncového stupně | 33 |
| 4.1 LM3886T | 34 |
| 4.2 Můstkové a paralelní zapojení | 34 |
| Můstkové zapojení | 34 |
| Paralelní zapojení | 35 |
| Můstkově-paralelní zapojení | 36 |
| Servo obvody | 36 |
| 4.3 Změny návrhu oproti AN-1192 | 38 |
| 5. Realizace | 39 |
| 5.1 Měření parametrů předzesilovače | 40 |
| Omezení při měření | 40 |
| Maximální zesílení předzesilovače | 40 |
| Harmonické zkreslení předzesilovače | 40 |
| Frekvenční a fázová charakteristika předzesilovače | 40 |
| Šum předzesilovače | 43 |
| Vstupní citlivost předzesilovače | 43 |
| Test funkčnosti směšovače | 43 |
| Test otáčení fáze | 44 |
| 5.2 Měření koncového stupně | 44 |
| Vstupní odpor | 44 |
| Výstupní odpor | 44 |
| Vstupní citlivost | 45 |
| Měření výstupního výkonu | 45 |
| Šum zesilovače | 47 |
| Harmonické zkreslení koncového stupně | 47 |
| Účinnost zesilovače | 48 |
| Stejnoseměrné napětí na výstupu | 48 |
| 5.3 Poznámky o nedostatcích a možných vylepšeních | 49 |
| Závěr | 50 |
| Seznam použitých zdrojů | 51 |
| Seznam příloh | 53 |

Seznam obrázků

| | |
|---|----|
| Obr. 1 Subwoofer od Acoustic Energy [1] | 11 |
| Obr. 2 Základní funkce zesilovače | 13 |
| Obr. 3 Poloha pracovních bodů tříd..... | 15 |
| Obr. 4 Třída A [2] | 16 |
| Obr. 5 Zesilovač třídy B [2]..... | 16 |
| Obr. 6 Třída AB [2] | 17 |
| Obr. 7 Třída C [2] | 18 |
| Obr. 8 Třída D [2] | 19 |
| Obr. 9 Blokované schéma..... | 27 |
| Obr. 10 Schéma směšovače | 28 |
| Obr. 11 Časová charakteristika směšovače se stejnými vstupy..... | 29 |
| Obr. 12 Časová charakteristika směšovače s rozdílnými vstupy..... | 29 |
| Obr. 13 Schéma subsonického filtru..... | 31 |
| Obr. 14 Schéma laditelné dolní propusti | 32 |
| Obr. 15 Schéma výstupního zesilovače | 32 |
| Obr. 16 Můstkové zapojení..... | 35 |
| Obr. 17 Paralelní zapojení | 36 |
| Obr. 18 Neinvertující servo obvod | 37 |
| Obr. 19 Invertující servo obvod | 37 |
| Obr. 20 Fotografie koncového stupně..... | 39 |
| Obr. 21 Záznam směšovače z osciloskopu | 43 |
| Obr. 22 Záznam směšovače s funkcí otočení fáze..... | 43 |
| Obr. 23 Záznam otáčení fáze | 44 |
| Obr. 24 Simulace výpočtu výkonu | 45 |
| Obr. 25 Simulace výpočtu výkonu můstku..... | 46 |
| Obr. 26 Schéma předzesilovače..... | 54 |
| Obr. 27 Schéma koncového stupně..... | 55 |
| Obr. 28 Strana TOP předzesilovače..... | 58 |
| Obr. 29 Strana BOTTOM předzesilovače | 58 |
| Obr. 30 Strana TOP koncového stupně | 59 |
| Obr. 31 Strana BOTTOM koncového stupně | 60 |
| Obr. 32 Fotografie předzesilovače..... | 61 |

| | |
|--|----|
| Obr. 33 Fotografie koncového stupně..... | 61 |
| Obr. 34 Fotografie koncového stupně s chladičem..... | 62 |

Seznam tabulek

| | |
|--|----|
| Tabulka 1 Tabulka hodnot frekvenční charakteristiky předzesilovače | 41 |
| Tabulka 2 Tabulka hodnot pro výpočet výkonu, příkonu a účinnosti | 46 |
| Tabulka 3 Tabulky hodnot pro výpočet THD při 85,3 Hz a 1 kHz | 47 |
| Tabulka 4 Seznam součástí předzesilovače | 56 |
| Tabulka 5 Seznam součástí koncového stupně | 57 |

Seznam rovnic

| | |
|--|----|
| (1)Výpočet THD | 20 |
| (2)Výpočet výstupního výkonu | 21 |
| (3)Výpočet výstupní impedance zesilovače | 22 |
| (4)Výpočet rezistoru funkce MUTE | 38 |
| (5)Výpočet účinnosti..... | 48 |
| (6)Výpočet příkonu..... | 48 |

Seznam grafů

| | |
|---|----|
| Graf 1 Graf modulové charakteristiky předzesilovače | 42 |
| Graf 2 Graf fázové charakteristiky předzesilovače..... | 42 |

Úvod

Tato bakalářská práce navazuje svým tématem na předcházející semestrální projekt, který se zabýval návrhem zesilovače pro basový reproduktor skládající se z předzesilovače a koncového stupně. V semestrálním projektu byly provedeny nezbytné simulace návrhu a byl sestaven testovací model koncového stupně, na kterém byla ověřena jeho základní činnost.

Subwoofer, je nezbytnou součástí šesti-kanálových reproduktorových sestav určených pro přehrávání filmů. Stal se ale také součástí 2.1 sestav pro PC ozvučení. Vzhledem ke stále větší konzumnosti společnosti, se při ozvučení hledí stále více na efekty a na pravidlo „více basů, více kvality“ a tohoto také využívají výrobci levných sestav, kdy jsou satelitní reproduktory ošizeny na měničích i ozvučnici a jejich jalový zvuk je zakryt zesíleným subwooferem. Správně by však měl být subwoofer pouze doplňkem pro přehrávání nejnižších frekvencí a základní basy by měly zvládat přední reproduktory a to jak u 5.1 tak u stereo zapojení.

Cílem této bakalářské práce je navrhnout jednokanálový zesilovač pro aktivní subwoofer, zrealizovat jej na desky plošných spojů a změřit základní parametry zesilovače. Zrealizovaný zesilovač má mít možnost připojení jak za pomoci stereo vstupu doplněnému o směšovač, tak pomoci mono vstupu, který se týká především A/V receiverů. Hraniční hodnotu výkonu jsem si stanovil 200 W na 8 Ω . Frekvenční rozsah by měl odpovídat přibližně 20 Hz – 300 Hz, přičemž horní mezní frekvence by měla mít možnost plynulého nastavení přibližně 50 Hz – 300 Hz. Posledním prvkem upravujícím vstupní signál by měla být možnost obrátit fázi signálu o 180°. Dalším kritériem je se alespoň přiblížit teoretickým hodnotám harmonického zkreslení v aplikační poznámce AN-1192, která uvádí v daném frekvenčním pásmu hodnotu okolo 0,004 %, a udržet ji ideálně pod hranicí 0,1 %.

1. Subwoofer

Subwoofer je samostatná reproduktorová jednotka, jejímž účelem je reprodukce nejnižších tónů, které je lidský sluch ještě schopen zachytit. Většinou se frekvenční rozsah subwooferů pohybuje okolo 20 Hz – 300 Hz.

Subwoofery se dělí na aktivní a pasivní. Základním rozdílem mezi nimi je ten, že aktivní subwoofer oproti pasivnímu obsahuje vlastní jednokanálový zesilovač, ve kterém je zvuk z linkového výstupu zesilovače nebo A/V přijímače zesílen. Pasivní subwoofer pracuje již se zesíleným reproduktorovým signálem a obsahuje pouze směšovač a pasivní výhybku. Aktivní subwoofer by měl obsahovat několik funkčních bloků a to: subsonický filtr, laditelnou aktivní výhybku, přepínač fáze, směšovač stereo-mono a koncový stupeň. Subwoofery také často obsahují funkci stand-by, kdy se subwoofer zapíná sám pouze, když je na vstupu nějaký signál.

Subwoofer lze tedy použít jak pro připojení ke stereo sestavě, která slouží především k poslechu hudby a kde tedy slouží spíše jako doplňující prvek, užitečný především u dvoupásmových regálových reprosoustav, tak při multimediálním obsahu jako jsou filmy aj., kde je plnohodnotnou součástí šesti či osmi kanálových sestav a většinou bývá ve zvukovém záznamu nahrána stopa přímo pro něj.

Bohužel spousta subwooferů postrádá možnost připojení obou variant zároveň tak, aby mezi nimi šlo přepínat, což je jedna z věcí, kterou chci ve své práci vyřešit.



Obr. 1 Subwoofer od Acoustic Energy [1]

2. Teorie zesilovače

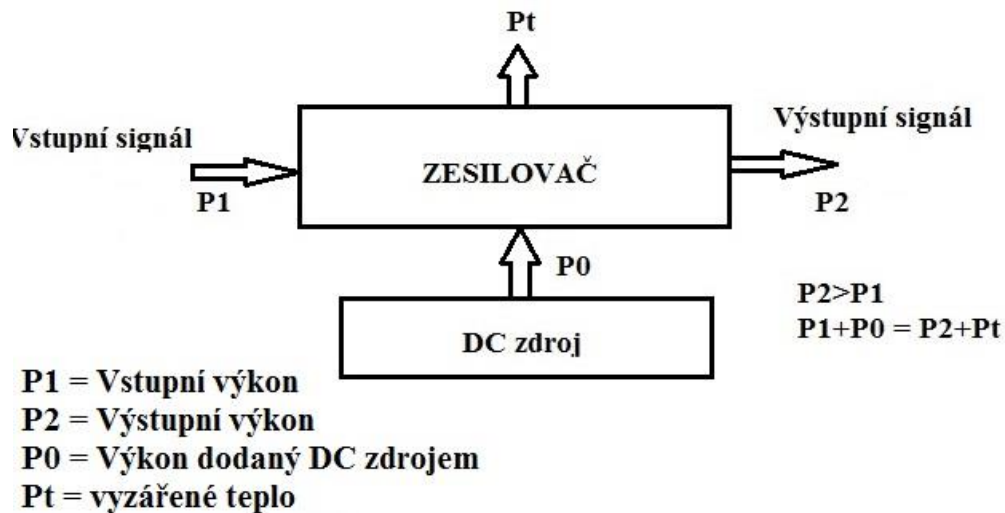
V této kapitole stručně uvedu některá základní fakta o zesilovači. Jeho historii, definici, rozdělení do tříd, základní parametry s normou DIN 45 500 známou jako Hi-Fi.

2.1 Historie

Zesilovače se v audio sféře začali objevovat přibližně od roku 1909, kdy Lee De Forest vylepšil vynález elektronkové diody Sira Johna Ambrose Flemminga z roku 1904 a přidáním další elektrody vynalezl první triodovou elektronku, která umožnila zesilování vstupního signálu. Tyto první triody byly ale velmi nestabilní a nespolehlivé, jelikož ještě neexistovala technologie, díky níž by bylo možné vytvořit ve skleněné baňce dostatečné vakuum. Až v roce 1912 F. Lowenstein zdokonalil triodu tak, že bylo již možné zesilovat i nízkofrekvenční signály. Po objevení polovodiče a zkonstruování prvních tranzistorů na začátku padesátých let dvacátého století, byla elektronková zařízení postupně vytlačena tranzistorovými přístroji, které měly ve všech ohledech lepší parametry. I když se elektronkové zesilovače stále vyrábějí, jsou určeny především pro ty, kteří dávají přednost jejich jedinečnému zvuku a také velice originálnímu vzhledu. Stále však zabírají podíl trhu s audio přístroji, i když jen nepatrný. Poté přišly operační zesilovače a integrované obvody. Jejich výhodou je jejich cena, spolehlivost a také relativní jednoduchost návrhů s těmito obvody především proto, že ve spojení s nimi není zapotřebí žádného valného množství dalších diskrétních součástek. [2]

2.2 Definice

Z hlediska elektroniky je zesilovač brán jako nelineární aktivní dvojbran, který je v základním zapojení tvořen jedním aktivním zesilovacím prvkem a to: elektronkou, tranzistorem či operačním zesilovačem a soustavou dalších diskrétních součástek pro nastavení pracovního bodu. Jeho funkce je za pomoci napájecího stejnosměrného zdroje zesílit či dle potřeby i modifikovat vstupní signál. V zapojení pro zpracování zvuku jde především o zvýšení amplitudy vstupního signálu s co nejmenším zkreslením. [3]



Obr. 2 Základní funkce zesilovače

2.3 Rozdělení zesilovačů

Níže uvádím rozdělení zesilovačů podle několika kritérií. Rozdělení převzato z [3], především proto, že v dané publikaci je přehledné a výstižné.

- Podle zesilované veličiny ($Z = \text{Impedance}$):
 - zesilovače napětí ($Z_{in} \rightarrow$ maximální, $Z_{out} \rightarrow$ minimální),
 - zesilovače proudu ($Z_{in} \rightarrow$ minimální, $Z_{out} \rightarrow$ maximální),
 - koncové zesilovače (maximální výstupní výkon).
- Podle zatěžovací impedance:
 - rezistivní – nízkofrekvenční (dále nf) a stejnosměrné (dále ss) zesilovače,
 - kapacitní,
 - induktivní, transformátor – koncové a speciální zesilovače,
 - rezonanční obvod vysokofrekvenční (dále vf) a nf zesilovače,
 - obecná impedance.
- Podle vazby mezi stupni:
 - přímá – stejnosměrné zesilovače,
 - odporová (pasivní, aktivní, diody) – ss a nf zesilovače,
 - kapacitní – střídavé zesilovače, nf a vf,
 - transformátorová – koncové nf a vf,
 - s kmitočtově závislými prvky – korekční zesilovače.

- Podle velikosti vstupního signálu:
 - malý signál – lineární nf a vf zesilovače,
 - velký signál – nelineární zesilovače, výkonové zesilovače nf a vf.

- Podle pracovního kmitočtu:
 - stejnosměrné,
 - střídavé nf (audio), vf.

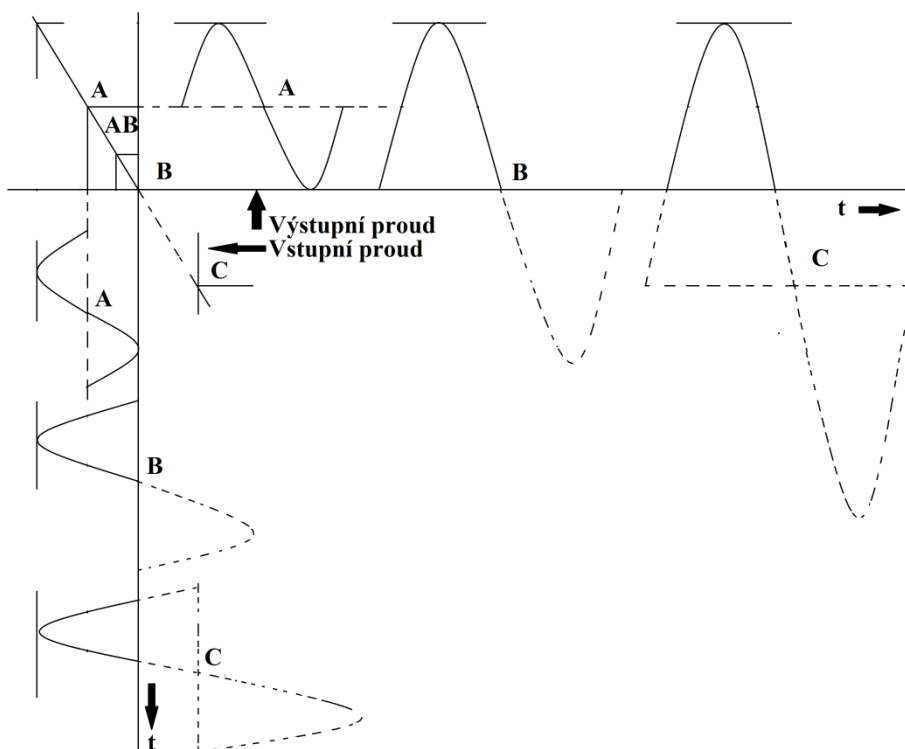
- Podle šířky přenášeného pásma:
 - úzkopásmové (laděné – vf, speciální – řídicí),
 - širokopásmové (vf, nf).

- Podle aktivního prvku:
 - bipolární tranzistor,
 - unipolární tranzistor,
 - elektronky,
 - integrované obvody.

- Podle polohy pracovního bodu aktivního prvku
 - třídy zesilovačů.

2.4 Třídy zesilovačů

Jak bylo uvedeno v předchozí kapitole, jedním se základních rozdělení zesilovačů a zároveň v audio nejpoužívanějších, je rozdělení do tříd. U čistě analogových zesilovačů, především pak tříd A, B, C a AB se jedná o nastavení polohy pracovního bodu zesilovače. Z tohoto se dále odvíjí tvar výstupního signálu, míra zkreslení a také účinnost zesilovače. Třída D funguje ale na jiném principu než základní třídy zesilovačů a bývají v ni použity i digitální obvody. Z tohoto důvodu třída D na obrázku níže není.

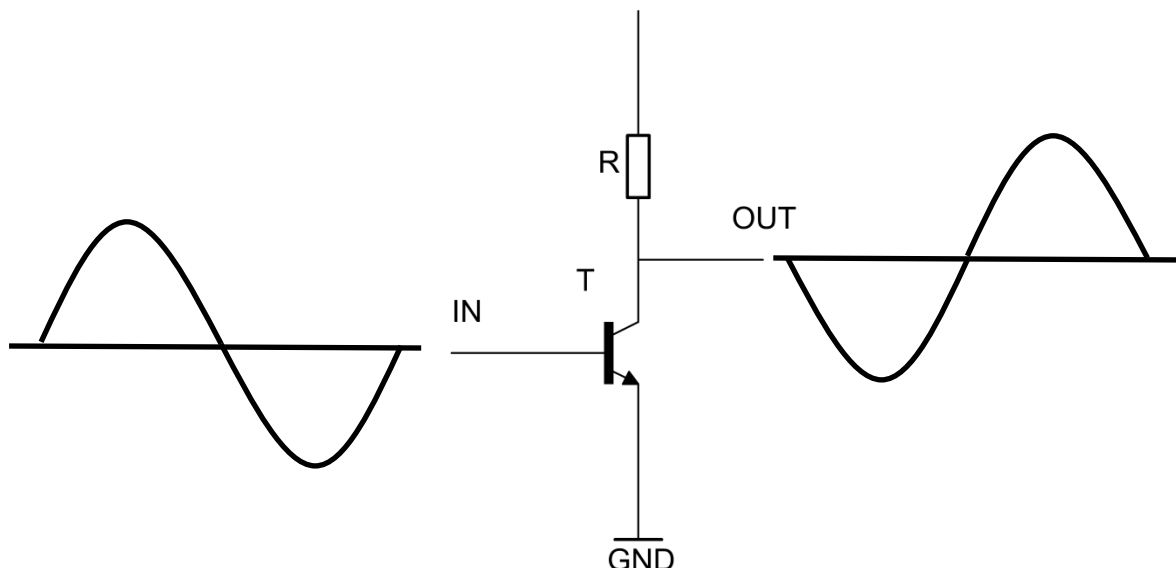


Obr. 3 Poloha pracovních bodů tříd

Třída A

Pracovní bod třídy A se výstupní charakteristice zesilovače nachází v ideálním případě uprostřed. Z toho vyplývá, že ideální vstupní sinusový signál je přenesen na výstup celý, tedy celých 360° . Zesilovač je tedy jednočinný, k přenesení celého signálu, záporné i kladné půlvlny, potřebuje pouze jeden zesilovací prvek.

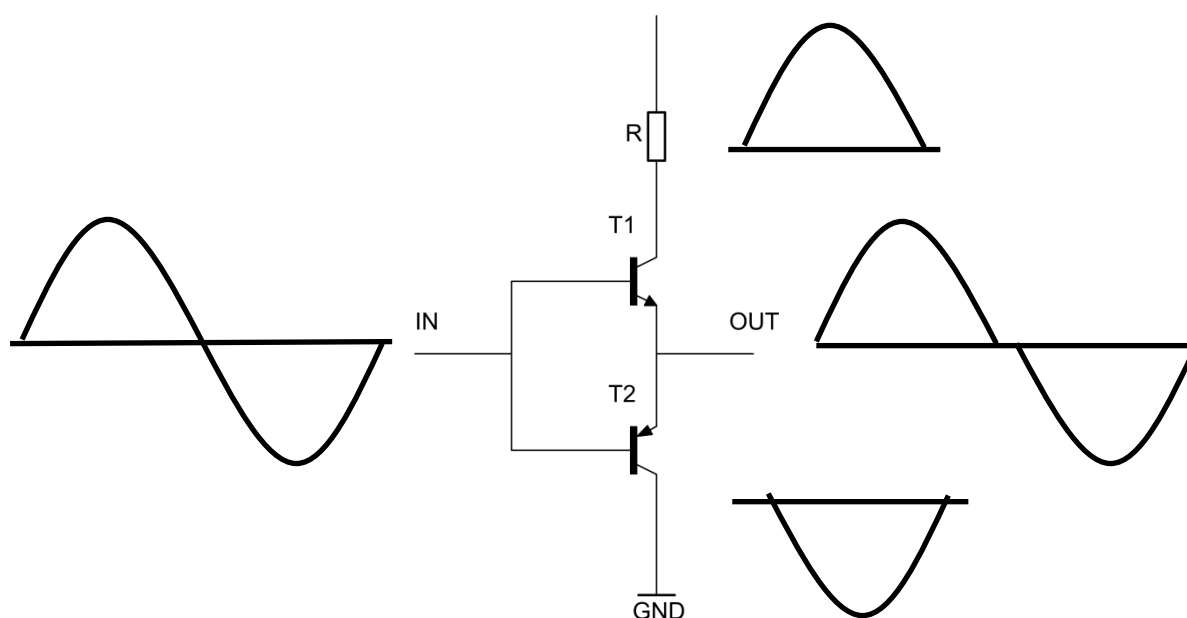
Zesilovačem protéká stálý a poměrně vysoký klidový proud, proto zesilovač nemá prakticky žádné zpoždění při sepnutí tranzistorů a tedy i přechodové zkreslení je minimální. Zároveň je však v tomto i nevýhoda třídy A. Díky vysokému klidovému proudu je zapotřebí i vysoký příkon. Jelikož není tento zesilovač schopen přenést vysoké rozkmitý signálu bez výrazného zkreslení, musí se maximální úroveň zesílení snížit minimálně o 50 %. Ve výsledku toto znamená, že se více než polovina výkonu vyzáří ve formě tepla a účinnost zesilovače se pohybuje okolo 25 %. Tím roste náročnost chlazení, napájení, konstrukce a také cena. Tyto zesilovače zabírají nepatrný podíl trhu a jsou určeny spíše pro nadšence. [2] [4]



Obr. 4 Třída A [2]

Třída B

Pracovní bod zesilovače třídy B je nastaven tak, že jím projde pouze jedna půlvlna tedy 180° signálu. Při nulové hodnotě vstupního signálu, odebírají výstupní tranzistory velice malý proud, který pak narůstá se zvyšováním úrovně vstupního signálu. Tyto zesilovače jsou úsporné a jejich účinnost se pohybuje okolo 78,5 % při maximální úrovni vstupního signálu.



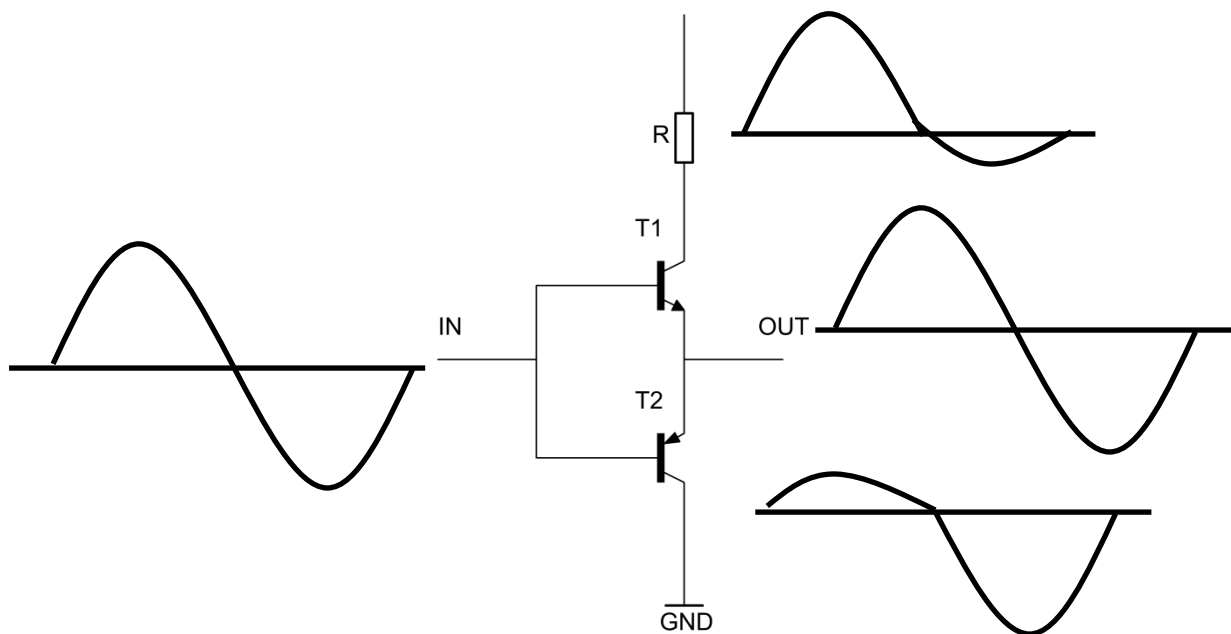
Obr. 5 Zesilovač třídy B [2]

Aby bylo možné zesílit celý signál, používají se v této třídě zapojení push-pull. Zesilovač je tedy dvojitý a na každou půlvlnu je zapotřebí jedné aktivní součástky. Velkou nevýhodou těchto zesilovačů je však velké přechodové zkreslení, kdy jsou oba

tranzistory při nulové úrovni vstupního signálu uzavřeny a při jeho zvyšování vzniká na tranzistoru zpoždění při otevření. Na obrázku je toto zkreslení vidět na přechodu mezi půlvlnami. [4]

Třída AB

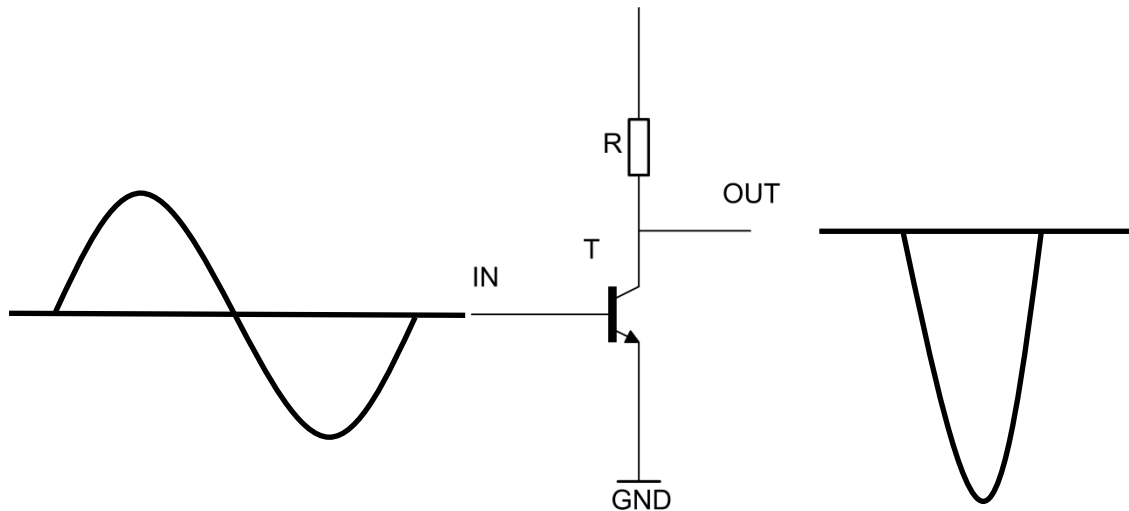
Třída AB není třídou v pravém slova smyslu, je spíše kompromisním řešením mezi A a B. Má stejné zapojení jako třída B, tedy dvojitě, avšak její pracovní bod je nastaven tak, aby v zesilovači tekla stálý malý klidový proud. Následkem je, že jedním tranzistorem neprojde pouze jedna půlvlna, ale také část druhé půlvlny. Tranzistor tedy při nulové úrovni vstupního signálu nikdy nevypíná a nedochází tak k přechodovému zkreslení, které je typické pro třídu B. Toto vylepšení je ale vykoupeno jednak nižší účinností cca 60 – 70 %, jednak harmonickým zkreslením, které vzniká v okamžiku, kdy oba tranzistory přenášejí stejnou část vstupního signálu a jejich proudový zesilovací činitel se sčítá, výsledkem jsou výkyvy v linearitě. [4] I přesto jsou zesilovače AB nejpoužívanější a nejběžnější. Díky kompromisnímu řešení, ceně a uspokojivé kvalitě výstupu.



Obr. 6 Třída AB [2]

Třída C

Třída C je charakteristická tím, že přenáší méně než 50 % vstupního signálu a vytváří na výstupu pulsy. Jelikož se tyto zesilovače používají především pro radiové frekvence a pro nízkofrekvenční aplikace se nepoužívá, jeho popis není pro tuto práci důležitý a uvádím ji zde pouze jako zástupce základní třídy. [2]



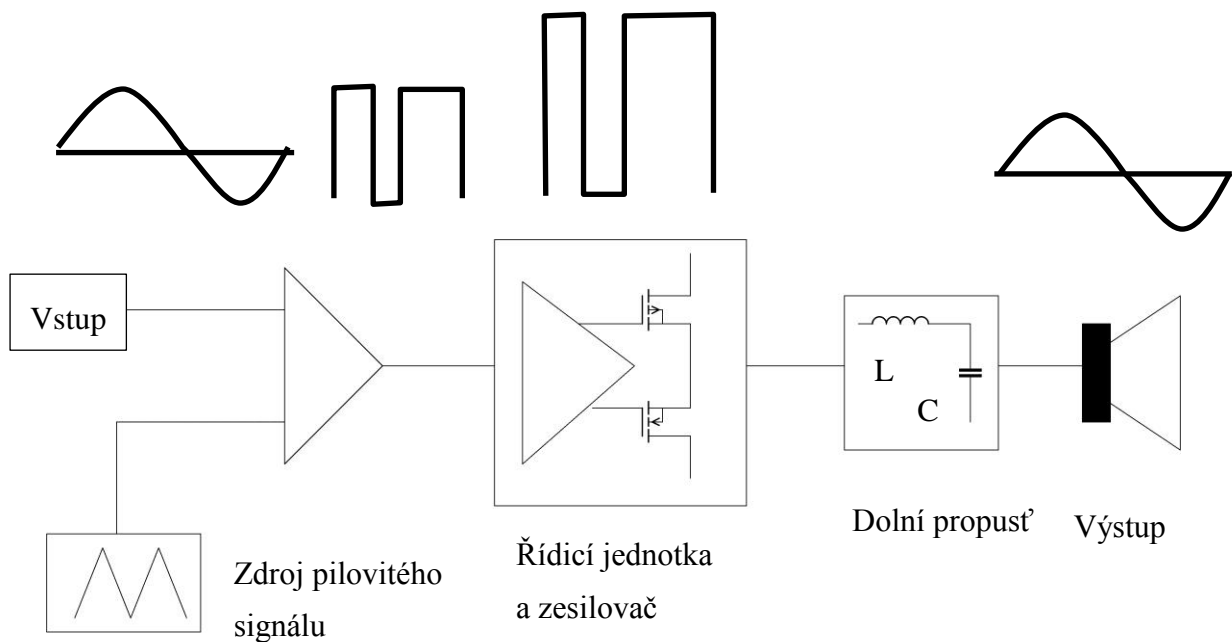
Obr. 7 Třída C [2]

Třída D

Třída D pracuje na principu pulsně šířkové modulace (dále jen PWM). Princip této třídy spočívá v transformaci vstupního signálu do vysokofrekvenčního pravoúhlého signálu jehož průběh je právě nositelem informace vstupního signálu. Po jeho zesílení a integraci skrze dolní propust', se na výstupu objeví zesílený původní analogový signál.

Největší výhodou této třídy je její účinnost, která se může pohybovat až nad hranicí 90% a v posledních letech i uspokojivou kvalitou výstupu v mnoha ohledech srovnatelnou s třídou AB.

Nevýhodou je však to, že pro správné zpracování vstupního signálu musí mít pravoúhlý signál více než desetinásobnou frekvenci. Tzn.: pro 20 kHz musí mít pravoúhlý průběh frekvenci alespoň 200 kHz. I když se první zesilovače této třídy objevily již ve čtyřicátých letech 20. století, první použitelné zesilovače se objevili na trhu až v letech osmdesátých. Hlavním problémem byla rychlost obvodů pro zpracování signálu, a proto byla tato třída používána hlavně pro nízké frekvence. S rostoucími možnostmi techniky se použitelnost těchto zesilovačů zvyšuje. Stále však dosahuje při nejvyšších frekvencích velkého zkreslení, kdy výstupní sinusový signál se stále podobá více pravoúhlému než vstupnímu sinusovému. Nevýhodou je i technická náročnost, jejich servis a cena. [4]



Obr. 8 Třída D [2]

Ostatní třídy

Existují i další třídy zesilovačů, buďto se pro audio oblast nevyužívají nebo jsou to modifikace tříd základních, a proto nejsou pro tuto práci dále důležité. Uvedu tedy jejich stručný seznam.

- E – Používá se pro snížení spotřeby v tranzistorech pomocí radiové frekvence. V nízkofrekvenčních aplikacích se nepoužívá. [4]
- G a H – Tyto třídy jsou modifikacemi třídy AB a B. Jde především o pokusy zvýšit jejich účinnost. Někdy bývají milně či záměrně klamavě pokládány za vylepšenou třídu D.
- T – Modifikace třídy D firmou Tripath Technology Inc., jde o změnu střídání PWM a nosné frekvence.

Třída této práce

Pro tuto práci jsem vybral třídu AB z těchto důvodů: menší náročnost na zapojení a kvalitu součástek, vysoká účinnost -> nízké nároky na napájení a především chlazení, uspokojivá kvalita výstupu jak ve formě dosažitelných výkonů tak poměrně nízkému zkreslení a na závěr také cena.

2.5 Základní parametry zesilovačů

V této kapitole uvedu základní parametry zesilovačů, které se týkají i tohoto návrhu a které jsem kromě intermodulačního a přechodového zkreslení změřil na zrealizovaném návrhu.

Přenosové pásmo

Zesilovač má mít kmitočtovou charakteristiku 40 – 16 000 Hz s odchylkou ± 1 dB u lineárních vstupů a ± 2 dB u vstupu korigovaných. Průběh se vztahuje na referenční kmitočet 1 kHz. Při měření je regulátor hlasitosti na maximum, korekční potenciometry na minimum. Výstup je zatížen jmenovitou zátěží, na vstupu jsou náhradní vstupní impedance, dle tabulky. [5]

Zkreslení

- Přechodové zkreslení
Projevuje se jako zpoždění mezi půlvlnami sinusového signálu. Příklad zkreslení je uveden v kapitole Třída B.
- Harmonické zkreslení (THD)
Měření zkreslení se provádí při čistém sinusovém signálu na vstupu a tento signál se porovnává s výstupním. Jde tedy o změny ve tvaru výstupního signálu oproti vstupnímu. Nejobjektivnějším postupem měření je pomocí kmitočtového analyzátoru, kde zjistíme všechny vyšší harmonické složky. Na výpočet zkreslení se pak uplatní vzorec:

$$THD = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \dots + U_n^2}}{U_1} \cdot 100 [\%] \quad (1)$$

Kde: U_1 je efektivní hodnota základní složky.

U_{2-n} jsou efektivní hodnoty dalších harmonických složek.

Zkreslení vzniká na nelineárních součástkách v zesilovači, na výstupním signálu vznikají další kmitočtové složky – vyšší harmonické kmitočty, které jsou lichými či sudými násobky kmitočtu vstupního signálu.

Harmonické zkreslení sudými složkami není tak rušivé jako lichými a proto se např. lampové zesilovače zdají být někdy lépe hrajícími i když jejich zkreslení je mnohonásobně vyšší než u tranzistorových zapojení. Některá zkreslení jsou přímo žádoucí jako u kytarových zesilovačů. Nejrušivější bývá třetí harmonická složka. [5]

Norma DIN 45 500 říká, že:

- Předzesilovače smějí mít činitel zkreslení nejvýše 0.7 % v rozsahu kmitočtů 40 – 4000 Hz
 - Koncové stupně 0,7 % v rozsahu 40 – 12500 Hz
 - Výkonové zesilovače mají povoleno maximálně 1 %
- Zkreslení intermodulační

Na poslech bývá toto zkreslení nepříjemnější než např. nežádoucí harmonické. Především z toho důvodu, že složky intermodulačního zkreslení nemají žádný vztah k původnímu signálu, jako je to u harmonického.

Měří se tak, že je potřeba na vstup přivést dva signály, podle DIN 45 500 jsou to 250 Hz a 80000 Hz, kdy signál 250 Hz má mít čtyřikrát vyšší úroveň a zesilovač má být vybuzen na 80% výstupního výkonu. Maximální povolené zkreslení jsou 2%. [5]

Jmenovitý výstupní výkon

Je to výkon, který je zesilovač schopen odevzdat do zátěže při plném vybuzení zesilovače. Pro měření se používá sinusový signál a měření probíhá alespoň 10 minut. Podle normy DIN 45 500 nesmí zkreslení u koncových zesilovačů překročit 0,7 %, u výkonových 1 %. [5]

Výpočet výkonu:

$$P_{out} = \frac{U_{out}^2}{R_z} \text{ [W]} \quad (2)$$

P_{out} – výstupní výkon

U_{out} – výstupní napětí

R_z – impedance zátěže

Další druhy výkonů jako je hudební výstupní výkon a špičkový výstupní výkon nepovažují za důležité parametry, jelikož jde především o parametry papírové a bývají zneužívány pro klamavou reklamu. Nezahrnuje se totiž u nich především zkreslení zesilovače a jde především o parametry za podmínek, které při běžném užívání zesilovače nedosáhneme.

Někteří seriózní výrobci udávají výstupní výkon při velmi malých zkresleních až setin procenta.

Vstupní impedance zesilovače

Vstupní impedance zesilovače je mnohem vyšší než výstupní. Dříve se používala zapojení se vstupní impedancí v řádech kiloohmů až jednotek megaohmů. Tento způsob se ale časem ukázal jako méně vhodným, jelikož snadněji propouštěl vysokofrekvenční rušení či brum indukovaný transformátorem. Se zkvalitňováním součástek a příchodem monolitických integrovaných obvodů a operačních zesilovačů, se začala tato hodnota snižovat. Podle normy DIN 45 500 by měla být vstupní impedance 10 kΩ. Mnohdy je však o mnoho nižší. [5]

Výstupní impedance zesilovače

Jde o impedanci, která je závislá na konstrukci samotného zesilovače. Podle normy DIN 45 500 má být nanejvýš 1/3 zátěže, reálně se pohybuje v řádu miliohmů. Bývá obecně přijímán fakt, že čím nižší výstupní impedance zesilovače, tím bývá vyšší jakost reprodukce. Podmínka daná normou je i kmitočtové pásmo, ve kterém musí platit a to: 40 – 12500 Hz.

Měření probíhá tak, že bez zátěže vybudíme zesilovač na úroveň jmenovitého výkonu a pak připojíme zátěž. [5]

Vzorec pro výpočet:

$$Z_{OUT} = R_z \cdot \frac{U_2 - U_1}{U_1} [\Omega] \quad (3)$$

Z_{OUT} = vnitřní impedance

U_1 = napětí na výstupu se zátěží

U_2 = napětí na výstupu bez zátěže

R_z = zátěž

Vstupní citlivost

Vstupní citlivost zesilovače je maximální vstupní napětí, které je zesilovač schopen ještě zesílit bez výrazného zkreslení. Například, je-li vstupní citlivost 1,5 V, každé další zvyšování vstupního napětí již nebude mít vliv na zvýšení výkonu a zároveň bude výstupní signál silně zkreslen či ve formě obdélníkového signálu.

2.6 Integrované obvody

Jelikož se tato práce zabývá návrhem z integrovaných obvodů, záměrně neuvádím tranzistorová ani elektronková řešení.

Pro integrované obvody jsem se rozhodl z několika důvodů. Předně se jedná o jednoduchost takového návrhu, co se týče realizace, ale i měření. Současné integrované obvody jsou schopny nahradit celé stupně zesilovače včetně speciálních čipů komplexní ochrany reproduktorů. V takto navrženém obvodu je pak o mnoho snadnější nalézt chyby v zapojení nebo zdroje rušení, jelikož jeden čip v takovém případě nahrazuje celý blok, který je případně tvořen ze součástek, jako jsou tranzistory či elektronky. Dalším důvodem je relativně nízká cena takového návrhu, při které je možné dosáhnout vysokých výkonů, alespoň co se týče domácího audia, s relativně dobrými parametry. Tyto obvody jsou navíc vybaveny množstvím ochran, které zabezpečí, že se obvody nepoškodí špatným návrhem či neopatrným zacházením s měřicími přístroji nebo jiným zařízením. Pravděpodobnost zničení některé z důležitých součástek je tak velmi nízká. Zničit tranzistor či elektronku je naopak záležitost relativně snadná a může se také velmi prodražit, zvláště jedná-li se o elektronku.

Nevýhodou integrovaných obvodů je právě jejich velká integrace, v čípech může vznikat velké množství šumu, které se pak dostává na výstup. Tento šum také roste s teplotou, která je další nevýhodou výkonových integrovaných obvodů. Veškerá výkonová část je integrována v jednom čipu, jehož účinnost se pohybuje právě v rozmezích hodnot třídy AB, nejedná-li se o čipy pro třídu D. To znamená, že u čipu o maximálním výkonu 100 W a účinnosti 60 %, se veškerý ztrátový výkon rovná přibližně 167 W a ten je vyzářen z čipu ve formě tepla. Díky integrovaným tepelným ochranám se čip pravděpodobně nezničí, ale je jasné, že takovéto teplo je třeba z čipu odvést pomocí kvalitního chladiče. Řešení z diskrétních součástek toto nevyžaduje, pro elektronky stačí okolní vzduch a jsou-li použity tranzistory s vysokým ztrátovým výkonem, postačí jim malý hliníkový chladič.

Skutečně kvalitní a také drahé analogové audio zesilovače jsou však postaveny na tranzistorech, převážně MOSFETech. Současné integrované obvody stále ještě nejsou schopny dosáhnout stejných výsledků, jako kvalitní návrh z diskrétních součástek. Takovéto návrhy, aby byly skutečně lepší, ale vyžadují velké množství zkušeností a také praxe s návrhy audio zesilovačů.

Operační zesilovače

Operační zesilovače jsou tranzistorové integrované obvody. V audio technice se používají především napěťové diferenciální zesilovače. Tyto obvody tedy zesilují rozdílné napětí mezi vstupními svorkami a výstupní veličinou je zesílené napětí.

Existuje mnoho druhů a možností jejich použití. Používají se především v předzesilovačích, kde je možné s jejich pomocí vytvořit kvalitní aktivní filtry i vyšších řádů, nebo komplexní kmitočtové korektory, jako je například Baxandallův kmitočtový korektor. Dále se používají jako vstupní a výstupní zesilovače a také je možné je použít jako aktivní směšovače stereo signálu. V tomto návrhu, kromě předzesilovače, tvoří součást servo obvodů v koncovém stupni, kde slouží k integraci stejnosměrného napětí.

Operační zesilovače vyrábí snad každá společnost zabývající se polovodičovou technologií a existuje nepřehledné množství typů a jejich použití. Uvedu zde proto pouze pár známých zástupců, které jsem v návrhu buď uvažoval nebo je přímo použil.

TL082

Jde o velmi známý JFET operační zesilovač od společnosti Texas Instruments (dále TI). Velmi často se používá právě v předzesilovačích, na které jeho parametry bez problémů stačí. Jeho největší výhodou je však pořizovací cena, která se pohybuje okolo 20 Kč za kus. Má relativně vysokou rychlost přeběhu $13 \text{ V}/\mu\text{s}$ a vstupní napěťový offset 3 mV. Není-li aplikací vyžadován nízký vstupní offset, je lepší jej nepoužít díky vysoké náchylnosti ke zničení. Jeho rozsah napájení je běžných max. $\pm 18 \text{ V}$, ale je schopen pracovat i na $\pm 5 \text{ V}$, zpracovává-li signál s nízkým napětím kolem 1 V. [6]

LF412ACN, AD712

V případě LF412 se jedná o společnost TI, u AD jde o Analog Devices, jsou to však ekvivalenty. Jedná se o nízko offsetové JFET operační zesilovače. Hodí se tedy pro integrátory, jako jsou třeba servo obvody, pro vstupní zesilovače/buffery -> nevytváření napěťový offset vstupního signálu. Obvod AD712 je novější než LF412, dostupnější, levnější a také má některé parametry lepší. Obvod AD712 má vstupní offset $200 \mu\text{V}$, tedy o $300 \mu\text{V}$ nižší a má rychlost přeběhu o $10 \text{ V}/\mu\text{s}$ vyšší, tedy $20 \text{ V}/\mu\text{s}$. Obvod LF412 má mnoho druhů, s příponou ACN má však nejlepší parametry a také je relativně drahý, kolem 130 Kč a málo dostupný. AD712 má také mnoho druhů, ekvivalentem LF412ky je AD712JNZ, některé další mají nepatrně lepší parametry, jsou však již drahé a jako náhrada i zbytečné, vzhledem k ceně. Oba operační zesilovače disponují jednokanálovými, dvoukanálovými a v případě AD712 i čtyřkanálovými verzemi. [7]
[8]

OPA2134PA

Jedná se o operační zesilovač společnosti Burr-Brown, spadající pod TI. Uvádím jej zde pouze jako příklad, jedná se také o náhradu LF412, ale s větším množstvím využití a také je speciálně navržen pro audio aplikace. Na fotografiích mého návrhu jsou v obvodu zapojeny, bohužel mi byly dodány vadné kusy a tak jsem je využít nemohl. Jeho nejvyšší předností je nízký offset 0,5 mV, rychlost přeběhu 20 V/ μ s, ale především zkreslení až 0.00008%. Je tedy vhodný pro použití do předzesilovačů, kde poslouží pro návrh velmi kvalitních kmitočtových filtrů nebo integrátorů. V datasheetu jsou uvedeny i další příklady použití, tohoto návrhu se však netýkají. V návrhu předzesilovače jsem jej nepoužil, protože pro můj návrh bohatě stačí uvedené TL082. [9]

Speciální integrované obvody

Zde uvedu pár zástupců integrovaných obvodů pro audio aplikace. Některé z nich jsem pro návrh uvažoval, některé zde uvedu pouze jako příklad, kterým lze nahradit takřka celý blok zesilovače.

LM1036

Jedná se o integrovaný čip nahrazující celý korekční předzesilovač. Původně jej vyráběla společnost National Semiconductor, která nyní spadá pod TI. Pomocí tohoto čipu lze při doplnění nezbytnými potenciometry a několika diskrétními součástkami, jako jsou rezistory nebo elektrolytické kondenzátory pro blokadu stejnosměrného napětí, vytvořit celý stereo předzesilovač pro nezbytnou korekci zvuku: hlasitost, nastavení výšek, basů, balance (vyrovnávání hlasitosti kanálů), loudness – zvýraznění basů a výšek, které je příjemnější pro poslech. Tento obvod se hodí pro návrh minimalistického řešení zesilovače nebo pro aktivní PC reproduktory. V mém návrhu by byl ale zbytečný, díky malému množství korekcí, které můj návrh obsahuje. [10]

μ PC1237

Velmi známý, hojně využívaný, bohužel však hůře dostupný čip, vyráběný původně společností NEC, nyní Unisonic Technologies. Jedná se o komplexní ochranu zesilovače a reproduktorů. Jeho základní funkce jsou:

- Detekce stejnosměrného napětí.
- Detekce napěťových špiček a záskmitů ze zdroje napájení, zejména při zapínání zesilovače
- Ochrana proti přepětí.
- Časové zpoždění připojení výstupů pro startu zesilovače.

Tento obvod by se pro můj návrh velmi hodil v případě, že by součástí této práce byl i zdroj napájení. Jelikož tomu tak není, postrádá jeho použití smysl. [11]

TDA7293

Jedná se o jednokanálový výkonový integrovaný zesilovač třídy AB, který vyrábí společnost ST. Tento čip obsahuje základní ochranné prvky proti zkratu a proti přepětí. Také má několik užitečných funkcí. MUTE – odpojení výstupu, STAND-BY – automatické zapnutí, je-li na vstupu signál a lze jej zapojit paralelně s druhým TDA7293. Maximální výkon tohoto obvodu je 100 W s 10 % zkreslením. V můstkovém zapojení až 130 W opět s 10 % zkreslením. Není-li vyžadován vysoký výkon, je tento obvod velmi dobrým řešením pro malé aktivní reproduktory či subwoofer a zároveň při využití tohoto obvodu na nízkém výkonu, lze jeho zkreslení udržet na přijatelné hodnotě. Díky vysokému zkreslení, které je výrazně nad rámec cíle, který jsem si stanovil, a zároveň díky tomu, že s ním nejsem schopen dosáhnout výkonu až 200 W, jsem jej pro návrh zamítl. [12]

LME49810, LME49830

Tyto integrované obvody slouží pro návrh výkonových zesilovačů třídy AB, fungují jako řídicí obvody pro koncové páry tranzistorů. V případě LME49810 pro bipolární, LME49830 pro MOSFETy. Tyto obvody jsou schopny uřídit až několik párů tranzistorů, jejich počet se volí dle toho, jakého výkonu má být dosaženo. Pro můj návrh by stačily 2 – 3 páry. Zároveň by měl takovýto návrh velmi nízké zkreslení.

Nejprve jsem uvažoval o tomto řešení. Nakonec jsem jej však musel zavrhnout a to díky ceně. Aby toto zapojení mělo smysl, jsou potřeba kvalitní výkonové tranzistory na výstupu. Dle aplikační poznámky AN-1850 se jedná o staré TOSHIBY 2SK1530 a 2SJ201, jejich ekvivalentem jsou IRFP260 a IRFP240, kde se každý pohybuje v ceně okolo 120 – 150 Kč. V případě jakéhokoliv poškození či zničení tranzistorů by pak výrazně stoupala cena realizace. Všechny tyto tranzistory mají zároveň vysoký ztrátový výkon, jenž pak klade vysoké nároky na chlazení, právě díky vyzářenému teplu. [13] [14] [15]

Abych doplnil teorii o třídění zesilovačů do tříd, uvedu zde ještě dva velmi zajímavé integrované obvody od TI, ze kterých lze sestavit zesilovač třídy D. Jedná se o obvod TAS5508C, který slouží jako PWM procesor, tedy pro pulsně šířkovou modulaci vstupního signálu, a o obvod TAS5631B, který právě zesílí výstup z PWM procesoru a je schopen dodat až 300 W do 4 i 8 Ω zátěže. [16] [17]

LM3886T/TF

Pomocí tohoto obvodu je právě vytvořen návrh této práce, jeho popis je tedy uveden v kapitole Návrh koncového stupně.

3. Návrh předzesilovače

Jako první část návrhu je předzesilovač, kterýžto považuji za soubor jednotlivých částí znázorněných v blokovém schématu. Funkcí předzesilovače je především upravit signál ze zdroje a mírně jej zesílit pro koncový stupeň, tak aby jeho maximální výstupní napětí při maximálním zesílení odpovídalo vstupní citlivosti koncového stupně. Je sice možné signál předzesilovačem zesílit na vyšší napětí, než je citlivost koncového stupně, ten však na toto již nebude reagovat a jeho zesílení zůstane neměnné.

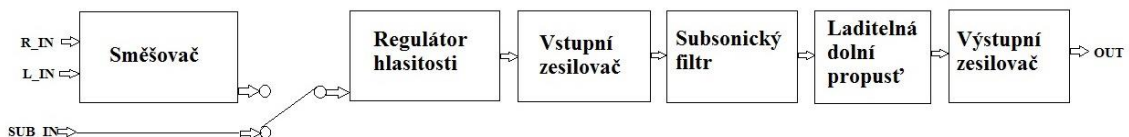
Jeho součástí bývají korekce vyvážení, zesílení, korekce frekvencí atd. Některé předzesilovače mají speciální charakteristiku pro dané vstupní zařízení. Toto především platí pro gramofony s různými druhy přenosků a magnetofony.

Jako hlavní součástku pro předzesilovač jsem vybral operační zesilovač TL082. Zejména díky jeho ceně, dostupnosti a pro předzesilovač i dostačujícím parametrům. [6]

3.1 Blokové schéma

Níže uvádím blokové schéma mého návrhu předzesilovače. Obsahuje všechny nezbytné komponenty pro správnou úpravu signálu pro koncový stupeň subwooferu.

Spousta subwooferů postrádá možnost připojení stereo signálu a zaměřuje se pouze na mono vstup z A/V zesilovače. Z toho důvodu jsem se rozhodl pro návrh se třemi vstupy, kdy R_IN a L_IN slouží pro stereo vstup a SUB_IN pro vstup z A/V zesilovače.



Obr. 9 Blokové schéma

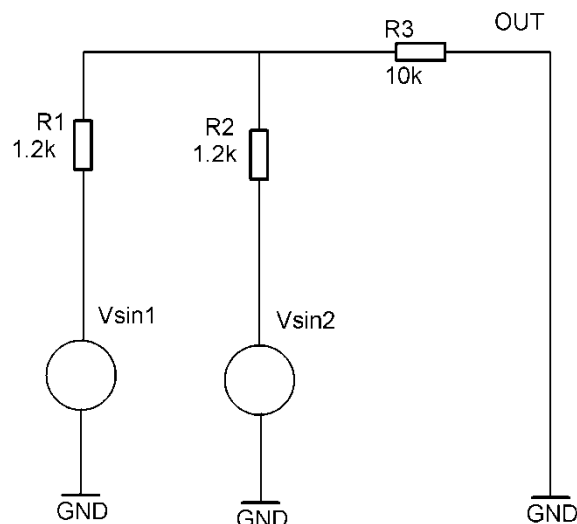
3.2 Návrh jednotlivých bloků

Směšovač

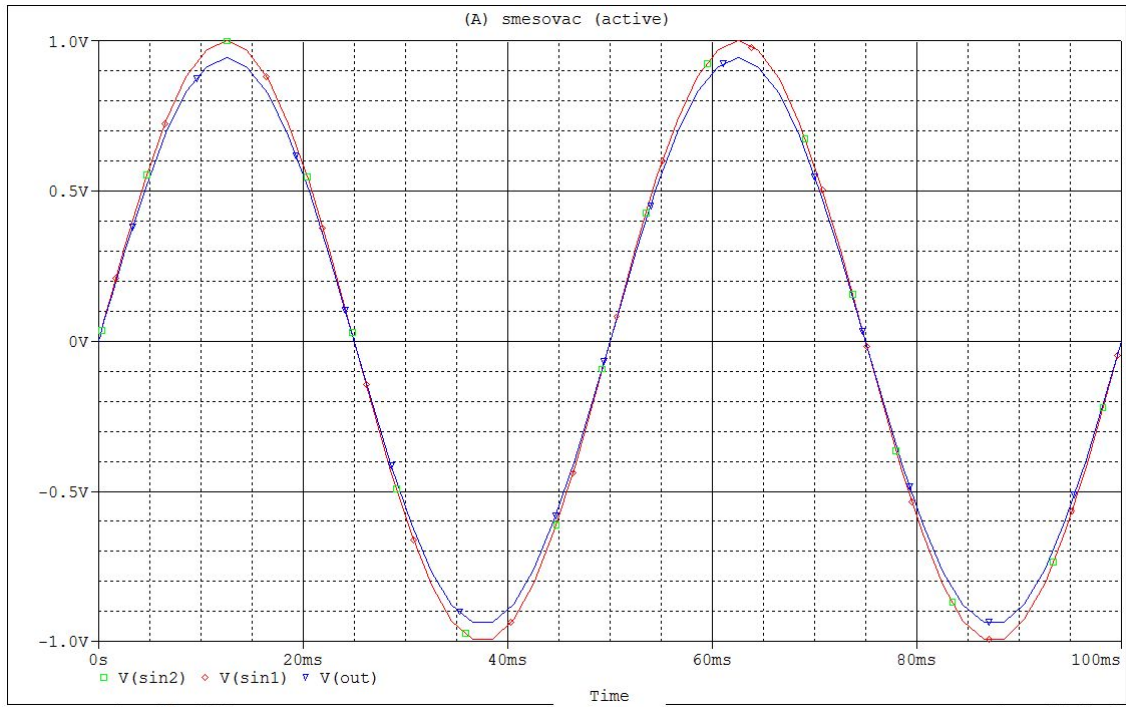
Směšovač či slučovač signálů slouží ke spojení dvou či více signálů do jednoho. Realizace směšovače se původně prováděla pomocí elektronek se šesti a sedmi elektrodami, tedy hexod a heptod. Nyní se používá ke směšování signálu buď operačního zesilovače v součtovém zapojení, nebo odporového sčítání. U odporového řešení není za potřeby aktivní součástky a tedy ani napájení. Avšak je-li použito pasivní sčítání signálů pomocí rezistorů, je třeba tento směšovač od dalších částí obvodů impedančně oddělit pomocí vstupního zesilovače. [18]

Inspiroval jsem se zapojením z [18], kde jsem hodnoty odporů nastavil na 1,2 k Ω . V simulaci jsem si potvrdil jeho funkčnost, kdy jsem na vstup připojil prvně dva zdroje sinusového signálu o stejné amplitudě 1 V a frekvenci 20 Hz, abych zjistil, zda je v tomto případě výstup stejný jako jeden ze vstupních signálů.

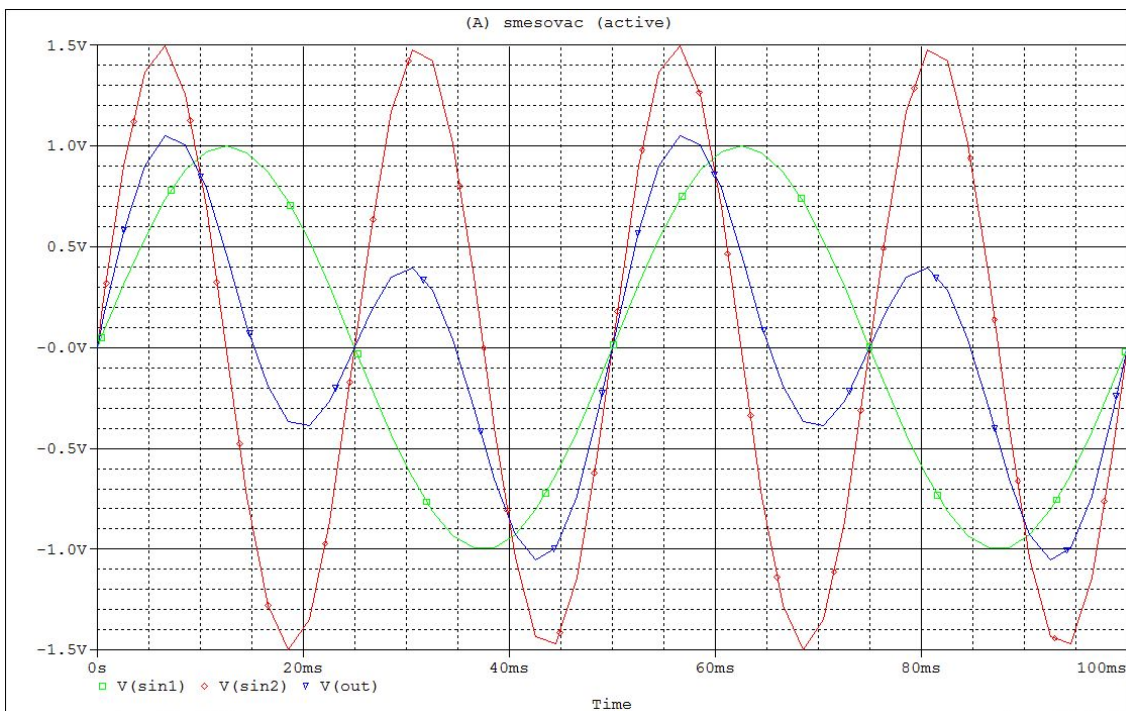
U druhého zapojení jsem u jednoho ze zdrojů změnil amplitudu na 1,5 V a frekvenci 40 Hz.



Obr. 10 Schéma směšovače



Obr. 11 Časová charakteristika směšovače se stejnými vstupy



Obr. 12 Časová charakteristika směšovače s rozdílnými vstupy

Regulátor hlasitosti

Je připojen mezi směšovač a vstupní zesilovač. Určuje nejen zesílení, ale i vstupní impedanci předzesilovače, která činí 10 k Ω .

Regulátor hlasitosti je také možné připojit na vstup koncového stupně a doplnit jej o subsonický filtr. Jelikož je tento filtr v předzesilovači již navržen, není jej u potenciometru zapotřebí

Jako regulátor hlasitosti pro mono zesilovač jsem vybral logaritmický potenciometr o odporu 10 k Ω .

Logaritmické potenciometry se pro regulaci hlasitosti používají díky jejich charakteristice, která je ze začátku velice strmá a zesilování je tak pro lidské ucho příjemnější. [18]

Vstupní zesilovač

Vstupní zesilovač tvoří impedanční oddělení pasivního směšovače a zároveň zesílení vstupního signálu na hodnotu 1 V. Zesílení je tedy 1,29krát, jelikož jmenovité výstupní napětí většiny přehrávačů a tedy i linkových výstupů zesilovačů je 0,775 V. [18]

Nastavení maximálního zesílení jsem provedl pomocí simulace v PSpice, kde jsem hledal maximální hodnotu vstupního napětí, při kterém je koncový stupeň vybuzen na 200 W.

Subsonický filtr

Subsonický filtr slouží jako ochrana reproduktoru před nízkými frekvencemi od cca 20 Hz níže u subwooferů, které není měnič schopen zahrát a které by mohly měnič poškodit či dokonce utrhnout membránu ze závěsů. Tyto frekvence zároveň mohou výrazně zatěžovat zesilovač. Subsonický filtr slouží zároveň jako ochrana před stejnosměrným napětím.

Subsonický filtr je filtr typu horní propust'. Doporučuje se pokles 18 dB/okt. či 60dB/dek, tedy filtr 3. řádu. [19]

Filtr jsem navrhl tak, aby mezní frekvence byla přibližně 20 Hz. Jedná se tedy o aktivní horní propust' třetího řádu v zapojení Sallen-Key. Pro výpočet hodnot jsem využil online návrhového systému [20], které jsem pak ověřil v programu OrCAD PSpice.

Hodnoty součástek tedy jsou:

$$C_1, C_2, C_3 = 1 \mu\text{F}$$

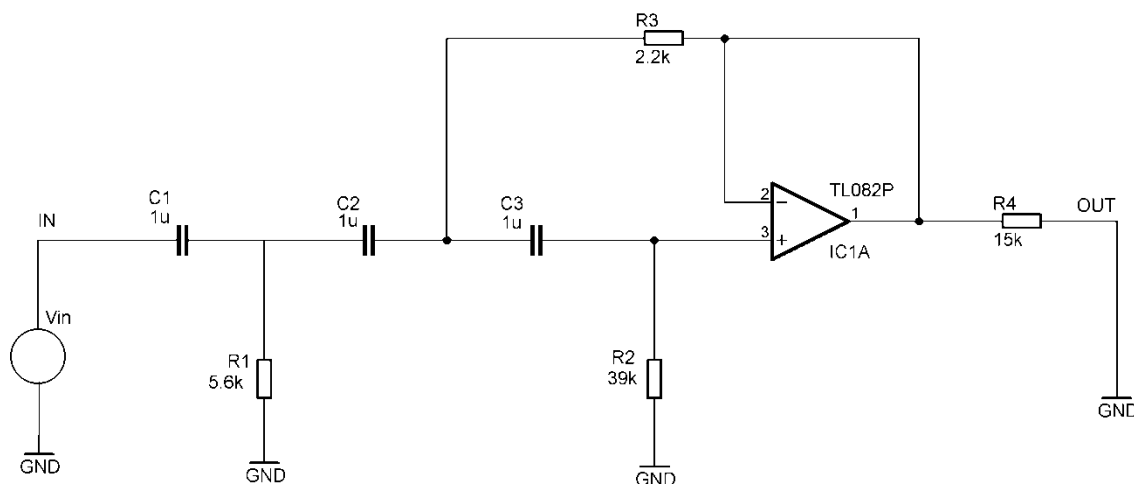
$$R_1 = 5,6 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 39 \text{ k}\Omega$$

$$R_3 = 2,2 \text{ k}\Omega$$

Operační zesilovač TL082. Symetrické napájení $\pm 15 \text{ V}$.

Dle simulace je mezní frekvence $f_0=20,27 \text{ Hz}$.



Obr. 13 Schéma subsonického filtru

Laditelná dolní propust'

Tato část předzesilovače slouží k ladění subwooferové jednotky tak, aby byla sladěna se zbytkem reproduktorové soustavy. Typicky u levnějších vícekanálových systémů, kde jsou přední reproduktory ošizeny na nízkých tónech, je subwoofer laděn výše než při zapojení u stereo sestavy, kde hraje spíše doplňující roli.

Filtr jsem navrhl jako sledovač napětí, aby signál nezesiloval, což si vyžádalo i úpravu hodnot součástek tak, aby byla frekvenční přenosová charakteristika co nejvyrovnanější. Rozsah možného nastavení mezní frekvence podle měření v OrCAD PSpice je 53 Hz – 330 Hz. Regulace se provádí dvojnásobným lineárním potenciometrem s impedancí 50 k Ω . Hodnoty filtru jsou opět navrženy pomocí online návrhového systému [20] a ověřeny simulací.

Jedná se o aktivní dolní propust' 2. řádu v zapojení Sallen-Key. Pokles je tedy 40dB/dek. či 12 dB/okt. [19]

Hodnoty součástek:

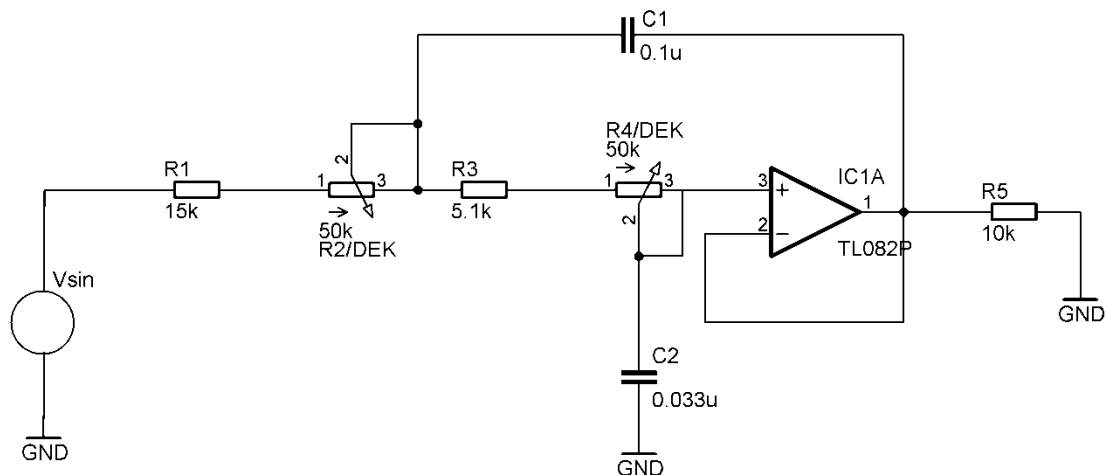
$$C_1 = 0,1 \mu\text{F}$$

$$C_2 = 0,033 \mu\text{F}$$

$$R_1 = 15 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 5,1 \text{ k}\Omega$$

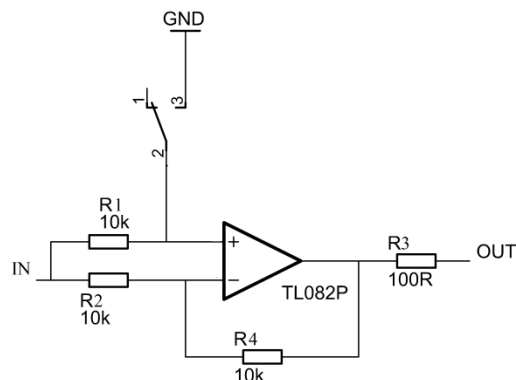
Operační zesilovač TL082. Symetrické napájení $\pm 15 \text{ V}$.



Obr. 14 Schéma laditelné dolní propusti

Výstupní zesilovač

Výstupní zesilovač je poslední komponentou v předzesilovači. S jeho pomocí je možné otočit fázi signálu o 180°. Lze jej provést i pomocí dvou operačních zesilovačů, kdy je jeden zapojen jako invertující a druhý jako neinvertující a přepínání mezi nimi. Zde použité zapojení je však o mnoho úspornější a v této aplikaci i funkční.



Obr. 15 Schéma výstupního zesilovače

4. Návrh koncového stupně

Koncový či výkonový stupeň je samostatný blok obvodu, který zajišťuje samotné zesílení signálu. V tomto obvodu by signál neměl být již nijak měněn, o tuto funkci se stará především předzesilovač. Na vstup koncového stupně se častokrát zapojuje i potenciometr pro nastavení úrovně zesílení. V tomto případě je však připojen na vstup předzesilovače.

Jak jsem již uvedl, rozhodl jsem se pro řešení s integrovanými obvody. Zejména díky jednoduchosti zapojení, a také proto, že pro dosažení stejných či lepších výsledku pomocí zapojení z čistě diskrétních součástek je třeba hodně zkušeností s návrhem zesilovačů. Proto jsem hledal integrovaný obvod, se kterým bych docílil výkonu cca 200 W na 8 Ω zátěž s dostatečně nízkým zkreslením pod 0,1 % THD. Obvod TDA7293 od ST jsem musel zavrhnout, protože s ním lze v můstkovém zapojení dosáhnout maximálně cca 130 W, ale s 10 % zkreslením THD. Dalším možností byl obvod LME49830 od TI, který slouží k buzení MOSFETů zapojených v páru. S tímto obvodem lze dosáhnout velmi vysokých výkonů při současně malém THD. Nakonec jsem se však rozhodl pro obvod LM3886T od TI. V jeho prospěch hraje především cena, za kterou s ním lze dosáhnout výkonu 200 W na 8 Ω zátěži s nízkým zkreslením.

Můj návrh vychází z aplikační poznámky AN-1192 zapojení BPA200. Jedná se o řešení pomocí můstkově/paralelního zapojení čtyř obvodů LM3886T. Což znamená, že v můstku jsou na sebe zapojeny dva bloky, kde každý z nich je tvořen paralelním zapojením dvou obvodů LM3886T. Dle aplikační poznámky lze s tímto řešením dosáhnout výše zmíněných 200 W na 8 Ω při zkreslení průměrně 0,001 % THD. Jedná se však o hodnoty naměřené v ideálních podmínkách výrobcem, ve skutečnosti takto nízkých hodnot nelze běžně dosáhnout

V rozsahu 20 Hz až 300 Hz, které je současně pracovním rozsahem návrhu pro subwoofer, zůstává zkreslení konstantní a zvyšuje se až s rostoucí frekvencí od 1 kHz, což je již mimo rozsah této práce. [14] [21] [22]

4.1 LM3886T

Jedná se o integrovaný jednobandový zesilovač třídy AB od společnosti Texas Instruments. Používá se pro zesilování nízkofrekvenčních signálů, hodí se tedy pro audio aplikace. Obvod LM4780 je prakticky stejný, má však dva kanály. Je schopen dodat stabilní výkon 50 W na 8 Ω nebo 68 W na 4 Ω při zkreslení 0,1 % THD. Hodí se tedy pro aktivní studiové monitory, kde je každý reproduktor zesilován zvlášť, nebo pro aktivní počítačové reproduktory, kde můžeme využít LM4780 pro satelity a LM3886 pro subwoofer. Návrh s tímto obvodem nevyžaduje žádné velké množství dalších součástek, obvod a tedy i deska plošných spojů může mít na poměry zesilovačů velmi malé rozměry. Je také relativně málo náročný na napájení a chlazení, není-li plně vybuzen. Tento obvod lze také spojovat paralelně či do můstku pro zvýšení výkonu. Nejvyššího výkonu se dosáhne právě výše zmíněným můstkově/paralelním zapojením. Jeho cena se pohybuje okolo 130 Kč.

LM3886 v sobě obsahuje i základní ochranné obvody proti zkratu na výstupu, proti přepětí na výstupu a proti přehřátí, kdy obvod při překročení teploty 156 °C odpojí výstup a obvod dále nepracuje, neklesne-li teplota pod 155 °C.

Další funkcí obvodu je i MUTE. Slouží k odpojení výstupu od obvodu. Bohužel, i když jsem neměl v plánu funkci MUTE používat, tento obvod neumožňuje pouze ignorování příslušného pinu a pro svou funkci vyžaduje stálé záporné napětí na příslušném pinu tak, aby z obvodu tímto pinem tekla stálý záporný proud větší nebo roven 0,5 mA. Užitečná by byla funkce STAND-BY, bohužel oproti obvodu TDA7293 jím LM3886 nedisponuje. [21]

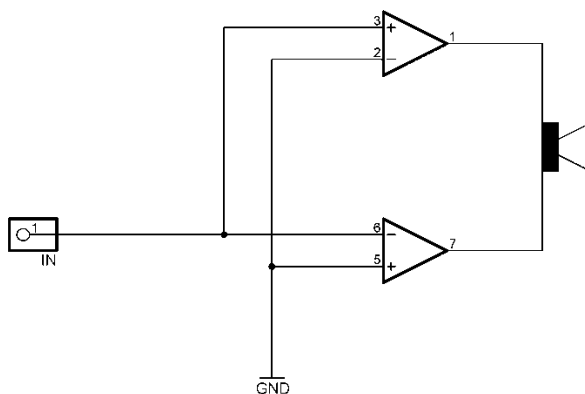
4.2 Můstkové a paralelní zapojení

Obojího se používá ke zlepšení vlastností návrhu, který by jinak vycházel ze zapojení jediného obvodu. Většinou se tato zapojení týkají integrovaných audio zesilovačů jako LM3886 či TDA7293. U obou zapojení je zapotřebí identických obvodů. Zapojování rozdílných obvodů do můstku či paralelně je nežádoucí, pokud by vůbec fungovalo.

Můstkové zapojení

Jedná se o zapojení dvou identických integrovaných obvodů, pokud to jejich konstrukce umožňuje. Pomocí tohoto zapojení lze dosáhnout vyšších výkonů než v případě samostatného obvodu. První zesilovač je zapojen jako neinvertující, druhý jako invertující. Zesilovače tedy pracují v protifázi, kdy každý z nich má stejně zesílení. Na zátěži je pak napětí, které je rozdílem mezi výstupy obou zesilovačů. Například je-li na

výstupu prvního +10 V a na výstupu druhého -10 V, na zátěži je +20 V. Znamená to, že pomocí můstkového zapojení dvou zesilovačů lze dosáhnout minimálně dvojnásobného výkonu. Nevýhodou jsou však vyšší ztrátové výkony a s tím roste také náročnost na chlazení.

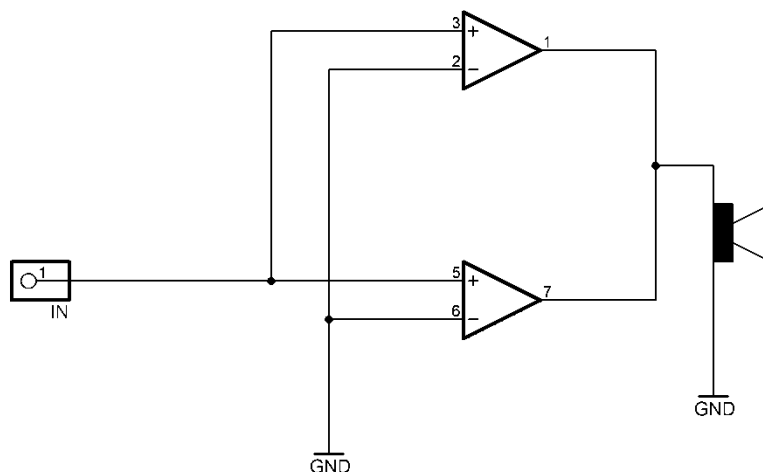


Obr. 16 Můstkové zapojení

Paralelní zapojení

Paralelního zapojení se používá především ke snížení ztrátového výkonu nebo není-li samostatný integrovaný obvod schopen řídit nízkou impedancí na zátěži. Napětí na výstupu zůstává oproti můstkovému zapojení stejné, výstupní proud je však rozdělen mezi oba obvody, stejně tak impedance zátěže. Například, máme-li na výstupu 4Ω zátěž, z pohledu každého z obvodů je na výstupu 8Ω .

U paralelního zapojení je důležité, aby byl zajištěn ideálně nulový offset na výstupním napětí. Není-li toto nijak ošetřeno, roste nežádoucí proud, který proudí mezi výstupy zesilovačů a zvyšuje ztrátový výkon. Tento problém se řeší buďto velice přesnými 0,1 % elektrolytickými kondenzátory a rezistory nebo pomocí servo obvodů, které snižují výstupní napěťový offset zesilovačů na minimum.



Obr. 17 Paralelní zapojení

Můstkově-paralelní zapojení

Jedná se o kombinace výše zmíněných zapojení a je zároveň i zapojením této práce. Jde o skloubení jejich výhod. V můstku jsou na sobě zapojeny dva páry paralelně zapojených zesilovačů. Kdy můstkové zapojení zajišťuje dostatečné zvýšení výkonu, paralelní obvody zároveň kompenzují ztrátové výkony, které můstkovým zapojením narostly.

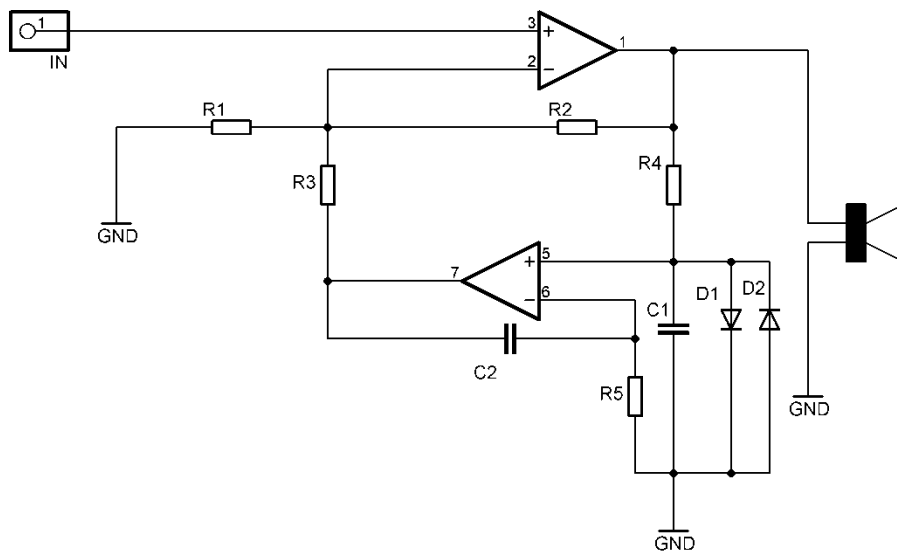
Servo obvody

Používají se ke snižování výstupního napětového offsetu zesilovačů na co nejnižší hodnotu, ideálně na nulu. Jeho funkcí je integrace stejnosměrného napětí z výstupů obvodů LM3886 a toto integrované napětí je pak posláno zpět do vstupu LM3886 opačné polarity, než je vstup, do kterého je přiveden signál.

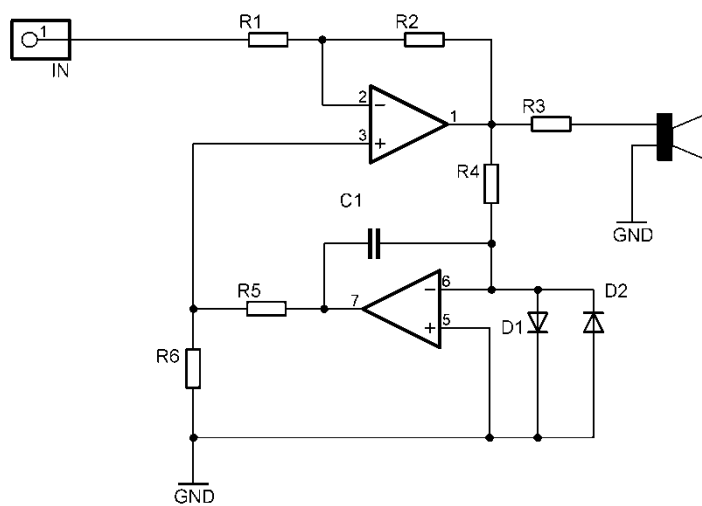
Pro servo obvod jsou kritické operační zesilovače s minimálním vstupním napětovým offsetem, jako je například výše uvedený operační zesilovač LF412ACN. Lze tedy použít i ekvivalenty, které jsou v současnosti i levnější a častokrát s lepšími parametry, než má dnes již poměrně starý LF412. Je však důležité, aby pro invertující i pro neinvertující servo obvod byly použity stejné operační zesilovače. Je-li použit každý jiný, výstupní offset se spíše zvýší, než sníží.

Operační zesilovače s nízkým vstupním offsetem jsou zároveň velmi náchylné na napětové špičky na vstupech a také na kvalitu napájení, k jejich zničení může proto dojít bez potřebné ochrany velice rychle.

Servo obvodu je třeba pro každý integrovaný zesilovač, který je zapojen paralelně. [22]



Obr. 18 Neinvertující servo obvod



Obr. 19 Invertující servo obvod

4.3 Změny návrhu oproti AN-1192

Oproti aplikační poznámce AN-1192, doznal návrh pouze několika drobných změn. Na vstupu jsem vynechal subsonický filtr, který je již součástí předzesilovače, není jej tedy již zapotřebí. Oddělení od předzesilovače je provedeno pomocí vazebního rezistoru 100 Ω na výstupu předzesilovače.

Další změnou jsou výstupní výkonové rezistory, které mají v aplikační poznámce hodnotu 0,1 Ω . Vybral jsem vyšší hodnotu 0,22 Ω , která by měla zajistit nižší šum na výstupech zesilovače. Hodnota 0,1 Ω navržená v AN-1192 předpokládá ideální charakteristiky a bezchybnost součástek v obvodu. Proto se doporučuje hodnota vyšší v rozsahu 0,22 – 0,33 Ω .

Další funkcí návrhu je funkce MUTE, jež vyžaduje rezistor, který se vypočítá dle následujícího vztahu:

$$R_{MUTE} = \frac{(|V_{EE}| - 2,6)}{I_{MUTE}} [\Omega] \quad (4)$$

V_{EE} Záporné napájení obvodu LM3886T

I_{MUTE} Proud tekoucí z pinu MUTE, musí být $I_{MUTE} \geq -0,5$ mA

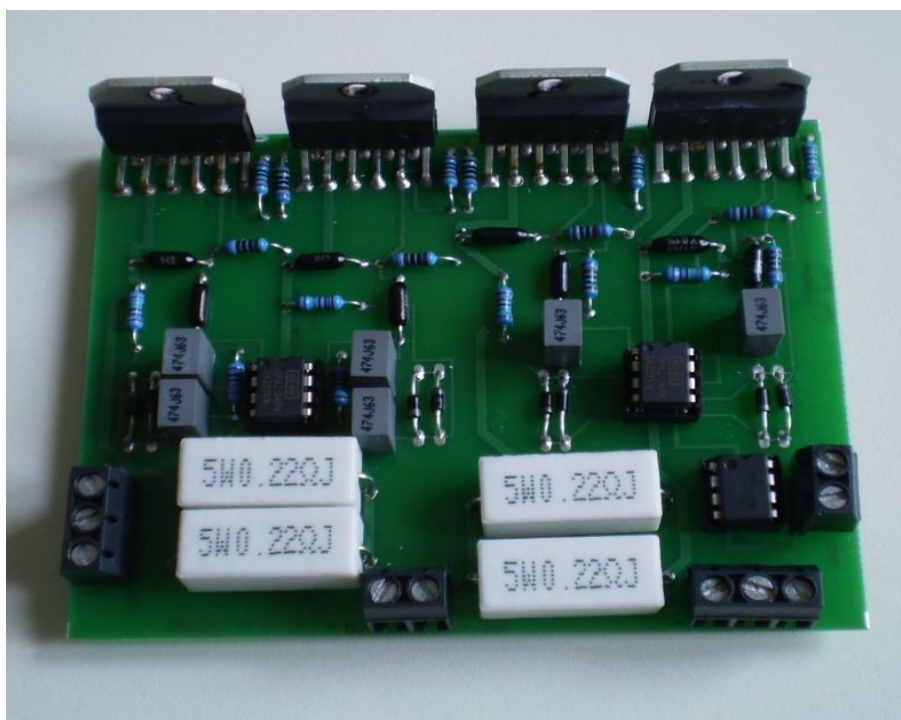
R_{MUTE} Rezistor nastavující funkci MUTE

Funkci MUTE používat nehodlám, proto přepínač, který by zkratoval pin MUTE na zem a odpojil tak vstupní signál od integrovaného obvodu LM3886, záměrně vynechávám. Avšak pro funkci obvodu je nezbytné, aby z pinu MUTE tekla stálý záporný proud vyšší než -0.5 mA. Proto v obvodu používám rezistor 20 k Ω , který zajistí při napájení ± 30 V stálý proud 1,37 mA a zároveň i při použití nižšího napájecího napětí bude z pinu MUTE téct proud, který bude stále vyšší než hodnota -0.5 mA.

5. Realizace

Oba stupně zesilovače byly zrealizovány na desce plošných spojů včetně všech nezbytných ovládacích prvků a konektorů. Již při spuštění testovacího modelu ze semestrálního projektu bylo jasné, že koncový stupeň bude vyžadovat kvalitní chlazení. LM3886 sice disponují tepelnými ochranami, přesto rostoucí teplota může v obvodech způsobovat další šum, který se objeví pak na výstupu a může také dojít k poškození samotné desky či součástek, které jsou nejbližší integrovaným obvodům. Je-li chladič dobře nevržen a z dobrého teplovodného kovu, jako je například měď, bude nejspíše stačit pasivní chlazení, avšak díky ceně měděného chladiče bude spíše lepším řešením doplnit klasický hliníkový chladič pomaloběžným ventilátorem, který by dostatečně chladil a zároveň nerušil svou hlučností. Jedná se ale o předpoklad, že zesilovač poběží dlouhodobě na maximální výkon. Při běžném domácím poslechu s největší pravděpodobností bude stačit chlazení pasivní případně doplnění o tepelnou pojistku, která zabrání poškození desek.

Pokud se jedná o obvody LM3886T, znamená to, že je tato součástka neizolována a že její zadní strana, strana pro chladič, je připojena na záporné napájení. Proto při případném zakomponování obvodu s chladičem do skříně je třeba tento chladič odizolovat od okolních kovových předmětů. Izolovaná verze, avšak skoro dvojnásobné ceny, se označuje LM3886TF.



Obr. 20 Fotografie koncového stupně

5.1 Měření parametrů předzesilovače

Omezení při měření

Měření parametrů mého návrhu zesilovače bylo do značné míry omezeno technickým vybavením v laboratoři dostupným pro měření. Bylo-li měření některého parametru omezeno vybavením, bude konkrétně uvedeno kterým zařízením a jak bylo měření omezeno. Jednalo se o tato zařízení:

1. Maximální příkon laboratorních zdrojů.
2. Nekvalita dostupné výkonové zátěže.
3. Omezení osciloskopu, kde hrozilo nebezpečí jeho poškození dalším zvyšováním výstupního napětí.
4. Maximální výstupní napětí generátoru.

Hodnoty byly měřeny pomocí osciloskopu a multimetru.

Maximální zesílení předzesilovače

Při vstupním jmenovitém napětí $U=0,775$ V byla na výstupu naměřena hodnota $U=1$ V. Tato hodnota odpovídá teoretickému předpokladu a simulacím v OrCAD PSpice.

Harmonické zkreslení předzesilovače

Tuto hodnotu jsem nebyl schopen účinně změřit, jelikož rozlišovací schopnost Fourierovy transformace dostupného osciloskopu nebyla pro měření dostatečná a hodnoty harmonických složek by byly pouze v rámci dohadu. Podstatnější je hodnota zkreslení koncového stupně.

Frekvenční a fázová charakteristika předzesilovače

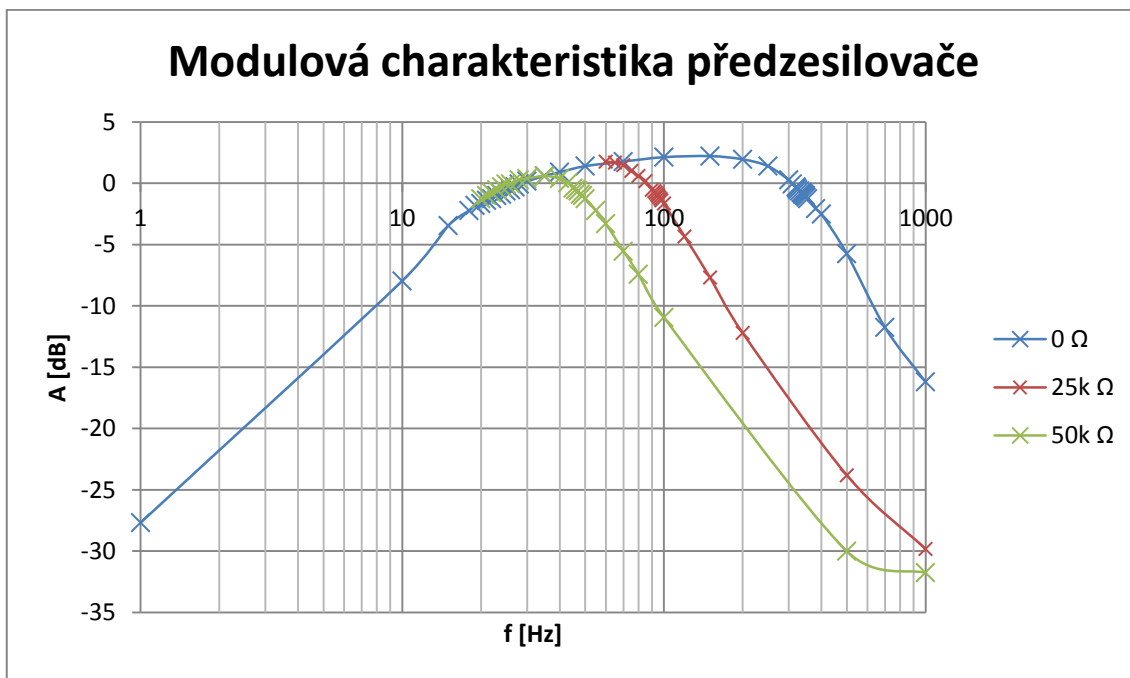
Měření probíhalo při vstupním napětí $U=0,775$ V a při maximálním zesílení předzesilovače (potenciometr hlasitosti v krajní poloze). Charakteristiky byly měřeny ve třech polohách potenciometru pro nastavení mezní frekvence dolní propusti a to: cca 0Ω , $25\text{ k}\Omega$ a $50\text{ k}\Omega$. Charakteristika při $0\ \Omega$ byla změřena celá, další dvě charakteristiky byly změřeny pouze od bodu, kde již končí charakteristika subsonického filtru.

Přibližné hodnoty frekvenčního rozsahu:

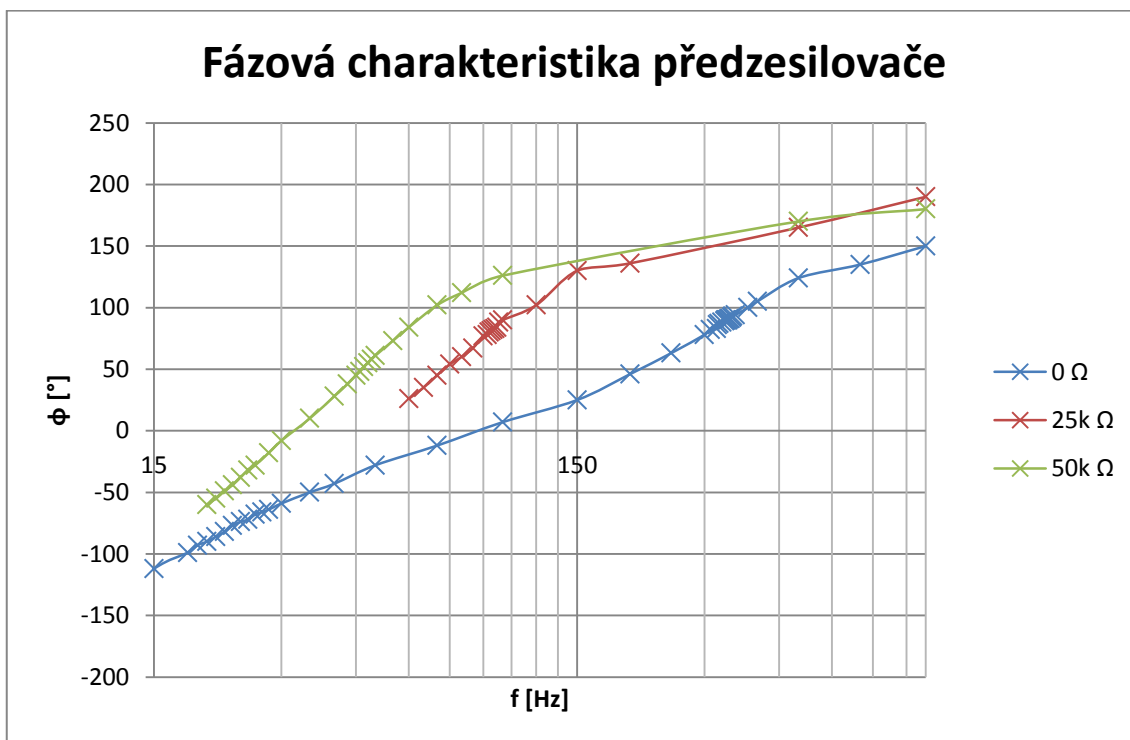
- $0\ \Omega$: 24 Hz – 335 Hz
- $25\text{ k}\Omega$: 24 Hz – 97 Hz
- $50\text{ k}\Omega$: 24 Hz – 55 Hz

Tabulka 1 Tabulka hodnot frekvenční charakteristiky předzesilovače

| 0 Ω | | | 25k Ω | | | 50k Ω | | |
|------------|----------|------------|--------------|----------|------------|--------------|----------|------------|
| f [Hz] | Uout [V] | ϕ [°] | f [Hz] | Uout [V] | ϕ [°] | f [Hz] | Uout [V] | ϕ [°] |
| 1 | 0,032 | -170 | 60 | 0,95 | 26 | 20 | 0,67 | -60 |
| 10 | 0,31 | -158 | 65 | 0,94 | 35 | 21 | 0,69 | -55 |
| 15 | 0,52 | -112 | 70 | 0,92 | 45 | 22 | 0,71 | -49 |
| 18 | 0,6 | -99 | 75 | 0,87 | 54 | 23 | 0,73 | -44 |
| 19 | 0,63 | -93 | 80 | 0,83 | 60 | 24 | 0,75 | -38 |
| 20 | 0,64 | -90 | 85 | 0,79 | 67 | 25 | 0,77 | -32 |
| 21 | 0,66 | -86 | 90 | 0,73 | 77 | 26 | 0,77 | -28 |
| 22 | 0,67 | -82 | 92 | 0,72 | 78 | 28 | 0,8 | -18 |
| 23 | 0,69 | -77 | 93 | 0,71 | 80 | 30 | 0,81 | -8 |
| 24 | 0,7 | -74 | 94 | 0,7 | 81 | 35 | 0,83 | 10 |
| 25 | 0,72 | -72 | 95 | 0,69 | 82 | 40 | 0,81 | 28 |
| 26 | 0,73 | -68 | 96 | 0,68 | 83 | 43 | 0,78 | 38 |
| 27 | 0,75 | -66 | 97 | 0,67 | 84 | 45 | 0,74 | 45 |
| 28 | 0,77 | -64 | 98 | 0,66 | 88 | 46 | 0,73 | 48 |
| 30 | 0,79 | -59 | 100 | 0,64 | 90 | 47 | 0,72 | 52 |
| 35 | 0,83 | -50 | 120 | 0,47 | 102 | 48 | 0,7 | 55 |
| 40 | 0,86 | -43 | 150 | 0,32 | 130 | 49 | 0,69 | 58 |
| 50 | 0,91 | -28 | 200 | 0,19 | 136 | 50 | 0,67 | 61 |
| 70 | 0,95 | -12 | 500 | 0,05 | 165 | 55 | 0,6 | 73 |
| 100 | 0,99 | 7 | 1000 | 0,025 | 190 | 60 | 0,53 | 84 |
| 150 | 1 | 25 | | | | 70 | 0,41 | 102 |
| 200 | 0,97 | 46 | | | | 80 | 0,33 | 112 |
| 250 | 0,91 | 63 | | | | 100 | 0,22 | 126 |
| 300 | 0,8 | 78 | | | | 500 | 0,0245 | 170 |
| 310 | 0,77 | 82 | | | | 1000 | 0,02 | 180 |
| 320 | 0,75 | 83 | | | | | | |
| 322 | 0,74 | 86 | | | | | | |
| 325 | 0,73 | 87 | | | | | | |
| 330 | 0,72 | 88 | | | | | | |
| 335 | 0,71 | 89 | | | | | | |
| 337 | 0,71 | 90 | | | | | | |
| 338 | 0,71 | 90 | | | | | | |
| 340 | 0,7 | 90 | | | | | | |
| 341 | 0,7 | 90 | | | | | | |
| 343 | 0,7 | 91 | | | | | | |
| 345 | 0,69 | 91 | | | | | | |
| 348 | 0,69 | 92 | | | | | | |
| 350 | 0,68 | 93 | | | | | | |
| 355 | 0,67 | 94 | | | | | | |
| 380 | 0,61 | 100 | | | | | | |
| 400 | 0,58 | 105 | | | | | | |
| 500 | 0,4 | 124 | | | | | | |
| 700 | 0,2 | 135 | | | | | | |
| 1000 | 0,12 | 150 | | | | | | |



Graf 1 Graf modulové charakteristiky předzesilovače



Graf 2 Graf fázové charakteristiky předzesilovače

Šum předzesilovače

Hodnota byla měřena tak, že potenciometr zesílení byl otočen na minimum, což znamená, že vstup obvodu je uzemněn. Na výstup jsem připojil multimetr a měřil efektivní hodnotu šumu, která činila $U=9,51$ mV.

Vstupní citlivost předzesilovače

Tuto hodnotu nebylo možné změřit, jelikož maximální hodnota napětí z generátoru je 20 V špička-špička a při této hodnotě nebyl výstupní signál na osciloskopu viditelně zkreslen.

Test funkčnosti směšovače

Test proběhl pomocí dvou generátorů. Na každém bylo stejné jmenovité napětí 0,775 V, frekvence na prvním byla 100 Hz a na druhém 200 Hz. Graf z osciloskopu odpovídá simulaci.



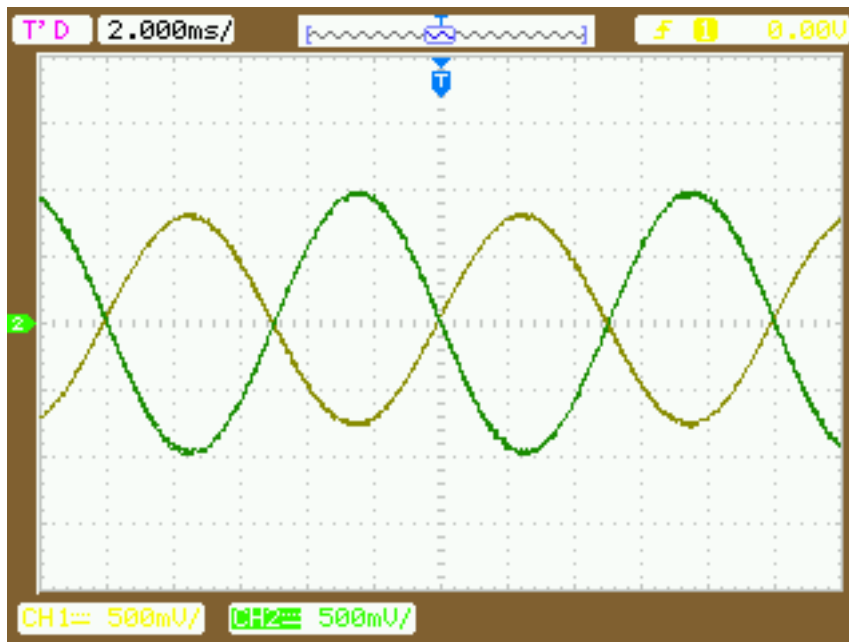
Obr. 21 Záznam směšovače z osciloskopu



Obr. 22 Záznam směšovače s funkcí otočení fáze

Test otáčení fáze

Vstupní napětí 0,775 V, 100 Hz.



Obr. 23 Záznam otáčení fáze

5.2 Měření koncového stupně

Jako zátěž posloužila soustava posuvných výkonových rezistorů, která byla nastavena přibližně na 8 Ω .

Vstupní odpor

Vstupní odpor jsem měřil tak, že jsem mezi generátor a zesilovač zařadil potenciometr, který jsem vytočil do krajní polohy a z osciloskopu odečetl hodnotu napětí. Poté jsem potenciometrem otáčel do chvíle, kdy na osciloskopu byla hodnota napětí poloviční, a odečetl pomocí multimetru hodnotu odporu na potenciometru.

Hodnota vstupního odporu byla určena jako $R_{IN}=5,5 \text{ k}\Omega$.

Výstupní odpor

Výstupní odpor se měří tak, jak je uvedeno v teoretickém úvodu. A pro jeho vypočtení se užije rovnice (3). Pro měření napětí jsem použil multimetr a měřil efektivní hodnotu výstupního napětí.

$$U_1=8,883 \text{ V}$$

$$U_2=9,1158 \text{ V}$$

$$R_Z=8 \text{ }\Omega$$

$$R_{OUT}=0,2097 \text{ }\Omega = 209,7 \text{ m}\Omega$$

Vstupní citlivost

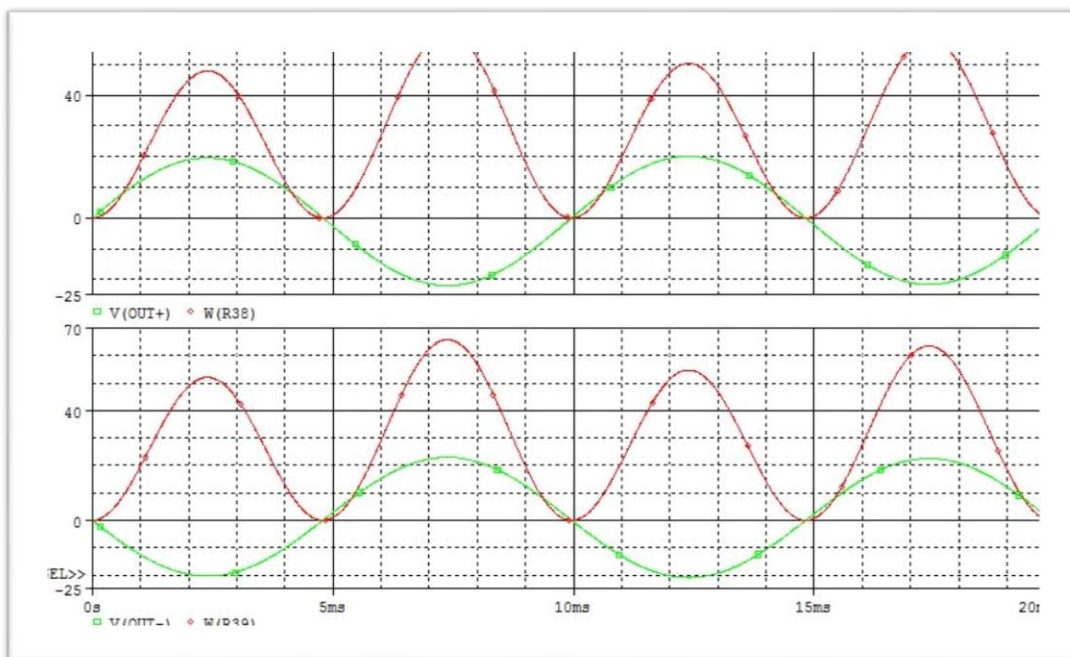
Vstupní citlivost nemohla být změřena, jelikož laboratorní zdroj nebyl schopen dodat potřebný příkon pro měření tak vysokého výkonu zesilovače a zároveň hrozilo zničení osciloskopu příliš vysokým napětím. Zároveň ani při dosažení maximálního napětí nebyl signál stále viditelně zkreslen.

Měření výstupního výkonu

Pro výpočet výstupního výkonu zesilovače se používá rovnice (2). Na vstup byl přiveden sinusový signál nejprve o hodnotě 1 kHz a poté 100 Hz. Velikost vstupního napětí jsem zvyšoval až do chvíle, kdy omezení přístrojů začalo narušovat měření. Měření výkonu bylo značně omezeno napájecím zdrojem a také nekvalitní zátěží, ve které docházelo k jiskření při vysokých výkonech a tím pádem také k ovlivnění výstupního signálu a také napájecího zdroje, jehož proudová ochrana automaticky odpojovala obvod od napájení.

Výpočet výkonu můstkově-paralelního zapojení se však liší od klasického zapojení tím, že do vzorce nedosazujeme poloviční hodnotu amplitudy nýbrž amplitudu celou (špička-špička). Důvodem je princip, na kterém funguje toto zapojení, jehož výkon na zátěži vzniká součtem napětí každé z větví můstku. Tuto teorii jsem si ověřil v OrCAD PSpice tak, že jsem návrh koncového stupně rozdělil na dvě části a zátěž na výstupu z jedné strany připojil na zem, jako by se jednalo pouze o paralelní zapojení integrovaných obvodů LM3886. Hodnota výstupního výkonu na zátěži odpovídala polovině amplitudy výstupního napětí. Při spojení obou paralelních zapojení do můstku však výkon odpovídá celé amplitudě. Dokazují to níže na simulaci z OrCAD PSpice:

Vstupní napětí $U=0,775$ V, $f=100$ Hz.

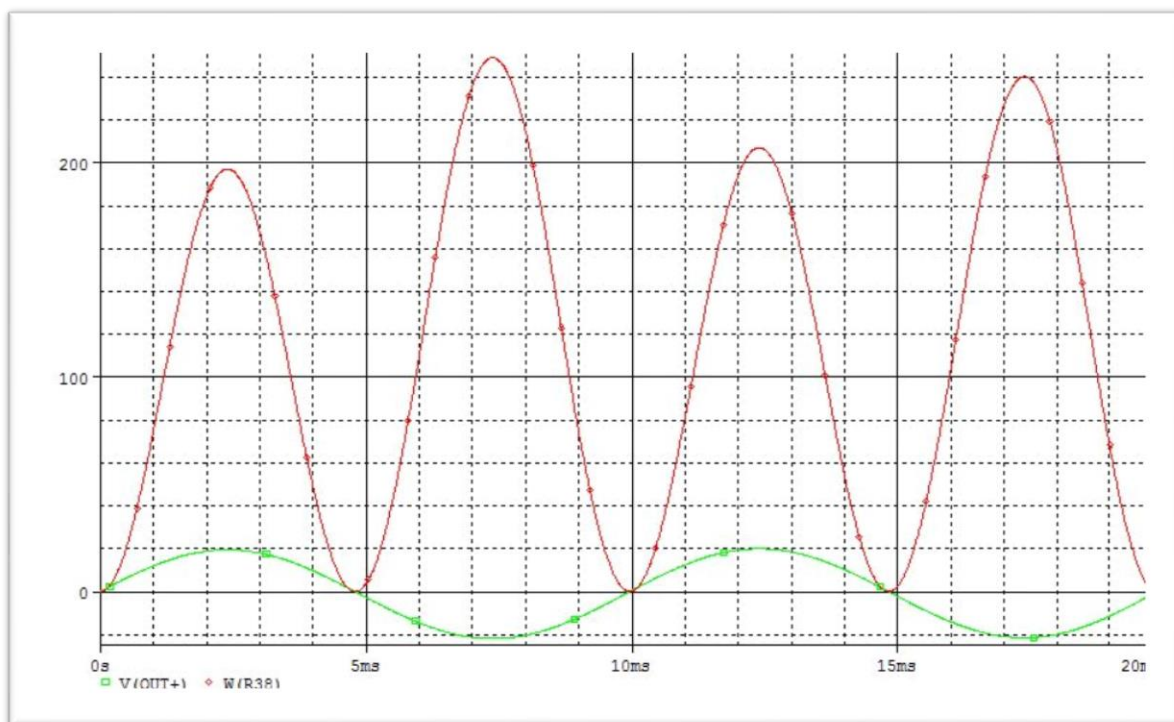


Obr. 24 Simulace výpočtu výkonu

Jak je vidět ze simulace. Výkon o hodnotě 50 W odpovídá polovině amplitudy napětí, tedy 20 V.

$$50 \text{ W} = \frac{20^2 V}{8 \Omega}$$

Avšak výkon můstkové zapojení odpovídá amplitudě celé:



Obr. 25 Simulace výpočtu výkonu můstku

$$200 \text{ W} = \frac{40^2 V}{8 \Omega}$$

Tabulka 2 Tabulka hodnot pro výpočet výkonu, příkonu a účinnosti

| f [Hz] | U _{IN} [V] | U _{OUT} [V] (Mezi vrcholy) | U _{NAP} [V] | I _{NAP} [A] |
|--------|---------------------|-------------------------------------|----------------------|----------------------|
| 100 | 0,8 | 33,6 | ±30 | ±2,9 |
| 1000 | 0,99 | 41,2 | ±30 | ±3,08 |

U_{NAP} – Symetrické napájecí napětí.

I_{NAP} – Napájecí proud na zdroji.

Výkon při 1 kHz:

$$P_{OUT} = \frac{41,2^2 V}{8 \Omega} = 212,18 \text{ W}$$

Výkon při 100 Hz:

Měření výkonu na 100 Hz bylo značně problematické, právě díky nekvalitní zátěži, ve které docházelo k jiskření na přechodovém odporu a také díky omezení způsobené laboratorním zdrojem. Nebylo tedy možné dosáhnout stejného výkonu jako u 1 kHz singálu.

$$P_{OUT} = \frac{33,6^2 V}{8 \Omega} = 141,12 W$$

Šum zesilovače

Jeho měření probíhalo stejným způsobem jako u předzesilovače. Jeho efektivní hodnota se pohybovala okolo 15 mV.

Harmonické zkreslení koncového stupně

Harmonické zkreslení, čili THD, jsem měřil na maximálním výkonu, kterého jsem byl schopen dosáhnout a to při 85,3 Hz (hodnota zvolena pro jednoduchost odečítání s ohledem na hodnotu za dílek na osciloskopu) a při 1 kHz. Měření jsem provedl pomocí Fourierovy transformace na osciloskopu a odečtením hodnot harmonických složek pomocí kurzorů. Měření bylo do značné míry nepřesné, protože harmonické složky neměly výraznou velikost a objevovaly se náhodně. Jejich velikost je tedy spíše dílem odhadu jejich průměrné polohy na displeji osciloskopu.

Výpočet THD jsem provedl pomocí rovnice (1).

Tabulka 3 Tabulky hodnot pro výpočet THD při 85,3 Hz a 1 kHz

| 85,3 Hz | | | |
|---------|-------------|----------|------------|
| n | A [dB] | A [-] | Un [V] rms |
| 0 | 0 | 1 | 1 |
| 1 | 19 | 8,91 | 8,91 |
| 2 | -58,8 | 0,001148 | 0,001148 |
| 3 | -58,8 | 0,001148 | 0,001148 |
| 4 | -51,2 | 0,002754 | 0,002754 |
| 5 | -61,6 | 0,000832 | 0,000832 |
| 6 | -51,2 | 0,002754 | 0,002754 |
| 7 | -58,4 | 0,001202 | 0,001202 |
| 8 | -55,6 | 0,00166 | 0,00166 |
| 9 | -49,2 | 0,003467 | 0,003467 |
| THD [%] | 0,066134179 | | |

| 1000 Hz | | | |
|---------|-------------|----------|------------|
| n | A [dB] | A [-] | Un [V] rms |
| 0 | 0 | 1 | 1 |
| 1 | 20,4 | 10,47 | 10,47 |
| 2 | -47,2 | 0,004365 | 0,004365 |
| 3 | -38,4 | 0,012023 | 0,012023 |
| 4 | -49,2 | 0,003467 | 0,003467 |
| 5 | -40,8 | 0,00912 | 0,00912 |
| 6 | -56 | 0,001585 | 0,001585 |
| 7 | -41,6 | 0,008318 | 0,008318 |
| 8 | -57,2 | 0,00138 | 0,00138 |
| 9 | -44,4 | 0,006026 | 0,006026 |
| THD [%] | 0,183397468 | | |

Účinnost zesilovače

Pro výpočet jsem použil vzorec:

$$\eta = \frac{P}{P_O} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (5)$$

Kde:

P – výkon zesilovače ve [W]

P_O – příkon zesilovače ve [W]

Pro výpočet příkonu jsem použil hodnoty z Tabulky 2 a známý vzorec:

$$P_O = 2 \cdot |I_{NAP}| \cdot 2 \cdot |U_{NAP}| \text{ [W]} \quad (6)$$

Účinnost při 100 Hz:

$$P_O = 348 \text{ W}$$

$$\eta = 40,55 \text{ %}$$

Účinnost při 1000 Hz:

$$P_O = 369,6 \text{ W}$$

$$\eta = 57,408 \text{ %}$$

Stejnoseměrné napětí na výstupu

Hodnotu stejnosměrného napětí jsem měřil pomocí multimetru a to při 100 Hz a při 1000 Hz. Jedná se o efektivní hodnotu napětí.

$$U_{DC-100 \text{ Hz}} = 13 \text{ mV}$$

$$U_{DC-1000 \text{ Hz}} = 45 \text{ mV}$$

5.3 Poznatky o nedostacích a možných vylepšeních

Nedostatkem, lze-li jej takto označit, je použití nízko-offsetových operačních zesilovačů pro servo obvod. Tyto jsou pro jeho správný chod nezbytné, avšak díky nízkému vstupnímu offsetu jsou velice náchylné na napěťové špičky a zákmity. Při testování došlo několikrát k jejich zničení a to především v invertujícím typu servo obvodu.

Nejpodstatnějším nedostatkem, který souvisí právě i s výše zmíněnou náchylností operačních zesilovačů v servo obvodu, je nedořešené napájení celého zesilovače. Při testování bylo evidentní, že je zapotřebí, aby napájecí napětí jak pro LM3886, tak pro servo obvody a vstupní buffer, bylo co nejplynulejší a také, že bude nutná kvalitní filtrace. Jakékoliv napěťové špičky a zákmity ze zdrojů, zejména při startu obvodu, se velmi negativně projevily na kvalitě výstupního signálu, či dokonce došlo ke zničení některého z operačních zesilovačů v servo obvodech.

Na nepájivém poli otestovaným vylepšením, je oddělení napájecí a signálové země rezistorem o hodnotě 10 Ω a výkonovému zatížení cca 2 W. Častokrát užívaná hodnota bývá v rozmezí 10 Ω - 100 Ω . Při případném návrhu zdroje a kompletace celého zesilovače do reprobedny by si toto vyžadovalo podrobnější testování.

Závěr

V této bakalářské práci jsem zkonstruoval kompletní návrh předzesilovače a koncového stupně, jehož základní návrh pocházel z předcházejícího semestrálního projektu a z aplikační poznámky AN-1192. Zesilovač jsem oživil, otestoval všechny dílčí prvky předzesilovače a pak změřil všechny parametry, které jsem stanovil v teoretickém úvodu s výjimkou intermodulačního a přechodového zkreslení. I přes omezení technickým vybavením jsem dosáhl takřka všech cílů, které jsem si původně stanovil s výjimkou výstupního výkonu na nízkých frekvencích, který činil 141,12 W. Je ale skoro jisté, že bych s lepšími přístroji dosáhl minimálně stejného výkonu jako při signálu o frekvenci 1 kHz, který byl 212,18 W. Stejně tak harmonické zkreslení zůstalo na velice nízké úrovni a také splňuje normu Hi-Fi, bohužel se mi však nepodařilo splnit svůj cíl nepřesáhnout hodnotu 0,1 % THD. Při 85,3 Hz činil 0,0661 % a při 1 kHz činil 0,1834 %, obojí při výkonech uvedených výše. Účinnost předzesilovače odpovídá teoretickému předpokladu a při 1 kHz a výkonu 212,18 W se jeho hodnota rovnala 57,408 %. Stejně tak přenosové pásmo předzesilovače, až na malé odchylky, odpovídá hodnotám teoretickým. Pásmo se pohybuje v rozmezí 24 – 335 Hz přičemž horní mezní frekvenci lze ladit v rozsahu 55 – 335 Hz.

Všechny cíle dané zadáním a cíle mnou stanovené, s výjimkou mírného přesáhnutí hodnoty THD o 0,0834 %, jsem splnil. Zesilovač je připraven pro použití za předpokladu kvalitního napájení, chlazení a také s nezbytnými ochranami, které lze vyřešit obvodem μ PC1237.

Touto prací jsem také ověřil, že zesilovač z integrovaných obvodů může stále dosahovat velmi dobrých parametrů i při vysokých výkonech a zároveň udržet cenu na přijatelné hodnotě. Další velkou výhodou, zjištěnou během realizace a měření, jsou integrované ochranné prvky v čípech, které byly i nechtěně mnohokrát prověřeny.

Seznam použitých zdrojů

- [1] ACOUSTIC ENERGY. *Acoustic Energy - award-winning British Loudspeakers* [online]. [cit. 2013-12-01]. Dostupné z: <http://www.acoustic-energy.co.uk/>
- [2] Amplifier. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikipedia Foundation, 28. 10. 2013 [cit. 2013-10-31]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Electronic_amplifier
- [3] BRANČÍK, L. a T. DOSTÁL. *Analogové elektronické obvody. Přednášky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky. 2007. ISBN 978-80-214-3525-4.
- [4] SLONE, G. R. *High-Power Audio Amplifier Construction Manual*. New York (USA): McGraw-Hill, 1999. ISBN 0-07-134-119-6.
- [5] KOTISA, Z. *NF zesilovače:předzesilovače*. Praha: BEN - technická literatura, 2003. 80-7300-030-X.
- [6] TEXAS INSTRUMENTS. *TL081, TL081A, TL081B, TL082, TL082A, TL082B, TL084, TL084A, TL084B: JFET-INPUT OPERATIONAL ...* [Datasheet]. Rev. G. Dallas, Texas 75265, U.S.A: 2004 [cit. 2013-12-09]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/slos081g/slos081g.pdf>
- [7] ANALOG DEVICES. *AD712: PRECISION, LOW COST, HIGH SPEED, BiFET DUAL OP AMP* [Datasheet]. Rev. H. Norwood, MA 02062-9106, U.S.A: 2010 [cit. 2014-06-02]. Dostupné z: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD712.pdf
- [8] TEXAS INSTRUMENTS. *LF412: DUAL JFET-INPUT OPERATIONAL AMPLIFIER* [Datasheet]. Rev. B. Dallas, Texas 75265, U.S.A: 1994 [cit. 2013-12-09]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lf412.pdf>
- [9] BURR-BROWN, TEXAS INSTRUMENTS. *OPA2134: SoundPlus(TM) High Performance Audio Operational Amplifiers*. 2000. Dallas, Texas 75265, U.S.A: 1997 [cit. 2014-06-02]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/gpn/opa2134>
- [10] TEXAS INSTRUMENTS. *LM1036 Dual DC Operated Tone/Volume/Balance Circuit* [Datasheet]. Rev. C. Dallas, Texas 75265, U.S.A: 2013 [cit. 2014-06-02]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/gpn/lm1036>
- [11] UNISONIC TECHNOLOGIES CO. LTD. *uPC1237: Protector IC for stereo power amplifier* [Datasheet]. 2011 [cit. 2014-06-02]. Dostupné z: <https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0CDUQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.unisonic.com.tw%2Fdatasheet%2FUPC1237.pdf&ei=gDGMU7y7J6St0QXztoAg&usg=AFQjCNHW46cOLuFoV8n-xVA1gJV3vxG7hw&bvm=bv.67720277,d.d2k>

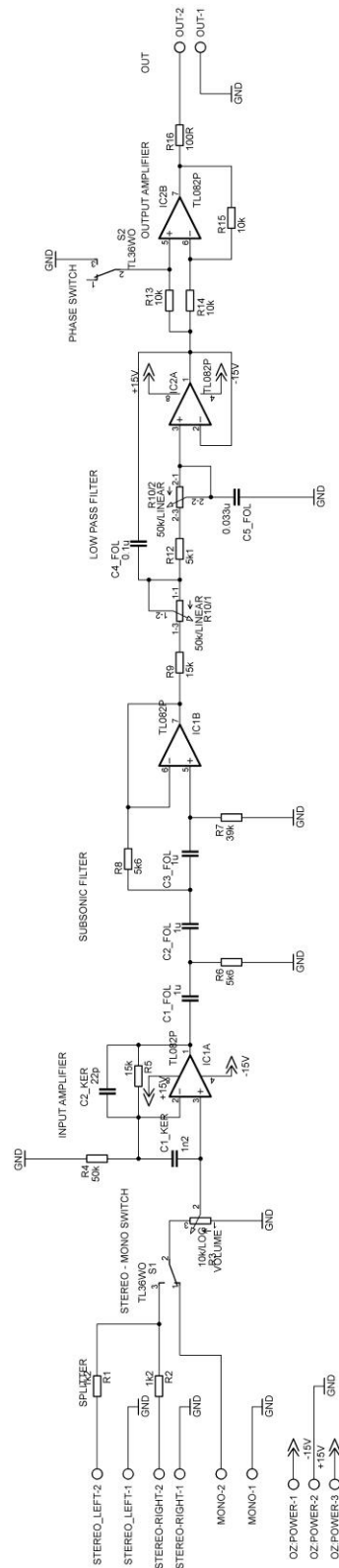
- [12] STMICROELECTRONICS. *TDA7293: 120 V / 100 W DMOS audio amplifier with mute and standby* [Datasheet]. Rev. 8. 2010 [cit. 2014-06-02]. Dostupné z: <http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/CD00001887.pdf>
- [13] TEXAS INSTRUMENTS. *LME49810 200V Audio Power Amplifier Driver with Baker Clamp* [Datasheet]. Rev. C. Dallas, Texas 75265, U.S.A: 2013 [cit. 2014-06-02]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/gpn/lme49810>
- [14] TEXAS INSTRUMENTS. *LME49830 Mono High Fidelity 200 Volt MOSFET Power Amplifier Input Stage with Mute* [Datasheet]. Rev. D. Dallas, Texas 75265, U.S.A: 2013 [cit. 2013-12-09]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lme49830.pdf>
- [15] TEXAS INSTRUMENTS. *AN-1850 LME49830TB Ultra-High Fidelity High Power* [Application note]. Rev. B. Dallas, Texas 75265, U.S.A: 2013 [cit. 2014-06-02]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/pdf/snua058>
- [16] TEXAS INSTRUMENTS. *TAS5508C: 8 Channel PWM Processor* [Datasheet]. Dallas, Texas 75265, U.S.A: 2010 [cit. 2014-06-02]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/gpn/tas5508c>
- [17] TEXAS INSTRUMENTS. *TAS5631B: PWM input 300W Stereo class D amplifier with integrated feedback* [Datasheet]. Rev. C. Dallas, Texas 75265, U.S.A.: [cit. 2014-06-02]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/gpn/tas5631b>
- [18] WIRSUM, S. *Abeceda NF techniky*. Praha: BEN - technická literatura, 2003. ISBN 80-86056-26-0.
- [19] WWW.ALDAX.CZ. Zesilovače pro aktivní subwoofery. In: www.aldax.cz [online]. [cit. 2013-11-29]. Dostupné z: <http://www.aldax.cz/index.php?act=prod&show=clanky&key=subzesy>
- [20] OKAWA ELECTRIC DESIGN. Filter Design and Analysis [online]. 2008. Dostupné také z: <http://sim.okawa-denshi.jp/en/Fkeisan.htm>
- [21] TEXAS INSTRUMENTS. *LM3886 Overture™ Audio Power Amplifier Series: High-Performance 68W Audio Power Amplifier w/Mute* [Datasheet]. rev. C. Dallas, Texas 75265, U.S.A: 2013 [cit. 2013-12-09]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm3886.pdf>
- [22] TEXAS INSTRUMENTS. *AN-1192 Overture™ Series High Power Solutions* [Application Note]. Rev. B. Dallas, Texas 75265, U.S.A: 2013 [cit. 2013-12-09]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/snua021b/snua021b.pdf>

Seznam příloh

| | |
|------------------------------------|----|
| A. Schémata..... | 54 |
| A.1. Schéma předzesilovače | 54 |
| A.2. Schéma koncového stupně | 55 |
| B. Seznam součástek | 56 |
| B.1. Předzesilovač..... | 56 |
| B.2. Koncový stupeň..... | 57 |
| C. Desky plošných spojů | 58 |
| C.1. Předzesilovač..... | 58 |
| C.2. Koncový stupeň..... | 59 |
| D. Fotodokumentace..... | 61 |
| D.1. Předzesilovač..... | 61 |
| D.2. Koncový stupeň..... | 61 |
| E. Obsah CD..... | 62 |

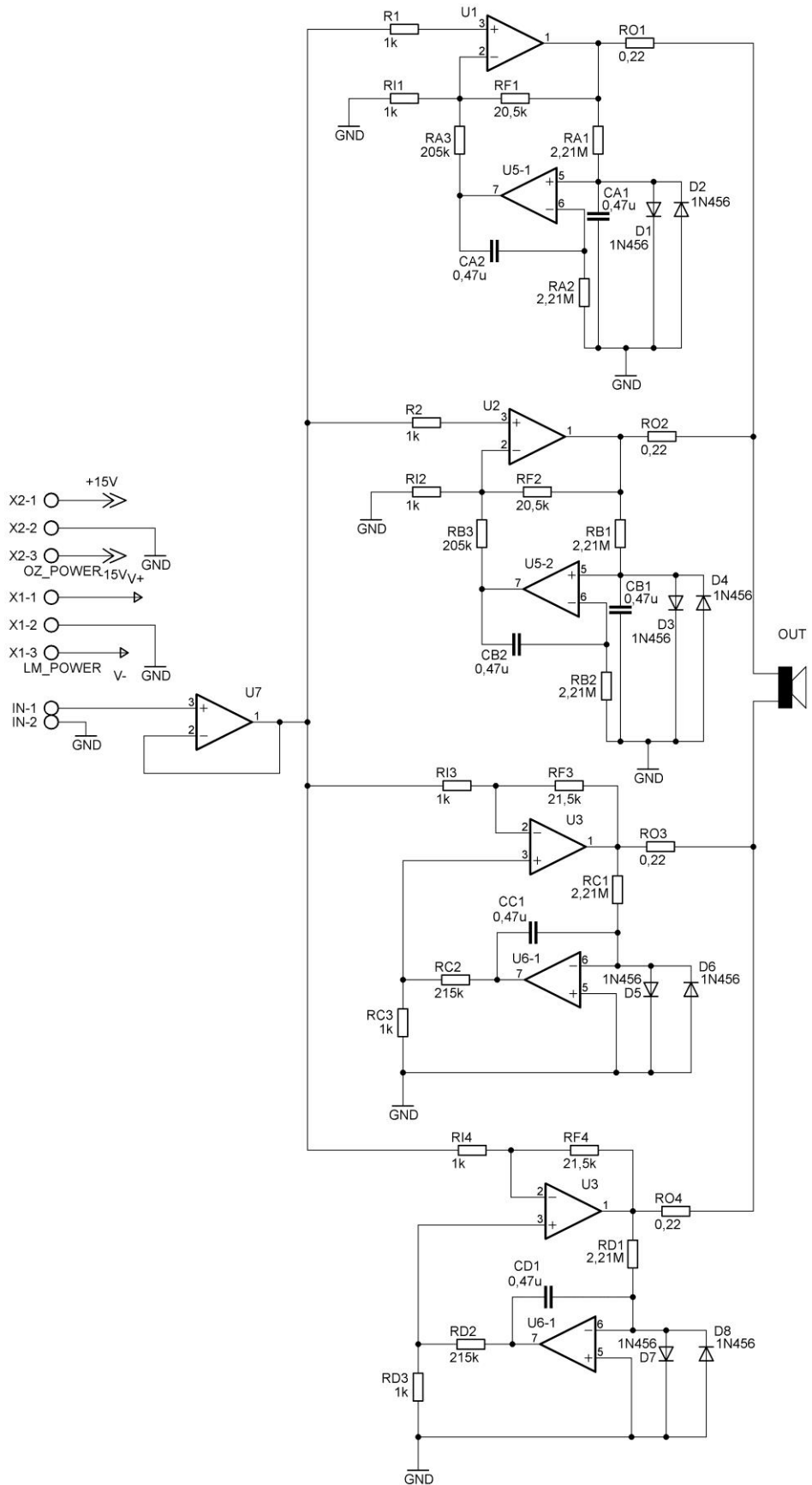
A. Schémata

A.1. Schéma předzesilovače



Obr. 26 Schéma předzesilovače

A.2. Schéma koncového stupně



Obr. 27 Schéma koncového stupně

B. Seznam součástek

B.1. Předzesilovač

Tabulka 4 Seznam součástek předzesilovače

| Součástka | Hodnota |
|--|-------------------------------------|
| R ₁ , R ₂ | 1,2 kΩ |
| R ₄ | 50 kΩ |
| R ₅ , R ₉ | 15 kΩ |
| R ₆ , R ₈ | 5,6 kΩ |
| R ₇ | 39 kΩ |
| R ₁₁ | 5,1 kΩ |
| R ₁₂ , R ₁₃ , R ₁₄ | 10 kΩ |
| R ₁₅ | 100 Ω |
| C _{1_KER} | 1,2 nF, Keramický |
| C _{2_KER} | 22 pF, Keramický |
| C _{1_FOL} , C _{2_FOL} , C _{3_FOL} | 1 μF, Foliový |
| C _{4_FOL} | 0,1 μF, Foliový |
| C _{5_FOL} | 0,033 μF, Foliový |
| IC ₁ , IC ₂ | TL082, DIP8 |
| R ₃ | 10 kΩ, Potenciometr logaritmický |
| R ₁₀ | 50 kΩ, Stereo potenciometr lineární |
| Konektory vstupů a výstupů | 4x Dvojité konektor AK500/2 |
| Konektor napájení | Trojité konektor AK500/3 |
| Přepínač stereo-mono, otáčení fáze | 2x Přepínač páčkový do DPS, TL36WO |
| Socket pro DIP8 | 2x |

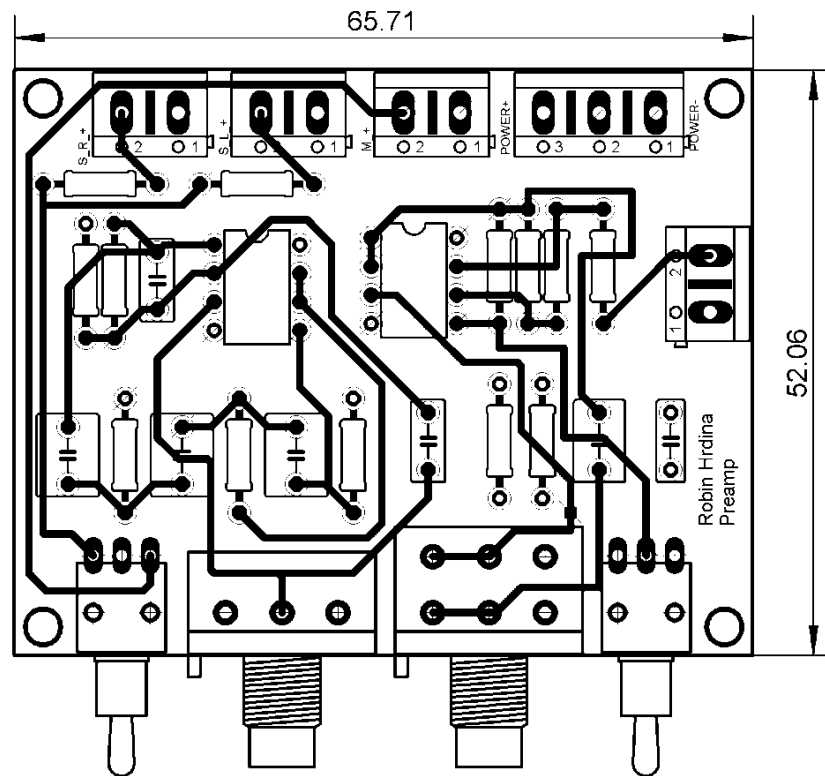
B.2. Koncový stupeň

Tabulka 5 Seznam součástek koncového stupně

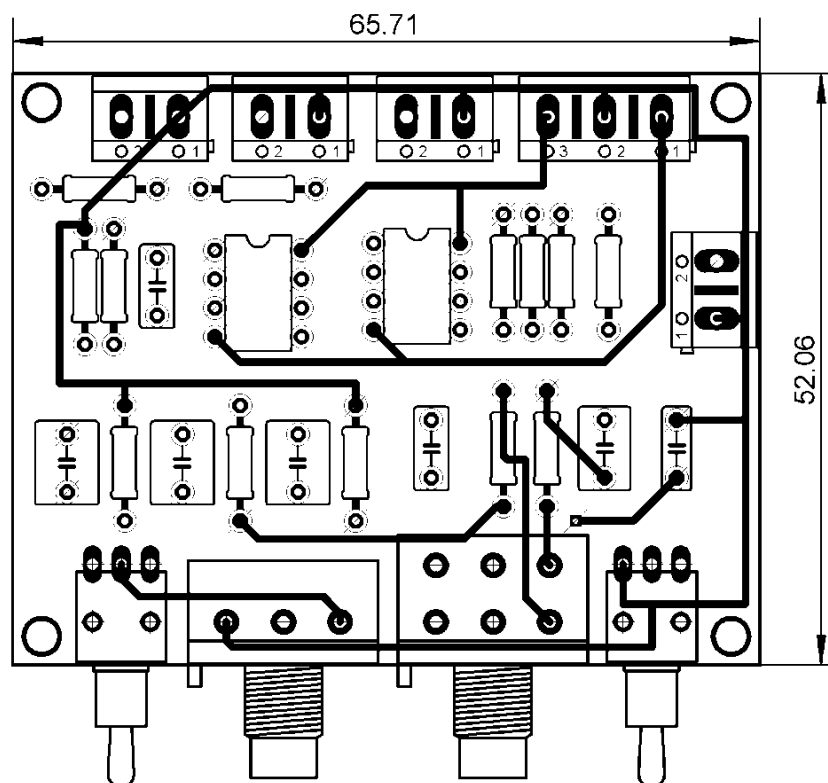
| Součástka | Hodnota |
|--|---|
| $C_{A1}, C_{A2}, C_{B1}, C_{B2}, C_{C1}, C_{D1}$ | 0,47 μ F/100 V, Foliový |
| $R_{O1}, R_{O2}, R_{O3}, R_{O4}$ | 0,22 Ω /5 W/5 %, Keramické pouzdro |
| $R_1, R_2, R_{i1}, R_{i2}, R_{i3}, R_{i4}, R_{C3}, R_{D3}$ | 1 k Ω /0,1 % |
| R_{f1}, R_{f2} | 20,5 k Ω /0,1 % |
| R_{f3}, R_{f4} | 21,5 k Ω /0,1 % |
| R_{A3}, R_{B3} | 205 k Ω / 0,1 % |
| R_{C2}, R_{D2} | 215 k Ω /0,1 % |
| $R_{A1}, R_{A2}, R_{B1}, R_{B2}, R_{C1}, R_{D1}$ | 2,21 M Ω /1 % |
| $D_1, D_2, D_3, D_4, D_5, D_6, D_7, D_5,$ | 1N456A |
| U_1, U_2, U_3, U_4 | LM3886T |
| U_5 | LF411ACN, DIP8 |
| U_6, U_7 | LF412ACN, DIP8 |
| $R_{M1}, R_{M2}, R_{M3}, R_{M4}$ | 20 k Ω |
| Konektor napájení LM3886, servo obvodů a vstupního bufferu | 2x AK500/3 |
| Konektor vstupu a výstupu | 2x AK500/2 |
| Socket pro DIP8 | 3x |

C. Desky plošných spojů

C.1. Předzesilovač

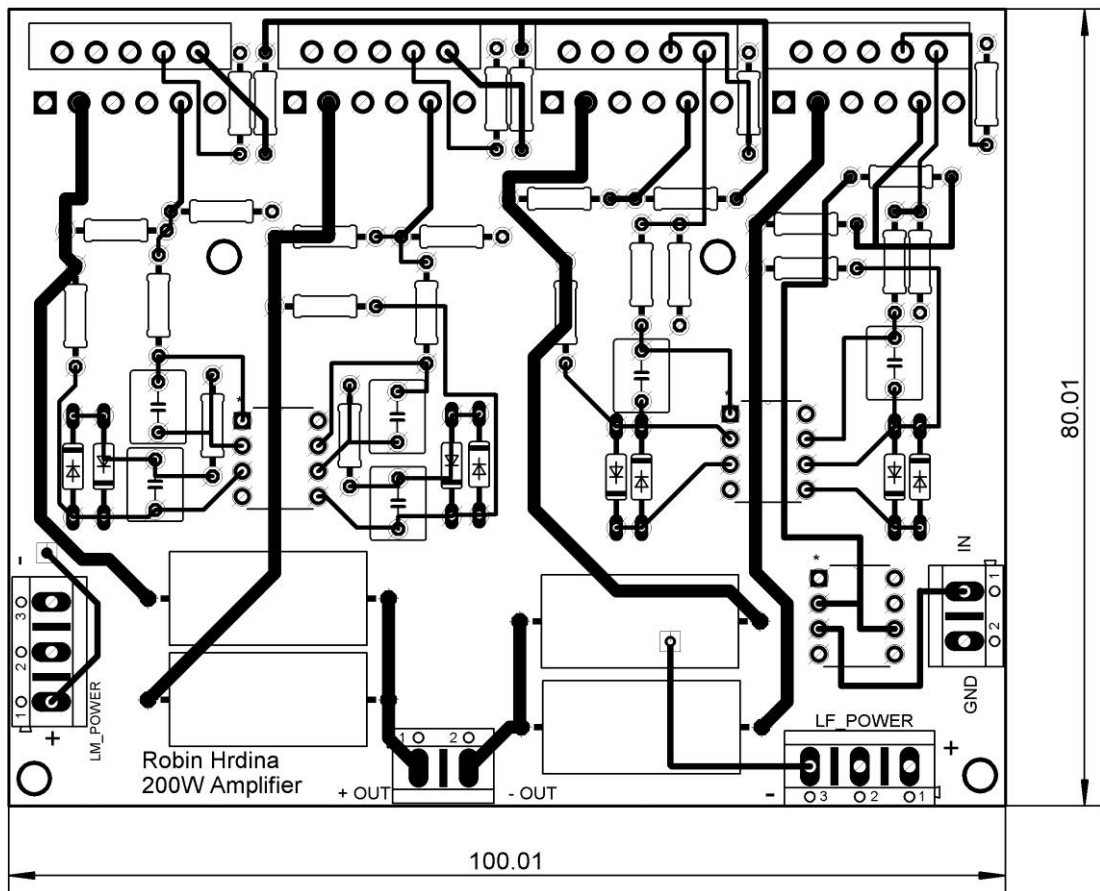


Obr. 28 Strana TOP předzesilovače

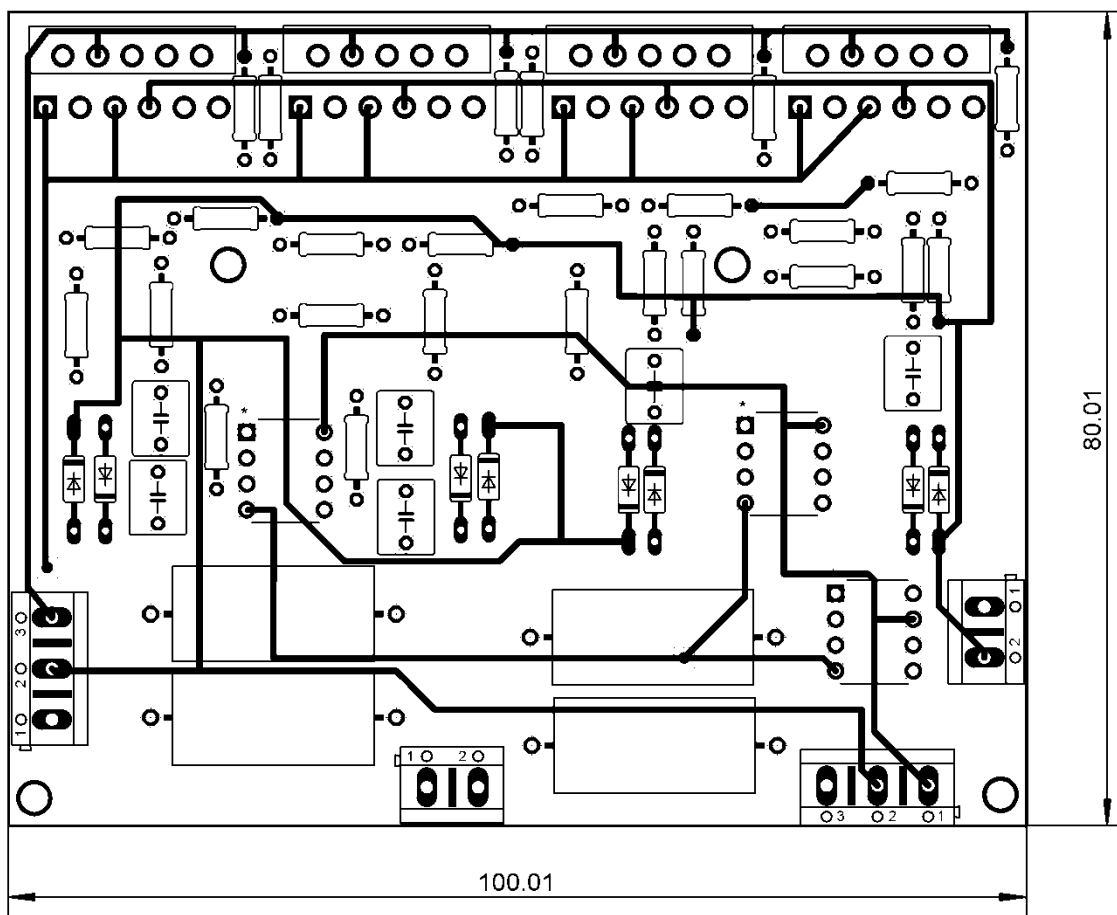


Obr. 29 Strana BOTTOM předzesilovače

C.2. Koncový stupněň



Obr. 30 Strana TOP koncového stupně



Obr. 31 Strana BOTTOM koncového stupně

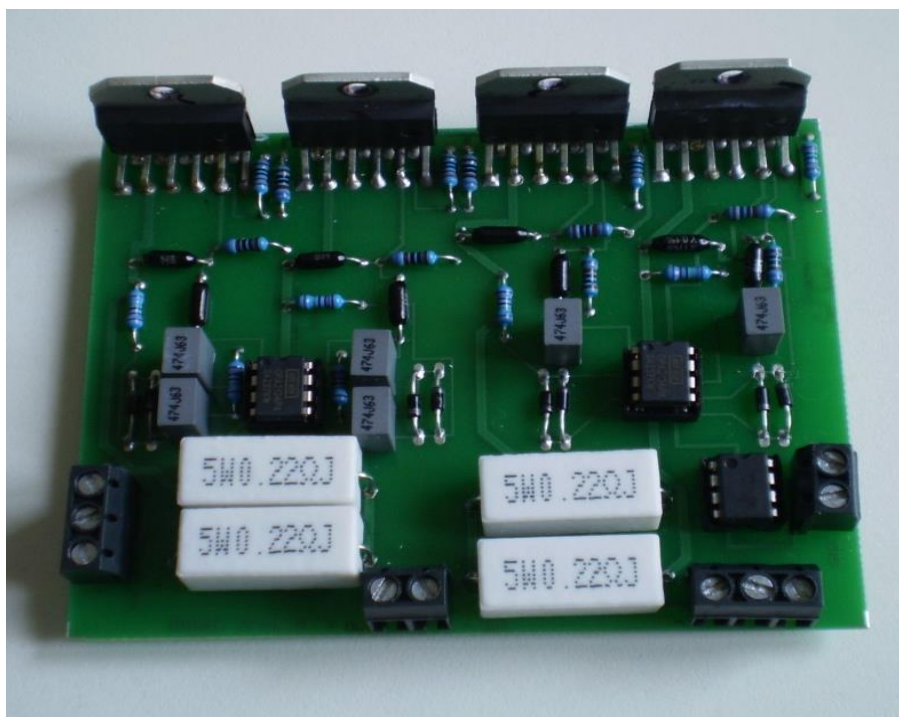
D. Fotodokumentace

D.1. Předzesilovač

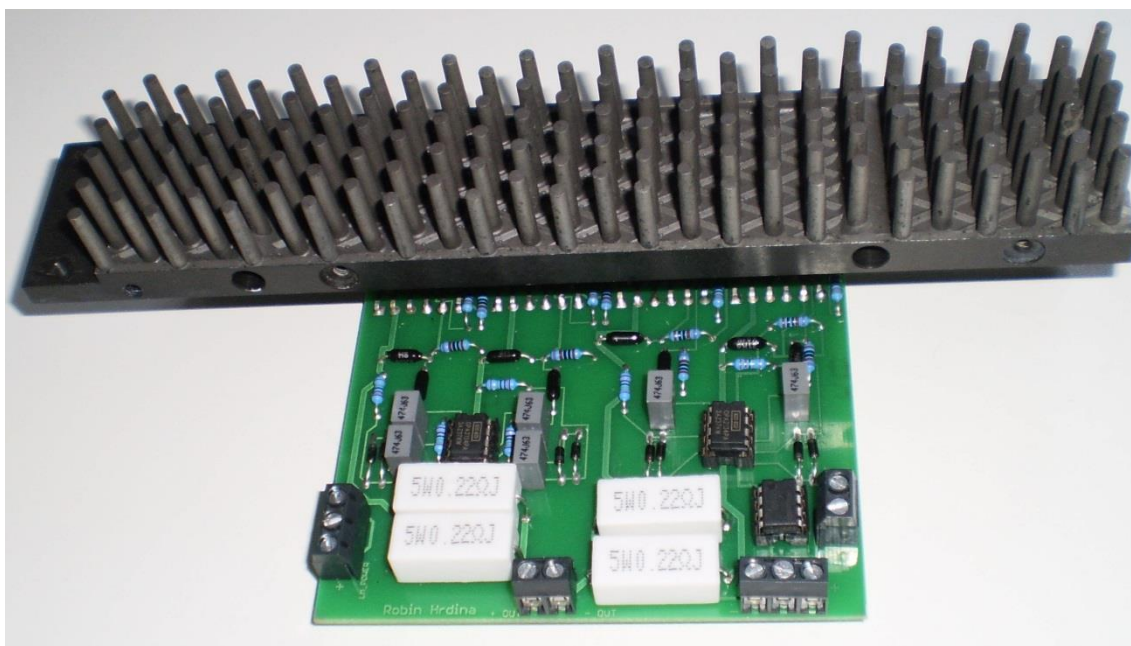


Obr. 32 Fotografie předzesilovače

D.2. Koncový stupeň



Obr. 33 Fotografie koncového stupně



Obr. 34 Fotografie koncového stupně s chladičem

E. Obsah CD

CD / PDF bakalářské práce

/ Datasheety

/ Aplikační poznámky

/ Záznamy z osciloskopu

/ Fotografie