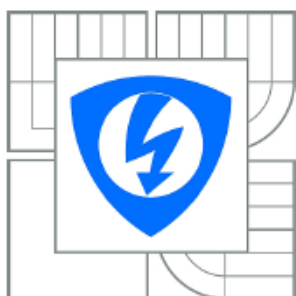




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

KONCOVÝ VÝKONOVÝ AUDIO ZESILOVAČ S DVOUPÁSMOVOU REPROSOUSTAVOU

POWER AUDIO AMPLIFIER WITH TWO-WAY SPEAKER SYSTEM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

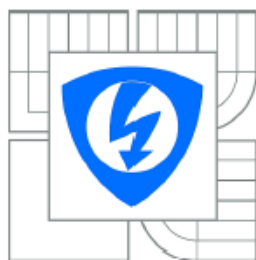
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MATEJ RYSTVEJ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. TOMÁŠ KRATOCHVÍL, Ph.D.

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Matej Rystvej
Ročník: 3

ID: 125621
Akademický rok: 2012/2013

NÁZEV TÉMATU:

Koncový výkonový audio zesilovač s dvoupásmovou reprodukcí

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte stereofonní výkonový zesilovač s výstupním výkonem do 40 W / 4 nebo 8 ohmů. Při konstrukci zesilovače uvažujte diskretní provedení s tranzistory MOSFET pracující ve třídě AB. K zesilovači navrhněte vhodnou dvoupásmovou reprodukcí, ke které provedte výběr reproduktorů (výrobce např. Monacor) a návrh vhodné výhybky. Návrhy doplňte simulací v PSpice apod.

Vytvořte kompletní konstrukční podklady k realizaci návrhu (schéma zapojení, návrh desky plošného spoje, rozložení a soupiska součástek, konstrukční výkresy atd.). Navržené zařízení realizujte experimentálně ověřte včetně sestavení standardního měřicího protokolu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] WIRSUM, S. Abeceda nf techniky. Praha: BEN – technická literatura, 2003.
- [2] KOTISA, Z. NF zesilovače – 1. díl Předzesilovače. BEN – technická literatura, Praha, 2001.
- [3] KOTISA, Z. NF zesilovače – 3. díl Tranzistorové výkonové zesilovače. BEN – technická literatura, Praha, 2003.

Termín zadání: 11.2.2013

Termín odevzdání: 31.5.2013

Vedoucí práce: doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.

Konzultanti bakalářské práce:

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida
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

Cieľom tejto bakalárskej práce bolo navrhnuť stereofónny zosilňovač s vhodnou reprosústavou pre domáce použitie. Zosilňovač má možnosť prepínania medzi režimom vyššieho a nižšieho výkonu. Je ho teda možné použiť aj s inou reprosústavou s nižším príkonom, a je pripravený k prípadnému neskoršiemu zavedeniu aktívneho frekvenčného filtra, ktorý pri zosilnení niektorých frekvencií prispôbí frekvenčnú charakteristiku k tejto navrhovanej reprosústave. Táto práca obsahuje riešenie softstart obvodu, koncového zosilňovača, predzosilňovacieho obvodu, prepínača výkonu, obvodu pre oneskorené pripojenie reproduktorov a reprosústavy.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

Zosilňovač, oddeľovač, koncový zosilňovač, reprosústava, reproduktor, výhybka.

ABSTRACT

The aim of this bachelor thesis was a design of a stereo amplifier with an appropriate loudspeaker system for home listening. The amplifier has the ability to be switched over between high and low output power mode. This means it is possible to be used also with an other loudspeaker system with lower input power rating, and it will be prepared for possible future implementation of an active frequency filter, which will fit the frequency response to this designed loudspeaker system by amplifying some frequencies. This thesis contains design of the softstart circuit, power amplifier, preamplifier circuit, the output power switch, the delayed loudspeaker connecting circuit and the loudspeaker system.

KEYWORDS

Amplifier, separator, power amplifier, loudspeaker system, loudspeaker, crossover.

RYSTVEJ, M. *Koncový výkonový audio zesilňovač s dvojpásmovou reprosústavou*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 39 s. Vedúci bakalárskej práce: doc. ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D..

PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že svoju bakalársku prácu na tému Koncový výkonový audio zosilňovač s dvojpásmovou reprosústavou som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho bakalárskej práce a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej bakalárskej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto bakalárskej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, obzvlášť som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/alebo majetkových a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovení § 11 a nasledujúcich zákona č. 121/2000 Sb., o práve autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), v znení neskorších predpisov, vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovení časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníku č. 40/2009 Sb.

V Brne dňa

.....

(podpis autora)

POĎAKOVANIE

Ďakujem vedúcemu bakalárskej práce doc. ing. Tomášovi Kratochvílovi, Ph.D. za účinnú metodickú, pedagogickú a odbornú pomoc a ďalšie cenné rady pri spracovaní mojej bakalárskej práce.

V Brne dňa

.....

(podpis autora)

OBSAH

Obsah	vii
zoznam obrázkov	ix
zoznam tabuliek	xi
Úvod	1
1 Koncové zosilňovače	2
1.1 Delenie koncových zosilňovačov	2
1.2 Parametre nízkočfrekvenčných zosilňovačov	2
1.3 Triedy zosilňovačov	5
2 Blokový návrh zosilňovača	7
2.1 Bloková schéma zariadenia	7
2.1.1 Popis blokovej schémy	7
2.2 Vstupná dolná priepusť	7
2.3 Oddeľovače	8
2.3.1 Prvý oddeľovač	9
2.3.2 Ostatné oddeľovače	10
2.4 Zmiešavač	11
2.4.1 Popis zapojenia	11
2.4.2 Výsledky simulácií v programe PSpice pre zmiešavač	12
2.5 Ochrana reproduktorov	13
2.5.1 Popis zapojenia	13
2.5.2 Výsledky simulácií v programe PSpice pre obvod oneskoreného pripojenia reproduktorov	14
2.6 Koncový zosilňovač	15
2.6.1 Popis zapojenia	16
2.6.2 Schéma zapojenia	17
2.6.3 Výsledky meraní pre koncový zosilňovač	17
2.7 Softstart	19
2.7.1 Popis zapojenia	19

2.8	Skompletizovaný zosilňovač	21
2.8.1	Poznámky k zapojeniu a konštrukcii celého zariadenia	21
2.8.2	Výsledky merania pre skompletizovaný zosilňovač.....	27
3	Návrh reprosústavy	29
3.1	Výber reproduktorov.....	29
3.1.1	Stredobasový reproduktor	29
3.1.2	Výškový reproduktor	30
3.2	Návrh ozvučnice	30
3.3	Návrh frekvenčnej výhybky.....	32
4	Záver	36
	Literatúra	38
	zoznam symbolov, veličín a skratiek	39

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obrázok 1.1	Výkonová šírka pásma (prevzaté a upravené z [2]).....	4
Obrázok 1.2	Závislosť výstupného prúdu na vstupnom napätí pri výkonovej súčiaske pracujúcej v triede a) A, b) AB, c) B - ilustrácie sú charakteristiky výkonových elektrónok (prevzaté a upravené z [3]).....	5
Obrázok 1.3	Priebeh signálu na výstupe digitálneho zosilňovača triedy D pred filtráciou (obdĺžniky) a po filtrácii (harmonický signál) (prevzaté a upravené z [3]).....	6
Obrázok 2.1	Bloková schéma jedného kanálu navrhovaného zosilňovača.....	7
Obrázok 2.2	Schéma zapojenia pasívnej dolnej priepusti	8
Obrázok 2.3	Modulová prenosová charakteristika navrhutej pasívnej dolnej priepusti	8
Obrázok 2.4	Schéma zapojenia prvého oddeľovača.....	9
Obrázok 2.5	Frekvenčná závislosť napät'ového zosilnenia prvého navrhnutého oddeľovača.....	10
Obrázok 2.6	Schéma zapojenia ostatných oddeľovačov	10
Obrázok 2.7	Frekvenčná závislosť zosilnenia ostatných navrhnutých oddeľovačov....	11
Obrázok 2.8	Schéma zapojenia navrhnutého zmiešavača	12
Obrázok 2.9	Frekvenčná závislosť napät'ového prenosu zmiešavača pri priechode signálu vstupom 1	12
Obrázok 2.10	Frekvenčná charakteristika napät'ového prenosu zmiešavača pri priechode signálu vstupom 2	13
Obrázok 2.11	Schéma zapojenia navrhnutého obvodu oneskoreného pripojenia reproduktorov.....	14
Obrázok 2.12	Priebeh napätia v uzle A cievok relé1 a relé2 (zelená) a priebeh rozdielu potenciálov medzi uzlami A a B týchto cievok (červená)	15
Obrázok 2.13	Priebeh bázoového, kolektorového a emitorového prúdu tranzistoru	15
Obrázok 2.14	Schéma zapojenia koncového zosilňovača (prevzaté a upravené z [4]).	17
Obrázok 2.15	Modulová prenosová charakteristika koncového zosilňovača	19
Obrázok 2.16	Schéma zapojenia softstart obvodu (prevzaté a upravené z [1])	20
Obrázok 2.17	DPS softstart obvodu (prevzaté a upravené z [1])	20
Obrázok 2.18	Osadzovací výkres softstart obvodu (prevzaté a upravené z [1])	21

Obrázok 2.19 Schéma zapojenia celého zosilňovača	23
Obrázok 2.20 DPS celého zosilňovača bez softstartu – strana spojov. Mierka M 1,25:1	24
Obrázok 2.21 Osadzovací výkres DPS celého zosilňovača bez softstartu – strana súčiastok. Mierka M 1,25:1	25
Obrázok 2.22 Modulová prenosová charakteristika skompletizovaného zosilňovača v režime nižšieho výkonu	27
Obrázok 2.23 Výstupný výkon skompletizovaného zosilňovača v režime nižšieho výkonu.....	27
Obrázok 2.24 Modulová prenosová charakteristika skompletizovaného zosilňovača v režime vyššieho výkonu.....	28
Obrázok 2.25 Výstupný výkon skompletizovaného zosilňovača v režime vyššieho výkonu.....	28
Obrázok 3.1 Závislosť charakteristickej citlivosti (horná krivka) a impedancie (dolná krivka) použitého stredobasového reproduktora na frekvencii (prevzaté z [5]).....	30
Obrázok 3.2 Závislosť charakteristickej citlivosti (horná krivka) a impedancie (dolná krivka) použitého výškového reproduktora na frekvencii (prevzaté z [6]) .	30
Obrázok 3.3 Frekvenčná odozva navrhutej basseflexovej ozvučnice s použitým stredobasovým reproduktorom	32
Obrázok 3.4 Schéma zapojenia dolnej (a) a hornej (b) priepusti použitej výhybky (prevzaté a upravené z [7])	33
Obrázok 3.5 Frekvenčná odozva dolnej priepusti (bas), hornej priepusti (vys) a súčet týchto kriviek (Total SPL) použitej výhybky	34
Obrázok 3.6 Kompletná schéma zapojenia navrhutej frekvenčnej výhybky	35
Obrázok 3.7 Frekvenčná odozva výhybky s reálnymi vlastnosťami záťaží pre basový reproduktor (bas), výškový reproduktor (vys) a pre súčet týchto kriviek (Total SPL).....	35

ZOZNAM TABULIEK

Tabuľka 2.1 Namerané hodnoty napät'ového prenosu v závislosti na frekvencii	18
Tabuľka 2.2 Zoznam súčiastok softstart obvodu (prevzaté a upravené z [1])	21
Tabuľka 2.3 Zoznam súčiastok celého zariadenia bez softstartu	26
Tabuľka 3.1 Parametre použitého stredobasového reproduktoru (prevzaté a upravené z [5]).....	29
Tabuľka 3.2 Parametre použitého výškového reproduktoru (prevzaté a upravené z [6])	30

ÚVOD

Táto práca rozoberá návrh stereofónneho zosilňovača s reprosústavou. Koncový zosilňovač pracuje v triede AB, jeho koncový stupeň tvoria MOSFET tranzistory IRF530 a IRF9530. Výkon koncového zosilňovača je prepínateľný medzi 35 W a 16 W do záťaže $4\ \Omega$. Prepínanie výkonu je riešené formou dvojvstupového zmiešavača, ktorý je postavený na obvode TL071. Zosilňovač ďalej obsahuje obvod ochrany reproduktorov oneskoreným pripojením, fungujúci na princípe tranzistorového spínača, ktorý s časovým oneskorením spína relé, ktoré pripájajú reproduktory ku koncovému zosilňovaču. Predpokladané harmonické skreslenie celého zosilňovača je 0,06 %. V pásme od 20 Hz do 20 kHz teoretické zvlnenie frekvenčnej charakteristiky zosilňovača nepresahuje $\pm 0,4\ \text{dB}$. Reprosústavu tvoria stredobasový a vysokotónový reproduktor firmy Monacor, uložené v bassreflexovej ozvučnici s výhybkou druhého rádu. Kontinuálny príkon reprosústavy je 100 W, špičkový 150 W. Jej citlivosť je 93 dB.

1 KONCOVÉ ZOSILŇOVAČE

Koncový zosilňovač je elektronické zariadenie, ktoré zosilňuje signál prichádzajúci na jeho vstup na výkon potrebný pre ďalšie spracovanie. Je to dôležitý obvod vysielacích, elektroakustických, meracích a iných prístrojov.

1.1 Delenie koncových zosilňovačov

Nasledujúce delenie je prevzaté a upravené z [1].

1. Podľa použitého zosilňovacieho prvku na tranzistorové, elektrónkové, magnetické, parametrické.
2. Podľa druhu budiaceho signálu na nízkofrekvenčné, vysokofrekvenčné, impulzové, jednosmerné.
3. Podľa šírky prenášaného pásma na širokopásmové, úzkopásmové.
4. Podľa zapojenia zosilňovacích prvkov na zosilňovače so spoločným emitorom, so spoločnou bázou, so spoločným kolektorom.
5. Podľa spôsobu činnosti na jednočinné, dvojčinné.
6. Podľa väzby medzi stupňami na zosilňovače s kapacitnou, priamou, transformátorovou väzbou.
7. Podľa polohy pracovného bodu na zosilňovače triedy A, B, AB, C,D, G, H, S, T atď.

1.2 Parametre nízkofrekvenčných zosilňovačov

Parametre zosilňovačov sa líšia podľa použitia zosilňovača. Táto časť práce je venovaná najdôležitejším charakteristikám uvádzaných u zosilňovačov. Všetky informácie o parametroch zosilňovačov v tejto podkapitole sú prevzaté a upravené z [2].

Vstupná citlivosť – udáva veľkosť vstupného napätia, ktoré je nutné k dosiahnutiu menovitého napätia na výstupe, prípadne menovitého výstupného výkonu. Ak sa zosilňuje signál, ktorý je menší než udávaná vstupná citlivosť, zhoršuje sa pomer signál/šum (S/N). Dôležitou hodnotou je veľkosť maximálneho vstupného napätia, ktoré je zosilňovač schopný spracovať bez väčšieho skreslenia – prebuditeľnosť.

Vstupná impedancia – pre optimálne prispôsobenie zdroja signálu ku vstupu zosilňovača je dôležité poznať vstupnú impedanciu. Reálna zložka impedancie R väčšinou prevláda. Normovaná impedancia vstupov je väčšinou $47\text{ k}\Omega/250\text{ pF}$. Vstupná impedancia zosilňovačov by mala byť 5 – 10 krát väčšia než výstupná impedancia zdroja. Zdroj tak pracuje takpovediac naprázdno a zosilňovač len málo ovplyvní jeho vlastnosti. Preťaženie výstupu vedie k zníženiu napätia a tým k zmenšeniu pomeru S/N, k zmene kmitočtovej charakteristiky a ku skresleniu.

Frekvenčná charakteristika – nf zariadenie by malo verne prenášať signály

v rozsahu minimálne 40 Hz – 16 kHz a u kategórie HiFi by odchýlka charakteristiky v tomto pásme nemala prekročiť tolerančné pole $\pm 1,5$ dB.

Fázová charakteristika – vyjadruje závislosť rozdielov fáze vstupného a výstupného signálu zosilňovača na kmitočte a v kanáloch by mala byť zhodná.

Prenosové pásmo – jeho priebeh sa vťahuje k referenčnému kmitočtu 1 kHz, kedy výstup zosilňovača je zaťažený menovitou záťažou a na vstup je pripojená náhradná vstupná impedancia (spravidla 47k Ω /250 pF). Zosilňovač má mať kmitočtovú charakteristiku v pásme 40 Hz – 16 kHz s odchýlkou maximálne ± 1 dB u lineárnych vstupov a ± 2 dB u korigovaných vstupov.

Odstup cudzích napätí – udáva pomer medzi maximálnym užitočným signálom a signálom zvyškovým a udáva sa v dB. Parametrom merania je vstupná citlivosť, impedancia, kmitočet (spravidla 1 kHz) a vstupné napätie, na ktorom je odstup rušivých napätí udaný. Charakteristika sa meria v pásme 32,5 Hz – 20 kHz. Predzosilňovače a výkonové zosilňovače s výstupným výkonom pod 20 W by mali mať odstup cudzích napätí väčší než 50 dB, výkonové zosilňovače nad 20W viac než 60 dB. Veľmi prísne nároky sú kladené na štúdiové a profesionálne zariadenia, kde má byť odstup väčší než 100 dB.

Odstup rušivých napätí – zhodné s predošlým, len je pre meranie použitý špeciálny filter, ktorý rešpektuje vlastnosti sluchu pri malých hlasitostiach.

Skreslenie – spravidla sa udáva činiteľ harmonického a intermodulačného skreslenia. U lineárneho skreslenia nie sú verne reprodukované amplitúdy, ale frekvencie zostávajú nezmenené. Naopak nelineárne skreslenie ovplyvňuje spektrum signálu.

Činiteľ harmonického skreslenia k – je objektívnou mierou posúdenia veľkosti nelineárneho skreslenia. Udáva sa v percentách, a predstavuje údaj, koľko percent užitočného harmonického signálu predstavuje zmes vyšších harmonických zložiek, generovaných zosilňovačom (THD – Total Harmonic Distortion). Činiteľ harmonického skreslenia je závislý na veľkosti vstupného napätia, respektíve na výkone a kmitočte. Pre výkonové zosilňovače je maximálny prípustný činiteľ harmonického skreslenia 3 % na frekvenciách 62,5 Hz a 4 kHz a 2 % pri 1 kHz (pre menovitý výkon). Merania sa vykonávajú aj na 40, 100, 400, 1000 a 6300 Hz.

Intermodulačné skreslenie – Po privedení dvoch harmonických signálov rozdielneho kmitočtu vplyvom nelinearít zosilňovača vznikajú harmonické násobky signálu (harmonické skreslenie) a súčtové a rozdielové zložky (intermodulačné skreslenie), ktoré v pôvodnom signále nie sú obsiahnuté. Väčšie hodnoty intermodulačného skreslenia sa prejavujú ostrou alebo chrapľavou reprodukciou so sykavkami. Maximálne povolené skreslenie je 2 %.

Činiteľ intermodulačného skreslenia m – meria sa pri menovitom vybudení kmitočtami 250 Hz a 8 kHz pri pomere amplitúd 4:1. Počuteľné je skreslenie okolo 3 % (IMD – Inter Modulation Distortion).

Výstupná impedancia – optimálne výkonové prispôsobenie nastáva, ak je výstupná impedancia zdroja rovnako veľká ako impedancia záťaže. Typické hodnoty impedancie reproduktorov sú 4, 8, 16 alebo 100 Ω .

Výkonová šírka pásma – týmto parametrom sa rozumie frekvenčný rozsah,

v ktorom môže výkon zosilňovača klesnúť o 3 dB pri dodržaní menovitého činiteľa harmonického skreslenia 1 %. Pokles výstupného výkonu o 3 dB (teda na 50 %) predstavuje pri konštantnej záťaži pokles výstupného napätia o 3 dB, teda na 70,7 %. Výkonová šírka pásma je teda obmedzená dolným a horným medzným kmitočtom a musí byť podľa normy najmenej (40 Hz – 12,5 kHz). Meria sa rovnako ako menovitý výstupný výkon, iba sa zisťujú medzné kmitočty, pri ktorých poklesne výstupný výkon na polovicu. Tento parameter znázorňuje obrázok 1.1.



Obrázok 1.1 Výkonová šírka pásma (prevzaté a upravené z [2])

Dynamika – pomer medzi maximálnou a minimálnou hodnotou signálu. Dynamika zosilňovača je u malých signálov obmedzená šumom, prípadne brumom, u veľkých maximálnym výstupným napätím, prípadne výkonom. Pre dosiahnutie požadovanej dynamiky je treba voliť zosilňovač s dostatočným výstupným výkonom (bežne postačí 1,5 W/m² ozvučovacej plochy, pre domáci posluh potom postačí zosilňovač s výstupným výkonom 30 W na kanál).

Vnútorňý odpor (impedancia) zosilňovača – je závislá na konštrukcii zosilňovača (vplyv zápornej spätnej väzby). Čím je vnútorná impedancia menšia, tým sú viac tlmené pripojené reproduktory a tým akostnejšia je reprodukcia. Skutočný vplyv je však ťažko preukázateľný. Norma predpisuje vnútornú impedanciu najviac do 1/3 hodnoty zaťažovacej impedancie. Táto podmienka musí byť zachovaná v kmitočtovom pásme 40 Hz – 12,5 kHz.

Činiteľ tlmenia záťaže – je definovaný ako pomer zaťažovacej a vnútornej impedancie. Jeho veľká hodnota znamená silné tlmenie reproduktoru, ktoré značne obmedzuje nežiadúce prechodové javy. Podľa normy musí byť činiteľ tlmenia rovný minimálnej hodnote 3.

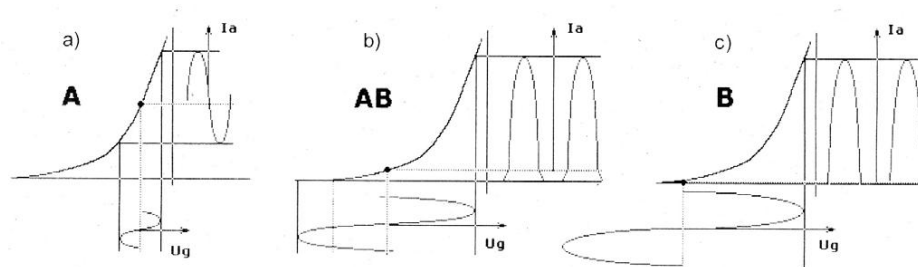
1.3 Triedy zosilňovačov

Trieda zosilňovača definuje buď pracovnú charakteristiku koncového stupňa výkonového zosilňovača alebo základný princíp činnosti celého zosilňovača.

Trieda A – výkonové súčiastky (bipolárne tranzistory, MOSFET, elektrónky...) v jednočinnom zapojení a nastaveným kludovým prúdom tak, aby boli stále vo vodivom (aktívnom) stave. Vďaka veľkému kludovému prúdu pracujú výkonové súčiastky zhruba uprostred svojej lineárnej pracovnej oblasti a majú najmenšie skreslenie signálu. Nevýhodou je malá energetická účinnosť, veľký príkon a jeho premena na teplo (nutné chladenie výkonových súčiastok), používa sa v High-end zosilňovačoch.

Trieda B – výkonové súčiastky v dvojčinnom zapojení s nastaveným nulovým kludovým prúdom. V jednej polovici koncového stupňa sú súčiastky aktívne len pri kladnej polvlne spracovávaného signálu, v druhej polovici naopak pri zápornej polvlne. Inak sú nevodivé a obidve polovice koncového stupňa sa tak v závislosti na polarite signálu striedajú v činnosti (push-pull). Pri prechode z vodivého do nevodivého stavu sú súčiastky v oboch zapojeniach takmer nevodivé a vzniká nelineárne skreslenie signálu (prechodové skreslenie). Výhodou je vyššia účinnosť (viac ako 50 %), nulový kludový prúd, nevýhodou je uvedené skreslenie.

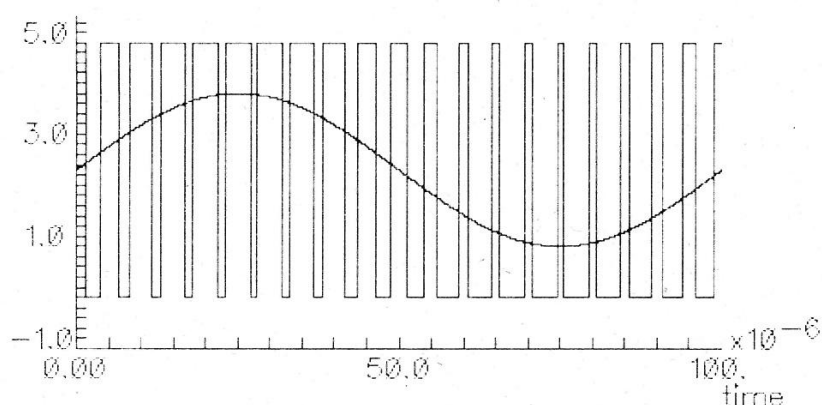
Trieda AB – kompromis medzi triedou A a B. Funkčne má bližšie k triede B, kde je zavedený malý kludový prúd, ktorý nepatrne zväčšuje spotrebu a znižuje účinnosť. Výhodou je podstatné zmenšenie prechodového skreslenia triedy B. Zjednodušene sa dá povedať, že pri malých úrovniach signálu pracuje zosilňovač v triede A, pri veľkých v triede B s dobrou účinnosťou a malým skreslením. Trieda AB je v konštrukcii bežných nf zosilňovačov najpoužívanější.



Obrázok 1.2 Závislosť výstupného prúdu na vstupnom napätí pri výkonovej súčiastke pracujúcej v triede a) A, b) AB, c) B - ilustrácie sú charakteristiky výkonových elektrónok (prevzaté a upravené z [3])

Trieda C – výkonové súčiastky majú nulový kludový prúd a navyše zavedené predpätie, ktoré ich ďalej zatvára. Prechádzajú z nevodivého do aktívneho stavu až v špičkách vstupného signálu, ktorých veľkosť dosahuje rádu desiatok percent napájacieho napätia. Skreslenie výstupného signálu je omnoho výraznejšie než v triede B. V nf technike teda je teda toto riešenie nepoužiteľné, vo vf technike v jednočinnom alebo dvojčinnom zapojení vo vysielачoch.

Trieda D – nepatrí do kategórie lineárnych zosilňovačov, pretože pre spracovanie signálu používajú techniku pulzne šírkovej modulácie PWM (Pulse Width Modulation) a označujú sa ako digitálne zosilňovače. Najväčšou prednosťou je vysoká účinnosť (80% a viac), spôsobená použitím spínacieho režimu tranzistorov. Nevýhodou je väčšie skreslenie v porovnaní s triedou A, AB.



Obrázok 1.3 Pribeh signálu na výstupe digitálneho zosilňovače triedy D pred filtráciou (obdĺžniky) a po filtrácii (harmonický signál) (prevzaté a upravené z [3])

Trieda G – spravidla používajú koncový stupeň v triede AB, líšia sa však v spôsobe napájania koncových tranzistorov, ktoré je dvoj alebo aj viacstupňové. Teda veľkosť napájacieho napätia sa prispôbuje veľkosti požadovaného výstupného výkonu. Pri menšom výkone pracuje zosilňovač s menším napájacím napätím, a keď výstupný výkon presiahne určitú nastavenú veľkosť, pripoja sa vyššie napájacie napätia. Výhodou je zväčšená účinnosť oproti pracovnej triede AB, menšie konštrukčné rozmery zosilňovača, nevýhodou zložitejší návrh zapojenia.

Trieda H – zhodné s triedou G, len veľkosť napájacieho napätia sa nemení skokovo, ale presne sleduje veľkosť vstupného signálu. Napájacie napätie je tak presne na takej úrovni, aby bola zachovaná správna činnosť výkonových súčiastok s ohľadom na veľkosť požadovaného výstupného výkonu. Na výkonových súčiastkach zosilňovača je teda vždy konštantný úbytok napätia. Výhodou je väčšia účinnosť oproti triede G, nevýhodou zložitejší návrh zapojenia.

Trieda S – výkonové súčiastky sú spínané (digitálne), od triedy D sa líši tým, že vďaka implementácii nových digitálnych metód spracovania už nepotrebujú na výstupe LC filter vo funkcii dolnej priepusti k potlačeniu spínacieho kmitočtu a ďalších produktov spínania.

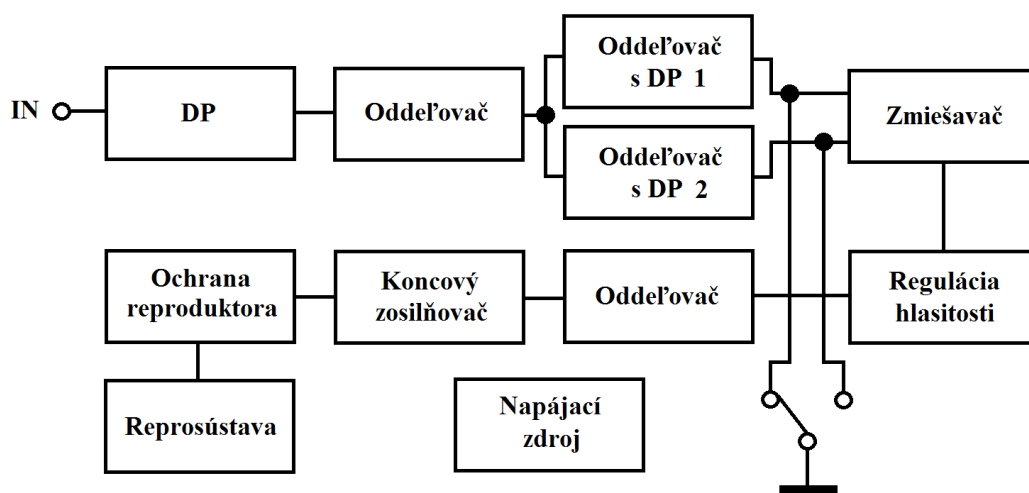
Trieda T – výkonové zosilňovače pracujú na podobnom princípe ako v triede D, ale s použitím vylepšeného a dobre prepracovaného algoritmu riadenia. Výsledkom je účinnosť okolo 90 % a vynikajúce zvukové parametre, skreslenie pod 0,1 %, malé nároky na chladenie.

Vyššie uvedené informácie o triedach zosilňovačov sú prevzaté a upravené z [3].

2 BLOKOVÝ NÁVRH ZOSILŇOVAČA

Táto kapitola sa venuje stručnému popisu celého zariadenia a riešeniu samotného zosilňovača bez reprosústavy.

2.1 Bloková schéma zariadenia



Obrázok 2.1 Bloková schéma jedného kanálu navrhovaného zosilňovača

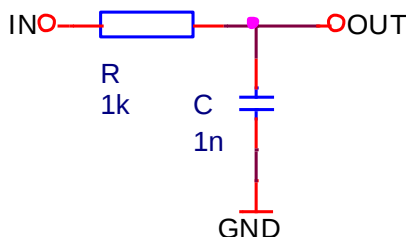
2.1.1 Popis blokovej schémy

Vstupný signál o napätí 775 mV je privedený na dolnú priepusť, ďalej do oddeľovacieho zosilňovača, ktorý bráni vzniku rezistorovej kombinácie na výstupe predošlého a vstupe nasledujúceho bloku. Tu sa signál rozdeľuje do dvoch vetví. Obe vetvy začínajú dolnou priepusťou a po oddelení bude možné signál z jednej, alebo druhej vetvy uzemniť, zatiaľ čo druhý bude pokračovať ďalej. Signál z prvej, respektíve druhej vetvy putuje do zmiešavača, ktorého vstupné rezistory určujú zosilnenie. Takto je zabezpečené, že zo zmiešavača môže vychádzať slabší, alebo silnejší signál, čo sa prejaví ako vyšší alebo nižší výstupný výkon, ktorý je používateľom prepínateľný prepínačom, znázorneným v blokovej schéme. Signál ďalej putuje do regulátora hlasitosti, a po ďalšom oddelení do koncového zosilňovača. Cesta zosilneného signálu je prerušená obvodom pre ochranu reproduktora, ktorý ho k reproduktoru pripojí s niekoľkosekundovým oneskorením, aby reproduktor nebol vystavený nebezpečenstvu zničenia prechodovým javom po zopnutí zosilňovača.

2.2 Vstupná dolná priepusť

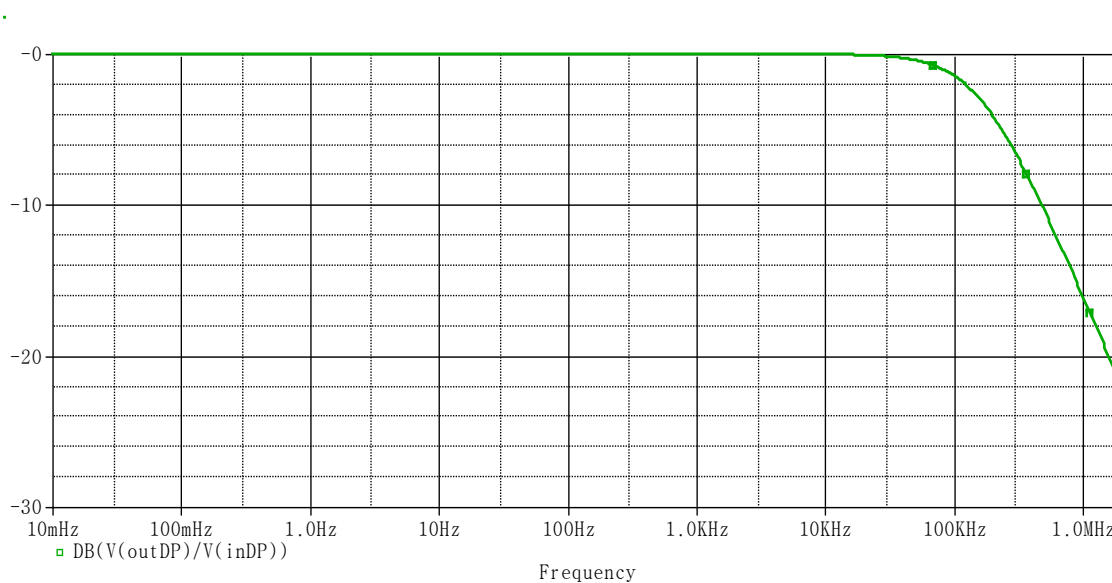
Pasívna dolná priepusť prvého rádu je na vstupe zariadenia zaradená kvôli zákmitu koncového zosilňovača v oblasti okolo 500 kHz, a kvôli vynechaniu tlmivky na jeho

výstupe. Medzný kmitočet je daný hodnotami rezistora a kondenzátora a je nastavený na 159 kHz, dôvod zvolenia takto vysokého kmitočtu je príliš plytké klesanie frekvenčnej charakteristiky. Keby sa zvolil nižší kmitočet, boli by príliš potlačené výšky. Schéma zapojenia dolnej priepusti, ktorá je označená v blokovej schéme ako „DP“, je uvedená na obrázku 2.2.



Obrázok 2.2 Schéma zapojenia pasívnej dolnej priepusti

Na obrázku 2.3 je znázornená modulová prenosová charakteristika tejto dolnej priepusti.



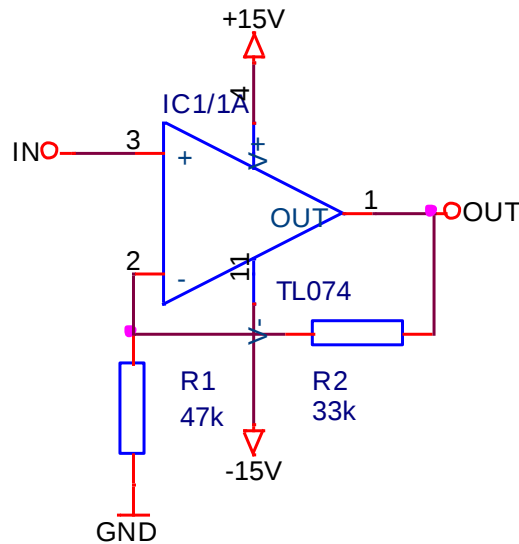
Obrázok 2.3 Modulová prenosová charakteristika navrhutej pasívnej dolnej priepusti

2.3 Oddel'ovače

Ich úlohou je zabrániť vzniku kombinácie rezistorov na výstupe predošlého a vstupe nasledujúceho bloku. Všetky štyri oddel'ovače pracujú v podstate rovnako, len prvý sa od ostatných líši zosilnením.

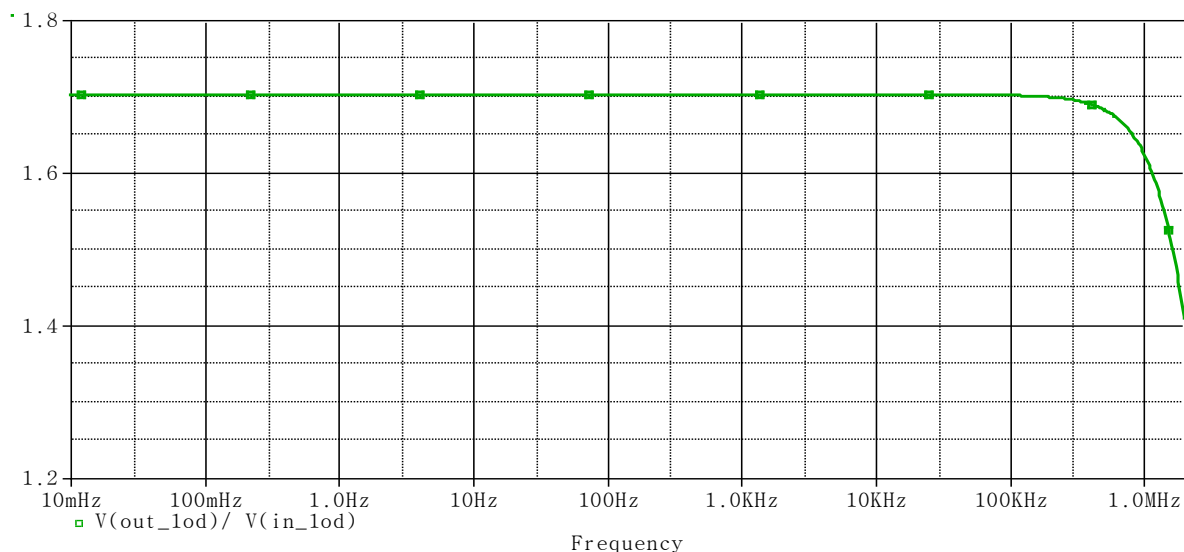
2.3.1 Prvý oddeľovač

Nízkošumový operačný zosilňovač TL071 pracuje v neinvertujúcom zapojení, jeho zosilnenie určujú rezistory R1 a R2 a je nastavené na 1,7. Vstupných 775 mV sa zosilní na 1,32 V, vhodných pre ďalšie spracovanie. Schéma zapojenia tohto oddeľovača, ktorý je v blokovej schéme označený ako „Oddeľovač“, je uvedená na obrázku 2.4.



Obrázok 2.4 Schéma zapojenia prvého oddeľovača

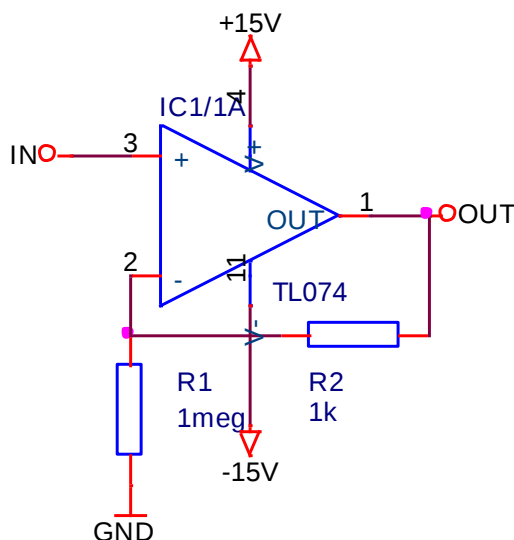
Obrázok 2.5 znázorňuje frekvenčnú závislosť napäťového zosilnenia prvého oddeľovača. Pokles na vysokých kmitočtoch je daný vlastnosťami operačného zosilňovača, a je priamo úmerný nastavenému zosilneniu. V tomto prípade začína výraznejší pokles až mimo akustického pásma, čo je síce nežiadúcim, ale pomocným javom z hľadiska filtrácie vysokých kmitočtov a pomáha tak vstupnej dolnej priepusti.



Obrázok 2.5 Frekvenčná závislosť napäťového zosilnenia prvého navrhnutého oddeľovača

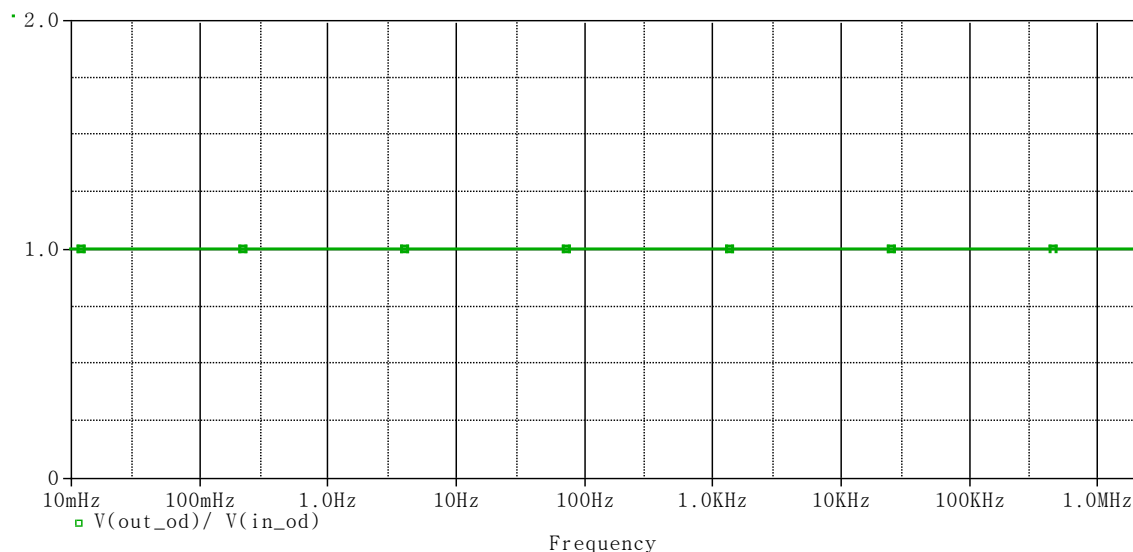
2.3.2 Ostatné oddeľovače

Princíp a zapojenie je rovnaké ako pri prvom oddeľovači, jediná zmena je v zosilnení, ktoré je tentokrát rovné jednej. Oddeľovače s dolnou priepusťou, ktoré sú v blokovej schéme označené ako „Oddeľovač s DP 1“ a „Oddeľovač s DP 2“, majú na vstupe rovnakú dolnú priepusť, ako je na vstupe zosilňovača. Keď sú tieto dolné priepuste od seba takto oddelené, tak klesanie modulu prenosu nezostáva plytšie, ako keby boli tieto pasívne priepuste zapojené priamo za sebou.



Obrázok 2.6 Schéma zapojenia ostatných oddeľovačov

Frekvenčná závislosť napäťového zosilnenia ostatných oddeľovačov je znázornená na obrázku 2.7.



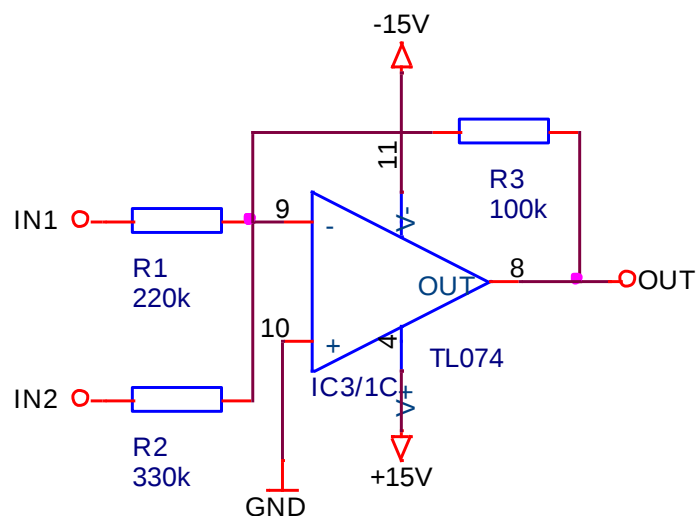
Obrázok 2.7 Frekvenčná závislosť zosilnenia ostatných navrhnutých oddeľovačov

2.4 Zmiešavač

Zmiešavač dokáže signál z jedného vstupu pustiť na výstup, zatiaľ čo signál na druhom vstupe môže byť uzemnený. Presadí sa tak len jeden signál z výstupu predošlých dvoch oddeľovačov, z ktorých jeden môže byť nahradený frekvenčným filtrom na vyrovnanie frekvenčnej charakteristiky použitej reproduktora. Ďalej zabezpečuje, že na vstup koncového zosilňovača pôjde buď silnejší, alebo slabší signál. Uzemňovanie jednej, alebo druhej vetvy je realizované prepínačom, ktorý je znázornený v blokovej schéme. Zmiešavač sa tak stáva kľúčovým blokom tohto zosilňovača.

2.4.1 Popis zapojenia

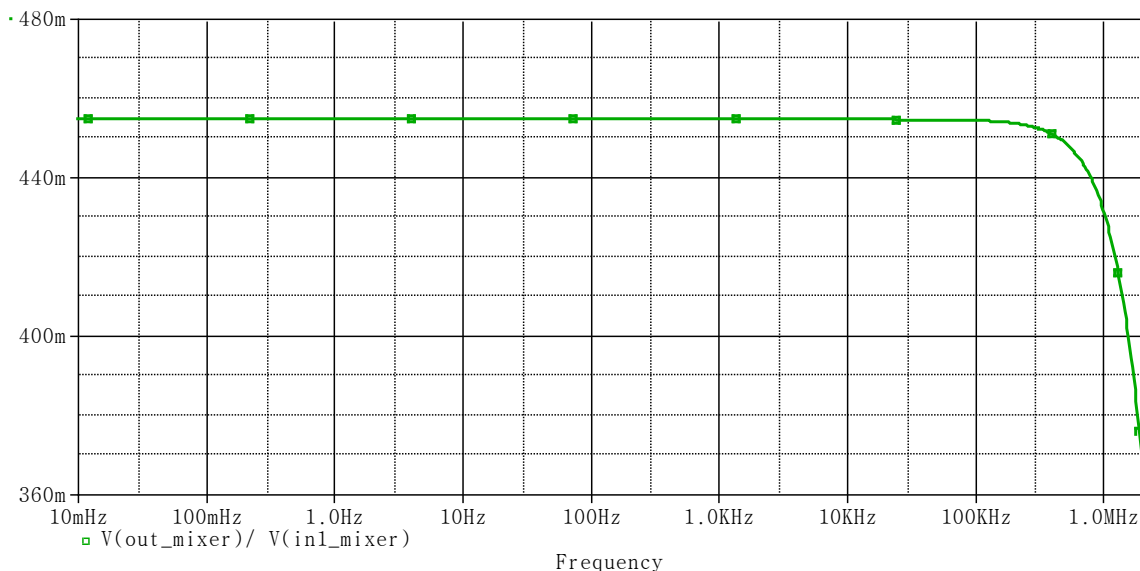
Rezistor R1, respektíve R2 nastavuje zosilnenie jednotlivých vstupov zmiešavača spolu s rezistorom R3. Pri priechode signálu rezistorom R1 a súčasnem uzemnení signálu pred rezistorom R2 je na výstupe zmiešavača tento signál zoslabený na 0,6 V, čo za koncovým zosilňovačom poskytne výkon asi 35 W do 4 Ω záťaže. Naopak, pri priechode signálu rezistorom R2 a súčasnem uzemnení signálu pred rezistorom R1 bude za zmiešavačom 0,4 V, teda na výstupe koncového zosilňovača bude okolo 16 W. Toto zníženie výkonu sa uplatní pri použití reproduktora s nižším príkonom, alebo po prípadnom dodatočnom zavedení frekvenčného filtra namiesto Oddeľovača s DP 2, v ktorom sa budú výrazne zosilňovať tie frekvencie, ktoré hrá reproduktor veľmi slabo, a tak sa na týchto frekvenciách môže výkon koncového zosilňovača rapídne zvýšiť. Schéma zapojenia zmiešavača je na obrázku 2.8.



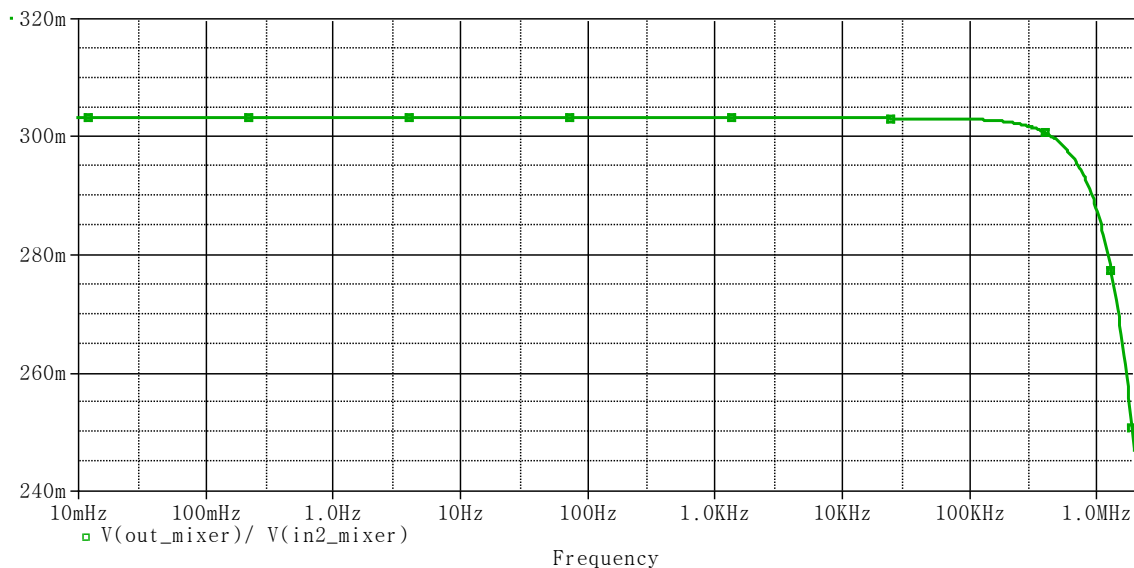
Obrázok 2.8 Schéma zapojenia navrhnutého zmiešavača

2.4.2 Výsledky simulácií v programe PSpice pre zmiešavač

Na obrázkoch 2.9 a 2.10 je do grafov v závislosti na frekvencii vyneseny napät'ový prenos zmiešavača pre priechod signálu jednotlivými vstupmi. Pokles na vysokých kmitočtoch je opäť spôsobený vlastnosťami operačného zosilňovača a je priamo úmerný nastavenému zosilneniu.



Obrázok 2.9 Frekvenčná závislosť napät'ového prenosu zmiešavača pri priechode signálu vstupom 1



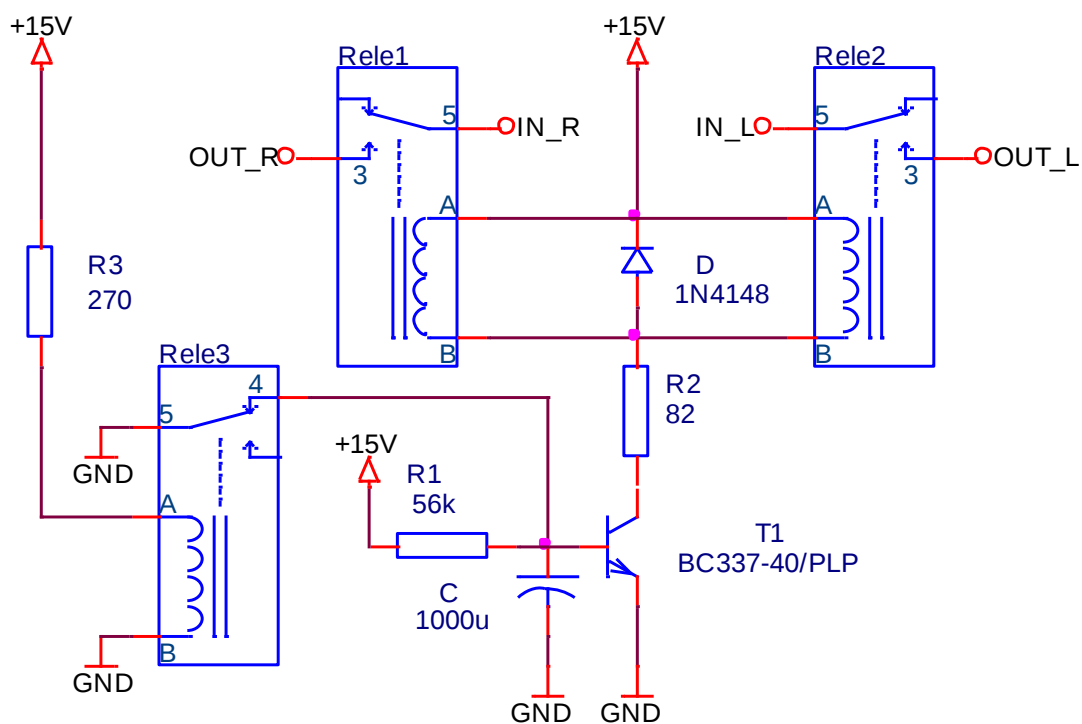
Obrázok 2.10 Frekvenčná charakteristika napät'ového prenosu zmiešavača pri priechode signálu vstupom 2

2.5 Ochrana reproduktorov

Ochrana reproduktorov oneskoreným pripojením chráni reproduktory pred zničením nežiadúcim prechodovým javom po zapnutí zosilňovača.

2.5.1 Popis zapojenia

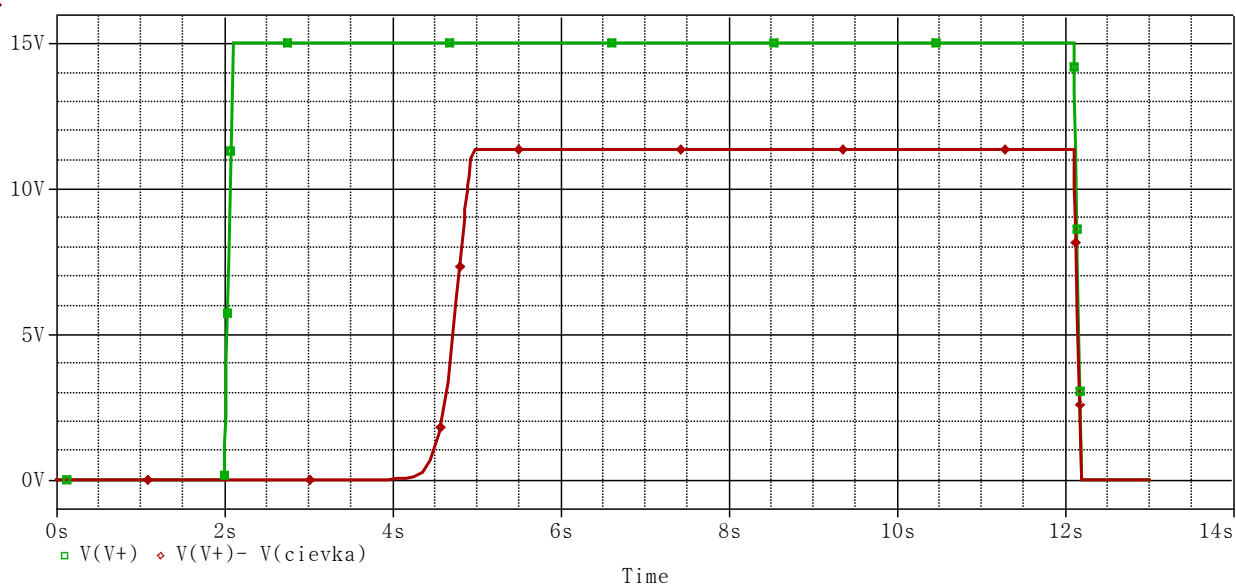
Stabilizované napájacie napätie +15V je po zapnutí privedené na cievku relé3 cez rezistor R3 a toto relé odpojí bázu tranzistora T1 od zeme. Tým pádom sa kondenzátor C už môže nabíť. Na kolektore tranzistora T1 sa drží napätie 15V až kým sa tento kondenzátor nenabije cez rezistor R1, čo je hodnotami týchto súčiastok nastavené na necelé 3 sekundy. Po uplynutí tejto doby sa tranzistor otvorí, a na pinoch B relé1 a relé2 sa objaví napätie asi 3,5 V. Rozdiel potenciálov na cievkach týchto relé je teda asi 11,5 V, čo stačí na zopnutie 12 V relé. Signály z koncových zosilňovačov sú privedené na IN_R a IN_L. K pinom OUT_R a OUT_L sú pripojené proti zemi reproduktory. Relé1 teda pripája reproduktor pravého kanálu a relé2 reproduktor ľavého kanálu ku koncovým zosilňovačom. Po odpojení napájania relé3 opäť pripojí bázu T1 k zemi, čím sa kondenzátor okamžite vybije. Je tak zabezpečené, že po vypnutí, a rýchlo opätovnom zapnutí sa bude kondenzátor nabíjať opäť 3 sekundy. Ako ochrana proti zničeniu tranzistoru po odpojení napätia je k cievkam paralelne zapojená dióda. Rezistor R2 dotvára delič pozostávajúci z jednosmerného odporu paralelne zapojených cievok relé1, relé2 a R2, a zabezpečuje, aby úbytok na cievkach relé1 a relé2 bol práve spomínaných 11,5 V. Ako spínací tranzistor bol použitý BC337-40 s maximálnym kolektorovým prúdom 200 mA, čo je pre tento obvod postačujúce. Schéma obvodu ochrany reproduktorov je na obrázku 2.11.



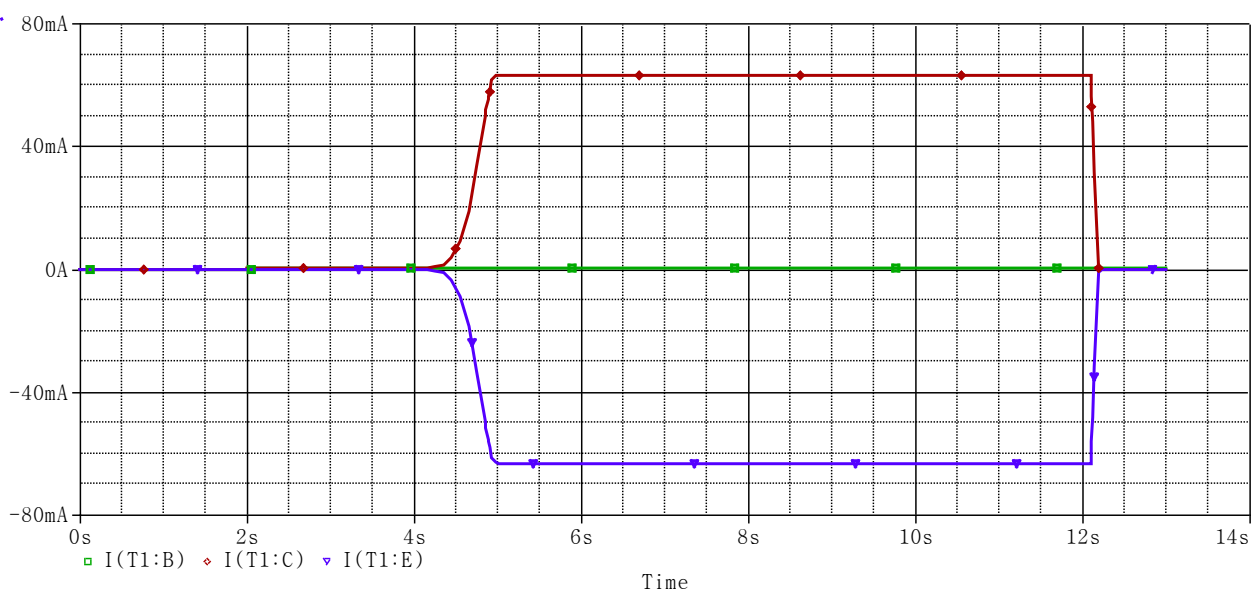
Obrázok 2.11 Schéma zapojenia navrhnutého obvodu oneskoreného pripojenia reproduktorov

2.5.2 Výsledky simulácií v programe PSpice pre obvod oneskoreného pripojenia reproduktorov

Na obrázkoch 2.12 a 2.13 sú znázornené dôležité napätia a prúdy tohto obvodu v časovej oblasti.



Obrázok 2.12 Priebek napätia v uzle A cievok relé1 a relé2 (zelená) a priebek rozdielu potenciálov medzi uzlami A a B týchto cievok (červená)



Obrázok 2.13 Priebek bázového, kolektorového a emitorového prúdu tranzistoru

2.6 Koncový zosilňovač

Koncový zosilňovač zosilňuje signál napäťovo aj prúdovo, a je schopný dodať vysoký výkon do nízkoimpedančnej záťaže. Použitý koncový zosilňovač dokáže dodať do $4\ \Omega$ záťaže $100\ \text{W}$ pri plnom vybudení. V tomto zariadení však bude vždy vybudený len čiastočne, a tak bude na jeho výstupe menší výkon, prepínateľný medzi $35\ \text{W}$ a $16\ \text{W}$, a teda aj koncové tranzistory sa nebudú príliš hriať. Uvedené zapojenie je pomerne jednoduché, lacné, a teda sa hodí pre takúto predimenzovanie za účelom možnosti

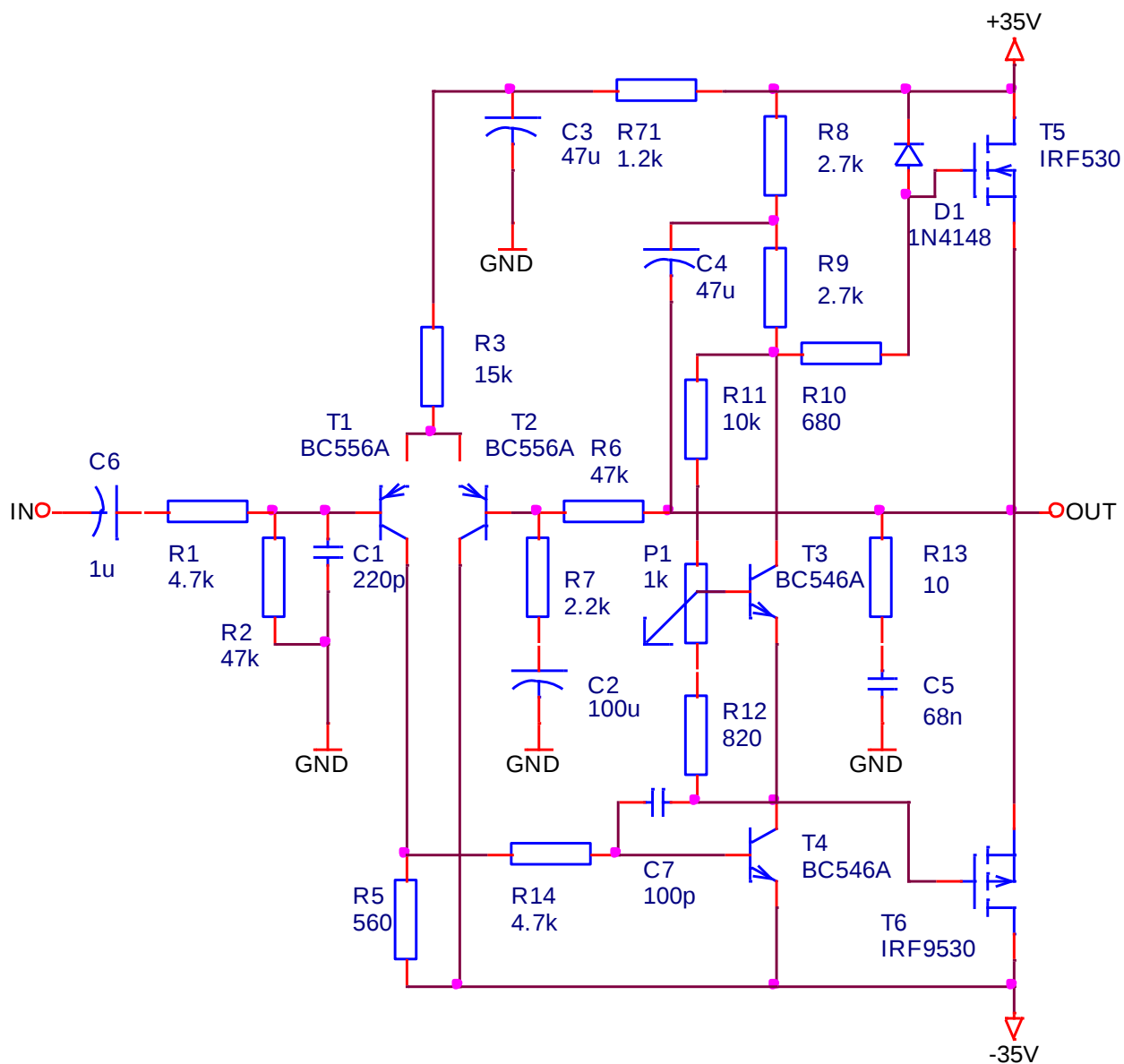
použitia menšieho chladiča. Zosilňovač pracuje v triede AB.

2.6.1 Popis zapojenia

Symetrické napájacie napätie zvyšuje potlačenie nežiadúceho zvyškového sieťového brumu a umožňuje priame pripojenie záťaže na výstup. Koncové tranzistory pracujú ako emitorové (source) sledovače. C4, R8 a R9 tvoria bootstrap, ktorý umožňuje budiacemu tranzistoru T4 pracovať v režime takmer konštantného prúdového zdroja. Dióda D1 bráni tomu, aby sa na gate T5 dostalo plné napájacie napätie a došlo tak k jeho prebudeniu. Tranzistor T3 spolu s R11, R12 a P1 zaisťuje predpätie koncových tranzistorov. Tranzistor T4 pracuje v triede A ako zdroj predpätia koncových tranzistorov a jeho kolektorový prúd je riadený vstupným diferenciálnym zosilňovačom T1, T2. Z výstupu zosilňovača je vedená záporná spätná väzba do báze tranzistoru T2 cez rezistor R6. Napätový zisk zosilňovača je nastavený na 20 rezistormi R6, R7. RC člen na výstupe obmedzuje zisk na vysokých kmitočtoch a bráni rozkmitaniu zosilňovača (Boucherotov člen).

Vyššie uvedený popis zapojenia je prevzatý a upravený z [4]. Schéma zapojenia koncového zosilňovača je uvedená na obrázku 2.14.

2.6.2 Schéma zapojenia



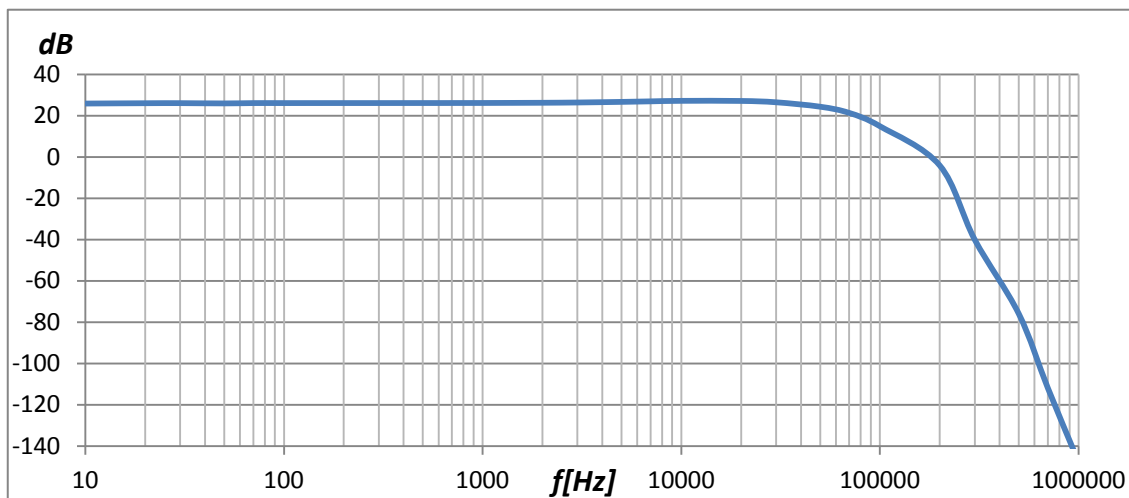
Obrázok 2.14 Schéma zapojenia koncového zosilňovača (prevzaté a upravené z [4])

2.6.3 Výsledky meraní pre koncový zosilňovač

V tabuľke 2.1 sú hodnoty merania napäťového prenosu, a na obrázku 2.15 je táto charakteristika vynesená do grafu.

Tabuľka 2.1 Namerané hodnoty napät'ového prenosu v závislosti na frekvencii

$U_{IN}=40\text{mV}$		
f [Hz]	U_{OUT} [V]	A_U [dB]
10	0,790	25,86
20	0,805	26,031
30	0,808	26,063
50	0,796	25,933
70	0,811	26,095
100	0,811	26,095
200	0,812	26,106
300	0,812	26,106
500	0,813	26,117
700	0,814	26,127
1k	0,816	26,149
2k	0,825	26,244
3k	0,838	26,380
5k	0,867	26,675
7k	0,893	26,932
10k	0,918	27,172
20k	0,913	27,124
30k	0,847	26,472
50k	0,662	24,332
70k	0,469	21,338
100k	0,223	14,881
200k	25m	-4,125
300k	0,4m	-40,04
500k	6,4 μ	-75,96
700k	0,1 μ	-111,8
1M	1,6n	-147,7



Obrázok 2.15 Modulová prenosová charakteristika koncového zosilňovača

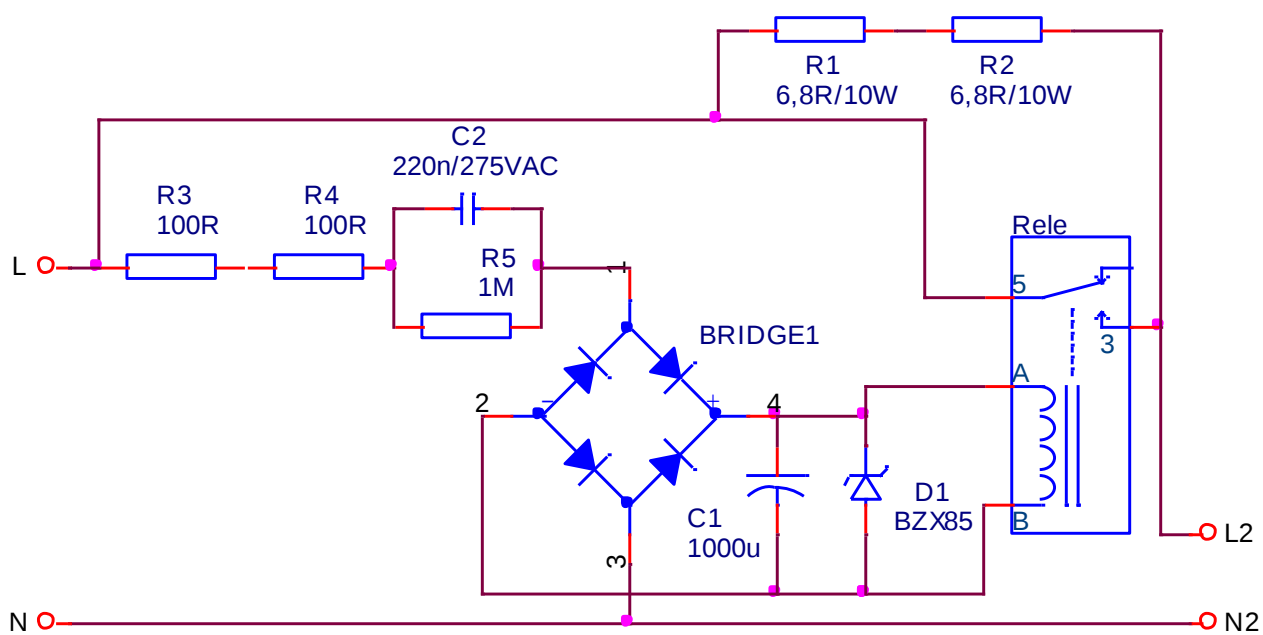
Predpokladané teoretické skreslenie koncového zosilňovača THD na frekvencii 1kHz má byť okolo 0,06%. Tu však bolo merané skreslenie THD+N, takže sa na výsledku prejavujú aj parazitné signály a šum. V režime nižšieho výkonu bolo namerané THD+N 0,19% a v režime vyššieho výkonu 0,13%. Čím vyšší výkon, tým menej sa prejavujú parazitné signály, a tak pri výkone, na ktorý je tento zosilňovač stavaný by bol vplyv parazitných signálov ešte menší.

2.7 Softstart

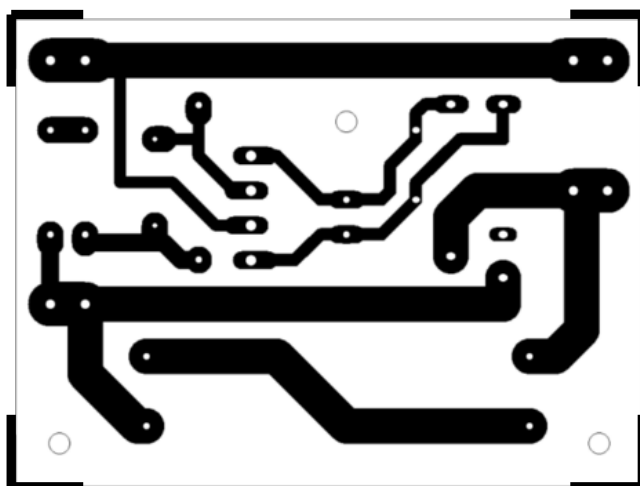
Softstart je obvod, ktorý zabráňuje vyražaniu poistiek pri zapnutí, obzvlášť pri použití toroidných transformátorov. Počas sytenia jadra transformátoru a počas nabíjania filtračných kondenzátorov odoberá zariadenie zo siete obrovský prúd, ktorý softstart obvod zmenší sériovo zaradenými rezistormi ešte pred transformátorom, ktoré sú neskôr premostené pomocou relé. V schéme zapojenia sa napätie zo zásuvky pripojí k pinom L1, N1, a výstupné svorky sú L2 a N2, kde sa pripája sieťový transformátor. Nižšie uvedený popis, schéma, doska plošných spojov, osadzovací výkres aj zoznam súčiastok sú prevzaté a upravené z [1].

2.7.1 Popis zapojenia

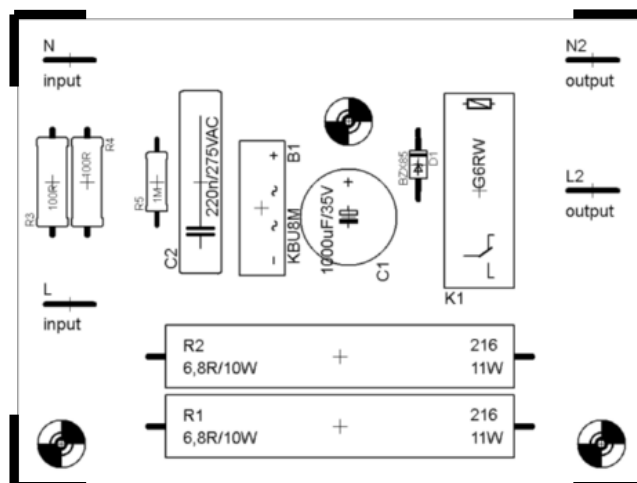
Po zapnutí sieťového spínača začne tiecť prúd cez rezistory R1 a R2, ktoré slúžia k prúdovému obmedzeniu pri zapnutí zosilňovača, kedy sa sýti jadro transformátoru a nabíjajú sa veľké filtračné kondenzátory zdroja. Napäťový deliaci pomer je daný rezistormi R3 až R5. Po usmernení napätia cez graetzov mostík sa nabíja kondenzátor C1, a po uplynutí tejto doby (v závislosti na veľkosti kapacity kondenzátora) zopne relé, ktoré premostí rezistory R1 a R2 a transformátor je potom napájaný normálnym režimom. Schéma zapojenia, doska plošných spojov a osadzovací výkres sú na obrázkoch 2.16, 2.17, 2.18. V tabuľke 2.2 je zoznam súčiastok.



Obrázok 2.16 Schéma zapojenia softstart obvodu (prevzaté a upravené z [1])



Obrázok 2.17 DPS softstart obvodu (prevzaté a upravené z [1])



Obrázok 2.18 Osadzovací výkres softstart obvodu (prevzaté a upravené z [1])

Tabuľka 2.2 Zoznam súčiastok softstart obvodu (prevzaté a upravené z [1])

Názov	Hodnota
R1,R2	6,8Ω/10W
R3,R4	100Ω/1W
R5	1MΩ/0,6W
L,L2,N,N2	Faston 6,3mm
D1	BZX85
C1	1000uF/35V
C2	220nF/275VAC
Rele	G6RW
BRIDGE1	KBU8M

2.8 Skompletizovaný zosilňovač

Táto podkapitola obsahuje schému zapojenia, dosku plošného spoja a odmerané charakteristiky celého zosilňovača bez reprosústavy. Na obrázku 2.19 je schéma zapojenia celého zariadenia. Na obrázku 2.20 a 2.21 je doska plošných spojov a osadzovací výkres celého zariadenia bez softstartu. Zoznam súčiastok celého zariadenia bez softstartu je v tabuľke 2.3. Na obrázkoch 2.22 a 2.23 sú výsledky merania frekvenčnej charakteristiky celého zosilňovača v režime nižšieho výkonu, a na obrázkoch 2.24 a 2.25 v režime vyššieho výkonu.

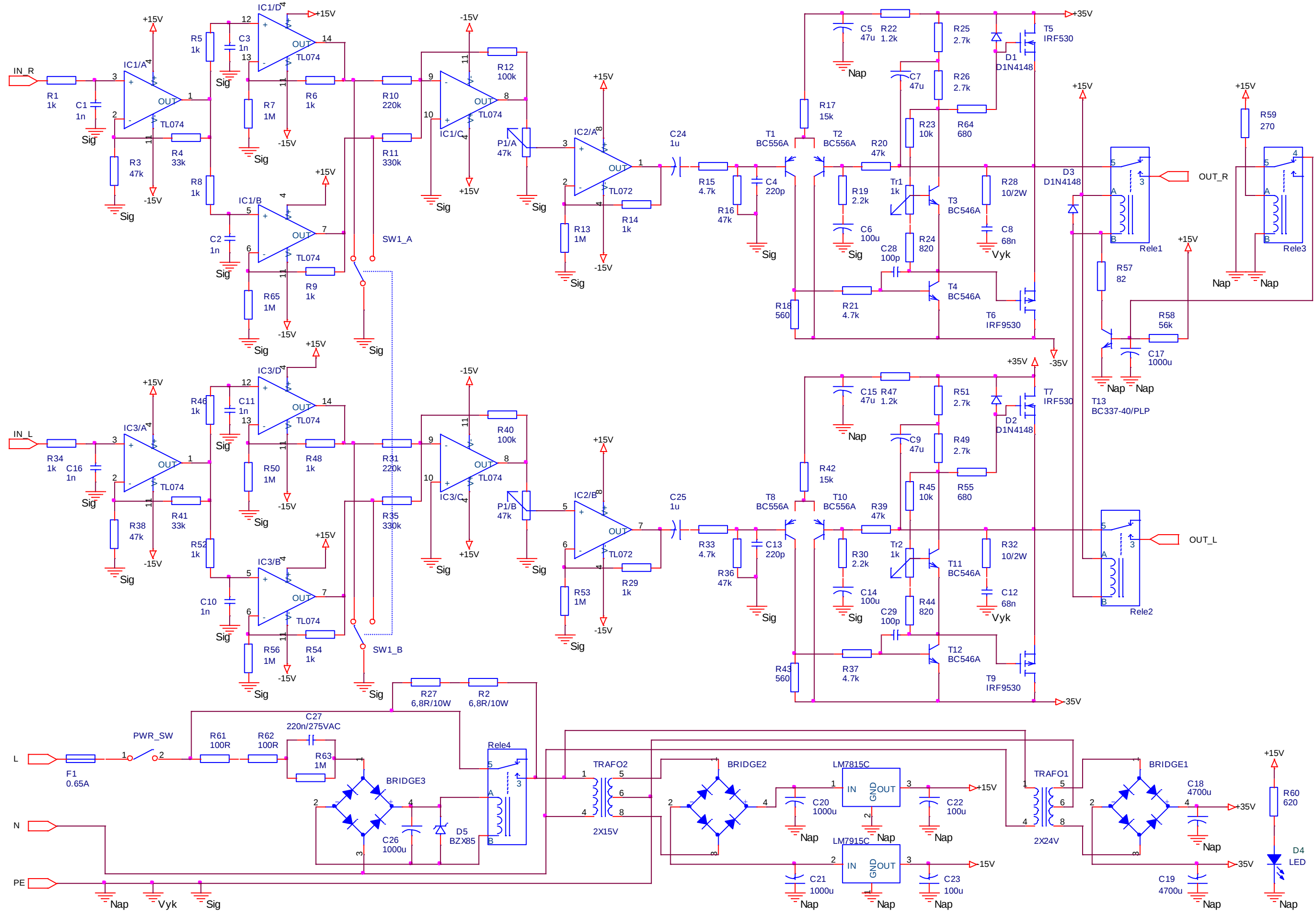
2.8.1 Poznámky k zapojeniu a konštrukcii celého zariadenia

Ako je vidieť zo schémy zapojenia celého zosilňovača, vodič L ide cez poistku a cez

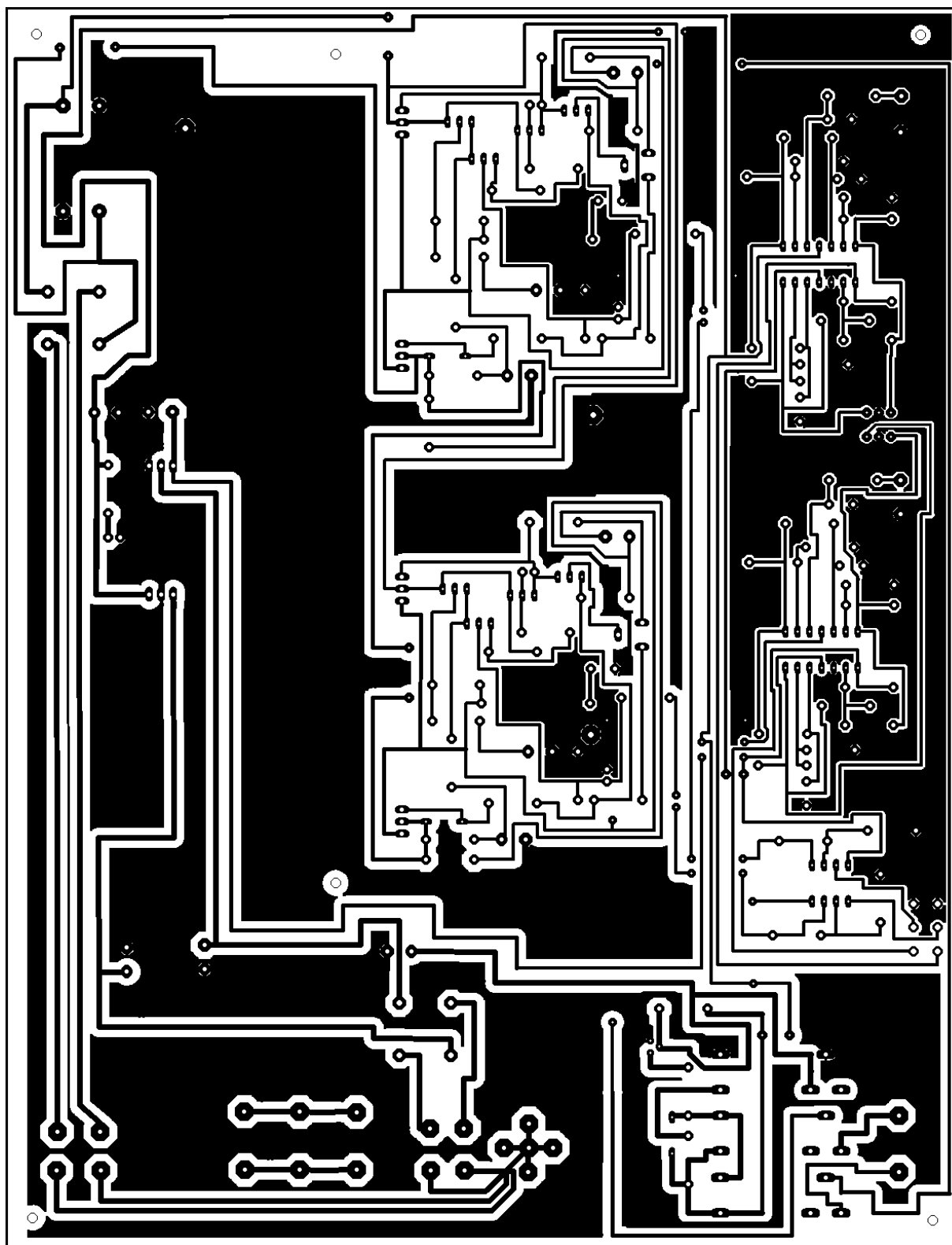
sieťový vypínač do softstartu na pin L. Vodič N ide priamo do softstartu na pin N. Pin L2 softstartu sa pripája na DPS zosilňovača na pin L2. Rovnako aj N2 softstartu sa pripája na N2 na DPS zosilňovača. Vodič PE sa pripája na DPS zosilňovača na pin PE. Na DPS zosilňovača sa ďalej piny NAP_A, SIG_A a VYK_A spoja s pinmi NAP_B, SIG_B, a VYK_B. Tým sa napájacia, signálová a výkonová zem spojí s vodičom PE v jednom mieste (respektíve na veľmi malej ploche). Na pin CHASSIS sa pripojí prístrojová krabica zosilňovača, a je tak spojená s vodičom PE.

K pinom TR-24_P1 a TR-24_P2 sa pripája primárne vinutie transformátora TRAFO1. Jedno sekundárne vinutie tohto transformátora ide na piny TR-24_S1 a TR-24_S2, a druhé sekundárne vinutie sa pripája na TR-24_S3 a TR-24_S4. Takto isto sa pripája aj transformátor TRAFO2, len v názvoch pinov pre tento transformátor je namiesto čísla „24“ číslo „15“.

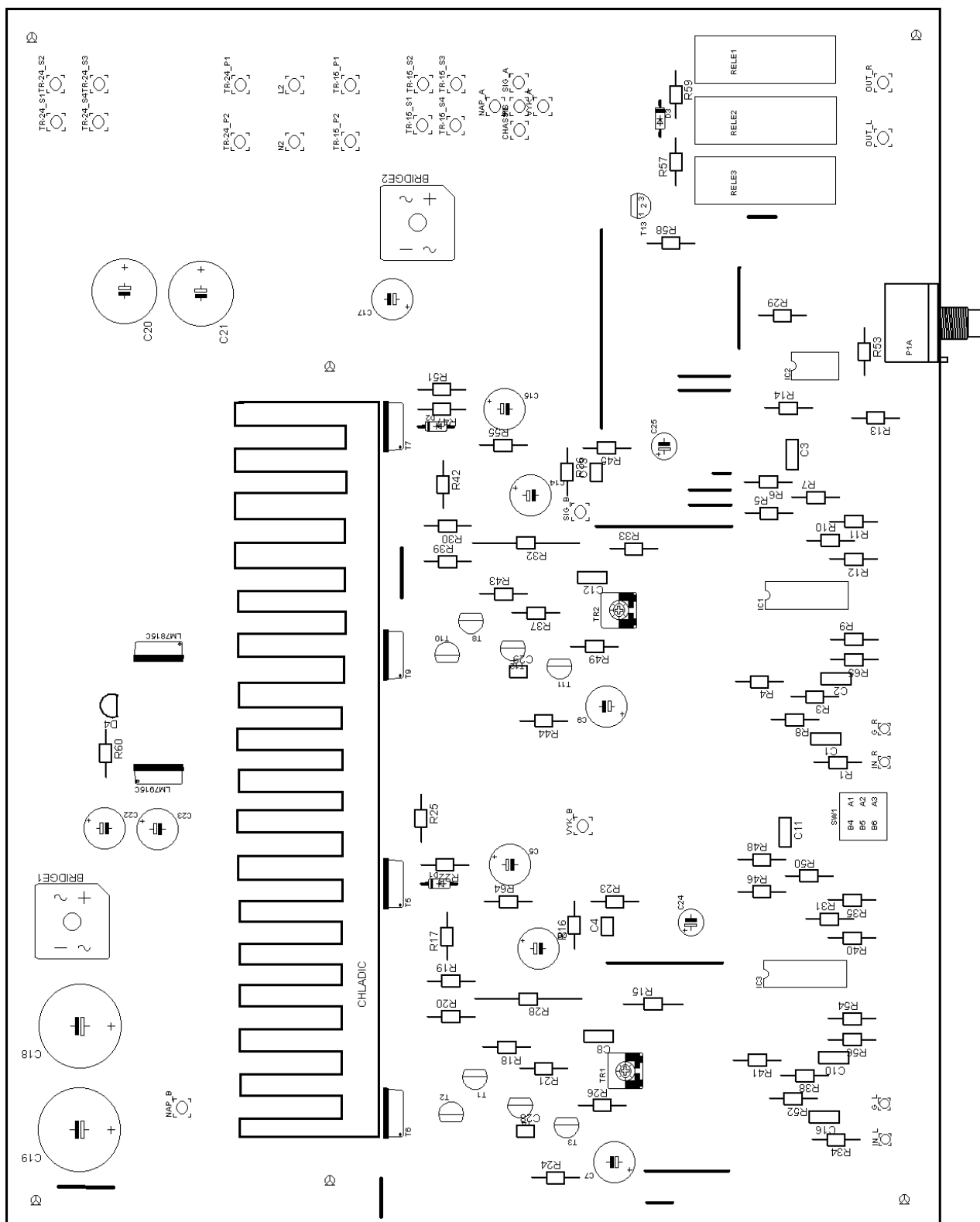
Vstupný signál pravého kanálu sa pripája k pinom IN_R a G_R(Input a Ground). Takisto vstup na ľavý kanál sa pripája na IN_L a G_L. Reprodukter pravého kanálu sa pripojí na pin OUT_R a druhý pól reproduktora sa prispája kdekoľvek na výkonovú zem. Rovnako reprodukter ľavého kanálu sa pripája na pin OUT_L a jeho druhý pól kdekoľvek na výkonovú zem.



Obrázok 2.19 Schéma zapojenia celého zosilňovača

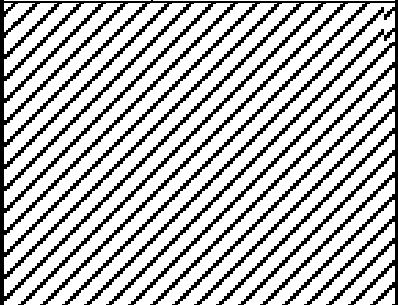


Obrázok 2.20 DPS celého zosilňovača bez softstartu – strana spojov. Mierka M 1,25:1

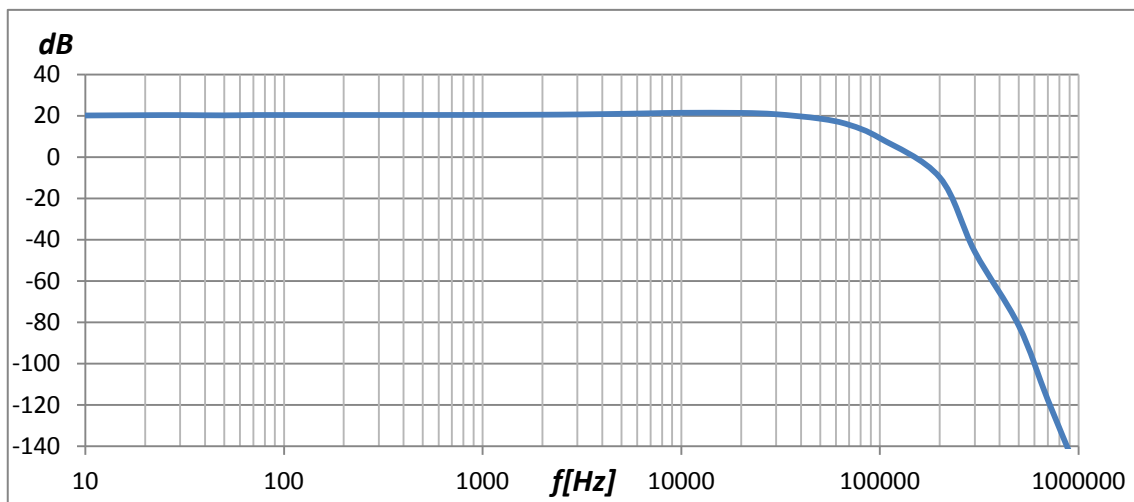


Obrázok 2.21 Osadzovací výkres DPS celého zosilňovača bez softstartu – strana súčiastok. Mierka M 1,25:1

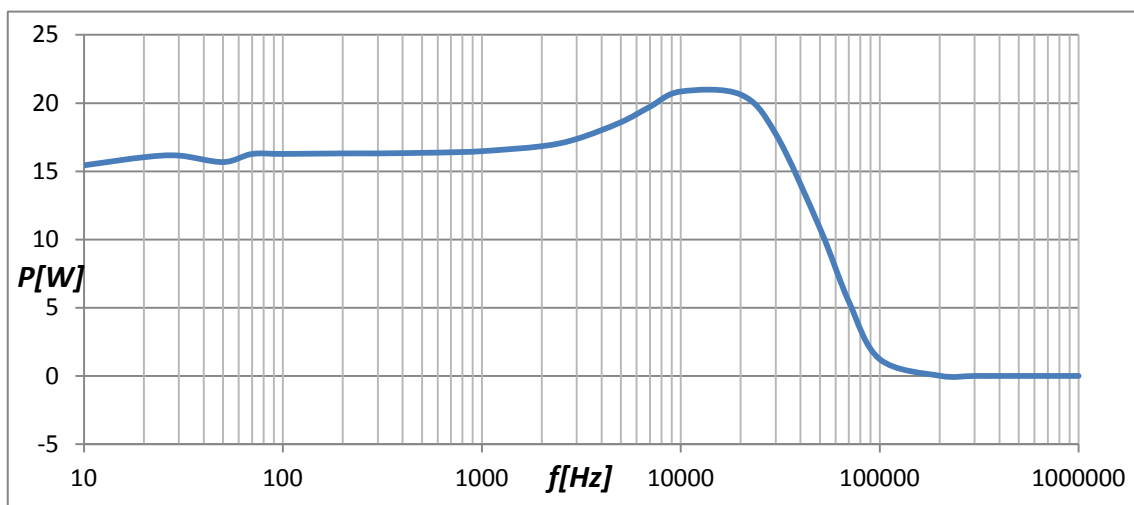
Tabuľka 2.3 Zoznam súčiastok celého zariadenia bez softstartu

Názov	Hodnota	Názov	Hodnota	Názov	Hodnota	Názov	Hodnota
BRIDGE1	B250C6000DR	D4	LED 3mm	R28	10Ω/2W	R60	620Ω
BRIDGE2	B250C3000	IC1	TL074	R29	1kΩ	R64	680Ω
C1	1nF	IC2	TL072	R30	2,2kΩ	R65	1MΩ
C2	1nF	IC3	TL074	R31	220kΩ	RELE1	RELE_FIN
C3	1nF	LM7815C	LM7815C	R32	10Ω/2W	RELE2	RELE_FIN
C4	220pF	LM7915C	LM7915C	R33	4,7kΩ	RELE3	RELE_FIN
C5	47uF/50V	P1A	47kΩ/A	R34	1kΩ	SW1	P-C1560AB
C6	100uF/25V	R1	1kΩ	R35	330kΩ	T1	BC556
C7	47uF/50V	R3	47kΩ	R36	47kΩ	T2	BC556
C8	68nF	R4	33kΩ	R37	4,7kΩ	T3	BC546A
C9	47uF/50V	R5	1kΩ	R38	47kΩ	T4	BC546A
C10	1nF	R6	1kΩ	R39	47kΩ	T5	IRF530
C11	1nF	R7	1MΩ	R40	100kΩ	T6	IRF9530
C12	68nF	R8	1kΩ	R41	33kΩ	T7	IRF530
C13	220pF	R9	1kΩ	R42	15kΩ	T8	BC556
C14	100uF/25V	R10	220kΩ	R43	560Ω	T9	IRF9530
C15	47uF/50V	R11	330kΩ	R44	820Ω	T10	BC556
C16	1nF	R12	100kΩ	R45	10kΩ	T11	BC546A
C17	1000uF/25V	R13	1MΩ	R46	1kΩ	T12	BC546A
C18	4700uF/50V	R14	1kΩ	R47	1,2kΩ	T13	BC337
C19	4700uF/50V	R15	4,7kΩ	R48	1kΩ	TR1	1kΩ
C20	1000uF/35V	R16	47kΩ	R49	2,7kΩ	TR2	1kΩ
C21	1000uF/35V	R17	15kΩ	R50	1MΩ	PWR_SW	P-H8600VB01
C22	100uF/25V	R18	560Ω	R51	2,7kΩ	F1	T630mA
C23	100uF/25V	R19	2,2kΩ	R52	1kΩ	TRAFO1	2X24V/150VA
C24	1uF	R20	47kΩ	R53	1MΩ	TRAFO2	2X15V/4,5VA
C25	1uF	R21	4,7kΩ	R54	1kΩ		
C28	100pF	R22	1,2kΩ	R55	680Ω		
C29	100pF	R23	10kΩ	R56	1MΩ		
D1	1N4148	R24	820Ω	R57	82Ω		
D2	1N4148	R25	2,7kΩ	R58	56kΩ		
D3	1N4148	R26	2,7kΩ	R59	270Ω		

2.8.2 Výsledky merania pre skompletizovaný zosilňovač

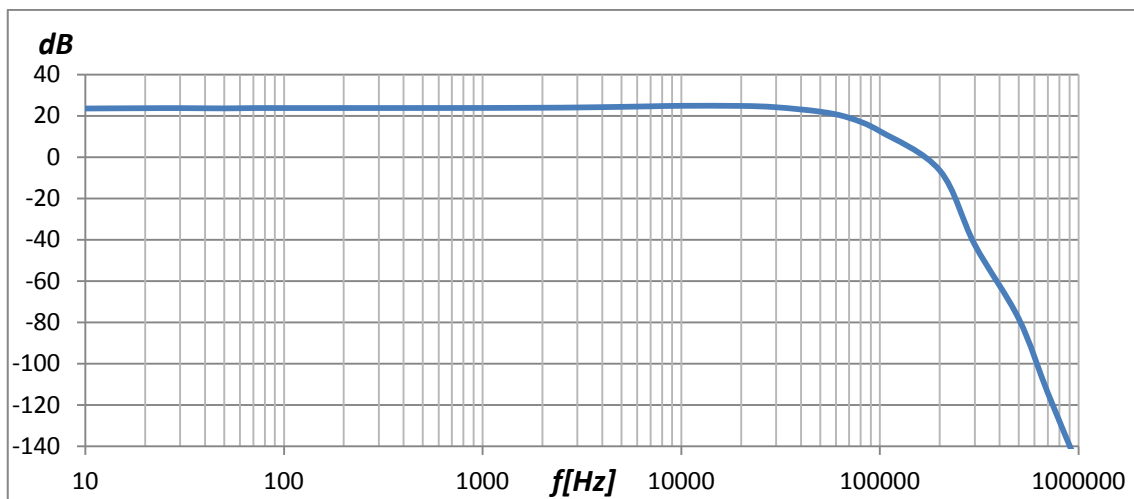


Obrázok 2.22 Modulová prenosová charakteristika skompletizovaného zosilňovača v režime nižšieho výkonu

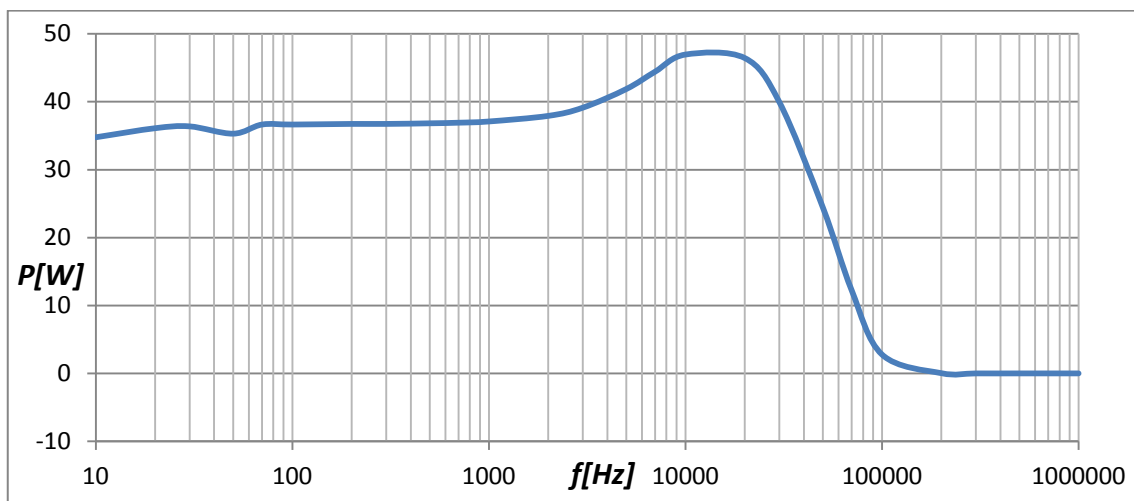


Obrázok 2.23 Výstupný výkon skompletizovaného zosilňovača v režime nižšieho výkonu

Skreslenie celého zosilňovača v režime nižšieho výkonu THD+N je 0,27%. Dôvod takéhoto veľkého skreslenia, tak ako aj dôvod stúpania výkonu v oblasti výšok je komentovaný v závere tejto práce.



Obrázok 2.24 Modulová prenosová charakteristika skompletizovaného zosilňovača v režime vyššieho výkonu



Obrázok 2.25 Výstupný výkon skompletizovaného zosilňovača v režime vyššieho výkonu

Skreslenie celého zosilňovača v režime vyššieho výkonu THD+N je 0,17%. Dôvod takéhoto veľkého skreslenia, tak ako aj dôvod stúpania výkonu v oblasti výšok je komentovaný v závere tejto práce.

3 NÁVRH REPOSÚSTAVY

Táto kapitola sa venuje výberu reproduktorov, návrhu ozvučnice a návrhu frekvenčnej výhybky. Návrhy sú doplnené základnými simuláciami v programe LspCAD.

3.1 Výber reproduktorov

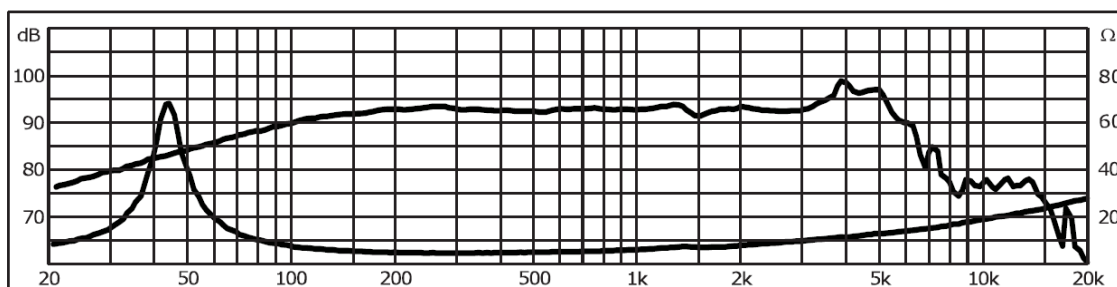
Jedná sa o dvoj pásmovú reposústavu, ktorá ma reprodukovat' pokiaľ možno celé počuteľné pásmo s čo najviac plochou frekvenčnou charakteristikou. Pre reprodukciiu nízkych a stredných kmitočtov bol vybraný stredobasový reproduktor Monacor SP-6/100PRO. Vyššie kmitočty má na starosti Monacor DTM-104/4. Dôvod takto zvolenej kombinácie je kompromis medzi plytkosťou frekvenčnej charakteristiky, charakteristickou citlivosťou, menovitou impedanciou a príkonom oboch reproduktorov.

3.1.1 Stredobasový reproduktor

Dôležité parametre uvádzané výrobcom, s ktorými sa pri návrhu počítalo, sú uvedené v tabuľke 3.1. Frekvenčnú závislosť charakteristickej citlivosti a impedancie znázorňuje Obrázok 3.1.

Tabuľka 3.1 Parametre použitého stredobasového reproduktora (prevzaté a upravené z [5])

Monacor SP-6/100PRO	
Menovitá impedancia	4 Ω
Rezonančný kmitočet	44 Hz
Kontinuálny príkon	100 W
Špičkový príkon	150 W
Charakteristická citlivosť (1W/1m)	93 dB
Mechanický činiteľ akosti	5,52
Elektrický činiteľ akosti	0,29
Celkový činiteľ akosti	0,27
Ekvivalentný objem	28 l
Jednosmerný odpor cievky	3,3 Ω
Indukčnosť cievky	0,4 mH



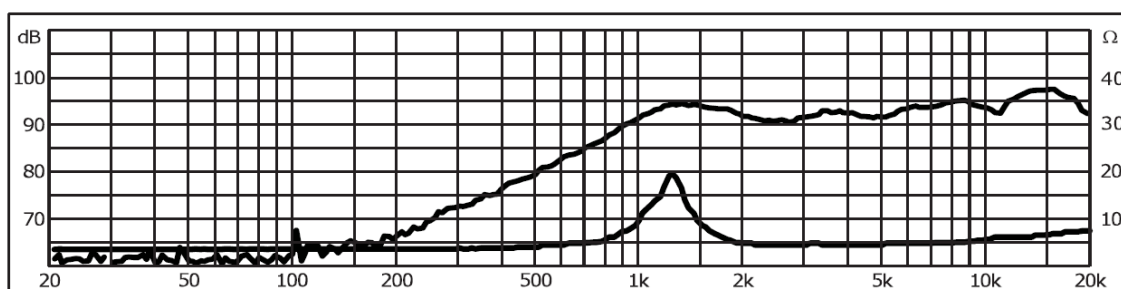
Obrázok 3.1 Závislosť charakteristickej citlivosti (horná krivka) a impedancie (dolná krivka) použitého stredobasového reproduktora na frekvencii (prevzaté z [5])

3.1.2 Výškový reproduktor

Parametre výškového reproduktora návrh reprosústavy až tak neovplyvňujú, tabuľka 3.2 obsahuje tie najdôležitejšie z nich. Obrázok 3.2 znázorňuje frekvenčnú závislosť jeho charakteristickej citlivosti a impedancie.

Tabuľka 3.2 Parametre použitého výškového reproduktora (prevzaté a upravené z [6])

Monacor DTM-104/4	
Menovitá impedancia	4 Ω
Rezonančný kmitočet	1200 Hz
Oporúčaný deliaci kmitočet výhybky (12dB)	2500 Hz
Kontinuálny príkon	45 W
Špičkový príkon	100 W
Charakteristická citlivosť (1W/1m)	92 dB



Obrázok 3.2 Závislosť charakteristickej citlivosti (horná krivka) a impedancie (dolná krivka) použitého výškového reproduktora na frekvencii (prevzaté z [6])

3.2 Návrh ozvučnice

Zvolenie typu ozvučnice a jej ďalší návrh je veľmi viazaný na vlastnosti hlbokotónového reproduktora. Všetky teoretické poznatky a vzťahy v tejto podkapitole sú prevzaté a upravené z [7].

Pre túto reprosústavu bol zvolený typ ozvučnice bassreflex, vyplýva to zo vzťahu [7]

$$EBP = \frac{f_s}{Q_{es}} = \frac{44}{0,29} = 151,7 \text{ Hz}, \quad (3.1)$$

kde f_s a Q_{es} sú rezonančný kmitočet a elektrický činiteľ akosti reproduktoru udávané výrobcom, a EBP je činiteľ Efficiency Bandwidth Product. Jedná sa o informatívnu hodnotu, a pokiaľ je $EBP > 50$ Hz tak sa reproduktor hodí skôr do bassreflexových reproduktorových sústav.

Pre stanovenie objemu ozvučnice bola zvolená aproximácia „Maximally flat“ a bol vypočítaný pomocou nasledujúceho vzťahu [7]

$$V_b = 15,33 \cdot V_{as} \cdot Q_{ts}^{2,86} = 15,33 \cdot 28 \cdot 0,27^{2,86} = 10,15 \text{ l} \quad (3.2)$$

kde V_{as} je ekvivalentný objem reproduktoru a Q_{ts} je celkový činiteľ akosti reproduktoru. Toto je čistý objem, do ktorého bude zadná strana reproduktoru vyžarovať, teda skutočný objem ozvučnice bude tento objem doplnený o objem košov reproduktorov, objem bassreflexového nátrubku, objem výstužných hranolov skrine a o objem výhybky.

Rezonančný kmitočet reproduktoru v bassreflexovej ozvučnici bol vypočítaný podľa vzťahu [7]

$$f_b = \frac{0,42 \cdot f_s}{Q_{ts}^{0,9}} = \frac{0,42 \cdot 44}{0,27^{0,9}} = 60,04 \text{ Hz}, \quad (3.3)$$

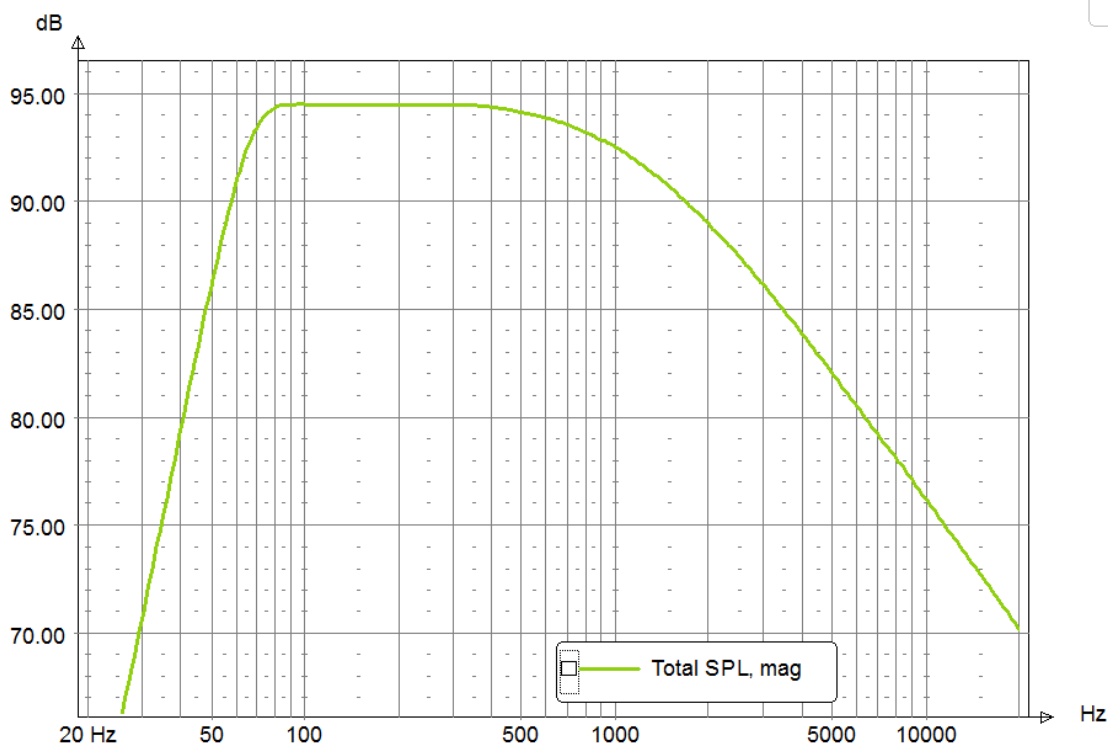
kde f_s je rezonančný kmitočet reproduktoru a Q_{ts} je celkový činiteľ akosti reproduktoru.

Keďže objem ozvučnice je relatívne malý, sú podmienky pre zvolenie rozmerov basreflexového nátrubku dosť obmedzené. A keďže dĺžka nátrubku je priamo úmerná jeho priemeru, čo vyplýva zo vzťahu (3.4), bol zvolený priemer 54 mm. Pri menšom priemere by už bolo dosť vysoké riziko turbulentného prúdenia vzduchu v nátrubku. Dĺžka nátrubku bola vypočítaná pomocou nasledujúceho vzťahu [7]

$$l = \frac{2361 \cdot d^2}{f_b^2 \cdot V_b} - 0,732d = \frac{2361 \cdot 0,054^2}{60,04^2 \cdot 0,01015} - 0,732 \cdot 0,054 = 149 \text{ mm}, \quad (3.4)$$

kde d je priemer nátrubku, f_b je rezonančný kmitočet reproduktoru v bassreflexovej ozvučnici a V_b je objem bassreflexovej ozvučnice. Z predajne dostupných nátrubkov bol vybraný Monacor BR-60TR, s priemerom 54 mm a dĺžkou 140 mm.

Frekvenčná odozva navrhutej bassreflexovej ozvučnice s použitým stredobasovým reproduktorom je znázornená na obrázku 3.3.

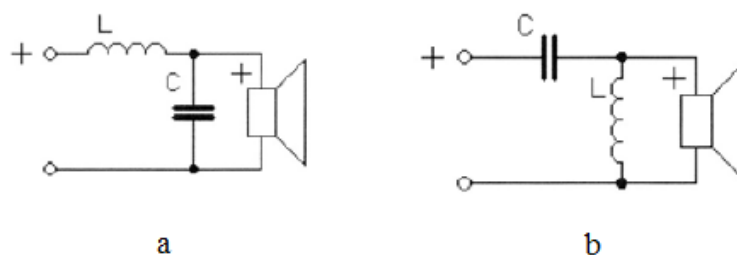


Obrázok 3.3 Frekvenčná odozva navrhutej basseflexovej ozvučnice s použitým stredobasovým reproduktorom

3.3 Návrh frekvenčnej výhybky

Deliaci kmitočet bol zvolený tak, aby výškový reproduktor nebol príliš zaťažovaný, a aby sa veľké nerovnosti frekvenčnej charakteristiky basového reproduktora v oblasti vyšších kmitočtov príliš neprejavili. Ako kompromis týchto dvoch podmienok bol zvolený deliaci kmitočet 2273 Hz. Je to hodnota, pri ktorej sú tieto dve podmienky splnené, a zároveň sa hodnoty súčiastok dajú veľmi presne prispôbiť normovaným hodnotám.

Pre túto výhybku bola zvolená strmosť 12 dB/oct. s aproximáciou Linkwitz – Riley, teda je splnená podmienka konštantnej amplitúdy akustického tlaku. Pred každým reproduktorom bude teda dolná, respektíve horná priepusť druhého rádu, a basová vetva bude navyše obsahovať filter pre kompenzáciu indukčnosti cievky basového reproduktora. Schémy zapojenia týchto priepustí sú na obrázku 3.4.



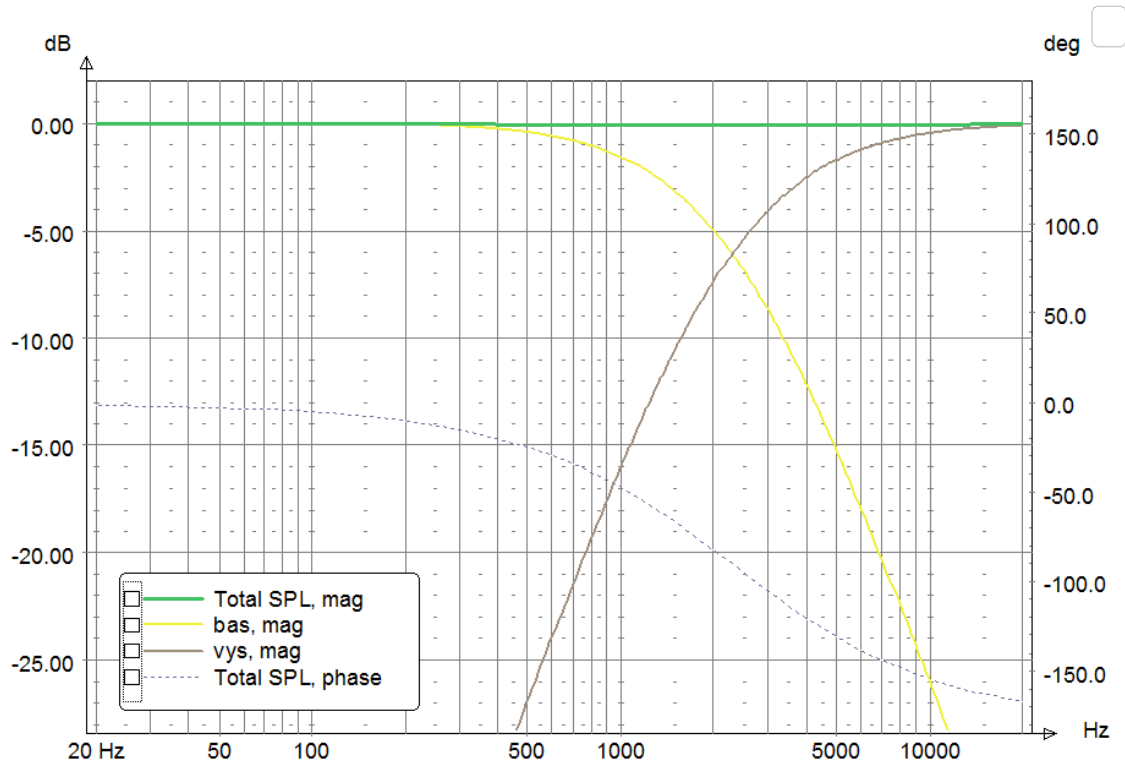
Obrázok 3.4 Schéma zapojenia dolnej (a) a hornej (b) priepusti použitej výhybky (prevzaté a upravené z [7])

Hodnoty použitých súčiastok výhybky boli vypočítané podľa nasledujúcich vzťahov [7]

$$L = \frac{Z}{\pi \cdot f_d} = \frac{4}{\pi \cdot 2273} = 0,56 \text{ mH}, \quad (3.5)$$

$$C = \frac{1}{4\pi \cdot f_d \cdot Z} = \frac{1}{4\pi \cdot 2273 \cdot 4} = 8,75 \text{ } \mu\text{F}, \quad (3.6)$$

kde Z je menovitá impedancia daného reproduktoru a f_d je deliaci kmitočet. Hodnota kondenzátoru $8,75 \text{ } \mu\text{F}$ sa v štandardných radách nenachádza, preto bola približne vytvorená paralelnou kombináciou kondenzátorov s hodnotami $8,2$ a $0,56 \text{ } \mu\text{F}$. Výsledok simulácie výhybky s čisto odporovými záťažami znázorňuje obrázok 3.5. Výškový reproduktor bol prepólovaný, aby bola dosiahnutá plochá frekvenčná charakteristika výhybky. Je to dôsledkom toho, že na deliacom kmitočte reproduktory vyžarujú s opačnou fázou, takže by na charakteristike vznikol veľký prepád, čo sa odstráni ďalším otočením fázy o 180 stupňov, teda zmenou polarít reproduktoru.



Obrázok 3.5 Frekvenčná odozva dolnej priepusti (bas), hornej priepusti (vys) a súčet týchto kriviek (Total SPL) použitej výhybky

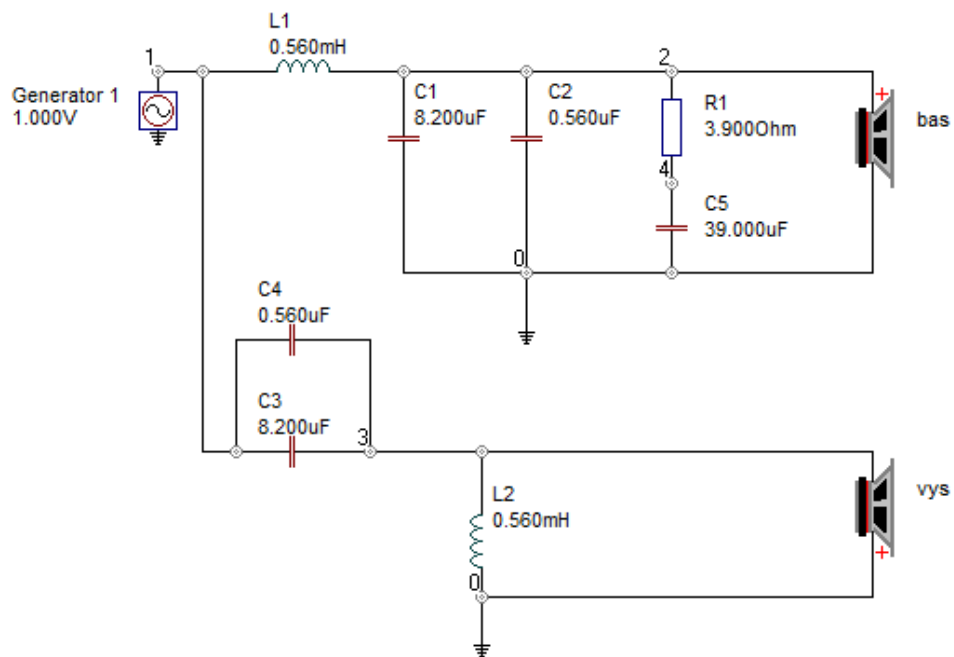
Posledným bodom návrhu výhybky je kompenzácia indukčnosti cievky basového reproduktora. Bola použitá kompenzácia pomocou sériového RC členu pripojeného paralelne k basovému reproduktoru. Jeho impedancia sa skombinuje s impedanciou reproduktora, čím bude vo výsledku poskytnutá výhybke skoro činná záťaž. Hodnoty súčiastok kompenzačného RC členu sa vypočítali pomocou nasledujúcich vzťahov [7]

$$R_k = R_e = 3,3 \, \Omega, \quad (3.7)$$

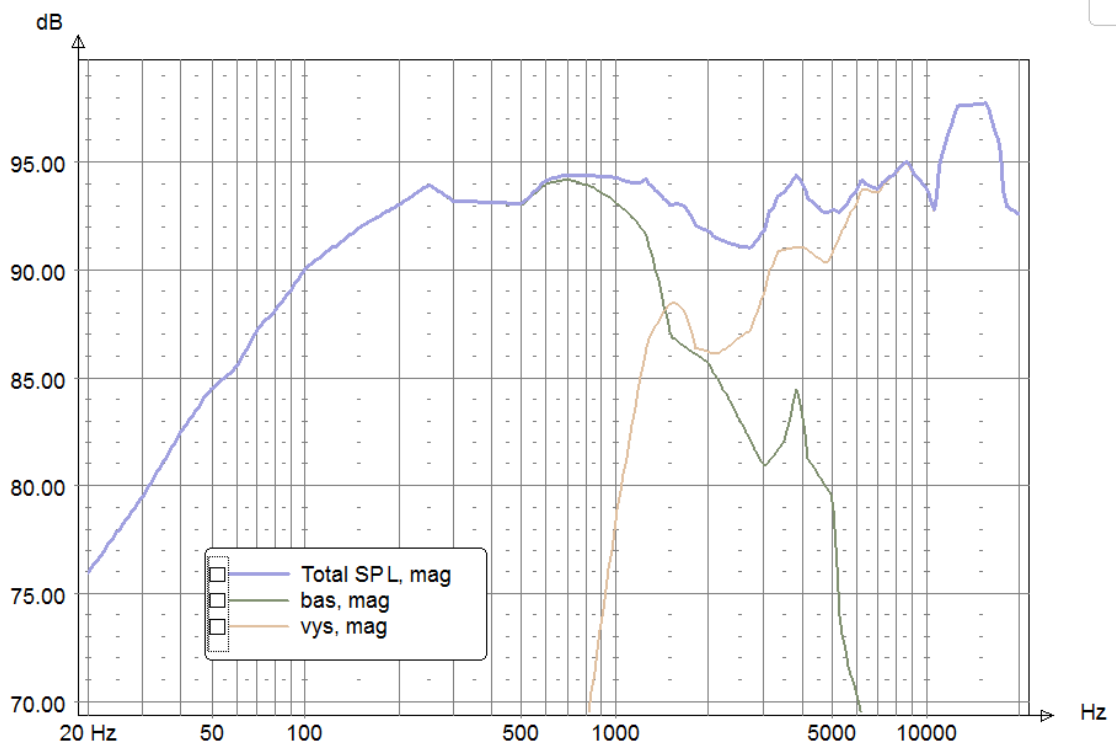
$$C_k = \frac{L_e}{R_e^2} = \frac{0,0004}{3,3^2} = 3,67 \, \mu F, \quad (3.8)$$

kde R_e je jednosmerný odpor cievky basového reproduktora, a L_e je indukčnosť cievky reproduktora. Pre kondenzátor bola z rady vybraná hodnota $3,9 \, \mu F$, a po simuláciach boli výsledky priaznivejšie pri použití kompenzačného rezistoru s odporom $3,9 \, \Omega$, namiesto vypočítaných $3,3$.

Kompletnú schému zapojenia výhybky vrátane kompenzačného RC členu znázorňuje obrázok 3.6. Kompenzačné súčiastky R_k, C_k sú označené ako R_1, C_5 . Výsledok simulácie takto zapojeného obvodu s reálnymi vlastnosťami záťaží je na obrázku 3.7.



Obrázok 3.6 Kompletná schéma zapojenia navrhnutej frekvenčnej výhybky



Obrázok 3.7 Frekvenčná odozva výhybky s reálnymi vlastnosťami záťaží pre basový reproduktor (bas), výškový reproduktor (vys) a pre súčet týchto kriviek (Total SPL)

Všetky vyššie uvedené teoretické poznatky a vzťahy v tejto podkapitole sú prevzaté a upravené z [7].

4 ZÁVER

V tejto práci bol rozobratý návrh zosilňovača s reprosústavou, ktorý vyhovuje domácim podmienkam. Jednotlivé bloky zosilňovača sú navrhnuté tak, aby koncový zosilňovač s reprosústavou fungovali spoľahlivo a bezpečne.

Všetky použité dolné priepuste spolu s nežiadúcimi dolnými priepustami vzniknutými parazitnými odpormi a kapacitami integrovaných obvodov efektívne napomáhajú k potlačeniu nadakustických kmitočtov.

Navrhnuté oddeľovače účinne oddeľujú susedné bloky a zabraňujú ich nežiadúcemu vzájomnému ovplyvňovaniu. Oddeľovač s DP1 a oddeľovač s DP2 zároveň plnia funkciu rozdelenia signálu do dvoch nezávislých vetví, za účelom uzemnenia iba jednej z nich. Je tak vždy využitý iba jeden vstup zmiešavača, teda sa nestane, že by zosilňovač chcel pracovať v oboch režimoch naraz. Celý tento problém je teda vyriešený čisto analógovo a bez zotrvačných článkov, takže funguje vždy rovnako a nie je treba ho nijak ošetrovať. Problém s predzosilňovačom predsa len nastal. Integrované obvody TL074 zrejme kmitajú, pretože sa dosť zahrievajú a skresľujú signál, čo by robiť nemali. S veľkou pravdepodobnosťou je to spôsobené nedokonalou stabilizáciou ich napájania – v zdroji chýbajú za stabilizátormi kondenzátory s nízkou kapacitou, ktoré bránia rozkmitaniu. Zdroj však nebol predmetom návrhu. Ďalší možný dôvod kmitania týchto obvodov sú chýbajúce oddeľovacie kondenzátory na vstupoch a výstupoch každého operačného zosilňovača. Neboli sem v návrhu zaradené kvôli predpokladu, že symetrické napájanie vylučuje ich potrebu. Za predzosilňovačom je teda v signáli počuť parazitné javy – pri stíšení je stále signál počuť, ale veľmi slabo a dosť skreslene. Z merania bolo zistené, že skreslenie THD+N je nepriamo úmerné hlasitosti. Takže sa dá povedať, že tento skreslený signál tu hrá stále s rovnakou intenzitou, a do neho sa pridávaním hlasitosti primiešava užitočný signál. Preto je pri väčšej hlasitosti skreslenie menšie, lebo tam už sa tento nežiadúci signál uplatňuje menej. Skreslenie THD+N je za predzosilňovačom pri plnej hlasitosti v režime nižšieho výkonu 0,08%, a v režime vyššieho výkonu 0,04%.

Zo všetkými týmito pomocnými obvodmi dostáva koncový zosilňovač na vstup vždy regulovateľný signál 600 mV, alebo 400 mV – podľa režimu, v ktorom práve pracuje. Výstupný výkon je teda regulovateľných 35 W, alebo 16 W do 4 Ω záťaže. Koncový zosilňovač je výkonovo predimenzovaný, a tak sa nároky na chladenie znižujú – menší a lacnejší chladič, za cenu použitia nevybudeného 100 W zosilňovača. Cena zosilňovača týchto kvalít s výkonom 35 W pri plnom vybudení by bola iba nepatrne nižšia, no chladič by musel byť omnoho väčší a drahší. Koncový zosilňovač tiež skresluje viac ako sa predpokladalo. Merania boli uskutočnené s neuzemnenou prístrojovou skriňou a taktiež zemniace plochy na plošnom spoji nie sú vyliaté všade, kde by mali byť a tak sa do užitočného signálu dostáva rušenie z okolia a z transformátoru. To by mohol byť dôvod vyššieho skreslenia, s akým sa počítalo. Z pôvodného zapojenia koncového zosilňovača bola odobratá výstupná tlmivka, čo zrejme spôsobuje zakrivenie frekvenčnej charakteristiky v oblasti výšok.

Obvod pre ochranu reproduktorov pripája reproduktory ku koncovému zosilňovaču s takmer trojsekundovým oneskorením, čo stačí, aby sa prechodový jav po zapnutí

zosilňovača stihol ustáliť. Taktiež je ošetrená podmienka vypnutia a rýchleho opätovného zapnutia zosilňovača, nemôže sa tak stať, že by sa reproduktory pripojili ku koncovému zosilňovaču skôr, ako po tejto spomínanej dobe.

Reprosústava je taktiež trochu predimenzovaná, je tak pripravená na možné neskoršie zavedenie frekvenčného filtra namiesto oddeľovača s DP1, ktorý bude výrazne zosilňovať niektoré frekvencie, a tak sa na týchto frekvenciách výkon zvýši. Návrh tohto frekvenčného filtra sa bude odvíjať zo skutočnej zmeranej frekvenčnej charakteristiky celého reťazca, aby bol zvuk čo najvernejší.

LITERATÚRA

- [1] PETRGÁL, F. *Audio výkonový zesilovač 2 x 500 W*. Bakalárska práca. Brno: FEKT VUT v Brně, 2011. 2.s. .
- [2] KRATOCHVÍL, T. *Úvod do nízkofrekvenční a audio elektroniky*. Nízkofrekvenční a audio elektronika – Prednáška č. 1. Brno: FEKT VUT v Brně, 2006.
- [3] KRATOCHVÍL, T. *Třídy a vlastnosti zesilovačů, předzesilovače*. Nízkofrekvenční a audio elektronika – Prednáška č. 3. Brno: FEKT VUT v Brně, 2006.
- [4] KOTISA, Z. *NF ZESILOVAČE – 3. díl tranzistorové výkonové zesilovače*. BEN – technická literatura, Praha 2003. 65 s. ISBN 80-7300-065-2.
- [5] Monacor International [online]. SP-6/100PRO – Miniature PA bass-midrange speaker, 150WMAX, 100WRMS, 4Ω. – [cit. 19. novembra 2012]. Dostupné na [www: http://www.monacor.sk/product/show/5782/SP-6-100PRO](http://www.monacor.sk/product/show/5782/SP-6-100PRO).
- [6] Monacor International [online]. DTM-104/4 – Hi-fi dome tweeters, 100WMAX, 8Ω (/8) and 4Ω (/4). – [cit. 19. novembra 2012]. Dostupné na [www: http://www.monacor.sk/product/show/5875/DTM-104-4](http://www.monacor.sk/product/show/5875/DTM-104-4).
- [7] TOMAN, K. *Reproduktory a reprosoustavy*. DEXON, Karviná 2001. 88 – 135 s. .

ZOZNAM SYMBOLOV, VELIČÍN A SKRATIEK

DP	Dolná priepusť
In	Vstup
Out	Výstup
<i>EBP</i>	Efficiency bandwidth product
f_s	Rezonančný kmitočet reproduktoru
Q_{es}	Elektrický činiteľ akosti reproduktoru
V_b	Objem basreflexovej ozvučnice
V_{as}	Ekvivalentný objem reproduktoru
Q_{ts}	Celkový činiteľ akosti reproduktoru
f_b	Rezonančný kmitočet reproduktoru v bassreflexovej ozvučnici
l	Dĺžka basreflexového nátrubku
d	Priemer basreflexového nátrubku
L	Indukčnosť použitých tlmiviek výhybky
C	Kapacita použitých kondenzátorov výhybky
Z	Impedancia reproduktoru
f_d	Deliaci kmitočet výhybky
R_k	Odpor rezistoru kompenzačného RC článku
R_e	Jednosmerný odpor reproduktoru
C_k	Kapacita kondenzátoru kompenzačného RC článku
L_e	Indukčnosť kmitaciej cievky reproduktoru