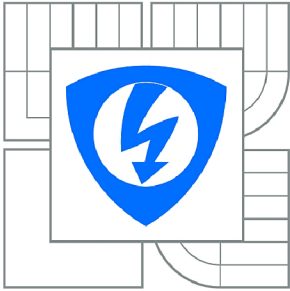




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

NÁVRH A REALIZACE AKTIVNÍCH REPRODUKTOROVÝCH SOUSTAV S DIGITÁLNÍM VSTUPEM

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF LOUDSPEAKER SYSTEM FOR WAVEFIELD SYNTHESIS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. FILIP UCHYTIL

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JIŘÍ SCHIMMEL, Ph.D.

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Telekomunikační a informační technika

Student: Bc. Filip Uchytíl

ID: 106844

Ročník: 2

Akademický rok: 2011/2012

NÁZEV TÉMATU:

Návrh a realizace aktivních reproduktorových soustav s digitálním vstupem

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte a realizujte dvoupásmovou reproduktorovou soustavu kompaktní velikosti a robustní konstrukce s integrovaným bi-amp zesilovačem s analogovým a digitálním vstupem, dvoupásmovým ekvalizérem a se síťovým napájecím zdrojem. Reproduktorová soustava bude určena pro ozvučení kapely nebo jiné veřejné produkce, proto při návrhu upřednostňujte vyzářený výkon oproti šířce pásma reprodukce a zvlnění modulové kmitočtové charakteristiky. Snažte se dosáhnout co nejvyššího akustického výkonu při nízkém celkovém harmonickém zkreslení. Objem ozvučnice by neměl přesáhnout 25 litrů. Zesilovač bude umožňovat nastavení citlivosti vstupu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Sýkora, B., "Stavíme reproduktorové soustavy", 1. - 48. díl. A Radio 10/1997 - 9/2001.
- [2] Toman, K., Reprodukory a reposoustavy, 1 díl. 2003.
- [3] Self, D., Small Signal Audio Design. Focal Press, 2010. ISBN 978-0-240-52177-0

Termín zadání: 6.2.2012

Termín odevzdání: 24.5.2012

Vedoucí práce: Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce:

prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Práce je zaměřena na návrh aktivní reproduktorové soustavy s bi-amp zesilovačem a digitálním vstupem. Je zde popsána teorie návrhu ozvučnice a její praktická realizace. Dále se pojednává o návrhu a konstrukci vstupních obvodů jako je předzesilovač, baxandallův korektor, aktivní výhybka, all-pass filtr a S/PDIF. Na základě popsané teorie zesilovačů jsou zvoleny optimální konstrukce zesilovačů a jejich následný návrh. Komplexní návrh reproduktorové soustavy je navržen tak, aby bylo dosaženo maximálního akustického výkonu při zachování nízkého zkreslení.

KLÍČOVÁ SLOVA

Reproduktor, ozvučnice, S/PDIF, baxandallův korektor, předzesilovač, aktivní výhybka, all-pass filtr, výkonový zesilovač

ABSTRACT

The work is focused on a design of an active loudspeaker system with a bi-amp amplifier and a digital input. There is described the theory of a loudspeaker enclosure design and its practical implementation. Furthermore the work deals with a design and construction of input circuits such as a preamplifier, Baxandall tone control, active crossover, all-pass filter and S/PDIF. On the basis of the amplifier's theory the optimal construction of amplifiers and their design are selected. The complex design of the loudspeaker box is devised so that it would reach a maximum acoustic power during the preservation of a low distortion.

KEYWORDS

Loudspeaker, enclosure, S/PDIF, Baxandall tone control, preamplifier, active crossover, all-pass filter, power amplifier

Bibliografická citace mé práce:

UCHYTIL, F. Návrh a realizace aktivních reproduktorových soustav s digitálním vstupem.
Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií,
2012. 93 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Schimmel, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že svůj semestrální projekt na téma Návrh a realizace aktivních reproduktorových soustav s digitálním vstupem jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrálního projektu a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedeného semestrálního projektu dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením tohoto projektu jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Jiří Schimmelovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne

.....
Filip Uchytíl

Výzkum popsáný v této diplomové práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

Obsah

Seznam obrázků.....	4
Seznam tabulek	5
Úvod.....	6
1 Zvuk.....	6
1.1 Vznik zvuku	6
1.2 Vlastnosti zvukového vlnění	6
1.3 Odrazy a stojaté vlnění	7
1.4 Lidský sluch	8
2 Reprodukory	10
2.1 Dělení reproduktorů	10
2.1.1 Dělení podle frekvenčního rozsahu	10
2.1.2 Dělení podle principu činnosti	13
2.2 Parametry reproduktorů	14
2.2.1 Všeobecné parametry.....	14
2.2.2 Thiele – Small parametry	17
3 Ozvučnice	20
3.1 Konstrukce ozvučnice	20
3.1.1 Materiály pro stavbu ozvučnic.....	21
3.2 Tlumení ozvučnice	21
3.3 Uzavřená ozvučnice	22
3.4 Ozvučnice typu bassreflex	22
3.4.1 Aproximace ladění	24
4 Vlastní návrh reproduktorové soustavy.....	26
4.1 Výběr reproduktorů.....	26
4.1.1 Výběr hlubokotónového reproduktoru	26
4.1.2 Výběr vysokotónového reproduktoru	27
4.2 Návrh ozvučnice pomocí vzorců	28
4.3 Návrh ozvučnice pomocí simulace	30
4.4 Konstrukční řešení ozvučnice	32
4.5 Měření reproduktorové soustavy.....	32
4.5.1 Modulová frekvenční charakteristika	33
4.5.2 Směrová charakteristika	33
4.5.3 Harmonické zkreslení.....	34

5	Vstupní obvody reproduktorové soustavy	36
5.1	Nastavení citlivosti vstupu	36
5.1.1	Přepínač citlivosti vstupu (útlumový článek) [8]	36
5.1.2	Návrh útlumového článku	36
5.2	Předzesilovače	37
5.2.1	Nesymetrický signál	37
5.2.2	Symetrický signál	38
5.3	Návrh předzesilovače	38
5.4	Obvod pro výběr analogového nebo digitálního vstupu	39
5.5	Obvod pro zpoždění reproduktoru	39
5.5.1	Návrh all-pass filteru	40
5.6	Korekční předzesilovače	41
5.7	Návrh korekčního předzesilovače	41
5.8	Obvod pro srovnání citlivostí reproduktorů	43
5.9	Reproduktorové výhybky	43
5.9.1	Návrh aktivní výhybky	44
5.10	Realizace vstupních obvodů	46
6	NF výkonové zesilovače	47
6.1	Třídy zesilovačů	47
6.1.1	Třída A	47
6.1.2	Třída B	47
6.1.3	Třída AB	47
6.1.4	Třída G	48
6.1.5	Třída H	48
6.1.6	Třída D	48
6.2	Zkreslení zesilovače	48
6.2.1	Zkreslení harmonické	48
6.2.2	Zkreslení intermodulační	49
6.3	Výstupní výkon zesilovače	49
6.3.1	Standard EIA	49
6.3.2	Standard FTC (Federal Trade Commission)	50
6.4	Impedance zesilovače	50
6.4.1	Vstupní impedance	50
6.4.2	Vnitřní impedance a činitel tlumení	50
6.4.3	Zatěžovací impedance	51

7	Návrh zesilovačů	52
7.1	Zesilovač pro vysokotónový reproduktor	52
7.1.1	Popis funkce	52
7.1.2	Realizace vysokotónového zesilovače	53
7.2	Zesilovač pro hlubokotónový reproduktor	53
7.2.1	Popis funkce	53
7.2.2	Detektor přebuzení	54
7.2.3	Realizace zesilovače pro hlubokotónový reproduktor	55
8	Závěr	56
	Literatura	58
	Seznam symbolů a zkratk	59
	Seznam příloh	60

Seznam obrázků

Obr. 1.1: Fletcherovy – Munsonovy křivky.....	8
Obr. 2.1: Řez elektrodynamického reproduktoru	10
Obr. 2.2: Impedanční charakteristika reproduktoru v bassreflexové ozvučnici	15
Obr. 3.1: Impedanční charakteristika reproduktoru v bassreflexové ozvučnici.	23
Obr. 4.1: Frekvenční charakteristika reproduktoru 8PS21 změřená výrobcem.....	27
Obr. 4.2: Frekvenční charakteristika reproduktoru DE12	28
Obr. 4.3: Simulace frekvenční charakteristiky reproduktoru 8PS21 v LspCAD 5.25	31
Obr. 4.4: Vlastní návrh ozvučnice	32
Obr. 4.5: Změřená modulová frekvenční charakteristika.....	33
Obr. 4.6: Změřená směrová charakteristika	34
Obr. 4.7: Harmonické zkreslení	35
Obr. 5.1: Útlumový článek typu U	37
Obr. 5.2: Schéma vstupního předzesilovače	39
Obr. 5.3: Přepínání vstupů.....	39
Obr. 5.4: Schéma zapojení all-pass filtru	40
Obr. 5.5: Fázová charakteristika all-pass filtru	41
Obr. 5.6: Schéma korekčního zesilovače	42
Obr. 5.7: Simulace Baxandallova korektoru	43
Obr. 5.8: Schéma aktivní výhybky	45
Obr. 5.9: Simulace aktivní výhybky.....	45
Obr. 7.1: Clip limiter	55

Seznam tabulek

Tab. 1.1: Hladina akustického tlaku běžných zvuků	7
Tab. 3.1: Orientační hodnoty pro volbu nátrubku [2]	24
Tab. 4.1: Specifikace a parametry reproduktoru 8PS21.....	27
Tab. 4.2: Specifikace a parametry reproduktoru DE12	28
Tab. 4.3: Porovnání vypočtených hodnot a hodnot z programu LspCAD	31

Úvod

V diplomové práci nejprve stručně pojednávám o zvuku, jeho vzniku, šíření a vlastnostech, které souvisejí se zadáním. Je zde také zmínka o lidském sluchu, jako je frekvenční charakteristika ucha.

Následuje kapitola zabývající se reproduktory. Zde jsou rozebrány jednotlivé typy reproduktorů, jejich dělení a parametry, které je nezbytně nutné znát při výběru i koupi. Elektroakustická analogie a náhradní schéma reproduktoru zde není probírána, ale lze ji nalézt v odborných literaturách uvedených na konci v seznamu citací.

Ve 3. kapitole je popsána teorie ozvučnic. Na začátku stručně popisují pouze nejpoužívanější typy ozvučnic, zejména potom tu, kterou jsem vybral pro vlastní návrh.

4. kapitola se zabývá praktickým návrhem reproduktorové soustavy. Zahrnuje vlastní výběr hlubokotónového a vysokotónového reproduktoru, které musí vyhovět požadavkům uvedeným v zadání. Obsahuje výpočet velikosti ozvučnice a naladění bassreflexu pomocí simulace i výpočtů, které ústí v realizaci vlastního praktického návrhu ozvučnice. V téže kapitole je pojednáno o měření navržené reproduktorové soustavy v bezdrazové komoře.

Další kapitola obsahuje teorii a vlastní návrh celé elektroniky potřebné pro aktivní reproduktorovou soustavu. Aby byla práce ucelenější, je vždy nejprve rozebrána teorie a následně vlastní návrh s výpočtem. Pojednáno je v první řadě o vstupních obvodech, které zahrnují symetrický předzesilovač, korekční zesilovač, obvod pro zpoždění reproduktoru a aktivní reproduktorovou výhybku. Na konci 4. kapitoly je diskutován vlastní návrh plošného spoje a komplexní schéma zapojení vstupních obvodů.

V posledních dvou kapitolách se zabývám nízkofrekvenčními zesilovači. Na začátku je popsána jejich teorie, následuje výběr zesilovače, který je v této práci použit a nakonec je zvoleno optimální řešení, které je prakticky zkonstruováno. Protože se jedná o reproduktorovou soustavu s bi-amp zesilovačem, bylo nutné použít zesilovače dva.

Při výběru reproduktorů je brána zřetel na kompaktní velikost reproduktorové soustavy, která nepřekračuje povolených 25 l objemu. Výběr zesilovačů i návrh vstupních obvodů je zpracován tak, aby bylo dosaženo co nejnižšího zkreslení THD při zachování kmitočtového rozsahu 80 – 18 kHz pro pokles -3 dB.

1 Zvuk

1.1 Vznik zvuku

Zvuk je mechanické vlnění částic, které můžeme popsat vlnovou rovnicí [1]

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c_0^2 \cdot \nabla^2 \cdot p^2, \quad (1.1)$$

kde p (Pa) je tlak zvukové vlny, t (s) čas, za který proběhne jedna perioda zvukové vlny a c_0 (m/s) je rychlost šíření zvuku.

Zvuk tedy vznikne všude tam, kde existuje nějaké hmotné prostředí. To může představovat v našem případě vzduch, železo, vodu (viz reproduktory do vody), apod. Je to postupné zhušťování a zředňování částic. Budeme-li tedy v dostatečné rychlosti měnit tlak vzduchu, budeme slyšet zvuk.

1.2 Vlastnosti zvukového vlnění

Rychlost šíření zvuku v daném materiálu závisí jednak na hustotě daného materiálu, ale také na jeho pružnosti. Pro představu se ve vodě zvuk šíří rychlostí přibližně 1500 m/s, zatímco

ve vzduchu pouze 344 m/s. Dobrým vodičem zvuku je beton sklo nebo ocel. Nadále, ale zůstaňme u vzduchu. Rychlost je závislá na několika faktorech, jako je teplota vzduchu

(20°C – 344 m/s, 500°C – 557 m/s), atmosférický tlak (pro běžné výpočty 100 kPa), vlhkost vzduchu, chemické složení (nečistoty, další látky obsažené ve vzduchu), apod. Bude-li okolní tlak vzduchu 100 kPa a my jej budeme pravidelně měnit od 99,999 do 100,001 1000krát za sekundu, uslyšíme tón o frekvenci 100Hz.

Objektivně se zvuk hodnotí na základě skutečnosti, že zvukové vlnění je vlastně přenos energie až k lidskému uchu. Platí, že čím větší energie zvukového vlnění se přenesou za uvažovanou dobu od místa vyslání zvuku až po místo příjmu, tím je větší vyzářený akustický výkon, který je dán vzorcem

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t}, \quad (1.2)$$

kde P (W) je akustický výkon, ΔE (J) je energie zvukového vlnění a Δt (s) je čas, za který se přenesou energie vlnění od místa vyslání po místo příjmu.

Další důležitou veličinou, je intenzita zvuku I . Ta vznikne, když se na malou plochu ΔS přenesou energie odpovídající akustickému výkonu ΔP . Pak je intenzita definována jako poměr

$$I = \frac{\Delta P}{\Delta S}, \quad (1.3)$$

kde I (Wm^{-2}) je tedy intenzita zvuku, ΔP (W) je akustický výkon a ΔS (m^2) plocha na kterou se přenášená intenzita šíří.

Lidské ucho má obrovský rozsah. Můžeme zaznamenat zvuky o výkonu již od 10 pW až po 1 W. Oněch 10 pW nám určuje hranici slyšitelnosti, zatímco 1 W hranici

bolesti. Tyto hodnoty jsou však závislé na frekvenci. Poměr největšího a nejmenšího akustického výkonu zvuku v oblasti největší citlivosti ucha je 1012, což představuje obrovský rozsah. Z tohoto důvodu vyjadřujeme tento poměr v logaritmických jednotkách bel. Hranici bolesti v tomto případě odpovídá 12 B. V praxi se ovšem používá desetkrát menší jednotka, kterou představuje onen známý dB. Je to fyzikálně bezrozměrná jednotka, která by se dala přirovnat k procentům. Pokud nám u procent 50% představuje půlku, pak u decibelů bude představovat polovinu -6 dB. Jestliže něco vydává zvuky o 6 dB hlasitěji, znamená to, že je to dvakrát hlasitější. Za práh slyšitelnosti se v decibelech považuje 0dB, zatímco za práh bolesti 130 dB. Tab. 1.1 ukazuje, jakých průměrných hodnot v dB dosahují běžné zvuky okolo nás. V praxi samozřejmě záleží také na tom, v jaké vzdálenosti od zdroje zvuku se měří. Všeobecně však (pro kulovou vlnu) platí pravidlo poklesu o 6 dB s každým dvojnásobkem vzdálenosti. Hladina akustického tlaku je vyjádřena jako

$$L_p = 20 \log \left(\frac{p}{p_0} \right), \quad (1.4)$$

kde L_p (dB) je hladina akustického tlaku, p (Pa) je hodnota vyvinutého tlaku a p_0 (Pa) referenční hodnota tlaku $2 \cdot 10^{-5}$ Pa.

Tab. 1.1: Hladina akustického tlaku běžných zvuků

Zdroj zvuku	Hladina akustického tlaku (SPL)
Odlehlý les	20 dB
Intenzita hluku v tiché místnosti (knihovna)	35 dB
Rušná kancelář, psací stroj	65 dB
Těžký automobil	90 dB
Intenzita zvuku na diskotékách	100 - 105 dB
Intenzita zvuku na koncertech	105 - 120 dB
Startující letadlo nebo raketoplán	120 - 130 dB

1.3 Odrazy a stojaté vlnění

Při dopadu zvukové vlny na překážku (stěna, skála), dochází k její odrazení podle zákona odrazu. Ten se dá zjednodušeně popsat jako úhel dopadu rovná se úhel odrazu. Při dopadu zvukové vlny na překážku, vlna předá část své energie do překážky a zbytek odrazí pod stejným úhlem. Míru předané energie zvukové vlny do překážky určuje tzv. koeficient pohltivosti. Ten závisí především na materiálu a charakteru jeho povrchu.

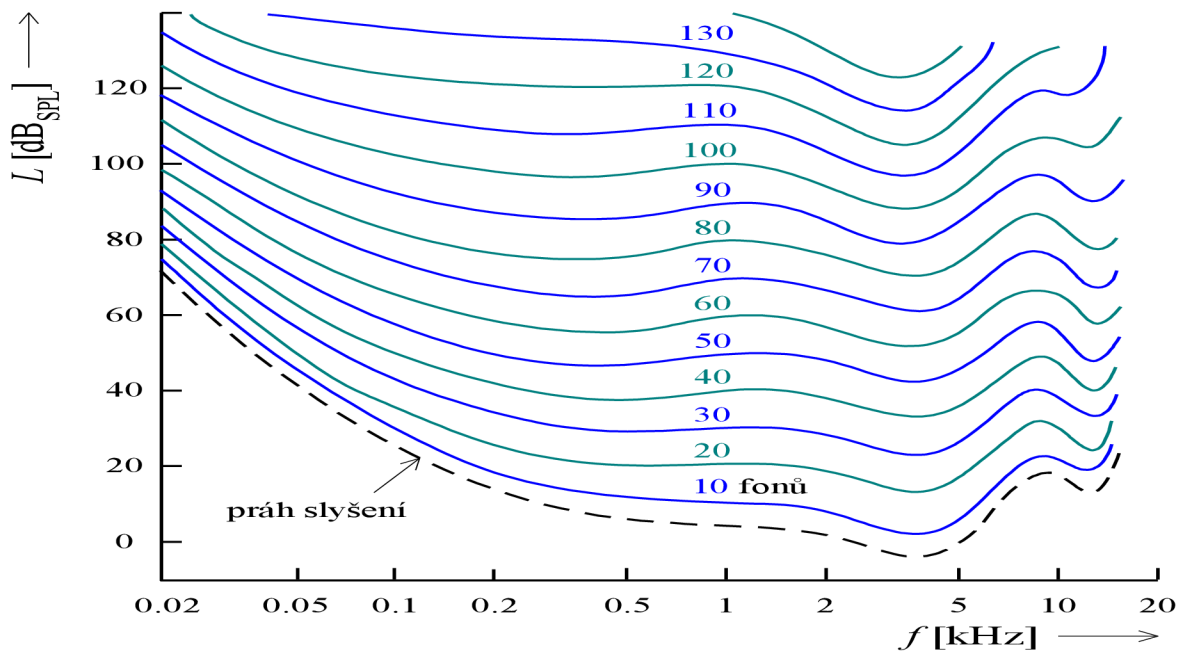
Spolu s odrazy úzce souvisí poloměr doznívání. Budu-li poslouchat reproduktorovou soustavu v malé uzavřené místnosti, poloměr doznívání bude velmi malý. Tato soustava potom místnost dostatečně pokryje a nám se bude zdát, že je hlasitost v celé místnosti stejná. Pokud však vezmu stejnou reproduktorovou soustavu do velké místnosti, která má poloměr doznívání daleko větší, najednou bude velice zřetelné, jak hlasitost prudce ubývá v závislosti na vzdálenosti. Nejhorší případ nastane, pokud tuto soustavu umístíme ven. Proto se pro ozvučování velkých prostorů používají nepřímo vyzařující reproduktory. Využívá se zde vlastností zvuku, kdy je akustický tlak soustředěn v úzkém laloku v ose reproduktoru, na úkor užšího

vyzařovacího úhlu. Reproduktorová soustava má potom v ose reproduktoru vyšší účinnost a tím vyšší akustický tlak.

Pokud dopadne zvuková vlna na nějakou překážku kolmo, odrazí se opačným směrem a odražená vlna se potká s vlnou přímou a dojde k interferenci. Potkají-li se tyto dvě vlny ve fázi, jejich amplituda se sečte a výsledná amplituda bude dvojnásobná. Jestliže se potkají v protifázi, vlny se naopak od sebe odečtou a jejich amplitudy se navzájem vyruší. Tímto způsobem mohou při poslechu v místnosti vznikat jistá minima (uzly) a maxima (kmity), což se v praxi může projevit například nedostatkem hlubokých frekvencí na některém poslechovém místě. Stojaté vlnění může být podélné nebo příčné. Typické příklady můžou být popsány na hudebních nástrojích. Podélné stojaté vlnění vzniká rozechvíváním zvukových sloupců u dechových nástrojů (trubka, klarinet). Příčné stojaté vlnění můžeme pozorovat u napjaté struny u kytary nebo napjatého vlákna.

1.4 Lidský sluch

Jak jsem se již výše zmínil, ucho je velice citlivý orgán, a to i ve frekvenční oblasti. Dokážeme zaznamenat zvuky přibližně od 20 Hz do 20 kHz, což představuje rozsah téměř deseti oktáv. To, jak se chová ucho na jednotlivých frekvencích, nejlépe vystihují tzv. Fletcherovy - Munsonovy křivky, viz obr. 2.1.



Obr. 1.1: Fletcherovy – Munsonovy křivky

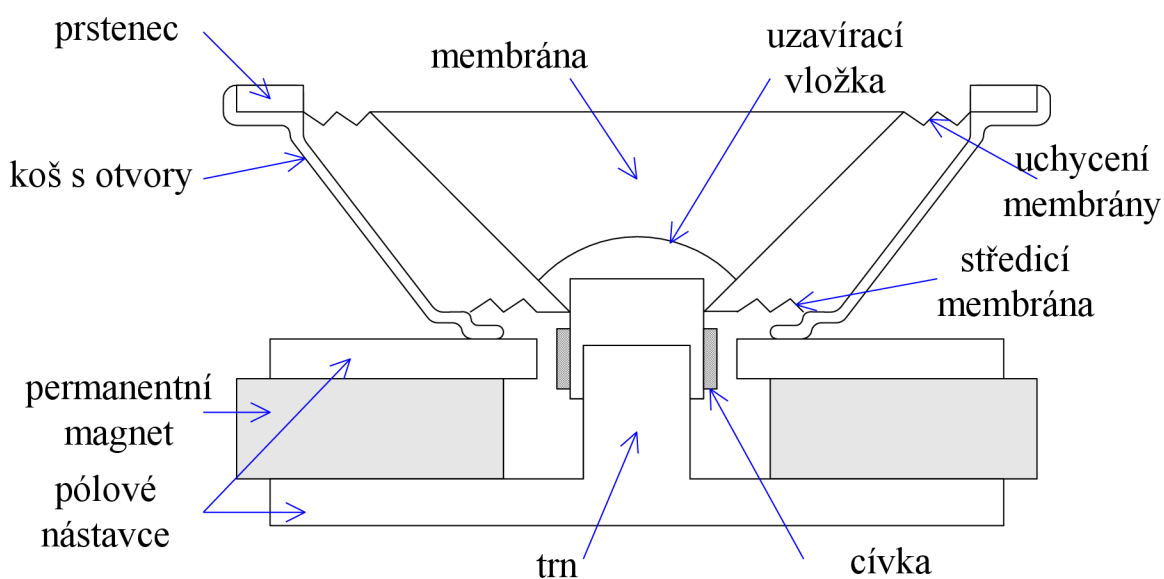
Jak je z obr. 2.1 patrné, lidské ucho je nejcitlivějších na frekvencích okolo 3,5 kHz.

To znamená, že na této frekvenci člověk slyší nejnižší akustické tlaky, ale také na nich má nejnižší práh bolesti. Nejspodnější, čárkovaná křivka na tomto obrázku symbolizuje práh slyšitelnosti. Křivka umístěná nejvýše potom představuje práh bolesti. Oblast mezi spodní a vrchní křivkou, je oblast slyšení. Je také zřejmé, že nízké a vysoké frekvence vnímáme s nižší hlasitostí nežli střední.

Tyto křivky jsou však jenom orientační, neboť každý člověk vydrží jiný akustický tlak a vnímá jinak frekvence. Sluch se zhoršuje se stářím člověka, protože stereocilia na vláskových buňkách ztrácí na své pružnosti. Nejvíce se to projevuje na vysokých kmitočtech, které jsou velmi důležité pro srozumitelnost řeči. Dlouhý a častý pohyb ve vysokých hladinách akustického tlaku také způsobuje trvalé poškození sluchu. Také je prokázáno, že střední a vyšší kmitočty způsobují větší poškození sluchu, než nižší kmitočty.

2 Reproduktory

Reproduktor je elektroakustický měnič, který převádí elektrickou energii na mechanickou. Pracuje na principu vzájemného působení sil magnetického pole trvalého magnetu s magnetickým polem cívky, kterou protéká střídavý proud. Síla je tím větší, čím je silnější pole magnetu, delší vodič, kterým je navinuta cívka, a čím je větší proud, který prochází danou cívkou. Abychom mohli takový reproduktor vybudit, musí jeho cívku protékat dostatečně velký proud, což vyžaduje adekvátní zesilovač připojený na jeho svorky. Reproduktor je velice důležitá součást při návrhu reproduktorové soustavy. Obecně se také říká, že dělá 50% výsledného zvuku, a proto by se při jeho výběru nemělo šetřit na tomto místě. Jak vypadá a jaké jsou nejdůležitější části elektrodynamického reproduktoru popisuje obr. 2.1.



Obr. 2.1: Řez elektrodynamického reproduktoru

Pro zajímavost, první reproduktor vynalezl roku 1876 Alexander Graham Bell, který ho potřeboval ke svému telefonu. Následně ho roku 1878 vylepšil Německý vynálezce Ernst Siemens.

2.1 Dělení reproduktorů

2.1.1 Dělení podle frekvenčního rozsahu

Žádný reálný reproduktor nedokáže ve skutečnosti přenést celé slyšitelné pásmo, z čehož vyplývá jejich nutné dělení do následujících příslušných kategorií.

- **Širokopásmové reproduktory**

Jak již název napovídá, tento typ reproduktoru je určen k tomu, aby pokud možno pokryl celé slyšitelné pásmo. Anglicky se jim říká full-range reproduktory. Velikost je velmi důležitý faktor při jejich vybírání. Pokud vybereme reproduktor v zásadě větší, budeme se muset spokojit s horším přenosem na vyšších frekvencích, z důvodu těžší membrány. Na oplátku však dostaneme lepší podání nižších frekvencí. Vybereme-li naopak reproduktor s menší plochou, dostaneme lepší podání vyšších frekvencí na úkor nižších. Všeobecně platí, že menší reproduktory hrají dynamičtěji než velké. To je

nutno brát na vědomí při jejich výběru. Frekvenční rozsah se často pohybuje přibližně od 80Hz do 14kHz. Pokud budeme reproduktor zbytečně přetěžovat na nízkých frekvencích, můžeme ho až poškodit. Velkou nevýhodou tohoto typu reproduktorů je většinou velké zkreslení. Jejich použití je proto omezené na nenáročnou aplikaci. Setkat se s nimi můžeme například v televizích, levných rádiích apod. Jednu výhodu ale přeci jenom tento typ přináší – není nutné použít reproduktorové výhybky, o kterých se zmíním dále.

Velmi často můžeme setkat s jejich modifikací, s širokopásmovými reproduktory s difuzorem. Difuzor může na první pohled připomínat jakýsi kalíšek připevněný na střed reproduktoru místo prachovky. Je tedy připojen ke stejné kmitací cívce jako celý reproduktor. Jeho funkce, je o něco rozšířit frekvenční charakteristiku směrem nahoru. Mnozí výrobci tento difuzor vyrábějí z kovu, čímž zlepšují odvod tepla z cívky.

Zvláštním typem širokopásmových reproduktorů jsou reproduktory koaxiální nebo dokonce triaxiální. U těchto reproduktorů již není pouze jedna kmitací cívka jako u předešlých typů. Skládají se ze dvou až tří samostatných reproduktorů, které jsou však umístěny na jedné ploše basové membrány. Přibývá zde tedy nutnost konstrukce reproduktorové výhybky. Hlavní výhodou spočívá v přiblížení se k bodovému zdroji zvuku, což je ideální případ reprodukce. Velké plus je také ušetření místa, velmi dobrá časová koherence nebo dokonce vyšší odolnost vůči zpětné vazbě. Nevýhodou je hlavně vysoká cena, nemožnost příliš ovlivnit směrové charakteristiky a problémy s fází u středních kmitočtů, což vede k náročnosti při odladování celého systému. V současné době se tento typ velmi rozšiřuje v profesionálním ozvučování, zejména u odposlechů. Setkat se s nimi však můžeme také velmi často u automobilů.

- **Hlubokotónové reproduktory**

Tato skupina je poměrně hodně rozšířená. Podle názvu lze snadno usoudit, o jaké reproduktory se jedná. Z angličtiny jsou nazývány jako woofery nebo dokonce sub-woofery. Hlubokotónové reproduktory jsou tedy určeny k reprodukci těch nejnižších kmitočtů, které je lidské ucho ještě schopno zaznamenat. Jejich frekvenční rozsah se přibližně pohybuje od 30 Hz do 4 kHz. Je proto bezpodmínečně nutné k nim při konstrukci reproduktorové soustavy zařadit reproduktory výškové nebo i středové. Protože mají tyto reproduktory na vyšších frekvencích již velké zkreslení, je nutné před ně zařadit výhybku, která eliminuje vstup vysokých frekvencí do reproduktoru a tudíž také částečně zabrání většímu zkreslení. Čím lepší přenos nízkých frekvencí od nich vyžadujeme, tím musí být reproduktor z fyzického hlediska větší, aby byla zachována citlivost. Proto jsou také konstrukčně největší. Částečně se může velikost membrány kompenzovat zdvihem membrány. U dvou pásmových soustav nahrazuje basový reproduktor středový. Ty úplně největší typy, které můžeme vidět, mají rozměr až 24", což je průměr kolem 60 cm, při obrovské hmotnosti skoro 40 kg.

Při jejich konstrukci musí být dbáno na několik zásad. Koš musí být velice pevný, aby odolával vysokým vibracím způsobeným velkou výchylkou membrány (někdy až 30 mm). Vyrábí se nejčastěji z plechů nebo u dražších reproduktorů z hliníkových slitin. Membrána má díky nízkým frekvencím vysoký zdvih, z čehož vyplývá její vysoká deformace. Proto je membrána tuhá, ale přitom lehká. Nejčastěji se vyrábí z papíru, na kterém se v některých případech mohou vyskytovat jisté vlnky podporující tuhost membrány. V ojedinělých případech je membrána vyrobena z hliníku, polypropylénu, sklených vláken nebo titanu. Kvůli již zmíněnému vysokému

zdvihu nelze podcenit ani zavěšení membrány. Závěsy musí být poddajné, umožňující velkou výchylku. V praxi se můžeme setkat s gumovými závěsy nebo více častými vlnkovými závěsy.

- ***Středotónové reproduktory***

Středotónové reproduktory (v angličtině mid-range reproduktory) vyzařují střední frekvence přibližně od 500 Hz do 5 KHz. Kvůli jejich vysokému rezonančnímu kmitočtu není možné je použít do dvoupásmových soustav. Jsou tímto odsouzeny hrát vždy s basovým a výškovým reproduktorem ve třípásmové reproduktorové soustavě. Na první pohled by se mohlo zdát, že nejzatěžovanější a nedůležitější reproduktor v dané soustavě je reproduktor basový. Opak je však pravdou, protože nejvíce namáhaný je právě středotónový reproduktor. To se dá snadno zjistit tím, když se podíváme na rozložení spektra běžného hudebního signálu, který má nejbohatší spektrum právě v oblasti, kterou má tento reproduktor hrát. Podíváme-li se na obr. 2.1, zjistíme, že je lidské ucho je nejcitlivější ve frekvenční oblasti, kterou hraje tento typ reproduktoru. To je důvod, proč by se mělo dbát při jeho výběru na co největší kvalitu. Středové reproduktory jsou velmi důležitým článkem například při reprodukci zpěvu a mluveného slova. U středového reproduktoru se musí dbát na vyrovnanou frekvenční charakteristiku, aby neměnil charakteristické zabarvení zpěvů nebo hudebních nástrojů.

Při výběru bychom se měli vyvarovat typů reproduktorů, které mají uzavřený koš. Jsou sice lacinější, ale také ne příliš kvalitní. Při konstrukci ozvučnice se středový reproduktor odděluje od basového do zvláštní komory, která zabrání pronikání basových frekvencí do středového reproduktoru, což by vedlo ke zkreslení.

Membrána bývá zhotovena nejčastěji z papíru, který má velký frekvenční rozsah, textilu, který musí být většinou impregnovaný, nebo titanu, který má velkou pevnost při relativně dobré účinnosti. Velikost těchto reproduktorů se pohybuje zpravidla od 100 mm do 180 mm a jejich tvary mohou být i oválné.

- ***Vysokotónové reproduktory***

Vysokotónové reproduktory nejčastěji hrají ve frekvenčním pásmu od 2 kHz po zbytek slyšitelného spektra, do 20 kHz. Velikost membrány se většinou pohybuje do 30 mm. Protože takto vysoké frekvence, které tyto měniče vyzařují, mají malou vlnovou délku, hraje zde velkou roli směrovost. Z tohoto důvodu se výškové reproduktory musejí při poslechu natáčet směrem k posluchači, nejlépe tak, aby byl přímo v úrovni uší. Velmi často se umísťují na zvukovod, který nadále určuje směrové vlastnosti vysokotónového reproduktoru nebo dokonce celé reproduktorové soustavy. Charakteristická citlivost je oproti basovým a středovým reproduktorům výrazně vyšší, a proto se většinou musí před jeho cívkou sériově zařadit rezistor pro srovnání citlivosti. Jejich membrána je většinou vytvořena z papíru, titanu, textilu, polymerů nebo polyamidů.

V hi-fi technice se nejčastěji používají výškové reproduktory s kalotovou membránou. Tento typ reproduktoru nepotřebuje zvukovod a vyznačuje se menší citlivostí, okolo 90 dB. Podobný typ je reproduktor s kuželovou membránou, který má však vyšší zkreslení. Pro profesionální použití by však takto malá citlivost nedostačovala, a proto se k těmto účelům používají tlakové výškové reproduktory (tzv. drivers). Ke své funkci potřebují zvukovod, který jim přímo určuje směrové vlastnosti. Ty mohou být ve vertikální a horizontální ose mnohdy odlišné (90° horizontálně a 60°

vertikálně). K těm nejznámějším patří tlakové výškové reproduktory konvexní (malá citlivost, ale vyrovnaná frekvenční charakteristika) a konkávní (vysoká citlivost na úkor zvlněné frekvenční charakteristiky). Zvláštní skupinu výškových reproduktorů tvoří piezoelektrické měniče, které mají velkou impedanci a obrovské zkreslení. Tímto jsou předurčeny pouze do nenáročných aplikací.

2.1.2 Dělení podle principu činnosti

- **Elektrodynamické reproduktory**

Jedná se o v současné době nejrozšířenější typ reproduktoru. Jak takový reproduktor vypadá a z čeho se skládá lze vidět na obr. 3.1. Skládá se z permanentního magnetu, cívky uložené v magnetické mezeře a membrány, která je uchycena přes poddajné závěsy na koš reproduktoru. Princip je založen na vzájemném působení dvou magnetických polí. Jedno pole tvoří permanentní magnet a druhé cívka navinutá na formeru, který je pevně připevněn k membráně. Cívkou prochází střídavý proud (zesílený hudební signál), který v okolí cívky vyvolá magnetické pole. Toto pole se navzájem ovlivňuje s magnetickým polem permanentního magnetu, což vyvolá pístový pohyb membrány, která nadále přemění tento mechanický pohyb na zvuk. To od membrány vyžaduje, aby byla dostatečně lehká, ale zároveň tuhá, aby nedocházelo k její deformaci, což by způsobovalo zkreslení vlivem jejich parazitních kmitů. Existuje několik variant elektrodynamických reproduktorů, které jsou dále stručně popsány.

- a) S kalotovou membránou - skládají se z kaloty, závěsu kmitací cívky, čelní desky a fázové vsuvky. Používají se u výškových reproduktorů, hlavně v hi-fi technice, kvůli jejich malému zkreslení. Tuhost a tvar membrány určuje, jaká bude směrová charakteristika, a citlivost určuje hmotnost kmitacího systému spolu s poddajností závěsu. Pokud kalota kmitá jako celek, blíží se bodovému zářiči. Membrána je nejčastěji zhotovena z titanu, textilií, plastů nebo hliníku. Dále se tento typ reproduktoru dělí podle jejich charakteristických rysů, které zde však nebudou rozebrány.
- b) S kuželovou membránou – membrána je tvaru komolého kužele a je zavěšená do koše reproduktoru. Cívka je umístěna v silném magnetickém poli a je uváděna do pohybu pomocí protékajícího proudu. Zkreslení mají větší, než reproduktory s kalotovou membránou. Jedná se o nejběžnější způsob konstrukce elektrodynamického reproduktoru. Tento reproduktor je také zobrazen na obr. 2.1.
- c) S magnetickým stíněním – tento typ reproduktoru je podobný jako reproduktor s kuželovou membránou, jen je zde rozdíl v magnetickém obvodu. Na zadní desku magnetu je umístěn kompenzační magnet spolu se stínícím krytem. Magnety jsou rozloženy tak, aby se vzájemně odpuzovali. To má za následek vyrušení magnetického pole vně magnetu, ale posílení magnetického pole ve štěrbině magnetu. Tím dochází k posílení celkového magnetického obvodu a reproduktor se tak stává účinnějším. Používají se výhradně tam, kde je potřeba reproduktory umístit blízko CRT monitorů. V dnešní době, kdy se používají téměř všude LCD monitory, však není třeba magnet stínit.

d) S uzavřeným košem – používají se hlavně u středotónových měničů. U nich by mohlo dojít k nežádoucím parazitním kmitům vlivem basového reproduktoru. Při koupi středotónového reproduktoru bez uzavřeného koše je ve většině případů nezbytné oddělit basový reproduktor od středového pomocí zvláštní ozvučnice.

- ***Elektrostatické reproduktory***

Princip těchto měničů je založen na silovém působení dvou elektrod, které mají plochu S a jsou od sebe vzdáleny o vzdálenost d . Membrána z tenké fólie je umístěna mezi těmito elektrodami. Protože nízké kmitočty potřebují velkou plochu a zároveň velkou výchylku membrány, bylo by potřeba vyrobít velké elektrody s velkou vzájemnou vzdáleností, což je však v rozporu s konstrukčním hlediskem nebo výrobní cenou. Z tohoto důvodu lze použít pouze pro konstrukci vysokotónových, případně středotónových reproduktorů. V neposlední řadě je nutné tyto dvě elektrody polarizovat vysokým napětím, řádově stovkami až tisíci volty. Kvalitativně jsou na tom elektrostatické měniče velice dobře. Mají malé zkreslení, vyrovnanou frekvenční charakteristiku, ale bohužel kapacitní charakter, což je nevhodné pro zatížení zesilovače.

- ***Elektromagnetické reproduktory***

V dnešní době ne příliš používané reproduktory. Tvoří je membrána z tenkého železného plechu, která je přitahována pevně umístěnou cívku s elektromagnetem nebo malým magnetem, umístěným v poli budící cívky. Jejich jedinou výhodou je jednoduchá konstrukce. Nevýhoda je velké zkreslení a malý kmitočtový rozsah. [2]

- ***Piezoelektrické reproduktory***

Pracují na principu piezoelektrického jevu. Piezoelektrický jev je založen na přivedení elektrického napětí na některé druhy materiálů (seignettova sůl, krystal, atd.). Působením tohoto elektrického pole v daném materiálu vytvoří mechanické napětí. Napětí vyvolá síly, které deformují materiál. Deformace je nakonec vhodným způsobem převedena na výchylku kmitacího systému. [3] Kvůli malé výchylce a ploše kmitacího systému se tyto reproduktory používají pouze jako vysokotónové. Mají poměrně velké zkreslení a zvlněnou frekvenční charakteristiku, což je odsuzuje pro nenáročné aplikace. Jejich výhody spočívají hlavně v ceně, vysoké účinnosti a jednoduché konstrukci.

2.2 Parametry reproduktorů

2.2.1 Všeobecné parametry

Do všeobecných parametrů řadíme například rozměry reproduktoru, kmitočtovou charakteristiku, směrovou charakteristiku, maximální dovolený příkon, citlivost, jmenovitou impedanci apod. Ty nejdůležitější jsou popsány v následujících kapitolách.

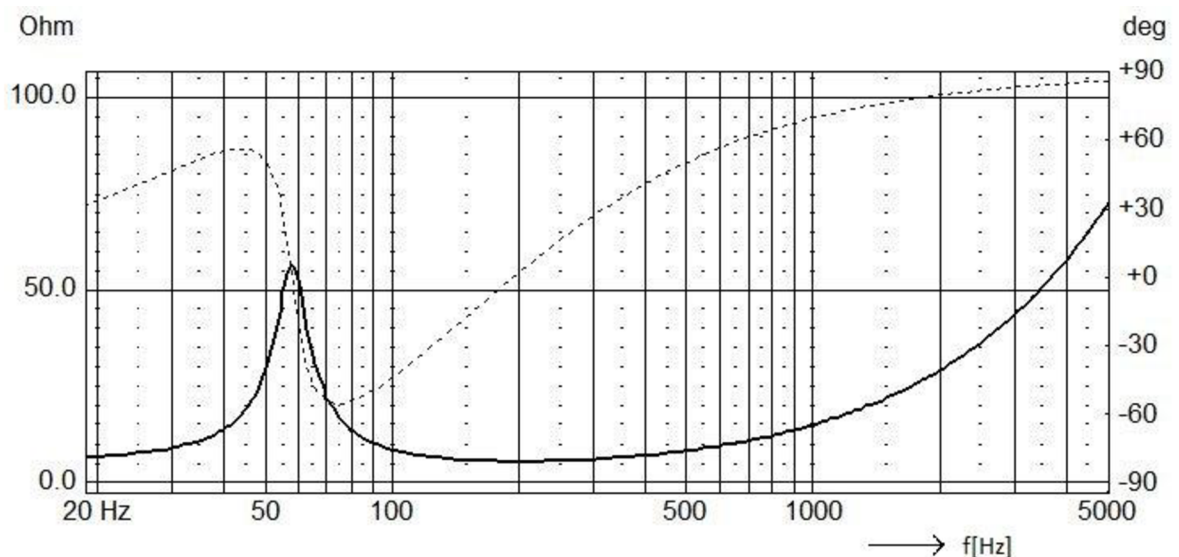
- ***Amplitudová frekvenční charakteristika***

Frekvenční charakteristika je závislost hladiny akustického tlaku v určité vzdálenosti od reproduktoru nebo reprosoustavy v její ose na frekvenci v logaritmickém měřítku, při podmínce dodržení konstantního napětí přivedeného na reproduktor. Nejčastěji se

udává pro měření v ose reproduktoru ve vzdálenosti 1 m. Měřit by se měla nejlépe v bezdrazové komoře nebo na volném prostranství. Při měření v uzavřené místnosti by výsledek mohl být zkreslený vlivem odrazů. Je to jedno z prvních kritérií, na které by se mělo dávat pozor při nákupu reproduktorů. Sledovat by se měla zejména v té oblasti, pro kterou je daný měnič podle výrobce navržený. Případně při koupi reproduktorové soustavy by se měla brát zřetel na celé slyšitelné pásmo. Při měření hlubokotónových reproduktorů, zejména v oblasti pod 100 Hz, nemá amplitudová frekvenční charakteristika velkou vypovídající hodnotu. Solidní výrobci uvádějí v této charakteristice také směrové vlastnosti reproduktorové soustavy, což nám poskytne základní představu, jak se reproduktorová soustava bude chovat směrově. Občas ve frekvenční charakteristice výrobce uvádí i amplitudovou charakteristiku pro vyšší harmonické. Charakteristika vyšších harmonických by měla ležet co nejnižší pod klasickou charakteristikou.

- **Impedanční charakteristika**

Impedanční charakteristika je závislost impedance reproduktoru na frekvenci. Jak vypadá, je nejlépe vidět na obr. 2.2.



Obr. 2.2: Impedanční charakteristika reproduktoru v bassreflexové ozvučnici

Jak je vidět, impedance reproduktoru je silně závislá na frekvenci. To je způsobené induktivním charakterem cívky reproduktoru. Na obr. 2.2 je vidět několik velmi důležitých míst. První čeho si lze povšimnout je jakýsi hrb s maximem na necelých 60 Hz. Ten udává rezonanční frekvenci reproduktoru. To zjednodušeně znamená, že v tomto místě bude hrát reproduktor nejméně a jeho výchylka membrány prudce vzroste. Pod tímto hrbem se již nedoporučuje reproduktor provozovat, protože zde narůstá velké zkreslení a výchylka opět roste. Za hrbem impedance opět klesá, až dosáhne svého minima a nadále opět roste. Toto minimum nám udává pro nás velmi důležitou nominální impedanci reproduktoru. Podle nominální impedance se rozdělují reproduktory na 2, 4, 6, 8 až 16 Ω . Pokud nevíme, o jaký reproduktor se jedná, lze změřit jeho reálnou složku pomocí ohmetru. Naměříme-li hodnotu okolo 3,4 Ω , jedná se o reproduktor 4 ohmový. Pokud to bude hodnota kolem 7 Ω , bude reproduktor 8 ohmový. Naměřené hodnoty nám udávají další důležité místo impedanční

charakteristiky. To se nachází před rezonančním kmitočtem na frekvenci 0 Hz. Tam platí, že impedance $Z = R$. Za minimem nám impedance opět roste, což je způsobené indukčností kmitací cívky. Mimo jiné se někdy můžeme setkat s naměřenou fází impedance, jejíž průběh je na obr. 2.2 – vyznačen čárkovanou čarou.

- **Jmenovitý příkon**

Jmenovitý příkon je jedna z prvních věcí, které si většina lidí (zejména laiků) všimne při koupi měniče nebo celé reproduktorové soustavy. Lidé si často zaměňují pojem příkon a výkon. Pro upřesnění, rozdíl mezi výkonem a příkonem je ztráta. Jestliže přivedeme do reproduktoru příkon např. 100 W, akustický výkon vyzářený do volného prostředí bude maximálně kolem 1 W, viz kapitola 1.2. Z toho plyne velmi malá účinnost reproduktoru, který spíše než zvuk produkuje teplo. Protože do měničů přivádíme signál střídavý a jeho cívka má indukčnost, ve skutečnosti do reproduktoru pouštíme zdánlivý příkon, který je dán vzorcem

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}, \quad (2.1)$$

kde S (VA) je zdánlivý výkon, P činný výkon (W) a Q (Var) jalový výkon.

V praxi se však zdánlivému příkonu S (VA) říká výkon P (W). Pro měření výkonu, existují přesné standardy. Z těch nejznámějších jmenujme RMS nebo AES. Měří se praxí ověřeným signálem, který je spektrálně podobný průměrnému hudebnímu signálu, po dobu řádově desítek hodin. Sledují se při tom parametry reproduktorů jako je teplota cívky nebo výchylka membrány. Na základě těchto testů se pak vyhodnocuje výkon, který bude u specifického reproduktoru zapsán do katalogu. Výkonů, které se uvádí u reproduktorů, je poněkud více. Nejzákladnější, podle kterého bychom se měli řídit, je výše uvedený výkon RMS, z toho je odvozen dvojnásobný výkon P_{max} neboli krátkodobý výkon. Ten reproduktor snese pouze krátkodobě, řádově milisekundy. Nejvyšší možný uváděný výkon je *p.m.p.o.*, který je asi 4krát větší než výkon RMS. Protože je běžný hudební signál složen převážně z těchto špiček, jsou tyto výkony u reproduktorů uvedeny.

- **Citlivost**

Citlivost je mnohdy důležitějším vodítkem k zjištění hlasitosti reproduktoru než jmenovitý příkon. Je to průměrná hodnota neboli aproximace amplitudové frekvenční charakteristiky měniče. Její jednotka se uvádí v dB a měření se obvykle provádí 1 m od reproduktoru v jeho akustické ose při příkonu 1 W s tím, že se měřená reproduktorová soustava nebo reproduktor umístí do poloprostoru. Kdybychom reproduktorovou soustavu po změření umístili do prostoru, měla by citlivost hodnotu o 6 dB nižší, kdyby ho umístili do kouta dvou stěn, citlivost by naopak o 6 dB stoupla, atd. Měření probíhá v akustické ose reproduktorů, z čehož vyplývá jasná nepřesnost při měření výškových reproduktorů, které mají značné směrové vlastnosti. Všeobecně se dá tvrdit, že jsou citlivější reproduktory dražší, čím je měnič větší, tím má obvykle větší citlivost. Citlivost nám spolu s výkonem udává, jak hlasitě bude reproduktor ve skutečnosti hrát. S kvalitou to ovšem nesouvisí. Průměrná citlivost pro hi-fi aplikace je kolem 90 dB, zatímco u profesionálního použití se tato hodnota přibližuje až 100 dB. Chceme-li v praxi zvýšit hlasitost, realizuje se to přidáním více stejných reproduktorových soustav

vedle sebe v dostatečné vzdálenosti. Dojde tím k navýšení celkové citlivosti o 3 dB. Vysokotónové reproduktory u sebe musejí být kvůli vlnové délce blíže než reproduktory hlubokotónové. S citlivostí široce souvisí hladina akustického tlaku, z angličtiny Sound Pressure Level (SPL).

- **Hladina akustického tlaku – SPL**

Neuvádí se sice u reproduktorů, ale až u reproduktorových soustav, nicméně je široce spjata s citlivostí reproduktoru. Jak mohou její jednotky napovědět (dB/W/m), je to veličina závislá na jmenovitém příkonu, citlivosti a vzdálenosti od reproduktoru. Zjednodušeně řečeno se jedná o maximální možnou hlasitost, kterou může reproduktor vyvinout. Solidní výrobci ji u svých výrobků uvádějí. Pro představu co to SPL je, bude nejvíce názorný následující příklad:

Mějme dva reproduktory:

1. Citlivost 90 dB, výkon 100 W
2. Citlivost 100 dB, výkon 100 W

A postup výpočtu pro získání jejich SPL bude následující:

1. 90 dB/1 W, 100 dB/10 W, 110 dB/100 W
2. 100 dB/1 W, 110 dB/10 W, 120 dB/100 W

Z výše uvedeného příkladu je patrné, že první reproduktor s citlivostí 90 dB potřebuje 100 W zesilovač pro dosažení akustického tlaku 110 dB, zatímco druhý reproduktor s citlivostí 100 dB, potřebuje zesilovač pouze 10 W pro to, aby dosáhl stejné hlasitosti.

Pro názornost ještě doplním, že reproduktor s citlivostí 90 dB bude hrát stejně nahlas, jako dva reproduktory o citlivosti 87 dB. Jak jsem se na začátku zmínil, hladina akustického tlaku je závislá také na vzdálenosti. Tato měření opět probíhají ve vzdálenosti 1 m od reproduktoru. Pokud se budeme vzdalovat, bude platit jednoduché pravidlo, že hladina akustického tlaku kulové zvukové vlny se čtvercem vzdálenosti klesá o 6 dB. To však opět platí pouze do určité míry. Při příliš velké vzdálenosti, budou hrát velkou roli odrazy a intenzita zvuku bude klesat pomaleji.

2.2.2 Thiele – Small parametry

Thiele – Small parametry popisují reproduktor jako elektrickou a mechanickou soustavu. V následujících bodech některé parametry přiblížím.

- **Ekvivalentní objem**

Ekvivalentní objem V_{as} (l) je objem vzduchu v uzavřené ozvučnici, který by měl stejnou poddajnost jako parametr C_{ms} u reproduktoru. Je to parametr, který nás informuje o tom, jak velkou ozvučnici budeme přibližně potřebovat pro daný reproduktor. Menší V_{as} znamená menší ozvučnici a větší V_{as} naopak větší.

- **Činitel mechanických ztrát**

Činitel mechanických ztrát Q_{ms} (-) zahrnuje ztráty pohyblivých částí reproduktoru (závěsy, membrána, apod.). Obecně by tento parametr měl být co nejmenší.

- **Činitel elektrických ztrát**

Činitel elektrických ztrát Q_{es} (-) určuje ztráty vzniklé v kmitací cívce. Vyjadřuje kvalitu elektromagnetického systému reproduktoru. Obecně by tento parametr měl být stejně jako u Q_{ms} , co nejmenší. Částečně nám určuje, jaký reproduktor se bude hodit do jaké ozvučnice. Reprodukty s menším Q_{es} se více hodí do náročných konstrukcí, jako je typ pásmová propust nebo konstrukce se zvukovodem. Pro bassreflexovou ozvučnici obvykle vystačí Q_{es} kolem 0,5.

- **Celkový činitel ztrát**

Celkový činitel ztrát Q_{ts} (-) zahrnuje mechanické i elektrické ztráty reproduktoru. Všeobecně je činitel jakosti vyjádřen jako poměr šířky pásma k frekvenci. Q_{ts} také souvisí s průběhem impedanční charakteristiky reproduktoru. Široký a nízký hrb na impedanční charakteristice například značí nízký činitel jakosti a naopak. Opět platí, že čím menší je, tím lépe. Je dán vzorcem

$$Q_{ts} = \frac{Q_{ms} \cdot Q_{es}}{Q_{ms} + Q_{es}}, \quad (2.2)$$

kde Q_{ms} (-) je činitel mechanických ztrát v reproduktoru a Q_{es} (-) činitel elektrických ztrát v reproduktoru.

- **EBP (-)**

Jedná se o informativní hodnotu, která nám napovídá, do jaké ozvučnice se bude hodit daný reproduktor. Je to poměr rezonančního kmitočtu f_s a elektrického činitele jakosti Q_{ts} . Reprodukty s *EBP* menším než 50 jsou vhodné spíše do uzavřené ozvučnice, zatímco reprodukty s hodnotou větší než 50 do bassreflexové ozvučnice. Pokud chceme použít reproduktor do konstrukce se zvukovodem nebo do bandpassu, je třeba vybírat reproduktor s nejvyšší hodnotou *EBP*. Pro menší reprodukty je potřeba větší hodnota *EBP*, nežli u reproduktorů větších.

- **Silový faktor**

Silový faktor *Bl* (N/A) vypovídá o tom, jak silný pohon má reproduktor. Je to součin délky vinutí cívky a síly magnetu. Čím je tato hodnota větší, tím má reproduktor lepší kontrolu membrány nad signálem přivedeným ze zesilovače. Větší reprodukty mají obecně větší *Bl*, než menší reprodukty.

- **Poddajnost závěsu membrány**

Značí se C_{ms} (m/N). Větší hodnota C_{ms} znamená poddajnější membránu a naopak. Poddajnější membrána má většinou nižší rezonanční kmitočet, tudíž hraje více hloubky. Tato hodnota se mění se stářím reproduktoru. Nový reproduktor má nižší C_{ms} , avšak po „rozehrání“ reproduktoru je membrána poddajnější.

- **Hmotnost membrány**

Hmotnost membrány M_{ms} (g) je parametr, udávající hmotnost membrány spolu s kmitací cívkou. Aby nebyla snížena citlivost reproduktoru, je třeba M_{ms} udržet na co nejmenší hodnotě. Proto se dodnes membrány nejčastěji vyrábějí z papíru, který má

nízkou hmotnost při zachování dostatečné tuhosti. Větší reproduktory mají analogicky větší hmotnost.

- **Rezonanční kmitočet reproduktoru**

Má označení f_s (Hz) a je závislý na hmotnosti membrány M_{ms} i poddajnosti závěsů C_{ms} . Rezonanční kmitočet lze odečíst z impedanční charakteristiky reproduktoru – viz hrb na obr. 3.1. Na tomto kmitočtu měnič rezonuje, pokud je umístěn ve volném prostoru. Při vestavění měniče do ozvučnice se hodnota f_s zvýší. Všeobecně mají větší reproduktory nižší rezonanční kmitočet než menší.

3 Ozvučnice

Ozvučnice se nepoužívá pouze k upevnění reproduktorů. Jelikož reproduktor nevyzařuje, jak by se mohlo zdát, zvukové vlny pouze dopředu, ale také dozadu, přičemž přední vlna je vůči zadní v protifázi. U nízkých kmitočtů, které mají velkou vlnovou délku by se mohla potkat přední a zadní zvuková vlna, což by vedlo k vzájemné interferenci. Tomuto jevu se říká akustický zkrat. V praxi bychom pocítili nedostatek nízkých frekvencí. Reproduktorová skříň tedy zabraňuje akustickému zkratu a navrhuje se výhradně pro basový reproduktor. Pokud umístíme reproduktor do ozvučnice, dojde k výrazným změnám v parametrech, protože membrána reproduktoru bude zatížena objemem vzduchu ozvučnice, který se promítne do hodnoty akustické impedance, do které reproduktor vyzařuje. Výchylka membrány se na nízkých kmitočtech zmenší, což bude svým způsobem bezpečnější pro provoz reproduktoru z hlediska mechanického namáhání. Dále se posune rezonanční kmitočet směrem nahoru a také dojde ke změně činitele jakosti Q_{ts} . Některé reproduktory jsou v praxi náchylnější na volbu přesného objemu, jiné naopak hrají v široké škále ozvučnic.

Ozvučnice by měla být co nejtužší, aby nedocházelo k vlastním kmitům. Při stavbě by se nemělo zapomínat na eliminaci stojatého vlnění. Tomu se částečně zabrání, pokud se při stavbě vyhneme rovnoběžným stěnám nebo reproduktorovou skříň dostatečně zatlumíme. Čím bude mít ozvučnice rozmanitější tvar, tím více potom stojaté vlnění eliminujeme.

3.1 Konstrukce ozvučnice

Reproduktorová ozvučnice by měla být v první řadě co nejrobustnější a nejtužší, aby nedocházelo k vlastním kmitům stěn. Kdyby stěny kmitaly, byly by sami o sobě zdrojem zvuku, což by mohlo vytvářet nechtěné interference, pazvuky nebo drnčení. Dřevo pro konstrukci musí mít co nejlepší vnitřní tlumení. Pokud je reproduktorová soustava vyrobena z nekvalitního, málo tuhého materiálu nebo je-li příliš velký, měl by být vhodně vyztužen. Vytzuhy se dávají zejména na stěny, které představují velkou plochu nebo mezi přední (ozvučnicí) a zadní deskou. Přední stěna je většinou málo pevná vlivem vyříznutých otvorů pro reproduktory.

Stěny se k sobě lepí kvalitním lepidlem a jsou k sobě přimontované dostatečným počtem vrutů. Musí k sobě těsně doléhat, aby nikde neunikal vzduch. Tomu se zabrání vylitím koutů i stěn silikonovým tmelem uvnitř ozvučnice. Reprodukory se připevní pomocí šroubů a samořezných matic a měly by být podloženy vhodným těsněním. Madla, hnízdo na stojan a připojovací terminál též nesmí propouštět žádný vzduch. U reproduktorových soustav z kategorie hi-fi se pro podložení používají jehlovité nožičky, aby se hluboké frekvence nepřenesly zbytečně do podlahy.

Povrchová úprava je nejčastěji provedena z dýhy nebo textilní fólie. U profesionálních reproduktorových soustav se jako povrchová úprava používá strukturovaný lak či speciální koberec. Konstrukce může být vyhotovena z nejrůznějších materiálů. Ty nepoužívané jsou v následující kapitole přiblíženy.

3.1.1 Materiály pro stavbu ozvučnic

- **Dřevotříska – D.T.D.**

Patří mezi velmi často používaný materiál, zejména pro amatérské konstrukce. Je středně těžká, tuhá a levná, s dobrým činitelem tlumení. Vyrábí se z dřevo-odpadu, který je slepen speciálním lepidlem do velkých formátů. Pro stavbu se nejčastěji používá v tloušťce 18 – 24mm. Její odolnost vůči mechanickému namáhání a vodě je malá, což ji odsuzuje k použití u profesionálních aplikací. Pokud dřevotříska namokne, má snahu se bortit. Využívá se hlavně v domácích podmínkách, kde se reproduktorová soustava nepřenáší a nepříjde do styku s vodou.

- **M.D.F.**

Z angličtiny *Medium Density Fiber board*, jeden z nejpoužívanějších materiálů v hi-fi technice. Je složena z dřevěných vláken a jemných pilin, které jsou slepeny za vysokých teplot. Vyznačuje se velkou hmotností, tuhostí i velmi dobrým činitelem tlumení. Nejčastěji se můžeme setkat s 18 mm tloušťkou. Její opracování je snadné a při řezání se neštěpí, jako překližka nebo dřevotříska. Kvůli velké hmotnosti a „křehkosti“ se téměř vůbec nepoužívá v profesionálních aplikacích.

- **Překližka z topolu**

Je jedna z nejlevnějších překližek na trhu. Její největší výhodou je nízká hmotnost při zachování velmi dobrých ostatních parametrů. Používá se k poloprofesionálním až profesionálním aplikacím, kvůli její velké tuhosti a malé hmotnosti. Vyrábí se ze slepených dýh, jejichž vrstvy jsou na sebe kolmo orientovány. Při koupi zde hraje velkou roli jakost (A, B, C) a počet vrstev. Pokud se použije špatná jakost, mezi jednotlivými vrstvami se mohou vyskytnout dutiny, které v praxi způsobují nechtěné rezonance. Pro konstrukci ozvučnic se nejčastěji používá 18 mm překližka, která má 13 vrstev. Pro jiné aplikace většinou vystačí 15 mm překližka s devíti vrstvami.

- **Březová překližka**

Vlastnostmi je velmi podobná topolové překližce. Jedná se o nejpoužívanější materiál pro konstrukci profesionálních boxů. Má střední až nízkou hmotnost, výbornou tuhost i poměrně dobré tlumení. Vůči vodě je mnohem odolnější než výše uvedené materiály. Mezi nevýhody určitě patří vysoká pořizovací cena.

- **A.B.S. plast**

ABS plasty nabízejí téměř dokonalou rovnováhu mezi pevností v tahu, tvrdostí povrchu a tuhostí. Poskytují také velkou houževnatost a odolávají teplotám od -40 do +70°C. Plasty jsou všeobecně velmi používaným materiálem pro firemní výrobu, z důvodu rychlé sériové výroby. Do určité míry se lze setkat s tímto materiálem i u profesionálních aplikací, např. u satelitních reproduktorových soustav nebo levných subwooferů. Hlavně se však takto vyrábějí spíše levné reproduktorové soustavy. [6]

3.2 Tlumení ozvučnice

Tlumení ozvučnice slouží primárně k potlačení stojatého vlnění uvnitř ozvučnice. To vznikne sloučením přímé a všech odražených vln, viz kapitola 1.3. Pokud by se

ozvučnice nezatlumila, mohlo by dojít k propadům (záporná interference) nebo hrbům (kladná interference) na frekvenční charakteristice reproduktorové soustavy.

Při tlumení hraje hlavní roli vrstva tlumícího materiálu a jeho činitel tlumení α . Množství také záleží na velikosti basového reproduktoru, které se pohybuje přibližně od 10 do 50 mm. Pro větší reproduktor použijeme analogicky více tlumícího materiálu a naopak. Z nejpoužívanějších materiálů bych jmenoval vatelín, vatu, bavlnu, polyuretanová vlákna apod. Jak už jsem se zmínil, ozvučnice se tlumí hlavně kvůli hlubokotónovému reproduktoru. U středotónových reproduktorů je často součástí „kyblíček“, který již tlumení obsahuje. Vysokotónové reproduktory obsahují tlumení již uvnitř měniče.

3.3 Uzavřená ozvučnice

V dnešní době je to jedna z nejrozšířenějších ozvučnic, zejména pro nenáročné aplikace. Její stavba, výpočet i simulace je jednoduchá a rychlá. Její účinnost ku náročnosti a ceně je velmi dobrá. Vhodný reproduktor do této konstrukce je takový, který má hodnotu EBP menší než 50. Vestavěním reproduktoru do uzavřené ozvučnice se sníží poddajnost reproduktoru C_{ms} , ale hmotnost M_{ms} zůstane neměnná. To bude mít analogicky za následek posun rezonanční frekvence f_s směrem nahoru. Výsledná nová rezonance bude dána vztahem

$$f_c = f_s \cdot \sqrt{\frac{V_{as}}{V_b} + 1}, \quad (3.1)$$

kde f_c (Hz) bude nový rezonanční kmitočet, f_s (Hz) původní rezonanční kmitočet reproduktoru ve volném prostředí, V_{as} (l) ekvivalentní objem reproduktoru a V_b (l) je objem navržené ozvučnice.

Mimo jiné se také změní celkový činitel jakosti reproduktoru Q_{ts} podle vzorce

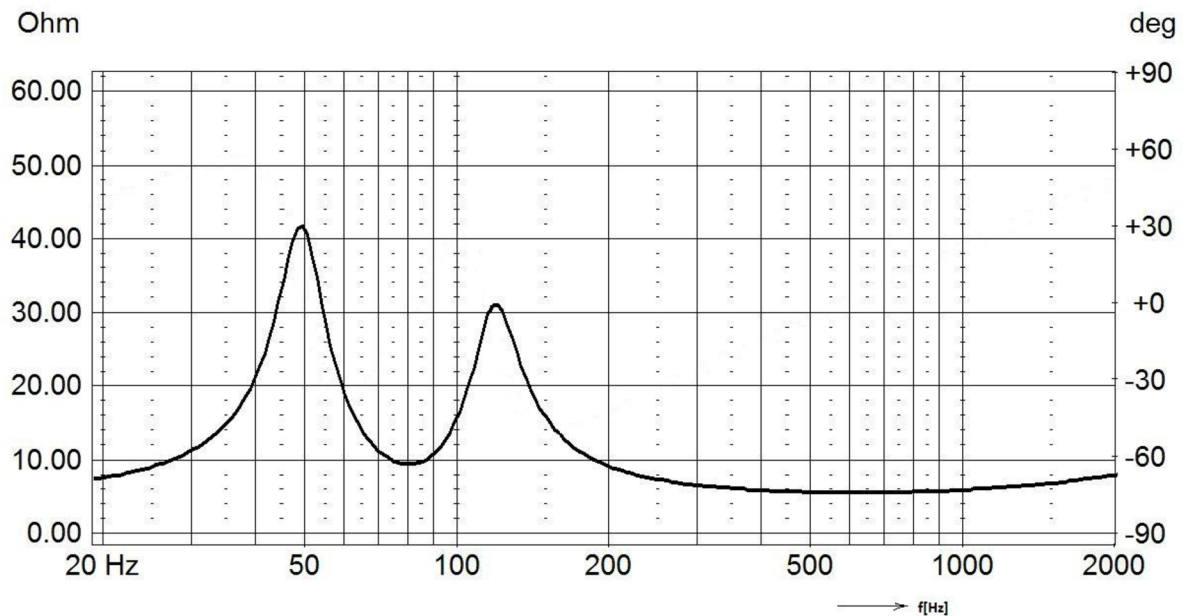
$$Q_{tc} = Q_{ts} \cdot \sqrt{\frac{V_{as}}{V_b} + 1}. \quad (3.2)$$

Činitel jakosti se nám dle tohoto vzorce zvýší. Hrb na impedanční charakteristice tedy bude ve výsledku výše položen, bude vyšší, ale také užší. Rovné charakteristice bez zvlnění u rezonančního kmitočtu bude odpovídat činitel jakosti $Q_{tc} = 0,707$. Nevýhodou tohoto typu ozvučnice je nutnost postavit velkou ozvučnici pro podání dostatečně hlubokých basů - malé reproduktorové skříně zpravidla basy nehrají. Výhodou je výše zmíněná jednoduchost, cena, ale hlavně fakt, že strmost amplitudové frekvenční charakteristiky pod rezonančním kmitočtem je pouze 12 dB/okt, což tvoří horní propust 2. řádu.

3.4 Ozvučnice typu bassreflex

Bassreflexová ozvučnice je v současnosti asi nejrozšířenější konstrukcí vůbec. Její hlavní výhoda spočívá ve větší citlivosti na nízkých kmitočtech a menší výchylce membrány na rezonančním kmitočtu. Dříve, než se rozhodneme nějaký reproduktor do této skříně umístit, měli bychom se podívat na hodnotu EBP . Ta by neměla být nižší než 50. Čím

větší však bude, tím lépe. Bassreflexová ozvučnice využívá principu Helmholtzova rezonátoru, který se nejčastěji naladí na rezonanční frekvenci reproduktoru. Pokud se nátrubek naladí správně, vzduch v něm bude kmitat se stejnou fází a stejnou frekvencí, jako membrána reproduktoru. To má mimo jiné výhodu lepšího ztlumení membrány na rezonančním kmitočtu, což vede k menšímu zkreslení a bezpečnějšímu provozu. Pokud bychom umístili reproduktor jako v předešlém případě do uzavřené ozvučnice, rezonanční kmitočet f_s se nám posune směrem nahoru a dostaneme nový rezonanční kmitočet f_c . V případě bassreflexu přibude nový rezonanční kmitočet f_b s nižší frekvencí. Jak se změní impedanční charakteristika reproduktoru umístěného v ozvučnici, pokud použijeme bassreflexový nátrubek je vidět na obr. 3.1.



Obr. 3.1: Impedanční charakteristika reproduktoru v bassreflexové ozvučnici.

Na impedanční charakteristice lze vidět tentokrát dva hrby. Pravý hrb je posunutý rezonanční kmitočet reproduktoru f_c a levý hrb je nový rezonanční kmitočet bassreflexového nátrubku f_b . Minimální hodnota minima mezi těmito hrby značí naladění nátrubku na danou frekvenci. V případě obr. 3.1, je to asi 80 Hz. Z praxe můžeme vypočítat, že čím jsou ony dva vrcholy vyšší a užší (vyšší činitel jakosti), tím je výraznější a přesnější minimum. Nový rezonanční kmitočet se spočítá podle vzorce [4]

$$f_b = 54,6 \sqrt{\frac{S}{V_b \cdot l}}, \quad (3.3)$$

kde f_b (Hz) je rezonanční kmitočet bassreflexového nátrubku, S (m^2) je plocha nátrubku, V_b (m^3) čistý objem ozvučnice a l (m) je délka nátrubku.

Rezananční kmitočet bassreflexového nátrubku určuje jeho délka a průřez. Pokud budeme zvětšovat délku nátrubku a zmenšovat jeho průřez, bude klesat rezonanční kmitočet. Hlavním kritériem při jeho návrhu je nejprve plocha bassreflexu,

nebo součet ploch bassreflexů. Z toho je následně odvozena délka nátrubku podle požadavku na jeho naladění. Obecně by plocha měla být větší nebo rovna 30% plochy membrány reproduktoru. Pokud vybereme reproduktor s velkou výchylkou membrány, měl by se průřez ještě zvětšit. Kdybychom podcenili průřez bassreflexového nátrubku (zejména u reproduktorů s velkým výkonem), mohlo by dojít k turbulentnímu proudění, což by mohlo vyvolat nepříjemné zvuky. Dalším důležitým aspektem je vzdálenost bassreflexu od zadní stěny reproduktorové bedny. Ta by měla být asi 1,5 násobek délky kratší strany průřezu nátrubku. Toto jsou pouze obecné zásady, které by se v praxi měli správně ověřit simulací na počítači. Přibližné průměry bassreflexů v závislosti na velikosti reproduktoru jsou uvedeny v tab. 3.1.

Tab. 3.1: Orientační hodnoty pro volbu nátrubku [2]

Průměr reproduktoru (mm)	Průměr nátrubku (mm)
< 100	30
130 – 165	50
165 – 200	75
200 – 250	100
250 – 305	130
305 - 380	160

Pokud bych měl jmenovat nevýhody této konstrukce, tak by to byla velká strmost amplitudové kmitočtové charakteristiky pod rezonančním kmitočtem bassreflexu. Oproti uzavřené ozvučnici (12 dB/okt) je to až 24 dB/okt. Pod rezonančním kmitočtem prudce stoupá výchylka membrány, což vede k nelineárnímu zkreslení oproti uzavřené ozvučnici i k většímu namáhání reproduktorů. To se dá částečně eliminovat zařazením horní propusti s mezním kmitočtem okolo tohoto rezonančního kmitočtu. Reproduktory v bassreflexové ozvučnici prakticky vydrží méně než v uzavřené. Návrh této konstrukce je složitější, časově náročnější a v neposlední řadě dražší. Při výpočtech se musí kontrolovat výchylka membrány, rychlost proudění vzduchu v nátrubku a skupinové zpoždění.

Výhodou je jednoznačně lepší podání nízkých frekvencí v okolí rezonančního kmitočtu oproti ozvučnici uzavřené. Není potřeba tak velký objem ozvučnice, na rezonančním kmitočtu a nad ním je malá výchylka membrány což má za následek menší zkreslení.

3.4.1 Aproximace ladění

Při návrhu bassreflexové ozvučnice existuje několik způsobů, podle kterých se provádí ladění ozvučnice. Jeden z nejpoužívanějších způsobů je aproximace její amplitudové frekvenční charakteristiky. Nejprve si musíme vybrat z nabídky aproximací takovou frekvenční charakteristiku, která nejvíce odpovídá našim představám. Poté se budeme snažit k této charakteristice přiblížit, budeme tedy aproximovat. Typů aproximací existuje několik. Základní rozdělení je na *assisted* (pro dosažení požadovaného výsledku je nutné použít některé aktivní elektronické prvky) a *unassisted* (není třeba použít elektronickou ekvalizaci pro dosažení požadované frekvenční odezvy). Ve světě

se nejvíce používají aproximace bez pomoci elektronických prvků (*unassisted*), a proto se nebudu nadále zabývat aproximacemi *assisted*. *Unassisted* se dále dělí na dvě základní rozdělení: *flat* (rovné) a *nonflat* (nerovné). Ladění typu *flat* se používá pro reproduktory s malým činitelem jakosti Q_{ts} , v zásadě menším než 0,4, zatímco ladění typu *nonflat* je určeno spíše pro činitele jakost vyšší. Aproximace typu *nonflat* nejsou určeny pro příliš náročné aplikace, neboť mají horší přechodovou a frekvenční charakteristiku. Mají však nižší frekvenci f_3 pro dané reproduktory. Typy jednotlivých aproximací jsou stručně popsány v následujících bodech. [5]

- **Aproximace typu Flat**

- a) SBB4 – Aproximace *Super Boom Box* 4. řádu pro nízké činitele Q_{ts} je charakteristický pro velké ozvučnice, nízké ladění (dlouhým bassreflexovým nátrubkem) a dobrou přechodovou charakteristikou. Má však větší zkreslení a největší hrb na frekvenční charakteristice.
- b) SC4 - *Sub-Chebyshevova aproximace* 4. řádu pro malé činitele Q_{ts} vyžaduje přibližně stejnou velikost ozvučnice jako SBB4, dokonce má i stejný kmitočet f_3 , ale má odlišné ladění. Také má více zvlněnou přechodovou charakteristiku.
- c) QB3 - *Quasi Butterworthova aproximace* 3. řádu pro malé činitele Q_{ts} je nejpoužívanější aproximací vůbec, protože vyžaduje malý objem ozvučnice při velmi nízkém kmitočtu f_3 . Činitel Q_{ts} měniče by mělo být v rozsahu od 0,1 do 0,56. Přechodová charakteristika však není tak dobrá, jako u výše jmenovaných typů.

Následuje trojice aproximací, které se téměř vůbec nepoužívají, neboť jsou určeny pro jedinou hodnotu činitele Q_{ts} .

- d) B4 (*Butterworthova aproximace* 4. řádu), BE4 (*Besselova aproximace* 4. řádu má nejlepší přechodovou charakteristiku), IB4 (*Butterworthova Inter-Order aproximace* 4. řádu). [5]

- **Aproximace typu nonflat**

- a) C4 – *Chebyshevova aproximace* 4. řádu je určena pro vyšší činitel Q_{ts} . Používá se pro malé hodnoty zvlnění, většinou menší než 1 dB. Jinak je podobná jako aproximace SC4.
- b) BB4 – *Boom Box* 4. řádu je na rozdíl od aproximace SBB4 určena pro vysoké hodnoty Q_{ts} .
- c) SQB3 – *Super Quasi Butterworthova aproximace* 3. řádu je opět obdoba aproximace QB3 pro velké činitele Q_{ts} .

4 Vlastní návrh reproduktorové soustavy

4.1 Výběr reproduktorů

Při stavbě a návrhu reproduktorových soustav je jedním z nejdůležitějších měřítek správný výběr reproduktoru. Ne nadarmo se říká, že reproduktory dělají 50% kvality zvuku v celkovém zvukovém řetězci, a proto by se na tomto místě šetřit nemělo. Jestliže se vybere špatný nebo nekvalitní měnič, nelze ho žádnou výhybkou nebo ekvalizérem vylepšit.

Pokud se staví vícepásmové systémy, je třeba vybrat vhodný výškový nebo basový reproduktor. Oba reproduktory k sobě musí „pasovat“, a to jak frekvenčním rozsahem, citlivostí, tak i kvalitou. Nejprve si musíme uvědomit, co od reproduktorové soustavy očekáváme, pro jaké aplikace budou určeny a kolik do nich chceme investovat.

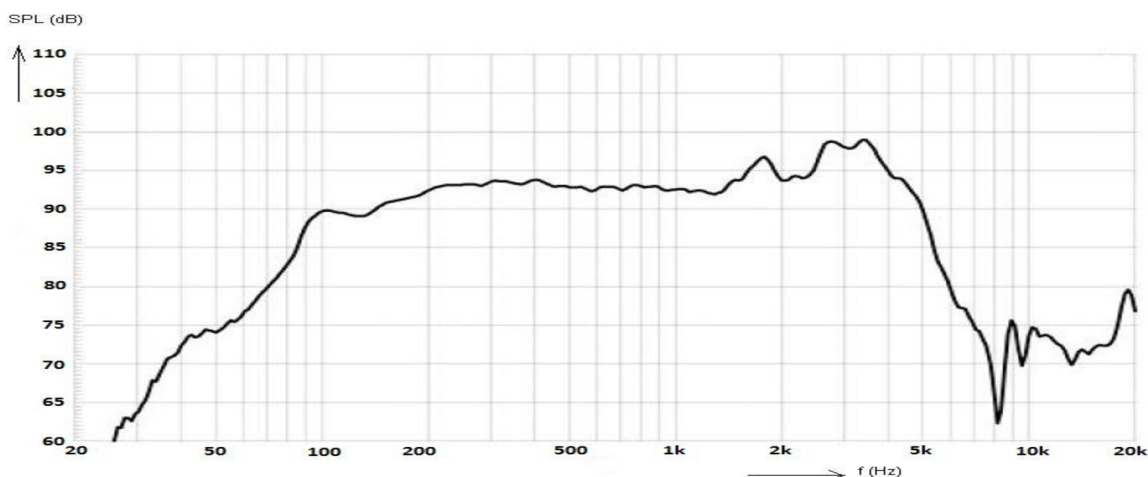
Profesionální reproduktory mají obecně vyšší citlivost než reproduktory určené pro hi-fi aplikace a bývají často nepřímo vyzařující se zvukovody, které jim udávají jejich směrové vlastnosti a vyšší účinnost. Zde je nutné si rozmyslet, jestli bude reproduktorová soustava použita samostatně nebo bude umístěna v poli. Když to bude pouze jeden reprobox, musíme zvolit zvukovod s širokým horizontálním vyzařovacím úhlem. V případě více reproboxů vedle sebe je lepší zvolit užší vyzařovací úhly zvukovodů a reproboxy nasměrovat tak, aby se jejich směrové vlastnosti příliš nepřekrývaly. V neposlední řadě se musíme rozhodnout, zda se budou reproboxy všet, budou-li se často přenášet (hmotnost) nebo se pouze nainstalují nastálo na jedno místo. Když budeme stavět pouze satelitní reproboxy, je nutné vybrat hlubokotónový reproduktor s dostatečně nízkým frekvenčním rozsahem. Bude-li komplexní systém používat i subwoofery, není pak třeba tolik dbát na reprodukci nízkých kmitočtů u satelitních reproboxů.

4.1.1 Výběr hlubokotónového reproduktoru

Jak jsem se již zmínil dříve, pro hlubokotónový reproduktor se navrhuje ozvučnice. Proto jsem se už na začátku musel rozhodnout, jaký reproduktor zvolit, abych se vešel do požadovaných 25 l objemu ozvučnice. Reproduktor by měl mít velkou citlivost a frekvenční rozsah alespoň od 80 Hz pro pokles -3 dB. Nejprve jsem se rozhodl pro reproduktor o velikosti 8" (200 mm). Veškeré podmínky dobře splňuje reproduktor 8PS21 od italské společnosti B&C, jehož parametry jsou popsány v tab. 4.1 a frekvenční charakteristiku znázorňuje obr. 4.1.

Tab. 4.1: Specifikace a parametry reproduktoru 8PS21

Parametr	Hodnota	Parametr	Hodnota
rozměr	8"	EBP	203
impedance	8 Ω	fs	73 Hz
frekvenční rozsah	70 - 3000 Hz	Re	5,4 Ω
příkon	200 W	Le	0,5 mH
hmotnost	3,5 kg	Qms	4,2
materiál koše	Al	Qes	0,36
magnet	ferit	Qts	0,33
citlivost	94 dB/W/m	Vas	14 l
Bl	12,6 Tm	Mms	23 g
Xmax	5,0 0/pk mm	Cms	207 $\mu\text{m}/\text{N}$
SPLref	93,8 dB	Sd	220 cm^2



Obr. 4.1: Frekvenční charakteristika reproduktoru 8PS21 změřená výrobcem

4.1.2 Výběr vysokotónového reproduktoru

Kvalita vysokotónového měniče je u dvoupásmové soustavy velmi zavádějící. Spektrum, které musí přenést, je široké a dělící frekvence by měla být co nejnižší, aby reprobox zahrál obstojně i střední pásmo. Proto by se mělo vybírat pečlivě a nešetřit na tomto místě.

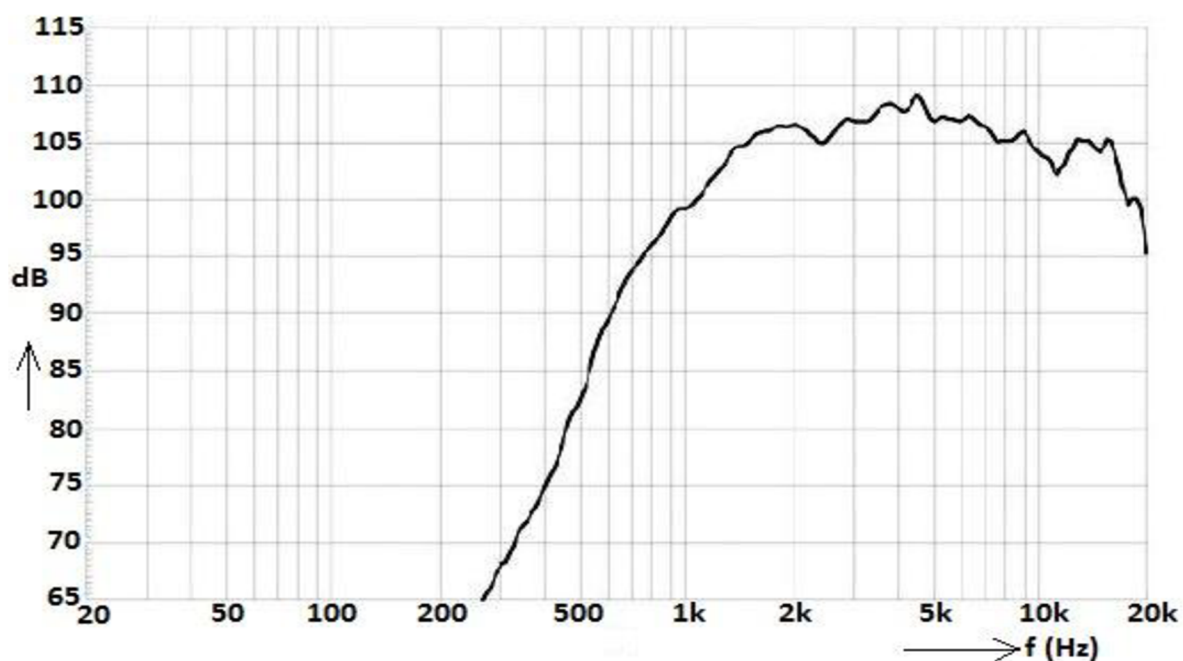
S výběrem vysokotónového reproduktoru souvisí i výběr zvukovodu. Než ho začneme vybírat, musíme si ujasnit, jaké směrové vlastnosti budeme požadovat. Pro reprodukci nablízko je vhodné zvolit širší vyzařovací úhel. Chceme-li hrát do větší vzdálenost, měli bychom naopak vybírat vyzařovací úhel užší. Výběrem špatného zvukovodu můžeme degradovat frekvenční vlastnosti vysokotónového měniče.

Vybíral jsem z nabídky 1" měničů, také od firmy B&C. Nejlepší parametry a přijatelnou cenu měl typ DE12. Jeho specifikaci je možné vidět v tab. 4.2 a frekvenční charakteristiku naměřenou výrobcem na obr. 4.2. Zvukovod jsem zvolil ME10, který je též

od stejné společnosti jako předchozí měniče. Jeho vyzařovací úhel je 80° x 60°.

Tab. 4.2: Specifikace a parametry reproduktoru DE12

Parametr	Hodnota
rozměr kmitací cívky	1" (25 mm)
hmotnost	1,1 kg
impedance	8 Ω
citlivost	106 dB/W/m
příkon	25 W
frekvenční rozsah	1500 – 18000 Hz
Re	7,8 Ω
Le	0,14 mH
materiál membrány	mylar
typ magnetu	ferit



Obr. 4.2: Frekvenční charakteristika reproduktoru DE12

4.2 Návrh ozvučnice pomocí vzorců

Při návrhu ozvučnice bylo nejprve nutné vybrat metodu, podle které se ozvučnice naladí (metoda normovaných charakteristik nebo aproximace ladění). Protože jsem v simulačním programu ladil pomocí aproximace QB3/SQB3, počítal jsem s touto metodou i při výpočtech. Díky této aproximaci lze dosáhnout nízkého kmitočtu f_3 a malého potřebného objemu ozvučnice. Nejprve jsem si musel stanovit ztráty Q_B vzniklé v ozvučnici, které jsou dány podle vzorce [5]

$$\frac{1}{Q_B} = \frac{1}{Q_L} + \frac{1}{Q_A} + \frac{1}{Q_P}, \quad (4.1)$$

kde Q_L jsou ztráty způsobené netěsností ozvučnice, Q_A ztráty způsobené tlumením a Q_P ztráty v bassreflexovém nátrubku.

Tyto ztráty není jednoduché odhadnout. Z praxe je však známo, že nejvýznamnější ztráta je způsobená netěsností ozvučnice - Q_L [5]. Ostatní ztráty jsou tak malé, že je můžeme ve výpočtu zanedbat. Nyní se musíme rozhodnout, s jakými ztráty budeme dále počítat. Vybral jsem $Q_L = 7$, což je běžná výchozí hodnota. V tomto momentě je nezbytné nahlédnout do aproximačních tabulek uvedené v [5] a vybrat parametry potřebné pro další výpočet. Ty se volí na základě celkového činitele jakosti reproduktoru Q_{ts} , v mém případě 0,33.

$$H = 1,2028 \quad \alpha = 2,1594 \quad f_3'/f_s = 1,3836$$

V první řadě vypočítáme potřebný objem ozvučnice, rezonanční kmitočet nátrubku a kmitočet pro pokles o -3 dB.

$$V_b = \frac{V_{AS}}{\alpha} = \frac{14}{2,1594} = 6,48 \text{ l}, \quad (4.2)$$

$$f_b = H \cdot f_s = 1,2028 \cdot 73 = 88 \text{ Hz}, \quad (4.3)$$

$$f_3 = \left(\frac{f_3'}{f_s}\right) \cdot f_s = 1,3836 \cdot 73 = 101 \text{ Hz}, \quad (4.4)$$

kde V_b (l) je objem ozvučnice, V_{AS} (l) ekvivalentní objem reproduktoru, f_b (Hz) rezonanční kmitočet nátrubku, f_s (Hz) rezonanční kmitočet reproduktoru s f_3 (Hz) kmitočet pro pokles -3 dB.

Abych mohl vypočítat základní průměr bassreflexového nátrubku, je třeba nejprve vypočítat objem spolukmitajícího vzduchu dle vzorce

$$V_d = S_d \cdot X_{max} = 0,022 \cdot 0,005 = 1,1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3, \quad (4.5)$$

kde V_d (m^3) je objem spolukmitajícího vzduchu, S_d (m^2) plocha membrány reproduktoru a X_{max} (m) maximální výchylka membrány.

Vypočítáme minimální průměr bassreflexového nátrubku d_v . Ten by však měl být co největší, aby nebyla překročena rychlost proudění. Z toho následně odvodíme jeho délku l .

$$d_v = \sqrt{f_d \cdot V_d} = \sqrt{87,8 \cdot 1,1 \cdot 10^{-4}} = 0,0983 \text{ m}, \quad (4.6)$$

$$\begin{aligned} l &= \frac{2361 \cdot d_v^2}{f_b^2 \cdot V_b} - 0,732 \cdot d_v \\ &= \frac{2361 \cdot 0,0983^2}{87,8^2 \cdot 6,48 \cdot 10^{-3}} - 0,732 \cdot 0,0983 = 0,3845 \text{ m}, \end{aligned} \quad (4.7)$$

kde d_v (m) je minimální průměr nátrubku a l (m) délka nátrubku.

Jak je vidět, délka bassreflexového nátrubku vychází nepříjemně dlouhá (38,5 cm) a velikost ozvučnice naopak příliš malá. Zkrátíme tedy bassreflex na 10 cm a objem ozvučnice zvětšíme na 20 l a vypočteme nový rezonanční kmitočet.

$$\begin{aligned} V'_b &= 20 \text{ l} \\ l' &= 10 \text{ cm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_b &= \sqrt{\frac{2361 \cdot d^2}{V'_d \cdot [l + (0,732 \cdot d)]}} \\ &= \sqrt{\frac{2361 \cdot 0,098275^2}{0,02 \cdot [0,1 + (0,732 \cdot 0,098275)]}} = 81 \text{ Hz} \end{aligned} \quad (4.8)$$

Objem navrženého reproboxu jsem stanovil na 20 l čistého objemu. Bassreflexový nátrubek bude mít rezonanční kmitočet 81,3 Hz při délce 10 cm a průměru 9,8 cm. Bassreflex bude ve tvaru obdélníku, který má plochu stanovenou vzorečkem

$$S_n = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,098^2}{4} = 0,7543 \text{ m}^2, \quad (4.9)$$

kde S_n (m^2) je plocha bassreflexu a d (m) je jeho průměr.

Celý výpočet jsem si ověřil v simulačním programu LspCAD 5.25, kde se mimo jiné mohou hlídat další důležité parametry jako je rychlost proudění vzduchu v nátrubku, výchylka membrány v závislosti na kmitočtu nebo skupinové zpoždění.

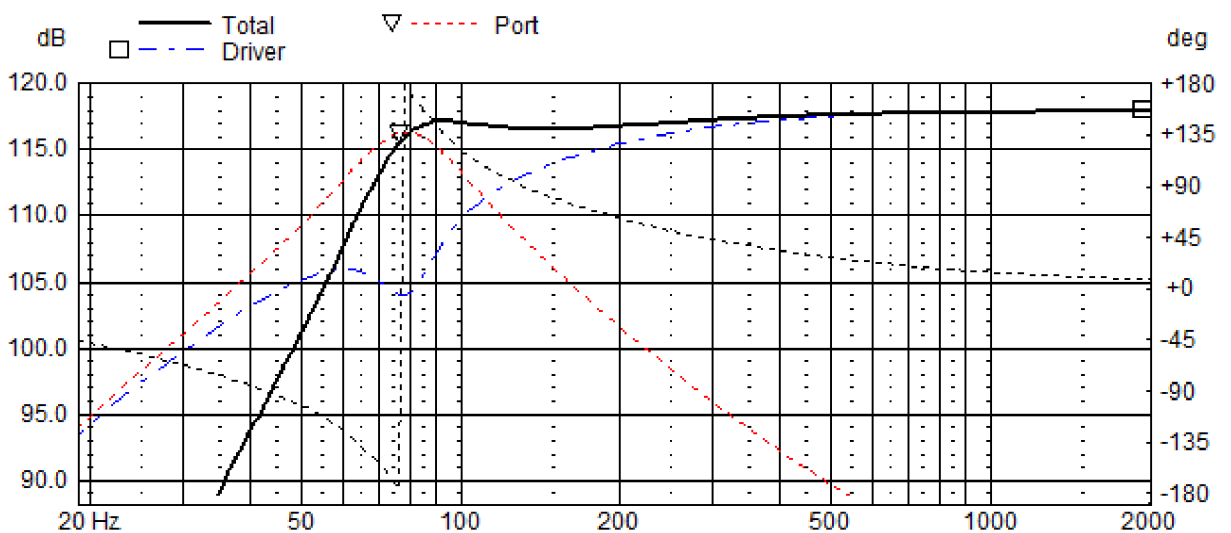
4.3 Návrh ozvučnice pomocí simulace

Dříve než si koupíme reproduktor, je vhodné si ho odsimulovat v libovolném simulačním programu, abychom získali základní představu chování reproduktoru v ozvučnici. K tomu je potřeba znát T-S parametry vybraného měniče, které nejčastěji najdeme na internetových stránkách výrobce. Pokud tomu tak není, je lepší se reproduktoru vyhnout obloukem. Simulace nám poskytne pouze hrubou představu, jak se bude daný reproduktor ve vybrané ozvučnici chovat, a proto bychom si měli výsledek vždy zkontrolovat měřením. To je z důvodu, že nám počítač neuvažuje např. přesný tvar ozvučnice, pohltivost a vlastnosti tlumícího materiálu, tvar a vlastnosti membrány nebo umístění reproduktorové soustavy ve specifické místnosti. Simulačních programů existuje několik, a proto je nutné si nejprve nějaký vybrat. Já jsem zvolil LspCAD 5.25.

První graf, který se musí v simulaci sledovat, je amplitudová frekvenční charakteristika. Ta by měla být pokud možno co nejrovnější (pokud nevyžadujeme jinak), bez zbytečných lokálních minim a maxim. Pro zajímavost je také možné si v programu nastavit rozměry místnosti a sledovat jak se jejím vlivem mění frekvenční charakteristika. Druhá základní věc, kterou je užitečné sledovat, je výchylka membrány v závislosti na kmitočtu. Ta by samozřejmě v požadovaném frekvenčním rozsahu

neměla přesáhnout hodnotu stanovenou výrobcem. LspCAD ji udává od $-pk$ (minimální výchylka reproduktoru) do $+pk$ (maximální výchylka reproduktoru), zatímco většina výrobců od nuly do $+pk$. Pokud se při návrhu jedná o bassreflexovou ozvučnici, je nutné hlídat rychlost proudění vzduchu v nátrubku. Ta by neměla překročit přibližně 20 m/s, jinak by mohlo dojít k turbulentnímu proudění vzduchu v nátrubku, což by způsobovalo nechtěné pazvuky. Dalším důležitým faktorem je graf skupinového zpoždění, který udává, za jakou dobu se dostane signál daného kmitočtu ze vstupu na výstup soustavy. Pro bassreflex by tato hodnota neměla být vyšší než 15 ms, zatímco u uzavřené ozvučnice stačí 5 ms. V neposlední řadě je vhodné sledovat také ostatní grafy, jako je impedanční charakteristika nebo impulsní odezva.

Frekvenční charakteristika použitého reproduktoru 8PS21 je zobrazena na obr. 4.3. Ostatní výstupy simulace jsou znázorněny v příloze A. Aproximaci jsem zvolil stejnou jako u algebraických výpočtů QB3/SQB3. V tab. 4.3 nalezneme porovnání vypočtených hodnot a hodnot vypočtených programem.



Obr. 4.3: Simulace frekvenční charakteristiky reproduktoru 8PS21 v LspCAD 5.25

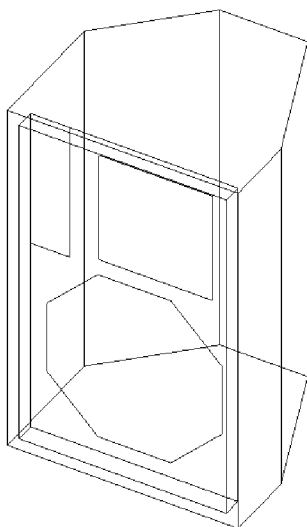
Tab. 4.3: Porovnání vypočtených hodnot a hodnot z programu LspCAD

Parametr	Vypočtená hodnota	Hodnota z programu LspCAD
Vb (l)	6,48	6,48
fb (Hz)	87,8	88
f3 (Hz)	101	106
dv (cm)	9,83	9,83
l (cm)	38,45	36,3
Vb' (l)	20	20
fb' (Hz)	81,25	79,5
l' (cm)	10	10

4.4 Konstrukční řešení ozvučnice

Při návrhu ozvučnice bylo přihlíženo k podmínkám, kterým bude reproduktorová soustava vystavena v praxi. Konstrukce by dle zadání měla být robustní, kompaktní velikosti a postavena z tuhého ale zároveň lehkého materiálu. Jako materiál byla vybrána vícevrstvá 15 mm překližka z baltské břízy, která se běžně v profesionální praxi používá. Její vlastnosti jsou popsány v kapitole 3.1.1

Velikost ozvučnice byla stanovena dle simulací a vypočtených hodnot z tabulky 4.3, na 20 l čistého objemu (bez bassreflexu). Aby bylo maximálně potlačeno stojaté vlnění, byl navržen velmi rozmanitý tvar ozvučnice, ve tvaru jakéhosi 6ti úhelníku. Abych získal základní představu o tom, jak bude ozvučnice vypadat, provedl jsem 3D návrh v programu AutoCAD 2009. Výsledek je vidět na obr. 4.4.



Obr. 4.4: Vlastní návrh ozvučnice

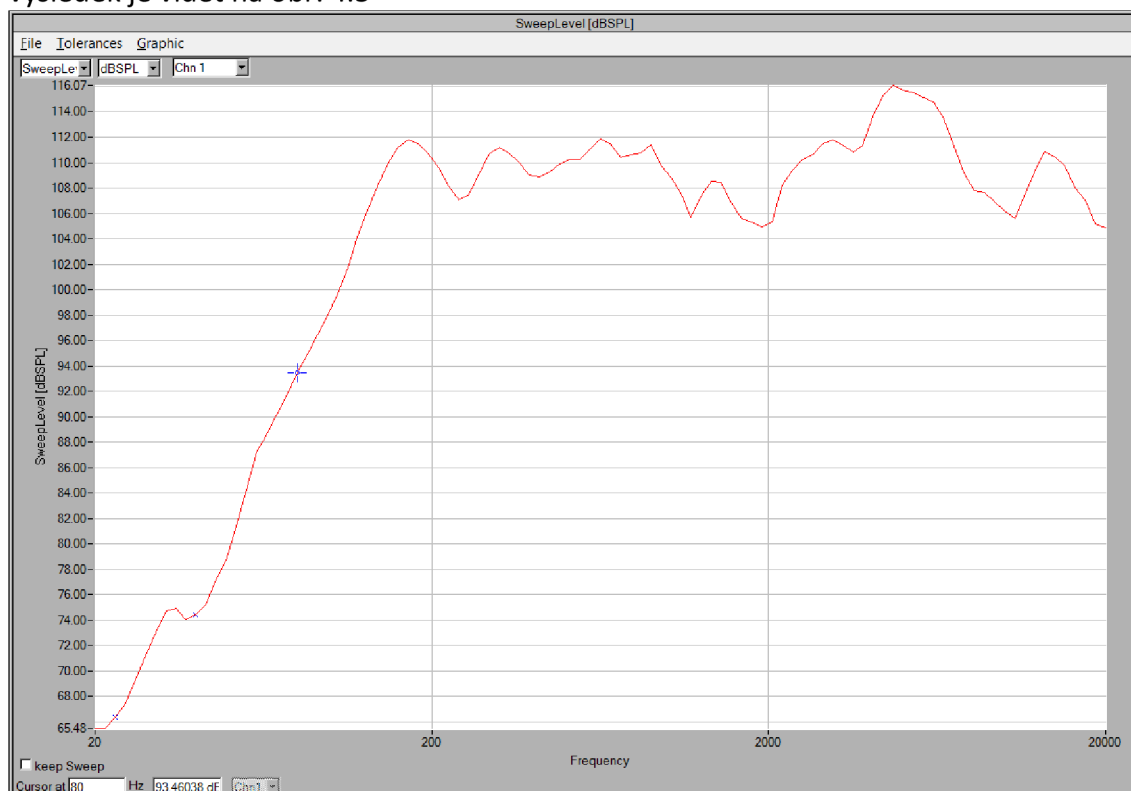
Ozvučnice má zapuštěnou přední desku s reproduktory o 25 mm, aby bylo možné na přední stranu přimontovat ochrannou mříž. Ta bude z vrchní i spodní strany zasunuta do vyfrézovaných drážek a ze stran přišroubována na dřevěné lištičky. Zvukovod pro vysokotónový reproduktor je zapuštěn do přední desky o 5 mm, zatímco hlubokotónový o 7 mm. Bassreflexový otvor je obdélníkového tvaru a jeho rozměry jsou navrženy dle simulace. Pravý zadní bok je zkosen o 45°, aby bylo mimo jiné možné reproduktorovou soustavu použít i jako pódiový monitor. V pravém zadním boku je vyříznut rámeček pro montáž kompletní elektroniky, která bude umístěna na plechu také zapuštěném do materiálu. Na spodní straně se nachází otvor, pro montáž hnízda na stojan. Jednotlivé desky byly nařezány na stroji CNC, slepeny a sešroubovány vruty. Podrobnou dokumentaci celého reproboxu s fotodokumentací lze nalézt v příloze B.1.

4.5 Měření reproduktorové soustavy

Měření bylo provedeno v laboratoři elektroakustiky, místnost PA-327. Reproduktorová soustava se umístila do bezodrazové komory, do výšky asi 1,5 m, 1 m od měřícího mikrofonu. Mikrofon musí mít co nejvyrovnanější frekvenční charakteristiku, aby nebyl výsledek příliš zkreslený. Korekce hloubek a výšek přitom byly nastaveny do nulové polohy, aby nedošlo k ovlivnění frekvenční charakteristiky.

4.5.1 Modulová frekvenční charakteristika

Jako budící signál byl použit rozmítaný sinusový signál o frekvenci 20 Hz - 20 kHz, přivedený na vstupní předzesilovač reproduktorové soustavy. Signál byl zesílen tak, aby se vybuzení zesilovače pohybovalo cca 6 dB pod klipem. Protože se jedná o dvoupásmovou reproduktorovou soustavu s bi-amp zesilovačem, bylo nutné experimentální metodou dorovnat citlivosti obou reproduktorů pomocí trimru umístěného ve vstupních obvodech, viz kapitola 5. Aby bylo dosaženo, co nelepší fázové charakteristiky na dělicím kmitočtu, která má značný vliv na charakteristiku frekvenční zejména v oblasti dělicího kmitočtu, bylo také třeba nastavit all-pass filtr popsaný v kapitole 5. Podle měření měl značný vliv na dělicím kmitočtu. Finální výsledek je vidět na obr. 4.5



Obr. 4.5: Změřená modulová frekvenční charakteristika

Pomocí kurzoru šel odhadnout dolní mezní kmitočtet reproduktorové soustavy pro pokles o -6 dB, který činil cca 100 Hz. Na kmitočtu kolem 2 kHz je vidět propad o 5 dB, který je pravděpodobně způsoben dělicím kmitočtem mezi vysokotónovým a hlubokotónovým reproduktorem. Na kmitočtu 4 kHz je naopak patrné jakési maximum vysokotónového reproduktoru, které je dáno vlastnostma zvoleného reproduktoru a zvukovodu. Pro potlačení tohoto hrbu by bylo třeba do obvodu zařadit pásmovou zádrž nebo posunou dělicí kmitočtet směrem nahoru.

4.5.2 Směrová charakteristika

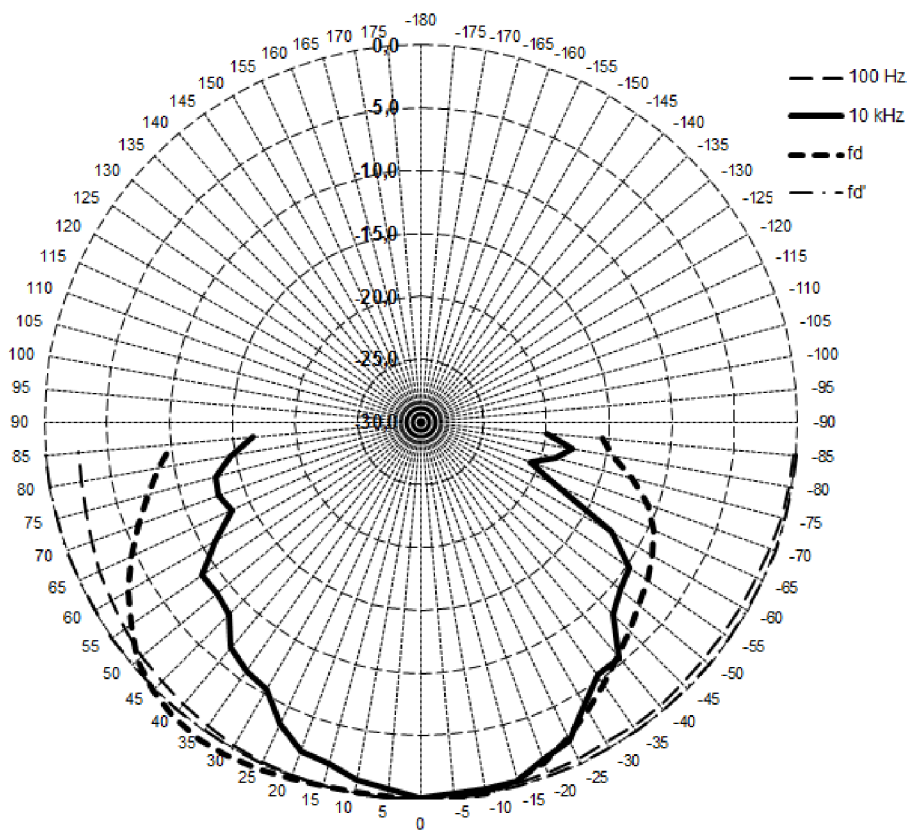
Popisuje míru vyzářeného výkonu v závislosti na natočení reproduktorové soustavy v horizontální nebo vertikální ose. Vstupní předzesilovač byl propojen s generátorem signálu, zatímco měřící mikrofón se zvukoměrem, ze kterého se odečítaly hodnoty SPL a zapisovaly do tabulky. Měření proběhlo pro horizontální osu, kdy byla reproduktorová soustava otáčena od -85° do 85° po krocích 5° . Měřilo se na frekvenci

100 Hz, 10 kHz a dělicím kmitočtu 2500 Hz. Výsledky jednotlivých měření jsou zobrazeny na obr. 4.6.

Tenká čárkovaná čára popisuje měření soustavy na frekvenci 100 Hz. Protože se zvuk reproduktorů do 200 Hz šíří prakticky všesměrově, je z grafu patrné, že akustický tlak byl s natočením ozvučnice téměř neměnný. Mírná nesymetrie křivky je nejspíš způsobena bassreflexovým nátrubkem, který je umístěn na levé straně reproduktorové soustavy.

Tlustá čerchovaná čára symbolizuje měření na dělicím kmitočtu 2,5 kHz. Je vidět, že s natočením reproduktorové soustavy již začíná ozvučnice směřovat. Nesymetrie křivky je zde nejvýraznější, což způsobuje vyosený zvukovod vysokotónového reproduktoru vůči hlubokotónovému. Na dělicím kmitočtu se totiž nejvíce překrývají frekvence vyzářené oběma reproduktory.

Plná čára náleží kmitočtu 10 kHz. Lalok je dle grafu nejužší a reproduktorová soustava je zde tedy nejvíce směrová. Velký vliv na tvar této křivky má zřejmě zvolený zvukovod.



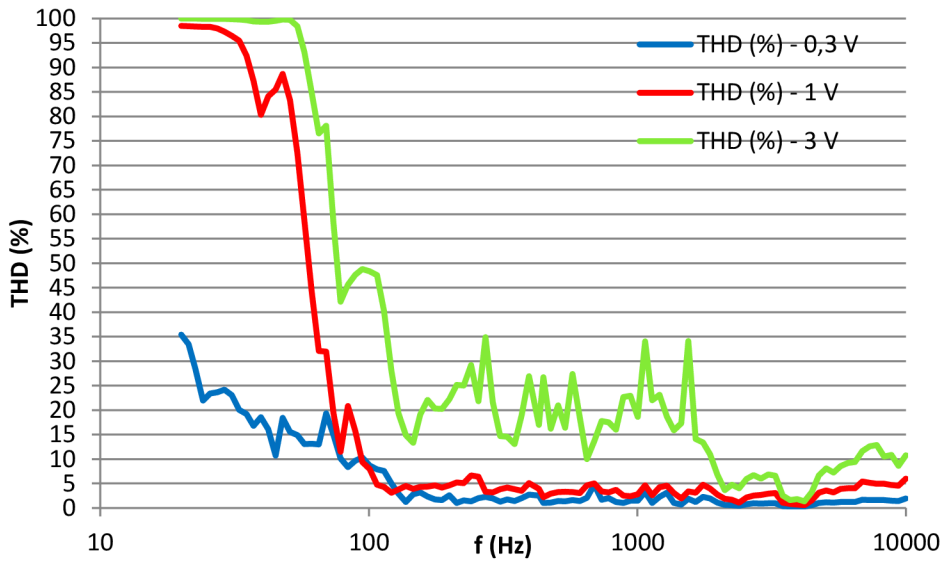
Obr. 4.6: Změřená směrová charakteristika

4.5.3 Harmonické zkreslení

Měření opět probíhalo za pomoci rozmítaného sinusového signálu od 20 Hz do 10 kHz. Byly provedeny 3 měření pro různá vstupní napětí. Výsledek je nejvíce názorný z obr. 4.7. Vlivem bassreflexové ozvučnice je zkreslení na frekvencích pod 100 Hz výrazně vyšší, což je pro tuto konstrukci typické. Při vstupním napětí 0,3 V dosahovalo zkreslení THD průměrně 2 %. Při 1V se zkreslení analogicky zvětšilo na 5 %. Zelená křivka náleží napětí 3V. THD basového reproduktoru průměrně dosahuje až 20 %. Takto velké

zkreslení je způsobené klipem zesilovače pro hlubokotónový reproduktor. Je vidět, že po dosažení dělící frekvence THD opět klesne na průměr 7%.

Na obr. 4.7 je názorně vidět, jak se harmonické zkreslení zvyšuje se vzrůstajícím výkonem. Při velkém zatížení reproduktorů již dochází k mechanické deformaci membrány, která toto zkreslení způsobuje nejvíce. Jistý vliv na THD má také zesilovač nebo nedokonalé těsnění ozvučnice.



Obr. 4.7: Harmonické zkreslení

5 Vstupní obvody reproduktorové soustavy

S ohledem na přehlednost a lepší popis, jsou vstupní obvody rozděleny na jednotlivá schémata, které jsou popsány v následujících kapitolách. Komplexní schéma zapojení je v příloze C.3

5.1 Nastavení citlivosti vstupu

V praxi se můžeme setkat s několika pracovními úrovněmi signálů. Jedním z nejpoužívanějších je úroveň mikrofonní a linková. Dále se můžeme setkat s úrovní reproduktorovou (signály vyšší než 24,5 V), které zde však nebudou probírány.

Mikrofonní úroveň představuje všechny signály, prakticky od nulového napětí, do 77,5 mV (-20 dBu). Do této kategorie spadají mikrofony (-30 dbu), DI boxy a některé nástrojové výstupy (-20 dBu). Signály mikrofonní úrovně jsou charakteristické velmi slabým signálem, neboť velmi často nemají žádný zdroj napájení (viz dynamické mikrofony). Proto musíme taková zařízení vždy připojit k tomu určeným předzesilovačům, které mají velké zesílení. V opačném případě bychom nemusely takové zařízení vybudit na dostatečnou úroveň nebo by mohl vzniknout šum vlivem velkého zesílení následujících stupňů v obvodu.

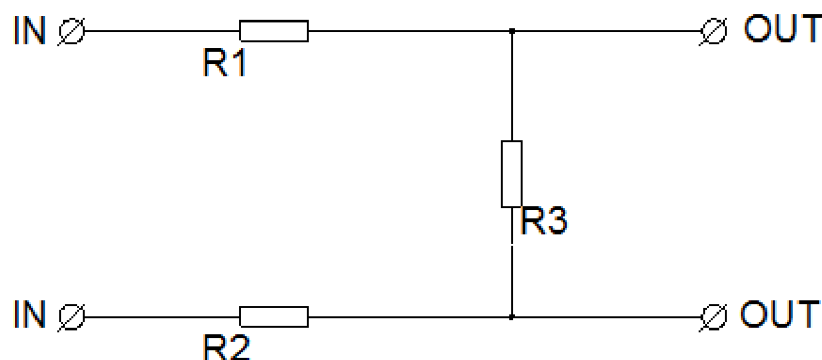
Linková úroveň zahrnuje všechny signály od napětí 77,5 mV až do 24,5 V (+30 dBu). Takové signály mohou produkovat některé nástrojové výstupy, ale hlavně výstupy předzesilovačů, mixážní pulty, limitéry, kompresory a další efekťová zařízení. Opět platí, že taková zařízení musíme připojovat k tomu určeným předzesilovačům. Pokud by se připojil signál o linkové úrovni k mikrofonnímu předzesilovači, došlo by k přebuzení signálu, což by vyvolalo slyšitelné zkreslení.[7]

5.1.1 Přepínač citlivosti vstupu (útlumový článek) [8]

Aby bylo možné k reproduktorové soustavě připojit zařízení jak s mikrofonní, tak linkovou úrovní, je nutné na vstup předzesilovače zařadit útlumový článek (tzv. PAD). PAD není nic jiného než zapojení rezistorů, na kterých vznikají potřebné ztráty, které zabraňují přebuzení mikrofonního předzesilovače. Existuje několik druhů zapojení (U, O, L, T, zmůstkované T atd.), jejichž základní dělení je na symetrické útlumové články a asymetrické útlumové články. Více o útlumových článcích lze nalézt v [8]

5.1.2 Návrh útlumového článku

Protože má navrhovaná reproduktorová soustava symetrický vstup, je třeba použít také symetrický útlumový článek. Vybral jsem zapojení typu U, které lze vidět na obr. 4.4



Obr. 5.1: Útlumový článek typu U

Při návrhu je třeba nejprve stanovit míru požadovaného útlumu. V našem případě bude vyhovovat 20 dB, které se převedou na poměr

$$k = 10^{\frac{dB}{20}} = 10^{\frac{20}{20}} = 10, \quad (5.1)$$

kde k (-) je konstanta, která představuje poměr (-) a dB je požadovaná míra útlumu.

Hodnotu k , lze také nalézt v tabulce uvedené v [8]. Dále se vypočte hodnota rezistoru R_1 podle

$$R_1 = R_3 \cdot (k - 1) = 150 \cdot (10 - 1) = 1350 \, \Omega, \quad (5.2)$$

kde $R_{1,2}$ (Ω)e hodnota rezistorů v sérii a R_3 (Ω) rezistor připojený paralelně.

Protože bude na vstup připojen mikrofon o impedanci 150 Ω , $R_3 = Z_{OUT} = 150 \, \Omega$. Zapojení je symetrické, a proto musíme přepočítat hodnotu rezistoru R_1 jako

$$R_{1,2} = \frac{R_1}{2} = 675 \, \Omega \quad (5.3)$$

Nejbližší hodnota rezistorů R_1 a R_2 z řady E24 je 680 Ω . Hodnota rezistoru R_3 (150 Ω) se přímo nachází v řadě E24.

Pro přepínání mezi linkovým a mikrofonním vstupem byl použit dvoupólový přepínač umístěný před útlumovým článkem.

5.2 Předzesilovače

Předzesilovač je část obvodu nebo zařízení, které má za úkol zpracovat vstupní signál. To může představovat např. impedanční přizpůsobení, odfiltrování vysokofrekvenčních signálů naindukovaných na vedení, ale také zesílení, respektive zeslabení signálu. Předzesilovač byl původně určen pro úpravu kmitočtové charakteristiky u gramofonu, později pro úpravu signálu z magnetodynamické přenosky. Dnes je hojně využíván pro zpracování nesymetrického i symetrického signálu v široké škále praktických obvodů.

5.2.1 Nesymetrický signál

Pokud vedeme nesymetrický signál, jsou k tomu potřeba dva vodiče. Živý (+), kterým protéká přenášený signál a stíněný (-). Pokud je stínění provedeno nekvalitně, rušivé napětí se naindukuje ve stejné polaritě na oba vodiče a přenesení se dále do obvodů, při nejhorším až k reproduktorům. To nám může velmi nepříjemnit poslech hudby v podobě brumu a jiných ruchů, jenž se naindukovaly kvůli vysokofrekvenčním zařízením jako je rádio nebo mobilní telefon. Tomu se dá mimo kvalitního stínění také zabránit nízkou impedancí vodiče, ovšem vždy jen do určité míry. Rušení se projeví tím více, čím delším kabelem přenášíme signál. Proto se toto vedení používá jen u nenáročných aplikací nebo při vedení signálu maximálně do 3 metrů.

5.2.2 Symetrický signál

Symetrické vedení je charakterizováno třemi vodiči. První vodič, z angličtiny „hot“, má znaménko (+), druhý vodič „cold“ znaménko (-) a třetí vodič představuje stínění. Vodič se znaménkem (+) přenáší kladné napětí, vodič s označením (-) záporné napětí. Na těchto vodičích se objeví rušivé napětí se stejnou fází. Oba vodiče jsou přivedeny na symetrizační vstup, který je v praxi tvořen operačním zesilovačem. Ten převádí symetrický vstup na nesymetrický a obrací fázi jednoho signálu o 180°. Užitečné signály se na výstupu operačního zesilovače sečtou a rušivá napětí naopak odečtou. Z důvodu nedokonalosti operačních zesilovačů se rušivé napětí nikdy neodstraní úplně, avšak přenos je o mnoho lepší než zapojení nesymetrické. Symetrické vedení se proto používá hlavně u profesionálních zařízení a všude tam, kde je potřeba vést signál na dlouhou vzdálenost.

5.3 Návrh předzesilovače

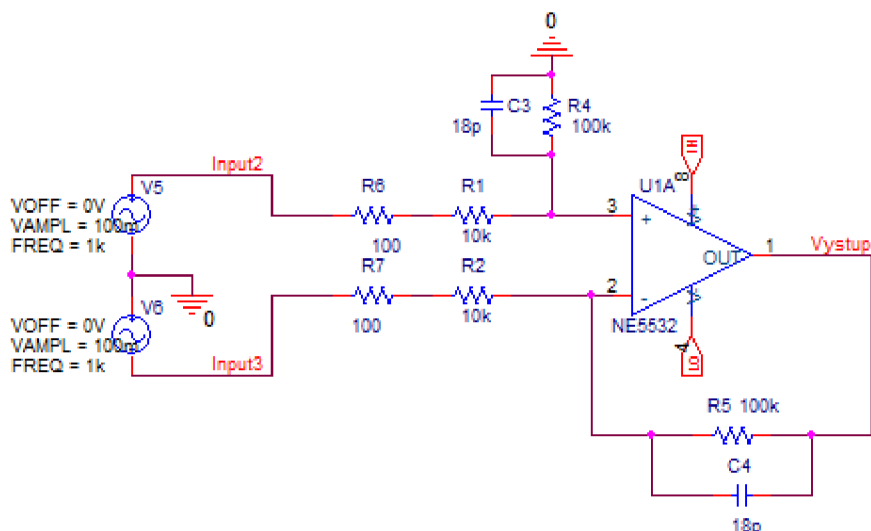
Schéma zapojení lze vidět na obr. 5.1. Skládá se z ultra-nízkošumového operačního zesilovače NE5532, který je napájen stejnosměrným napětím $\pm 9,1$ V. Na vstup předzesilovače je nejprve přiveden symetrický signál, který prochází rezistory R_6 a R_7 . Jejich zastoupení v obvodu plní funkci ochrany v případě zkratu na vstupu. Poměrem rezistorů R_1, R_4 respektive R_2, R_5 lze nastavit zesílení operačního zesilovače. Hodnoty jsou nastaveny v poměru 1:10, což vypovídá o zesílení $A_U = 10$. Takové zesílení je nastaveno z důvodu možnosti připojení zařízení o mikrofonní úrovni. Lze jej snadno vypočítat ze vzorce

$$A_U = \frac{U_{VYST}}{U_{VST+} - U_{VST-}} = \frac{2}{100 \cdot 10^{-3} - (-100 \cdot 10^{-3})} = 10, \quad (5.1)$$

kde A_U (dB) je celkové zesílení předzesilovače, U_{VYST} (V) jeho výstupní napětí, U_{VST+} (V) kladné vstupní napětí (input2) a U_{VST-} (V) záporné vstupní napětí (input3).

Rezistory R_6 a R_7 dohromady tvoří vstupní impedanci předzesilovače, která je rovna jejich součtu. R_{IN} tedy činí 10,1 k Ω . Kondenzátory C_3 a C_4 jsou zapojeny tak, aby tvořili dolní propust. Ta zabraňuje pronikání vysokofrekvenčního rušení do obvodu z připojených zařízení. Mezní frekvence musí být dostatečně vysoko, aby nebránila průchodu zvukového signálu, který může obsahovat frekvence až 20 kHz. Hodnoty kondenzátorů byly vybrány s ohledem na dostupnost kondenzátorů na českém trhu. Mezní kmitočet dolní propusti je dán vztahem

$$f_m = \frac{1}{2\pi \cdot C_3 \cdot R_4} = \frac{1}{2\pi \cdot 18 \cdot 10^{-12} \cdot 10 \cdot 10^4} = 88 \text{ kHz}. \quad (5.2)$$

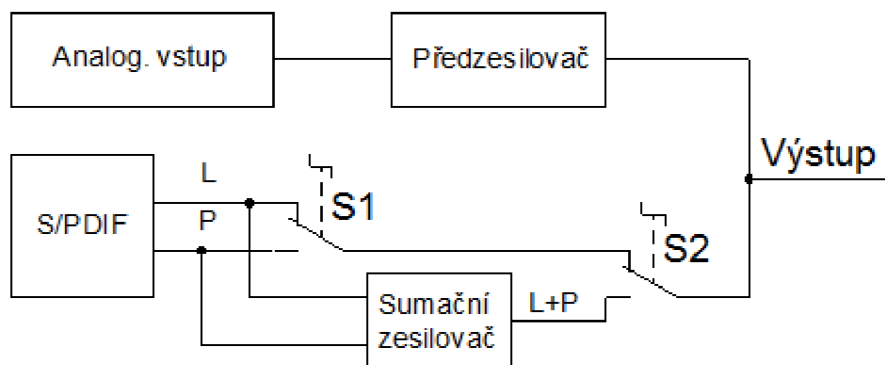


Obr. 5.2: Schéma vstupního předzesilovače

Simulaci zapojení byla provedena v programu PSpice 9.2.

5.4 Obvod pro výběr analogového nebo digitálního vstupu

Dle zadání musí být reproduktorová soustava schopna zpracovat analogový i digitální signál s rozhraním S/PDIF. K tomu je však potřeba vytvořit přepínání vstupů. Na obrázku 5.3 se nachází blokové schéma navrženého přepínače. Pro podrobný náhled je potřeba nahlédnout do přílohy C3.



Obr. 5.3: Přepínání vstupů

Na vstup je přiveden buď analogový signál z XLR konektoru nebo zkonvertovaný analogový signál z D/A převodníku. Pokud přichází signál z bloku analogový vstup, projde dále předzesilovačem na výstup do dalších obvodů. Je-li však signál přiveden z bloku S/PDIF, přepínačem S1 si můžeme zvolit, zda bude daná reproduktorová soustava hrát levý kanál nebo pravý. Přepínačem S2 můžeme díky sumačnímu zesilovači sloučit oba kanály a reproduktorová soustava pak bude hrát v režimu mono.

5.5 Obvod pro zpoždění reproduktoru

Protože cívka hlubokotónového reproduktoru není ve stejné vzdálenosti od ozvučnice jako cívka reproduktoru vysokotónového, je dobré vstupní obvod obohatit o zpožďovací článek, který tuto vzdálenost dokáže vykompenzovat.

Obvod, který dokáže vytvořit takové zpoždění se nazývá z angličtiny „all-pass filter“. Název napovídá, že se jedná o zapojení, které propouští všechny frekvence se stejnou amplitudou, ale posunuje výstupní fázi vůči vstupní. Tento fázový posun je navíc frekvenčně závislý, a tudíž není výpočet takového obvodu příliš jednoduchý. Princip posunutí fáze je založen na použití dolní propusti prvního řádu, přičemž ztráty vzniklé průchodem tohoto filtru jsou kompenzovány zavedením záporné zpětné vazby.[12]

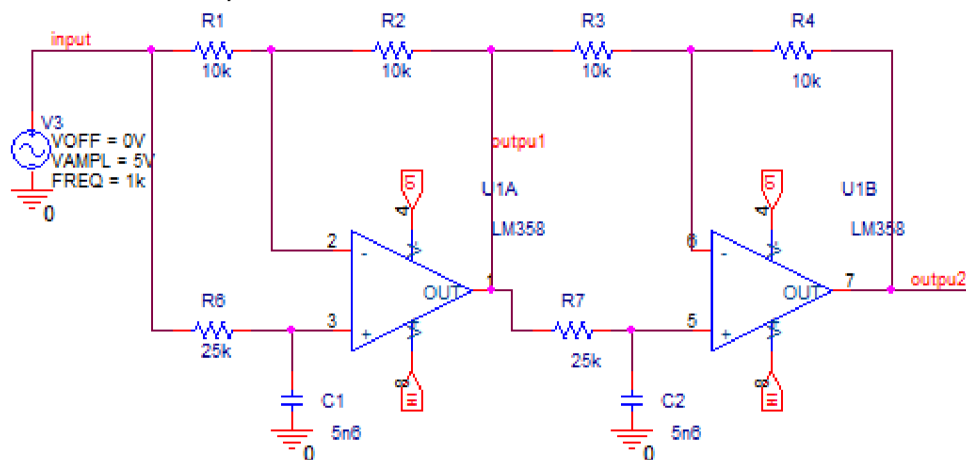
5.5.1 Návrh all-pass filteru

Cívky reproduktorů od sebe budou vzdáleny cca 20 cm a dělicí kmitočet byl stanoven na 2,5 kHz. Vypočítáme vlnovou délku λ , abychom zjistili, zda se mohou na této frekvenci reproduktory ovlivňovat.

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{344}{2500} = 0,1376 \text{ m} \cong 14 \text{ cm}, \quad (5.3)$$

kde λ (m) je vlnová délka, v (m/s) rychlost šíření zvuku a f (Hz) dělicí frekvence aktivní výhybky.

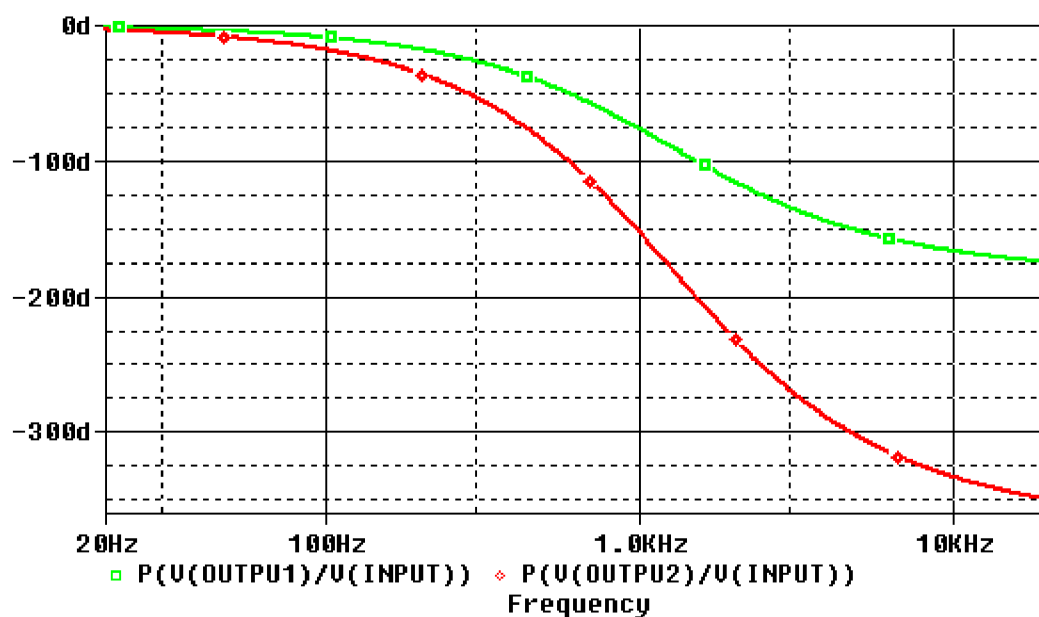
Jak je vidět ze vzorce 5.3, velikost vlnové délky je podobná vzdálenosti reproduktorů. To by mohlo na kmitočtové charakteristice způsobovat nežádoucí minima nebo maxima. Proto je vhodné navrhnout přeladitelný all-pass filtr, aby bylo při měření reproduktorové soustavy možné fázi měnit.



Obr. 5.4: Schéma zapojení all-pass filtru

Zapojení vychází z [12]. Hodnoty součástek byly zvoleny na základě simulace v PSpice. Jedná se o zapojení all-pass filtru 2. řádu, kdy každý operační zesilovač (U1A a U1B) otáčí fázi o 180°. Na výstupu je tedy fáze otočena o 360°. Rezistor R6 s kondenzátorem C1 tvoří dolní propust prvního řádu, která plní funkci otočení fáze. Rezistory R1 a R2 potom nastavujeme zesílení operačního zesilovače. V tomto případě jsou poměry těchto rezistorů 1:1, což zajišťuje výsledný přenos $A = 1$. Rezistory R6 a R7 ve skutečnosti představují 2 trimry, kterými bude možné fázi měnit.

Z obr. 5.4 je zřejmé, že je otočení fáze závislé na kmitočtu. Se vzrůstající frekvencí se úměrně zvětšuje fáze. Na dělicím kmitočtu 2,5 kHz, lze výstupní signál posunout vůči vstupnímu maximálně o 252°.



Obr. 5.5: Fázová charakteristika all-pass filtru

5.6 Korekční předzesilovače

Jsou zařízení nebo obvody, které umožňují úpravu kmitočtové charakteristiky dle potřeb posluchače nebo kompenzují akustické vlastnosti místnosti. Mohou být dvoupásmové, třípásmové nebo vícepásmové v podobě ekvalizéru. Umožňují zesílení nebo zeslabení daných kmitočtů o 10 – 30 dB. U hi-fi aplikací se nejčastěji vyskytují dvoupásmové a třípásmové ekvalizéry. Vícepásmové korektory lze velmi často nalézt v mixážních pultech. Ty se mohou dále dělit na grafické (pevně stanovené Q a F) a parametrické (volitelné Q a F). Základní rozdělení korektorů je na pasivní a aktivní.

Pasivní korekční zesilovače jsou složeny pouze z kondenzátorů a rezistorů. Jejich výhoda spočívá hlavně ve větší přebuditelnosti a menším zkreslení oproti korektoru aktivnímu. Odpadají také případné problémy s výběrem špatného operačního zesilovače, který by mohl mít špatný odstup signálu od šumu nebo nevhodné zesílení. Protože tento korektor obsahuje pouze pasivní prvky, vlivem jejich ztrát vzniká velký útlum dosahující až -20 dB. Aby byl zachován přenos 1, musí se za korektorem signál opět zesílit.[9]

Naproti tomu má aktivní korektor v propustném pásmu stálé zesílení 1, které je dáno zpětnou vazbou operačního zesilovače. Odstup signálu od šumu má velký a při nastavení potenciometrů do střední polohy má téměř lineární průběh. Potenciometry nemusí být nutně logaritmické nebo dokonce exponenciální, jako je tomu u pasivního korektoru. Mívají průběh lineární.

5.7 Návrh korekčního předzesilovače

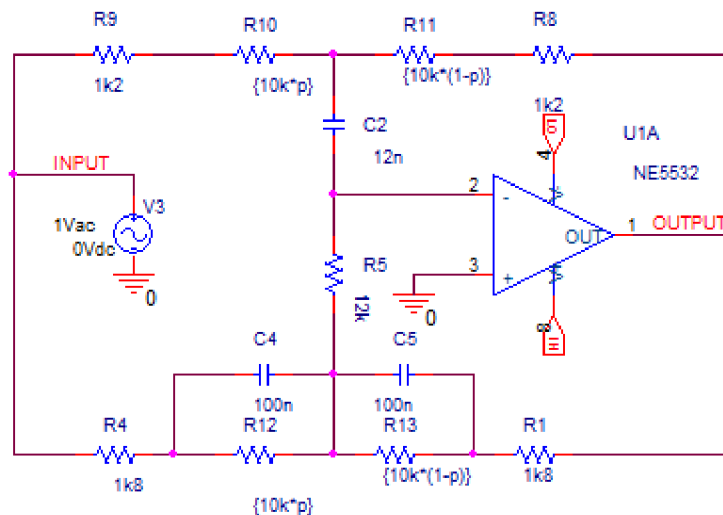
Zvolil jsem aktivní Baxandallův korektor hloubek a výšek, z důvodu jeho jednoduchosti a možnosti velkého zesílení. Schéma je převzaté ze [9]. Pro ověření funkčnosti zapojení byla provedena simulace v programu PSpice.

Na vstup korektoru je přivedeno napětí z výstupu symetrického zesilovače. Obvod je navržen tak, aby měli použité rezistory a potenciometry malou hodnotu

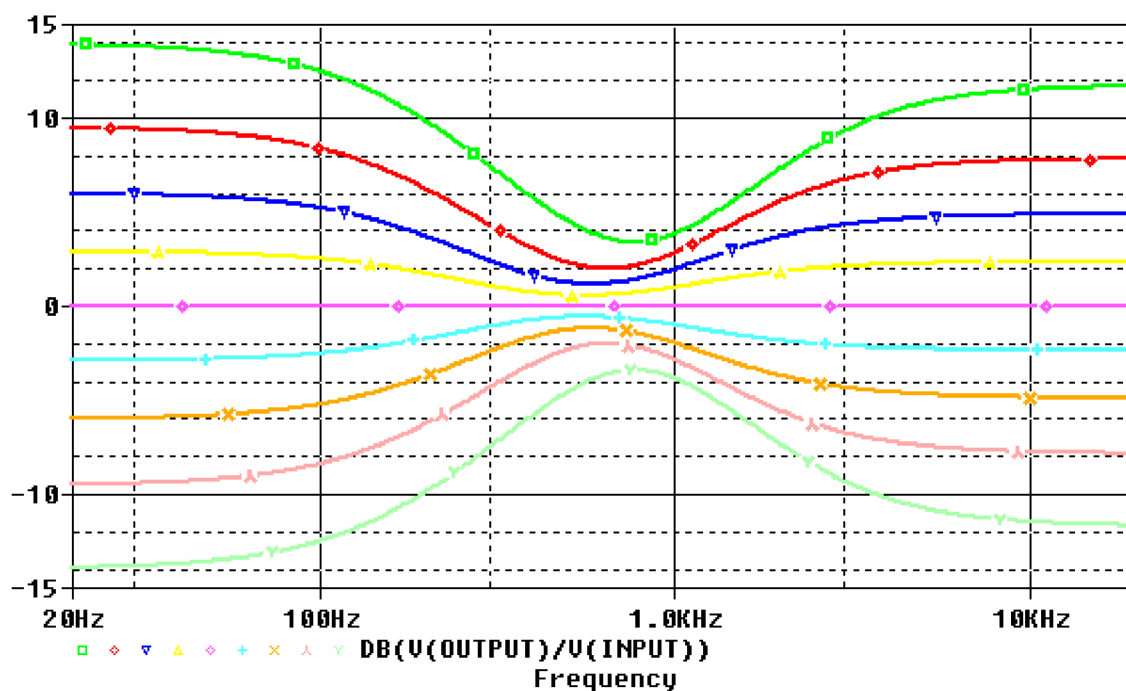
z důvodu dosažení nízké vstupní impedance. Při zvolení příliš vysoké hodnoty potenciometrů by mohl obvod šumět. Při návrhu se nejprve zvolí hodnoty potenciometrů, které na obr. 5.2 představují rezistory R_{10} , R_{11} a R_{12} , R_{13} . U hodnoty těchto rezistorů se vyskytuje parametr p , který symbolizuje aktuální polohu jezdce potenciometru v rozmezí od 0,1 do 0,9. Simulace je pak provedena pro 9 poloh potenciometrů. Jestliže se bude hodnota rezistoru R_{10} zvyšovat, hodnota rezistoru R_{11} se bude snižovat a naopak. Toto řešení bylo nutné provést kvůli simulačnímu programu PSpice. V dalším kroku se vílí hodnoty tzv. dorážecích odporů R_9 , R_8 , R_4 a R_1 , které stanovují maximální zesílení a zeslabení hlubokotónového a vysokotónového korektoru. Podle výsledku simulace, který je na obr. 5.4, je zesílení a zeslabení vysokotónového korektoru přibližně ± 12 dB. Hlubokotónový korektor má útlum a zesílení ± 14 dB. Kondenzátory C_2 , C_4 , C_5 a rezistor R_5 určují činitel jakosti Q a lomovou frekvenci, která se podle obr. 5.3 nachází poblíž 650 Hz.

Operační zesilovač jsem jako v předchozích případech použil NE5532. Rezistory byly vybírány z řady E24, která má toleranci 1%. Při vložení Baxandallova korektoru do obvodu bude nutné na jeho vstup i výstup umístit vazební kondenzátory, které odstraní případné rušení způsobené otáčením potenciometrů.

I v případě, nastavení potenciometrů do nulové polohy, by korektor mohl ovlivňovat frekvenční charakteristiku reproduktorové soustavy. Proto bylo do obvodu zaimplementováno přemostění (bypass) pomocí přepínače, aby mohl být Baxandallův korektor vyřazen z činnosti.



Obr. 5.6: Schéma korekčního zesilovače



Obr. 5.7: Simulace Baxandallova korektoru

5.8 Obvod pro srovnání citlivostí reproduktorů

Aby bylo možné během měření sestavy vykompenzovat citlivosti reproduktorů, je nezbytně nutné navrhnout také obvod, který by tento problém řešil. Před aktivní výhybkou pro hlubokotónový i vysokotónový reproduktor byl zařazen operační zesilovač v invertujícím zapojení. Do zpětné vazby je místo rezistoru jednoduše zařazen trimr, kterým je možné nastavit zesílení respektive zeslabení operačního zesilovače. Schéma zapojené lze nalézt v příloze C.3.

5.9 Reproduktorové výhybky

Protože žádný reproduktor nedokáže přenést celé slyšitelné pásmo bez výrazného zkreslení nebo poklesu citlivosti, je nutné používat reproduktorové soustavy, které obsahují vícero měničů. Signál, který se do nich přivádí, by měl být nejprve rozdělen dle frekvenčního rozsahu, aby nedocházelo ke vzájemnému ovlivňování amplitudových charakteristik. K tomuto účelu je nutné používat reproduktorové výhybky, které jsou buď pasivní nebo aktivní. Důležitým parametrem při její konstrukci je strmost filtru. Strmost nám udává, jak prudce bude v přechodném pásmu klesat amplituda v závislosti na frekvenci. Nejčastěji se můžeme setkat s poklesem o 6, 12, 18, 24 až 30 dB/okt, přičemž strmost 6 dB/okt představuje filtr prvního řádu, 12 dB/okt filtr druhého řádu až 30 dB/okt filtr pátého řádu. Ideální výhybka je taková, která má největší možnou strmost a zároveň plynulý přechod fáze. Toho však z konstrukčního hlediska není možné docílit, a proto je volba strmosti vždy nějakým kompromisem. Obecně mají filtry vyšších řádu horší fázovou charakteristiku a naopak.

Pasivní výhybky se umísťují přímo před reproduktory respektive za zesilovač a jejich název je odvozen od elektronických součástek, které jsou v nich použity. Skládají se tedy výhradně z kondenzátorů, rezistorů a cívek, které musí být dostatečně výkonově dimenzované, aby odolávaly proudu a napětí ze zesilovače. Jejich hlavní výhoda spočívá v tom, že nemusíme používat více zesilovačů, což vede k nižší ceně.

Nevýhoda však spočívá ve větším zkreslení (zejména při vyšších výkonech) a horší fázové charakteristice. Z toho důvodu je nutné pro náročnější aplikace zvolit výhybku aktivní.

Ta, jak název opět napovídá, obsahuje aktivní prvky. Jednotlivé filtry mohou být tvořeny pomocí tranzistorů, operačních zesilovačů, kondenzátorů a rezistorů. Ve zvukovém řetězci se aktivní výhybky umísťují mezi zesilovač a zdroj signálu. To znamená, že pracují s velmi malým napětím.

5.9.1 Návrh aktivní výhybky

Aktivní výhybku (viz obr. 5.4) jsem zvolil typu Linkwitz-Riley, se strmostí 24 dB/okt pro basový i výškový reproduktor. Dělicí kmitočet byl zvolen na základě vybraných reproduktorů. Hlubokotónový měnič 8PS21 má kmitočtový rozsah přibližně do 3 kHz, ale

od 2 kHz již nemá příliš rovný průběh. Výškový reproduktor DE12, má doporučenou dělicí frekvenci na 2,2 kHz. Zvolil jsem tedy kompromis, kdy se mezní frekvence horní i dolní propusti nachází na 2,5 kHz. Ve výhybce jsem opět použil nízko-šumové operační zesilovače NE5532 napájené ± 15 V. Výhybku pro hlubokotónový reproduktor tvoří operační zesilovač $U2A$ a $U2B$. Dohromady tvoří dolní propust 4. řádu, jejíž postup návrhu je následující.

Nejprve musíme určit kondenzátory C_9 a C_{10} , jejichž hodnota by neměla být příliš vysoká ani nízká, aby se obvod impedančně nepřetěžoval a naopak. Zvolil jsem $C_{9,10} = 22$ nF. Horní mezní kmitočet pro pokles o -6 dB byl stanoven na základě reproduktorů na frekvenci 2,5 kHz. Nyní je třeba vypočítat hodnotu rezistorů $R_7 - R_8$.

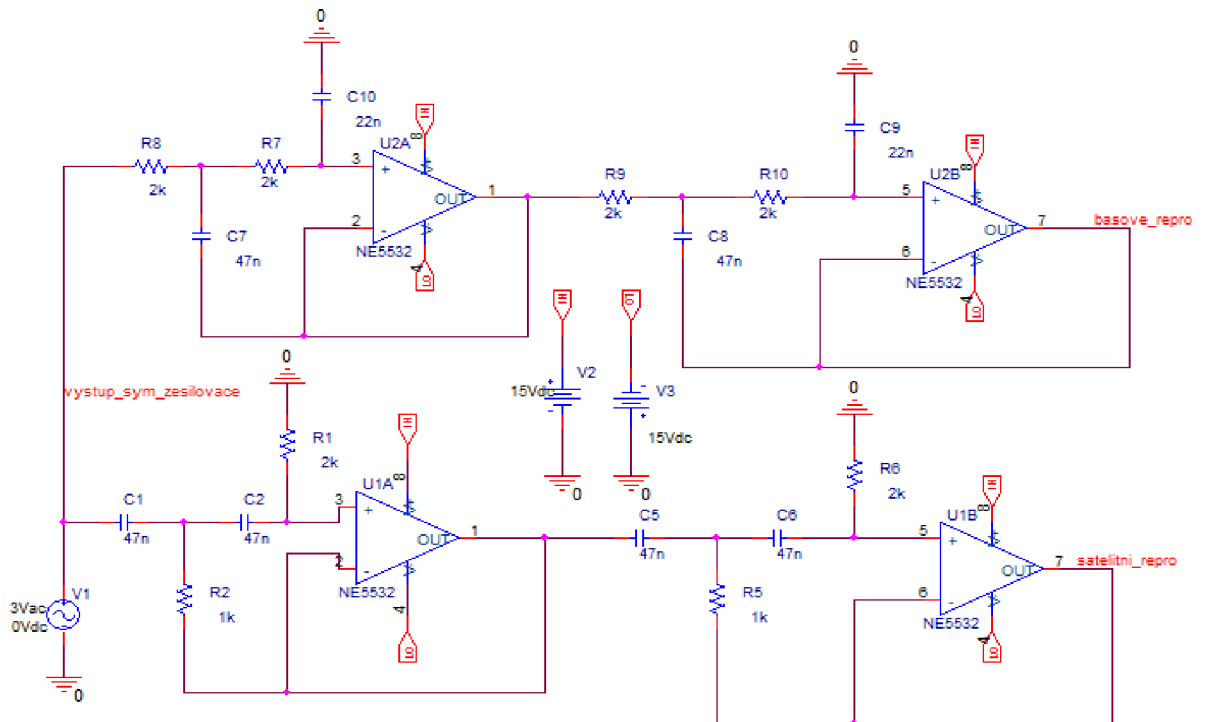
$$R_{7-10} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{2} \cdot C_{10,9} \cdot f_D} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{2} \cdot 22 \cdot 10^{-9} \cdot 2,5 \cdot 10^3} = 2046 \Omega. \quad (5.3)$$

Vybral jsem velikost odporu z řady E24, $R_{7-10} = 2$ k Ω . Kondenzátory C_7 a C_8 by měly mít dvojnásobnou hodnotu než kondenzátory C_9 a C_{10} . Nejbližší možná hodnota je opět vzhledem k vyráběným řadám 47 nF.

Výhybku pro vysokotónový reproduktor tvoří operační zesilovače $U1A$ a $U1B$. Zde je nutné zvolit nejprve hodnoty kondenzátorů C_1 , C_2 , C_5 a C_6 . Tu jsem vybral vzhledem k dostupnosti na českém trhu 47 nF. Dělicí frekvence pro pokles o -6 dB bude stejná jako u výhybky pro hlubokotónový reproduktor, tedy 2,5 kHz. Dále vypočteme rezistory R_2 a R_5 .

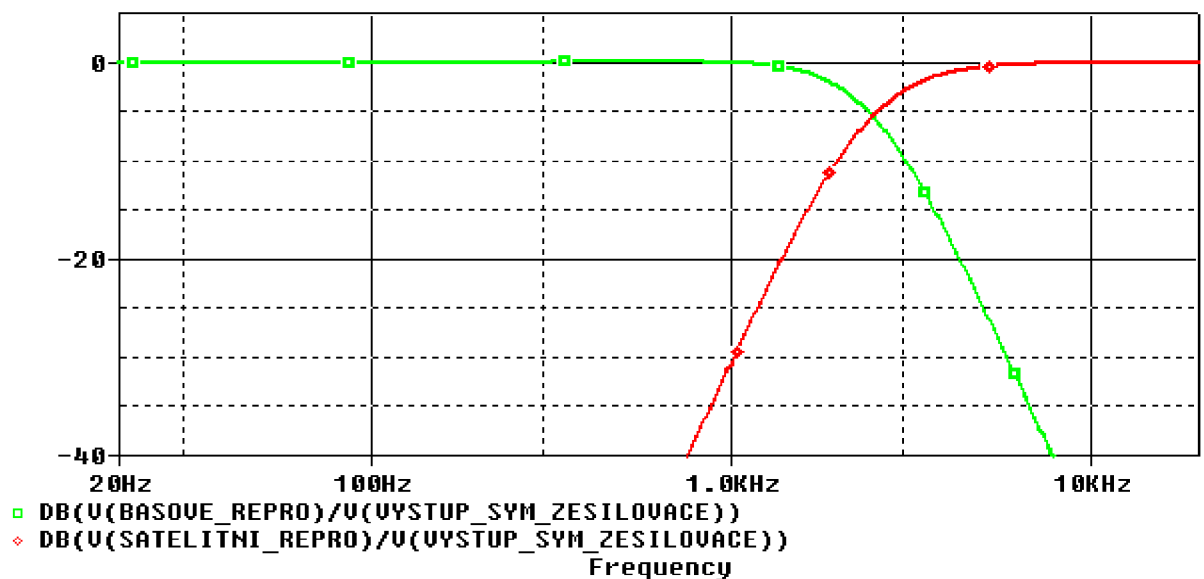
$$R_{2,5} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{2} \cdot C_{1,2,5,6} \cdot f_D} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{2} \cdot 47 \cdot 10^{-9} \cdot 2,5 \cdot 10^3} = 958 \Omega. \quad (5.4)$$

Nejbližší hodnota podle E24 je 1 k Ω . Rezistor R_1 a R_6 musí mít přibližně dvojnásobnou hodnotu $R_{2,5}$. Z řady E24 je to hodnota 2 k Ω .



Obr. 5.8: Schéma aktivní výhybky

Simulaci aktivní výhybky jsem provedl v programu PSpice 9.2 (viz obr. 5.5). Podle kurzoru jsem zjistil dělicí frekvenci mezi hlubokotónovým a vysokotónovým reproduktorem. Ta se dle programu nachází na 2,48 kHz, což je téměř přesný požadovaný výsledek. Pokles na tomto místě činí -5,53 dB, místo požadovaných 6 dB. Tato odchylka vznikla nepřesností, při vybírání hodnot rezistorů a kondenzátorů z výrobních řad. Výstupní napětí je stejně velké jako vstupní, což svědčí o napěťovém přenosu $A_U = 1$.



Obr. 5.9: Simulace aktivní výhybky

5.10 Realizace vstupních obvodů

Všechny výše popsané obvody byly navrženy na jeden plošný spoj, viz příloha C.3. DPS byla vyrobena v programu EAGLE-4.16r2 jako dvouvrstvá s prokvy o rozměru 134 x 47 mm.

Operační zesilovače, rezistory a keramické kondenzátory jsou umístěny na spodní straně desky (BOTTOM) v pouzdře SMD. V případě kondenzátorů a rezistorů byla vybrána velikost SMD 1206 s ohledem na dostupnost a výkon součástek. Všechny rezistory byly vybrány z řady E24 (1% tolerance). Ostatní součástky jako jsou vazební kondenzátory, přepínače, potenciometry, trimry a XLR konektory, se nachází na vrchní straně desky (TOP). Přepínače a potenciometry jsou přitom připájeny na drátkách, z důvodu lepší montáže do plechového panelu.

Deska vstupních obvodů je připevněna kolmo na vrchní stranu panelu za pomoci přišroubovaných XLR konektorů, s ohledem na dostatek míst pro zbylé komponenty. Přepínače jsou umístěny přesně pod touto DPS. Osazovací plán vrchní a spodní strany je k vidění v příloze D.3, deska spojů vrchní i spodní strany pak v příloze E.3. Fotodokumentace realizovaného plošného spoje se nachází v příloze G.3.

Operační zesilovače jsou napájeny symetrickým napětím $\pm 9,1$ V.

6 NF výkonové zesilovače

Zesilovač je aktivní nelineární dvojbřan, který pomocí vnějšího napájecího zdroje proudově a napěťově zesiluje vstupní signál přivedený do zesilovače. V ideálním případě je výstupní signál funkcí signálu vstupního. Zesilovač tvoří koncovou část zvukového řetězce, ze kterého se přivádí signál přímo k reproduktorům. Nejčastěji se můžeme setkat s elektronkovými nebo tranzistorovými zesilovači. V této práci budu rozebírat pouze zesilovače tranzistorové, neboť s nimi budu dále pracovat. Existuje mnoho konstrukčních řešení zesilovačů, z čehož vyplývá jejich dělení do následujících pracovních tříd.

6.1 Třídy zesilovačů

6.1.1 Třída A

Jedná se o nejjednodušší možné řešení, vyznačující se malým zkreslením. Třída A je zapojena jednočinně, což značí, že jedna větev zesilovače zesiluje obě půlvlny. Zesilovače v této třídě mají pracovní bod na převodní charakteristice položen tak, aby ležel přibližně uprostřed. Protože je tranzistor stále sepnut ve vodivém stavu, protéká jím neustále velký klidový proud. To vypovídá o malé účinnosti, v praxi dokonce jen kolem 10%. Kvůli tomu, jsou tyto zesilovače náročné na konstrukci. Musíme jim dodat vysoký příkon, který se z velké části promění na teplo, což klade nemalé nároky na chlazení. Aby se zvýšila účinnost třídy A, bylo by nutné zvětšit amplitudu vstupního signálu, což by se však projevilo velkým zkreslením. Z důvodu vysoké výrobní ceny a špatné účinnosti se s touto konstrukcí v praxi téměř nesetkáme.

6.1.2 Třída B

Je jakýsi opak třídy A. Pracovní bod má nastaven těsně před bod otevření výkonových tranzistorů. Klidový proud se v této třídě žádný nenastavuje. To má za následek prudké zvýšení účinnosti až na 65%. Zapojení je dvojjinné, což znamená, že zesilujeme zvlášť kladnou i zápornou půlvlnu. Vlivem nedokonalého spínání tranzistorů vzniká na přechodu mezi těmito půlvlnami tzv. přechodové zkreslení, které se projevují zejména u slabých signálů. Zkreslení je bohužel natolik slyšitelné, že se navzdory vysoké účinnosti s těmito zesilovači také v praxi příliš nesetkáme. V nečinnosti třída B neodebírá žádný proud, který při zatížení jen pozvolna roste. Odpadají proto problémy s chlazením a vysokou výrobní cenou kvůli spotřebě.

6.1.3 Třída AB

Tato třída je něco mezi zesilovačem ve třídě A a B, proto tedy označení AB. Konstrukčně je podobný více zesilovači třídy B (dvojjinné zapojení), ale nastavením klidového proudu je naopak podobné třídě A. Pracovní bod na převodní charakteristice se nejprve nastaví tak, aby zesilovačem neprotékal žádný klidový proud. Poté ho začneme pomalu zvyšovat až do chvíle, kdy bude zkreslení přijatelné. Účinnost takového zesilovače se pohybuje okolo 50 - 70%, kdy opět záleží na velikosti vstupního signálu (větší signály obvykle znamenají vyšší zkreslení). Zkreslení má vcelku malé a konstrukčně není příliš náročný. Proto se zesilovače pracující v této třídě staly nejpoužívanějšími z kategorie lineárních zesilovačů.

6.1.4 Třída G

Jedná se o jakousi nadstavbu zesilovače ve třídě AB s rozšířeným napájecím napětím. Třída G tedy obsahuje dva nebo více napájecích stupňů, kdy první, nižší napětí, napájí tranzistory zapojené ve třídě AB a vyšší napětí slouží právě pro zmíněnou nadstavbu. Při malém výkonu zesilovač funguje totožně, jako třída AB. Dosáhne-li napětí nastaveného prahu, skokově se změní. Díky tomu se účinnost oproti třídě AB ještě zvyšuje. Konstrukce takového zesilovače však není příliš snadná, avšak pozitivum je rozhodně menší váha a rozměry.

6.1.5 Třída H

Funkce této třídy je téměř shodná s třídou G jen s tím rozdílem, že se výstupní napětí nemění skokově, ale spojitě sleduje vstupní signál. Napětí se většinou porovnává v komparátoru, a pokud opět první napětí překročí stanovený práh, sepne se další napětí. Napájecí napětí může být opět více-stupňové. Zapojení je ovšem velmi komplikované, ale odměnou za to, je ještě vyšší účinnost než u třídy G.

6.1.6 Třída D

Tato třída se svými vlastnostmi a konstrukcí zcela vymyká všem předešlým koncepcím. Nejedná se již o lineární zesilovač nýbrž nelineární. Na vstupu zesilovače je signál nejprve namodulován pomocí PWM (pulse width modulation) modulátoru a nakonec přiveden

na koncové tranzistory. Ty pracují neustále v saturaci a jsou nepřetržitě i v nečinném stavu spínány vysokou frekvencí, řádově stovkami kilohertzů. Jejich úroveň může nabývat pouze hodnot 1 nebo 0, což eliminuje vznik veškerých ztrát, které normálně při zpracování spojitého signálu vznikají. Díky nízkým ztrátám má zesilovač v této třídě účinnost až 80%. Aby se na výstupu odstranila vysoká frekvence vzniklá při spínání tranzistorů, je třeba na výstup zesilovače zařadit filtr typu dolní propust s vysokým činitelem jakosti. Pokud není filtr navržený správně nebo nedostatečně, dochází k degradaci frekvenční charakteristiky na vyšších frekvencích. Výstupní filtr má také značný podíl na zhoršení činitele jakosti.

6.2 Zkreslení zesilovače

Každý zesilovač více či méně zkresluje. To je dáno nedokonalostí použitých součástek, přechodovými jevy a zapojením zesilovače jako takového. Lidské ucho není příliš citlivé na nižší harmonické složky a vnímá je jako běžný signál. Některé zkreslení dokonce člověk vnímá jako líbivé, viz elektronkový „teplý“ zvuk. Velikost nelineárního zkreslení vyjadřuje činitel harmonického zkreslení k , kdy výsledné zkreslení je udáno v procentech. Výkonové zesilovače mají povolenou toleranci 1%. Jak jsem naznačil, typů zkreslení existuje hned několik. Stručně se však budu zabývat jen těmi nejvýznamnějšími, které jsou dále rozepsány.

6.2.1 Zkreslení harmonické

Měření probíhá tak, že se na vstup zesilovače přivede sinusový signál, jehož změna se pozoruje na výstupu. Degradace signálu vznikne pomocí nelineárních členů v přenosové cestě. Harmonické zkreslení není pro lidské ucho líbivé. Vyšší harmonické složky působí negativněji než nižší. Při měření je nutností použít velmi přesný

generátor signálu. Podle normy by neměl přesahovat desetinu zkreslení měřeného. Měření takového zkreslení může probíhat dvěma způsoby.

První je za pomoci spektrálního analyzátoru, kterým zjistíme výskyt vyšších harmonických složek. Výsledné zkreslení se pak musí vypočítat podle přesně definovaných vzorců. Tato metoda je velmi přesná, neboť na ní nepůsobí rušivá napětí, která zesilovač produkuje.

Druhá metoda spočívá v použití filtru typu pásmová propust. Pomocí filtru zjišťujeme podíl všech vyšších harmonických v původním signálu. Toto měření však není tolik přesné jako za pomoci spektrálního analyzátoru, protože se zde mohou uplatnit rušivá napětí.[10]

6.2.2 Zkreslení intermodulační

Vzniká vlivem nelinearit přenosových členů. Jednotlivé kmitočty jsou dány kombinací součtových a rozdílových frekvencí vstupního signálu a jeho harmonických složek. Pro lidský sluch se však projevuje poněkud nepříznivěji než zkreslení harmonické. Měření intermodulačního zkreslení je mnohem obtížnější, protože musíme na vstup zesilovače připojit signály dva. První o kmitočtu 250 Hz s amplitudou 4krát vyšší než druhý signál, který má stanovený kmitočet 1 kHz dle normy DIN 45 500. Kmitočty harmonických složek je třeba změřit spektrálním analyzátozem. Tolerance pro výkonové zesilovače je 2%, což odpovídá dvojnásobku přípustné hodnoty harmonického zkreslení.[10]

6.3 Výstupní výkon zesilovače

Je takový výkon, který je zesilovač schopný dodat do připojené zatěžovací impedance, nejčastěji (2, 4, 8 až 16Ω). V běžných podmínkách takovou zátěž tvoří právě reproduktor. Otázkou však zůstává, jak velký výstupní výkon zesilovače zvolit. Jednoznačně je vždy lepší mít silnější zesilovač než reproduktor. Pokud by tomu tak nebylo, zesilovač by začal zkreslovat dříve než reproduktor a potenciál reproduktoru by nebyl nevyužit naplno. Navíc by vlivem limitace zesilovače mohlo dojít k poškození reproduktoru. Proto je dobré mít u zesilovače vždy dynamickou rezervu, aby se dokázaly reprodukovat veškeré dynamické špičky, které běžný hudební signál obsahuje. Pro subbasové reproduktorové soustavy se volí výkon zesilovače, jakožto 1,5 – 2 násobek příkonu reproduktoru, zatímco u satelitních reproduktorových soustav bývá výkon reproduktoru přibližně srovnatelný s výkonem zesilovače. Výkon zesilovače se měří podle mezinárodně uznávaných standardů. Z těch nejpoužívanějších jmenujme standard EIA a FTC. [13]

6.3.1 Standard EIA

Měří se pomocí jednoho zvoleného kmitočtu, kdy většina výrobců volí 1 kHz. Na vstup zesilovače se přivede zvolený signál a začne se hlídat výstupní napětí. Vstupní signál se zvyšuje do té úrovně, dokud zesilovač nenarazí na svůj limit (clip), při kterém se nesmí překročit definovaná hranice zkreslení buď 0,05 %, 0,1 % nebo 1 %. Toto zkreslení by nemělo být zaměněno se samotným THD zesilovače. Tento standard není příliš náročný pro mnohé zesilovače, protože mimo to, že se měří pouze na jednom kmitočtu, norma dovoluje provést měření pouze na jednom kanálu zesilovače. Solidní výrobce tento výkon uvádí pro měření dvou kanálů současně.

6.3.2 Standard FTC (Federal Trade Commission)

Tento standard je mnohem náročnější než EIA. Měření probíhá rozmítaným sinusovým signálem 20 - 20 kHz (pokud není jinak specifikováno). Oba kanály musejí být současně vybuzeny i zatíženy, což klade velké nároky na zdroj zesilovače. Zesilovač potom musí obstát zatěžovací zkoušku, ve které nesmí v žádném případě vypnout tepelné ani proudové ochrany, a signál nesmí být po celou dobu zátěže omezen. Testuje se nejprve při 1 kHz po dobu 1 hodiny na 1/3 plného výkonu zesilovače. Následuje pětiminutový test plného výkonu. Zkreslení zesilovače při měření opět nesmí překročit stanovené hranice zkreslení (0,025 %, 0,05 % a 0,1%). Zesilovač je také testován při malých úrovních hlasitosti (hranice 0,25 W), při kterých se již začnou projevovat přechodová zkreslení.

Jak je vidět, podmínky jsou opravdu náročné. Proto spousta zesilovačů tento standard vůbec nemá uvedený v katalogovém listu zesilovače. Nemuseli by totiž splnit test do zátěže 2 Ω, při kterém je zesilovač nejvíce namáhán.

6.4 Impedance zesilovače

6.4.1 Vstupní impedance

Vstupní impedance zesilovače by měla být asi 3krát až 5krát vyšší, než vnitřní odpor zdroje signálu. Podle normy IEC se doporučuje vstupní impedance 10 kΩ. V opodstatněných případech je možné zvolit impedanci daleko nižší. Dříve, podle starých norem byly předepsány vysoké vstupní impedance, řádově stovky kΩ. Dnes jsou však takto vysoké impedance zbytečné, jelikož došlo k velkému pokroku při výrobě operačních zesilovačů, které mají výstupní impedanci tak malou, že je stačí zatížit úměrně malou impedancí.

Měření vstupní impedance probíhá tak, že se zesilovač zatíží jmenovitou impedancí a na vstup připojíme tónový generátor se sériovým rezistorem R_g . Jeho hodnota by měla činit asi 1/10 předpokládané vstupní impedance. Zesilovač vybudíme a změříme napětí na rezistoru R_g a vstupních i výstupních svorkách. Vstupní impedanci zesilovače pak vypočítáme dle následujícího vztahu

$$R_{vst} = \frac{U_1}{U_2} \cdot R_g, \quad (6.1)$$

kde R_{vst} (Ω) je vstupní impedance zesilovače, U_1 (V) napětí na vstupních svorkách a U_2 (V) napětí na výstupních svorkách.

Tímto výpočtem však zjistíme pouze reálnou složku impedance. Doporučuje se měřit hlavně na nižších frekvencích. U vyšších kmitočtů se začíná projevovat parazitní kapacita součástek, která by vedla ke zkreslenému výsledku.[10]

6.4.2 Vnitřní impedance a činitel tlumení

Je dána vnitřním zapojením zesilovače. Norma (DIN 45 500) povoluje vnitřní odpor nejvýše 1/3 impedance zatěžovací [10]. Dnešní zesilovače ji však s přehledem splňují a jejich vnitřní odpor bývá řádově jednotky miliohmů.

Mnohdy se v tomto kontextu mluví o činiteli tlumení, v angličtině dumping factor. Ten je určen jako podíl zatěžovací impedance ku vnitřní impedanci zesilovače.

Činitel tlumení je nepřímo úměrně závislý na frekvenci. Se zvyšující se frekvencí klesá činitel tlumení. Funkcí zesilovače není pouze rozkmitat membránu, ale hlavně ji také zatlumit. Činitel tlumení je nejvíce slyšitelný u hlubokotónových reproduktorů. Zvuk zesilovače s vysokým činitelem tlumení se zdá konkrétnější. To je velmi důležité například při živém vystoupení, kdy tento činitel přispívá k dynamice přednesu. Pokud bychom chtěli srovnávat jednotlivé zesilovače podle tohoto činitele, výsledky by byly hodně neobjektivní. Zesilovač v pracovní třídě D bude mít analogicky činitel tlumení menší než zesilovač pracující v lineární třídě. To je u třídy D způsobené výstupním filtrem, který zvýší vnitřní impedanci zesilovače.

6.4.3 Zatěžovací impedance

Zatěžovací impedanci tvoří reproduktor, který standardně nabývá hodnot 2, 4, 8 nebo 16 Ω . Při připojování reproduktorů k libovolnému zesilovači je nutné zjistit minimální zatěžovací impedanci zesilovače. Pokud bude nabývat např. 8 Ω , znamená to, že k němu nesmíme připojit reproduktor s nižší impedancí. To by vedlo v nejlepším případě k aktivaci ochrany nebo dokonce až k destrukci zesilovače. Opačný případ však nastat může. Připojíme-li k zesilovači vyšší impedanci než minimální povolenou, zesilovač bude mít naopak proudovou rezervu. Do reproduktoru však bude podle Ohmova zákona dodán menší výkon.

7 Návrh zesilovačů

7.1 Zesilovač pro vysokotónový reproduktor

Zesilovač pro vysokotónový reproduktor by měl být dostatečně dimenzovaný oproti zvolenému vysokotónovému reproduktoru. Výrobce u reproduktoru DE12 uvádí výkon 25 W na minimálním dělicím kmitočtu 2200 Hz. Při vyšších kmitočtech však tento reproduktor zvládne mnohem více, nehledě na dynamické špičky, kterých je zejména při ozvučování koncertů a jiných veřejných produkcí spousta. Navíc bude vysokotónový reproduktor značně zatlumen, aby byla dorovnána jeho citlivost vůči reproduktoru hlubokotónovému, který má citlivost o 12 dB nižší.

Zvolil jsem integrovaný zesilovač TDA7293V, jakožto nástupce TDA7294 od firmy SGS Thomson, pracující ve třídě AB. Je integrován do pouzdra Multiwatt 15 a jeho rozsah napájecího napětí dovoluje až ± 50 V. Výkonový stupeň je tvořen tranzistory DMOS, které při napájení ± 40 V dokáží dodat výkon až 100 W při zatěžovací impedanci 8 Ω . Za zmínku rozhodně stojí, že TDA7293V podporuje i práci do impedance 4 Ω , která však nebude použita. Samozřejmostí tohoto integrovaného obvodu je ochrana proti zkratu na výstupu a ochrana tepelná. Při zapojování jsem se držel doporučeného zapojení výrobce, avšak bylo nutné provést drobné změny. Zapojení jsem realizoval v programu Eagle 4.16r2.

7.1.1 Popis funkce

Na vstupu zesilovače je zapojen kondenzátor C_{17} , který zabraňuje pronikání stejnosměrné složky do obvodu. Spolu s rezistorem R_{29} tvoří horní propust první řádu, jejíž dolní mezní kmitočet pro pokles o -3 dB je dán vztahem

$$f_m = \frac{1}{2\pi \cdot RC} = \frac{1}{2\pi \cdot 22 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 10^{-6}} = 7 \text{ Hz.} \quad (7.1)$$

C_{21} a C_{22} jsou filtrační kondenzátory připojené k napájení. Jejich hodnotu jsem nechal na doporučených 1000 μF . Paralelně k nim jsou připojeny kondenzátory C_{18} a C_{20} . Ty slouží k odfiltrování vysokofrekvenčních složek, které by se do obvodu mohly dostat ze zdroje napájení. Obvod bude napájen ± 40 V, pro dosažení požadovaného výkonu 100 W do 8 Ω . Rezistor R_{32} společně s kondenzátorem C_{19} tvoří tzv. RC Boucherův člen, který zajišťuje stabilitu obvodu na výstupu. Pokud bychom Boucherův člen nezapojili, mohlo by dojít k rozkmitání zesilovače a následné destrukci. Pin 4 s označením SGND jsem uzemnil, protože slouží k řetězení více zesilovačů, což v mém případě nebude použito. Využil jsem sdružené funkce mute a stand-by, která slouží ke zpožděnému připojení reproduktorů. Zabraňuje tak případnému lupnutí do reproduktorů při zapnutí síťového vypínače. Tvoří ji kondenzátory C_{25} , C_{26} a rezistory R_{33} , R_{34} , R_{35} . Zapojení a hodnoty těchto součástek vychází z katalogového listu TDA7293V. Na pin 5 je vyvedena signalizace clipu. Připojil jsem k němu červenou LED diodu, která je přes odpor R_{36} připojena ke kladnému napájecímu napětí. Vývod bootstarp a bootloader tvoří funkci, která dokáže omezit napájecí napětí při použití zdroje vyššího napětí než 50 V. Kondenzátor C_{23} je mezi ně zapojen, čímž povoluje plný rozsah napájecího napětí 120 V.

7.1.2 Realizace vysokotónového zesilovače

Zesilovač pro vysokotónový reproduktor je navržen na oboustranné desce plošného spoje. Všechny součástky jsou diskrétní, rezistory jsou miniaturní metalizované o velikosti 0207 s tolerancí 1%. Návrh byl proveden programem EAGLE 4.16r2. Osazovací plán se nachází v příloze D.2 a strana spojů TOP a BOTTOM v příloze E.2a a E.2b. Plošný spoj je umístěn na stejném chladiči jako zesilovač hlubokotónový, kvůli chlazení integrovaného obvodu TDA7293V, který je přes silikonovou podložku a izolační průchodku ke chladiči přichycen. Je napájen symetrickým zdrojem o napětí ± 42 V.

7.2 Zesilovač pro hlubokotónový reproduktor

Zesilovač pro hlubokotónový reproduktor byl vybírán podle zvoleného reproduktoru. Výrobce B&C uvádí u reproduktoru 8PS21 výkon 200 W RMS. Potřebný výkon pro tyto účely by měl být tedy 200 W a více, z důvodu pokrytí výkonových špiček, kterých je při živé reprodukci dostatek. Zesilovač by měl být pokud možno malý a kvalitně provedený, aby odolával tvrdšímu zacházení aktivní reprosoustavy. Zvolil jsem schéma zesilovače ve třídě AB, kvůli malému zkreslení a celkové kvalitě reprodukce. Schéma je převzaté z [11], přičemž budou provedeny drobné úpravy např. ve výběru součástek a celkovému přizpůsobení k mým požadavkům. Zesilovač je napájen napětím přibližně ± 62 V. Při tomto napájení by měl zesilovač dodat výkon okolo 300 W do zatěžovací impedance 4 Ω . Protože zvolený reproduktor má impedanci 8 Ω , počítám s dosaženým výkonem přibližně 200 W, což je pro dané účely naprosto vyhovující.

7.2.1 Popis funkce

Na vstup zesilovače je přivedeno linkové napětí. Následuje vstupní filtr složený ze součástek R_{56} , R_{57} a C_{26} , C_{27} . Jeho funkcí je zamezit vysokofrekvenčnímu a stejnosměrnému napětí, přicházejícího ze vstupních obvodů. Signál je dále přiveden do diferenčního zesilovače, tvořeného tranzistorem $T_{12} - T_{15}$, který již rozděluje přivedený signál na kladnou a zápornou půlvlnu. To je nutné provést u zesilovačů pracujících ve třídě AB, viz kapitola 6.1.3.

Trimmer TR_1 , tranzistor T_9 , rezistory $R_{38} - R_{40}$ spolu s diodami $D_9 - D_{12}$ slouží k nastavení klidového proudu. Při ožívání zesilovače je třeba trimr nastavit nejdříve tak, aby jezdec směřoval směrem k emitoru, a trimr tak představoval odpor o hodnotě 2,2 k Ω . Poté je nutné kontrolovat napětí na koncových tranzistorech a jezdcem trimru opatrně snižovat odpor (zvyšovat klidový proud). Tím se dosáhne požadovaného proudu, kterým snížíme přechodové zkreslení. Při zahřátí zesilovače by se mohl klidový proud zvýšit natolik, že by došlo k destrukci koncového stupně. Z tohoto důvodu je nezbytné použít diody $D_1 - D_4$, které se musí umístit přímo na chladič k výkonovým tranzistorům. Všeobecně je známo, že úbytek napětí na diodě je závislý na teplotě (se zvyšující se teplotou klesá úbytek napětí). Zvýší-li se tedy teplota chladiče, jmenované diody změní vlastnosti a otevřou více bázi tranzistoru T_9 . Ten sníží proud přiváděný do koncových tranzistorů. Tímto způsobem je vytvořena jakási zpětná vazba, udržující klidový proud.

Tranzistory T_3 , T_4 , T_7 a T_8 dohromady tvoří napěťový (rozkmitový) stupeň zesilovače. Pozvolna zesilují vstupní napětí až na úroveň napětí napájecího. Následují budící tranzistory (budiče) T_1 a T_2 , které je nutné použít, pokud jsou koncové tranzistory bipolárního typu. Bázi bipolárního tranzistoru je potřeba dodat dostatečný proud pro otevření. Budící tranzistory by tedy měly být proudově dostatečně

dimenzované a umístěné na patřičném chladiči, nejlépe spolu s tranzistorem koncovými. Koncové tranzistory jsem zvolil *MJ15003/MJ15004*. Ve schématu jsou to tranzistory $Q_1 - Q_6$. Protože musí zvládnout vysoké napětí i proud, je třeba je umístit na kvalitní chladič v dostatečné vzdálenosti od sebe. Emitorové rezistory $R_1 - R_6$ kompenzují nedostatky koncových tranzistorů z výroby a měli by být také správně dimenzované. Já jsem zvolil rezistory se ztrátovým výkonem 5 W.

Z emitorů koncových tranzistorů je vyvedena další zpětná vazba přes rezistory $R_{10} - R_{15}$. Pokud se zvýší proud protékající koncovým stupněm nad nastavenou úroveň, otevřou se tranzistory T_5 a T_6 , čímž naopak přivřou tranzistory T_3 a T_4 , které sníží napětí a tím pádem i proud tekoucí do koncových tranzistorů. Diody D_1 a D_2 zabraňují proniknutí kladného nebo záporného napětí do napájecího napětí opačné polarity, které vznikne při zatížení zesilovače reproduktorem a jeho provozu.

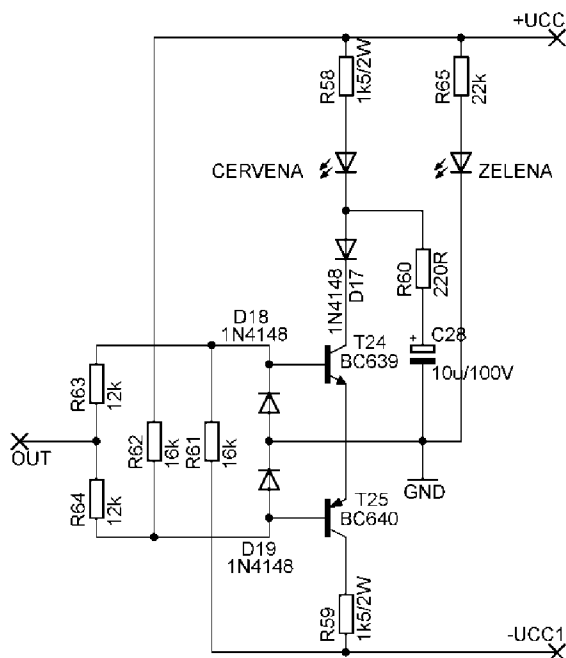
Na výstupu zesilovače nesmíme přehlédnout Boucherův RC člunek složený z rezistoru R_8 a kondenzátoru C_3 . Zabraňuje rozkmitání zesilovače zejména při připojení nevhodné zátěže. V krajních případech by se mohl tento člunek vynechat. Výkonová a signálová zem je spojena přes rezistor R_{22} . To je běžná praxe, která se takto aplikuje, aby se zamezilo možnému vzniku zemních smyček. Kondenzátory C_{24} , C_{25} , C_{13} , C_{15} a C_4 , C_5 jsou zde zařazeny k dodatečné filtraci napájecího napětí, které by nemuselo být příliš dokonalé a v nejhorších případech by to vedlo k rozkmitání nebo zákmitům zesilovače. Paralelně k nim jsou připojeny kondenzátory C_{22} , C_{23} , C_{12} , C_{14} a C_6 , C_7 . Ty odstraňují vysokofrekvenční složku vznikající v napájecích zdrojích, zejména pokud se použije spínaného napájecího zdroje. Napájecí napětí $\pm U_{cc}$ je zapojeno přes pojistky F_1 a F_2 , jejichž hodnota je 5 A, rychlé. Hodnota pojistky se volí dle velikosti napájecího napětí a zátěže zesilovače, která v tomto případě činí 8 Ω .

7.2.2 Detektor přebuzení

Detektor přebuzení je obvod, který signalizuje, že zesilovač na výstupu dosáhl svého maximálního napájecího napětí. Pokud by zesilovač tímto detektorem vybaven nebyl, snadno by nedbalostí obsluhy došlo k ořezání výstupního signálu, což by mohlo vést k poškození reproduktoru. LED dioda signalizující tento stav by nikdy neměla svítit, ale maximálně jen zřídka problikávat.

Obvod je převzat z [11], avšak byl mírně upraven. Namísto použitého optočlenu je použita 3 mm červená LED dioda, která klip signalizuje. Obvod je připojen přes 2 W rezistory přímo na kladné a záporné napájecí napětí hlubokotónového zesilovače. V případě, že napětí na výstupu k reproduktoru (pin OUT) dosáhne maximálního napětí, otevřou se tranzistory T_{24} a T_{25} a červená LED dioda se rozsvítí.

Do obvodu byla také přidána signalizace napájení reproduktorové soustavy, viz rezistor R_{65} a zelená LED dioda. Tento obvod je implementován přímo v plošném spoji pro hlubokotónový zesilovač.



Obr. 7.1: Clip limiter

7.2.3 Realizace zesilovače pro hlubokotónový reproduktor

Zesilovač byl sestaven z diskretních součástek. Byly použity miniaturní rezistory s kovovou vrstvou o rozměru 0207, zatížitelností 0,5 W, tolerancí 1 % a převážně fóliové kondenzátory. Plošný spoj byl navržen jako oboustranný s prokovey, aby bylo dosaženo co nejmenších rozměrů DPS. Velikost plošného spoje má rozměry 150 x 109 mm. Osazovací plán je možné vidět v příloze D.1, spodní a vrchní pohled na desku pak v příloze E.1a a E.1b. Návrh byl proveden stejně jako u vstupních obvodů v programu EAGLE-4.16r2.

Zesilovač je umístěn na distančních sloupkách mezi dva hliníkové L profily o tloušťce 6 mm. Koncové tranzistory NPN jsou připevněny na jednu straně chladiče spolu s budícím tranzistorem T_{16} a diodami $D_1 - D_4$. Tranzistory PNP jsou s budícím tranzistorem T_{17} dány na druhý L profil, přičemž jsou od chladiče izolovány slídovými podložkami přišroubovanými skrze izolační průchodky. Napájeny jsou napětím ± 62 V přivedeným skrze 5 A rychlé pojistky umístěné v pojistkových pouzdrech. Výstupní tlumivka byla zhotovena ze smaltovaného drátu o tloušťce 1,2 mm. Je tvořena 12ti závitů o průměru 12 mm. Takto navinutá cívka je nasazena na 5 W drátovém rezistoru R_7 . Klidový proud byl nastaven trimrem TR_1 .

Při konstrukci hlubokotónového zesilovače byla zjištěna chyba na plošném spoji. Tranzistory MPSA56, které byly vybrány z knihovny EAGLE, měli špatně uspořádané vývody. Proto bylo nutné (dle katalogového listu) prohodit bázi s kolektorem ohnutím vývodů.

Zhotovený hlubokotónový zesilovač je uveden v příloze G.1.

8 Závěr

Na začátku práce jsem se zabýval teorií zvuku, reproduktorů a ozvučnice, pomocí níž jsem provedl návrh reproduktorové soustavy a vhodný výběr elektroakustických měničů. Oba reproduktory byly vybrány od předního světového výrobce, italské společnosti B&C Speakers. Při návrhu jsem se držel zadání diplomové práce a snažil se navrhnout koncept reproduktorové soustavy tak, aby vyhovovala vysokým požadavkům při ozvučování kapel nebo jiných veřejných produkcí. Bylo tedy nutné vybrat reproduktory s vysokou citlivostí a výkonem při podmínce dodržení požadovaného malého objemu ozvučnice max. 25 l. Návrh ozvučnice jsem provedl pomocí vzorců. Všechny výpočty byly ověřeny v simulačním programu LspCAD 5.25, jehož výstupy lze vidět v příloze A. Po teoretickém návrhu, byla ozvučnice prakticky navržena. Výsledný objem splňuje požadavky a činí čistých 20 l. Celkově má ozvučnice velmi rozmanitý tvar, aby se co nejvíce zamezilo stojatému vlnění. Pravá zadní strana je zkosená o 45°, což dokonce umožňuje použít reproduktorovou soustavu jako pódiový monitor. Přední strana je zapuštěna o několik centimetrů a je plně připravena pro montáž ochranné mříže. Povrchová úprava měla být původně tvořena strukturovaným lakem, jenž by odolával tvrdým podmínkám, kterým má být reproduktorová soustava vystavena. K tomu však nakonec z finančních důvodů nedošlo a ozvučnice byla natřena černou matnou barvou. Fotodokumentace hotové reproduktorové soustavy je k vidění v příloze B.2.

Ve druhé polovině práce jsem se zabýval návrhem komplexní elektroniky pro tuto aktivní reproduktorovou soustavu. Protože by se mělo jednat o bi-amp řešení, bylo potřeba navrhnout zesilovače dva. Všechny desky plošného spoje byly umístěny na plechový panel, který představuje pravou zadní stěnu ozvučnice. Zdroj, síťový vypínač a konektor pro připojení napájecí šňůry se nachází ve spodní části panelu. Zesilovač pro hlubokotónový reproduktor je spolu se zesilovačem pro vysokotónový reproduktor posazen do hliníkového U profilu tloušťky 6 mm, aby byl zajištěn dostatečný přenos vzniklého ztrátového tepla. Plošný spoj vstupních obvodu je potom přimontován kolmo k vrchní straně panelu. V této oblasti se tedy nacházejí všechny ovládací prvky.

Pro napájení jsem použil klasický zdroj s toroidním transformátorem o celkovém výkonu 400 VA. Transformátor byl vyroben na zakázku u firmy JK-ELTRA, neboť nebylo možné na českém trhu sehnat transformátor potřebných parametrů (dvě vinutí). Na primární straně je v sérii zařazen NTC termistor, který zabraňuje proudovému nárazu. První vinutí je symetrické o výkonu 300 VA při napětí na sekundární straně 2 x 45 V. To slouží pro napájení zesilovače pro hlubokotónový reproduktor. Druhé vinutí má výkon 100 VA. Jeho sekundární napětí činí 2 x 30 V a je dále použito pro napájení zbylých obvodů. Obě napětí jsou usměrněna pomocí 25 A Greatzova můstku a vyfiltrována elektrolytickými kondenzátory náležité kapacity. Pro napájení operačních zesilovačů je stejnosměrné napětí ± 42 V (mimo jiné použité pro napájení zesilovače pro vysokotónový reproduktor) usměrněno stabilizátorem se zenerovou diodou a tranzistorem na symetrické napětí $\pm 9,1$ V. Zdroj je dále vybaven stabilizovaným napětím +24 V, které sice není použito, ale může posloužit pro obvod, jako je například zpoždění připojení zátěže nebo obvod pro přemostění NTC termistoru. Nechybí ani stabilizované napájení +5 V a 3,3 V, které má sloužit pro napájení digitálního obvodu S/PDIF. V diplomové práci není z časových důvodů

uvedena kapitola zabývající se zdrojem. Transformátor má zalitý střed a je umístěn uvnitř ozvučnice pomocí šroubu.

Při osazování oboustranných plošných spojů součástkami, bylo nejprve potřeba opravit prokovy, protože se jich při výrobě cca 90 % nepovedlo. Nicméně oživení zdroje a zesilovače pro hlubokotónový i vysokotónový reproduktor proběhlo bez problémů. U oživování vstupních obvodů byla zjištěna závada v přepínání mezi digitálním a analogovým vstupem a přemostění Baxandallova korektoru. Při přepnutí digitálního vstupu na sloučený signál L+P se spojí výstup dvou operačních zesilovačů, což způsobí prudké zahřátí součástek a chrčení v reproduktorech. Totéž platí u přemostění Baxandallova korektoru. Toto přepínání by se tedy muselo prakticky vyřešit jiným způsobem. Dále vznikají ve vstupních obvodech zemní smyčky, které způsobují brum. To je pravděpodobně způsobeno nevhodným rozmístěním součástek na DPS.

Digitální vstup jsem navrhl pomocí S/PDIF dekodéru WM8804 a D/A převodníku WM8524. Při návrhu jsem postupoval dle katalogových listů. Schéma zapojení je uvedeno v příloze C.5, osazovací plán v příloze D.5a, D.5b a pohled na plošný spoj v E.5. Deska je realizována jako jednostranná. K vlastní konstrukci zapojení již nedošlo.

Výsledky měření reproduktorové soustavy jsou popsány v kapitole 4.4. Na frekvenci kolem 2 kHz vzniká propad o 5 dB, který je nejspíš způsoben nevhodně zvoleným dělicím kmitočtem. Kdybych měl pokračovat v návrhu, pokusil bych se provést aktivní výhybku jako přeladitelnou, aby bylo zabráněno tomuto nedostatku.

Literatura

- [1] KÁŇA, Ladislav. *ELEKTROAKUSTIKA* . Skriptum. VUT v Brně, 2002. 91 s.
- [2] TOMAN, Kamil. *REPRODUKTORY A REPROSOUSTAVY*, 1.díl. Orlová : DEXON, 2003. 201 s.
- [3] REICHL, Jaroslav. [online]. [cit. 2011-11-01]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/401-piezoelektricky-reproduktor>
- [4] SÝKORA, Bohumil. *Stavíme reproduktorové soustavy*, 1. - 48. díl. A Radio. 10/1997 - 9/2001.
- [5] DICKANSON, Vance. *Loudspeaker Design Cookbook*. 7th edition. Peterborough : Old Colony Sound Lab, NH, 2006. 275 s. ISBN 1-882580-47-8
- [6] VEJRAŽKOVÁ, Ivana. [online]. [cit. 2011-12-03]. Dostupné z: http://www.happymaterials.com/imgs/articles/153-11_10_ABS.pdf
- [7] HEIDUSKA, Cyrus. [online]. [cit. 2012-05-21]. Dostupné z: <http://www.ovnilab.com/articles/linelevel.shtml>
- [8] CHINN, Rick. [online]. [cit. 2012-05-21]. Dostupné z: <http://www.uneeda-audio.com/pads/>
- [9] SELF, Douglas. *SMALL SIGNAL AUDIO DESIGN*. The Boulevard, Langford Lane, Kidlington, Oxford, OX5, 1GB, UK : Focal Press, 2010. 556 s. ISBN 978-0-240-52177-0.
- [10] KOTISKA, Zdeněk. *NF zesilovače* , 1. díl. Praha : BEN, 2001. 90 s. ISBN 80-7300-030-X.
- [11] KOTISKA, Zdeněk. *NF zesilovače* , 4. díl. Praha : BEN, 2006. 103 s. ISBN 80-7300-211-
- [12] PAVLIC, Theodor. [online]. [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: http://www.tedpavlic.com/teaching/osu/ece209/lab1_intro/lab1_intro_phase_shifter.pdf
- [13] LEE, Bob. [online]. [cit. 2012-05-23]. Dostupné z: http://www.prodance.cz/download/otazky_a_odpovedi_kolem_vykonovych_z_esilovacu.pdf

Seznam symbolů a zkratek

ABS	A krylonitril b utadienstyren
AES	A udio E ngineering S ociety
Bi – amp	Bi - amplifier
CRT	C athode R ay T ube
DPS	P lošný spoj
EIA	E lectronic I ndustries A lliance
FTC	F ederal T rade C ommission
IEC	I nternational E lectrotechnical C ommission
LCD	L iquid C rystal D isplay
LED	L ight E mitting D iode
LspCAD	L oudspeaker C omputer A ided
okt	oktáva
pk	peak
PSpice	S imulation P rogram with I ntegrated C ircuit E mphasis
PWM	P ulse W idth M odulation
RC	R esistor C ondenser
RMS	R oot M ean S quared
SGND	S ource G round
SPL	S ound P ressure L evel
THD	T otal H armonic D istortion
T – S parametry	A lbert N eville T hieie a R ichard H. S mall

Seznam příloh

- A SIMULACE REPRODUKTORU 8PS21 v LspCAD 5.25
 - A.1 Impedanční charakteristika reproduktoru 8PS21 v bassreflexové ozvučnici
 - A.2 Skupinové zpoždění
 - A.3 Rychlost vzduchu v bassreflexu
 - A.4 Frekvenční závislost výchylky membrány

- B DOKUMENTACE OZVUČNICE
 - B.1 Jednotlivé formáty desek
 - B.2 Kompletní reproduktorová soustava

- C SCHÉMA ZAPOJENÍ
 - C.1 Zesilovač pro hlubokotónový reproduktor
 - C.2 Zesilovač pro vysokotónový reproduktor
 - C.3 Celkové schéma vstupních obvodů
 - C.4 Zdroj
 - C.5 S/PDIF

- D OSAZOVACÍ PLÁNY
 - D.1 Zesilovač pro hlubokotónový reproduktor
 - D.2 Zesilovač pro vysokotónový reproduktor
 - D.3a Celkové schéma vstupních obvodů – TOP
 - D.3b Celkové schéma vstupních obvodů – BOTTOM
 - D.4 Zdroj
 - D.5a S/PDIF - TOP
 - D.5a S/PDIF - BOTTOM

- E DPS
 - E.1a Zesilovač pro hlubokotónový reproduktor – TOP
 - E.1b Zesilovač pro hlubokotónový reproduktor – BOTTOM
 - E.2a Zesilovač pro vysokotónový reproduktor – TOP
 - E.2b Zesilovač pro vysokotónový reproduktor – BOTTOM
 - E.3a Celkové schéma vstupních obvodů – TOP
 - E.3b Celkové schéma vstupních obvodů – BOTTOM
 - E.4 Zdroj
 - E.5 S/PDIF

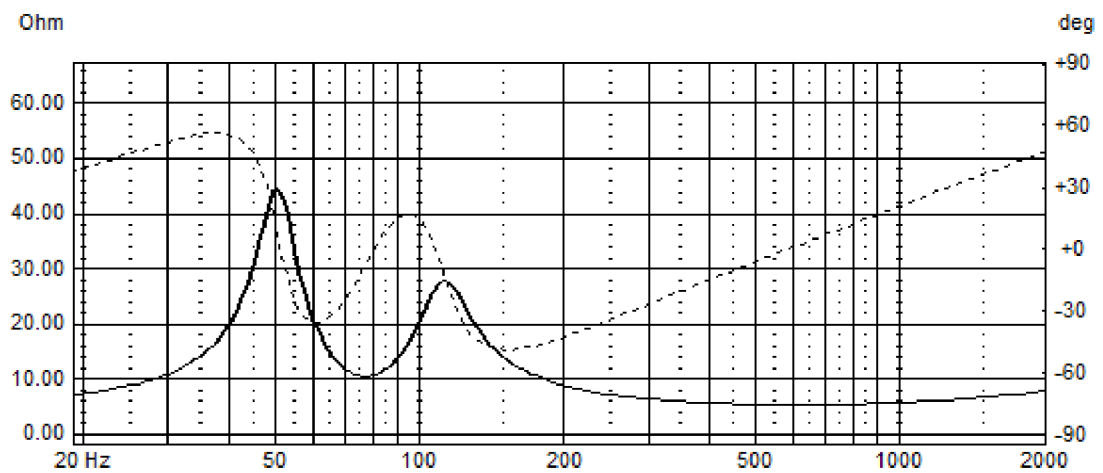
- F SEZNAM SOUČÁSTEK
 - F.1 Zesilovač pro hlubokotónový reproduktor
 - F.2 Zesilovač pro vysokotónový reproduktor
 - F.3 Vstupní obvody
 - F.4 Zdroj

- G FOTOGRAFICKÁ DOKUMENTACE
 - G.1 Zesilovač pro hlubokotónový reproduktor

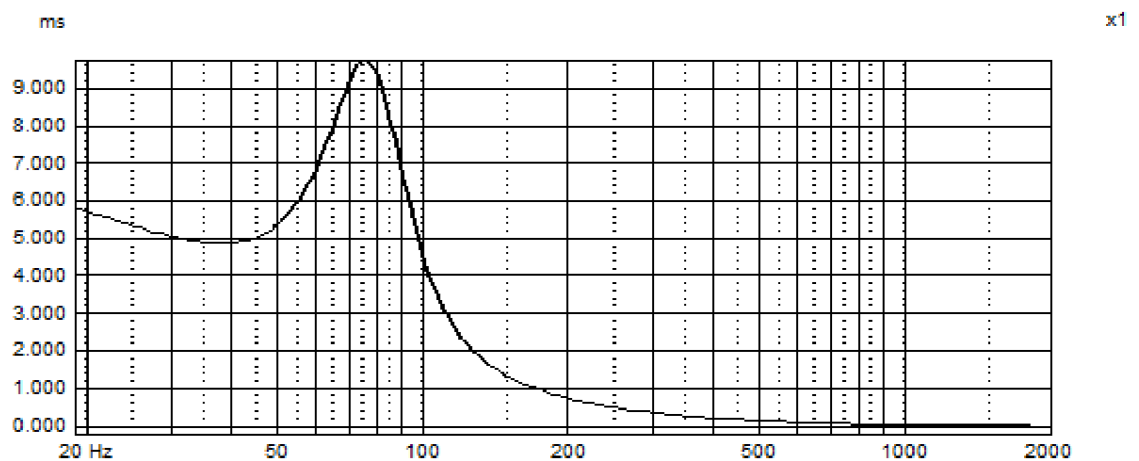
- G.2 Zesilovač pro vysokotónový reproduktor
- G.3a Celkové schéma vstupních obvodů – TOP
- G.3b Celkové schéma vstupních obvodů – BOTTOM
- G.4 Zdroj
- G.5 Elektronika reproduktorové soustavy

A SIMULACE REPRODUKTORU 8PS21 v LspCAD 5.25

A.1 Impedanční charakteristika reproduktoru 8PS21 v bassreflexové ozvučnici

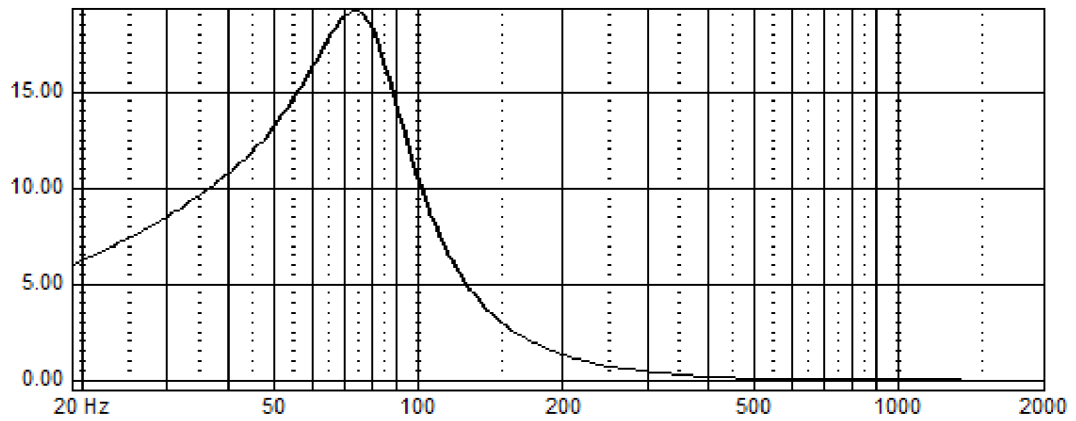


A.2 Skupinové zpoždění



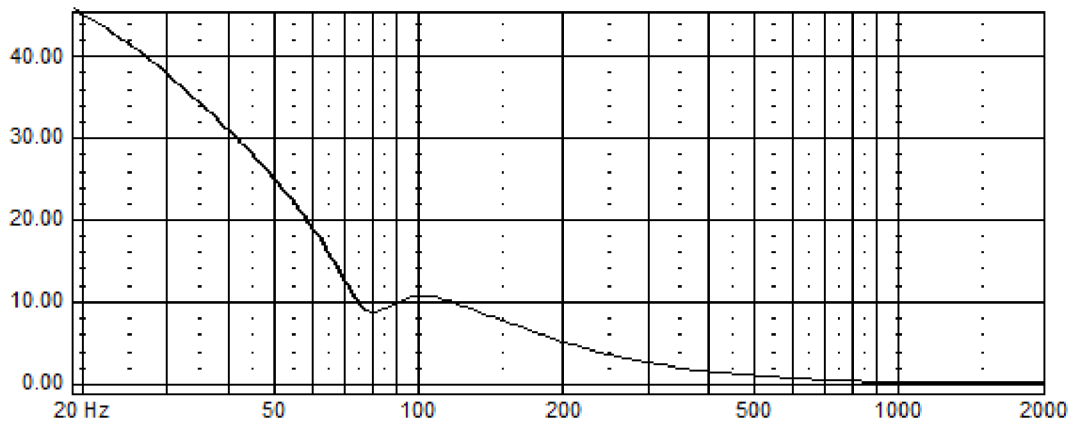
A.3 Rychlost vzduchu v bassreflexu

m/s



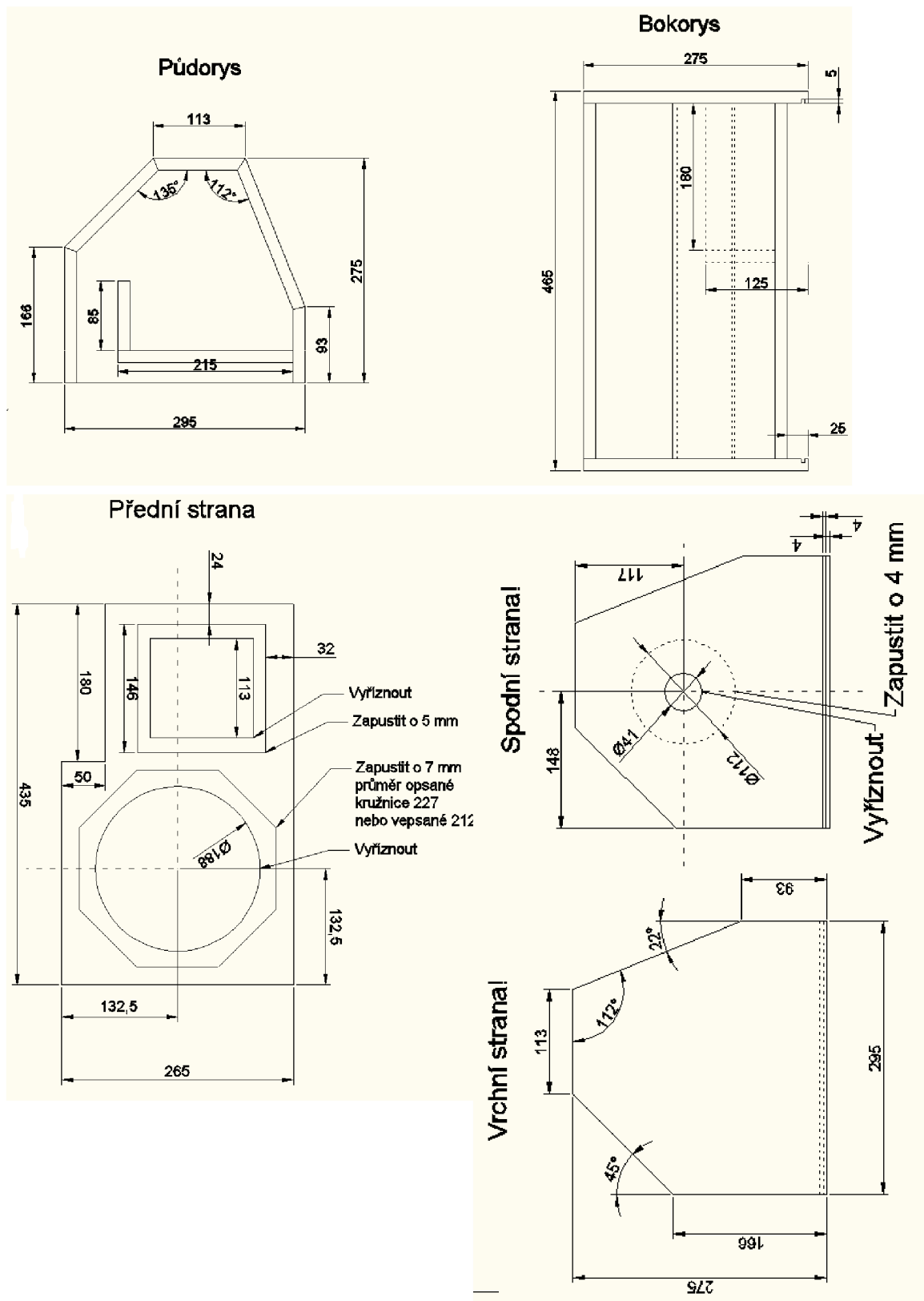
A.4 Frekvenční závislost výchylky membrány

mm p-p



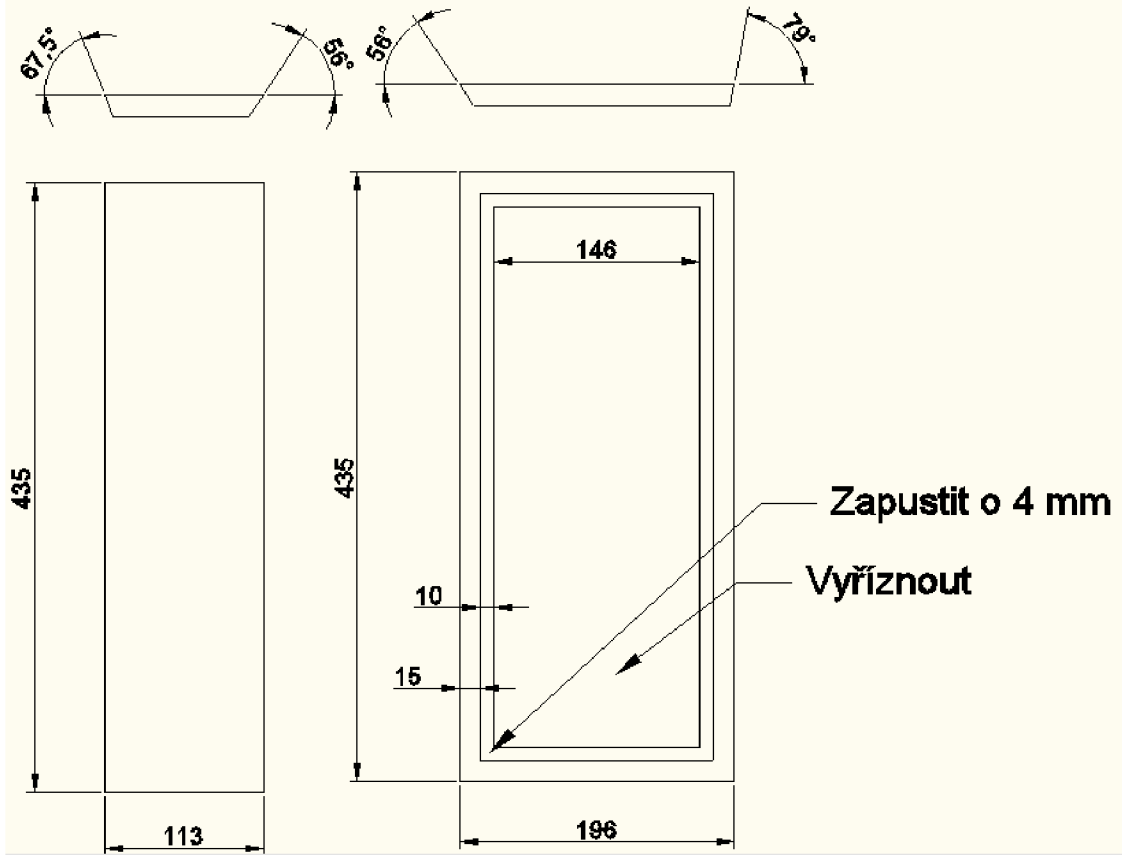
B DOKUMENTACE OSVUČNICE

B.1 Jednotlivé formáty desek



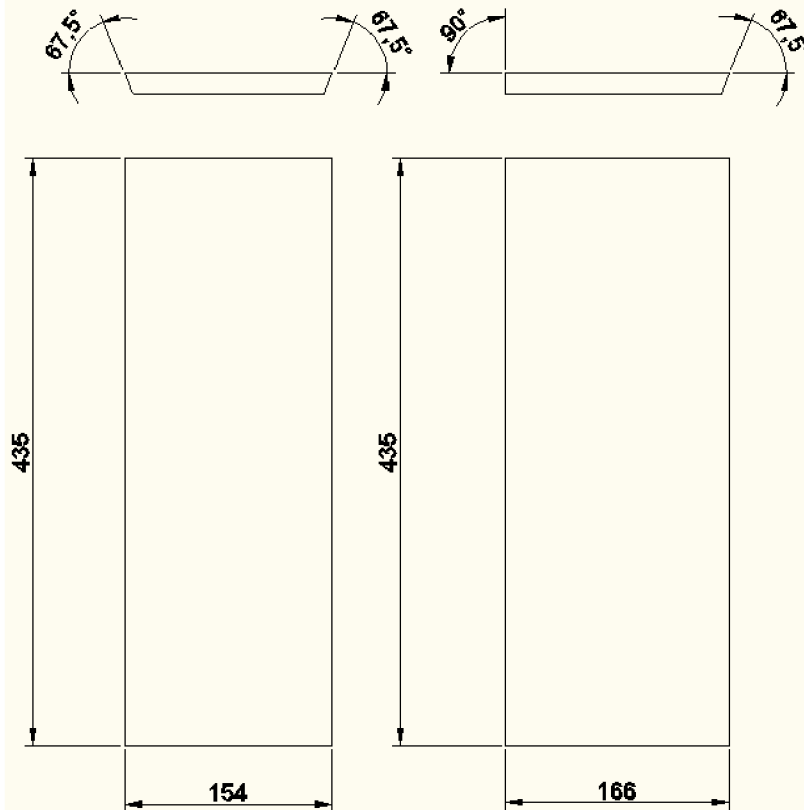
Zadní

Pravý bok zadní

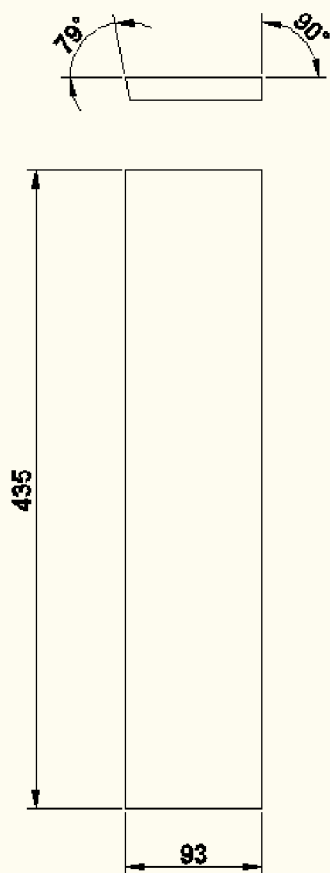


Levý bok zadní

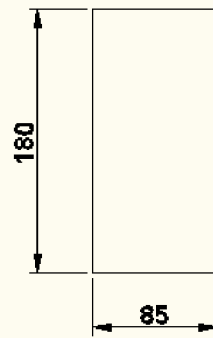
Levý bok přední



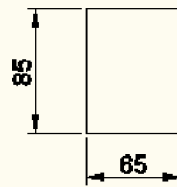
Pravý bok přední



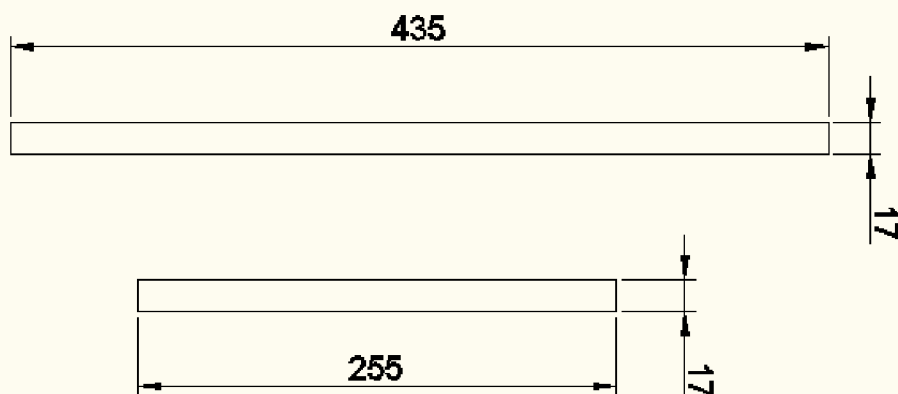
Bassreflex vertikál



Bassreflex horizontál



Pro mříž

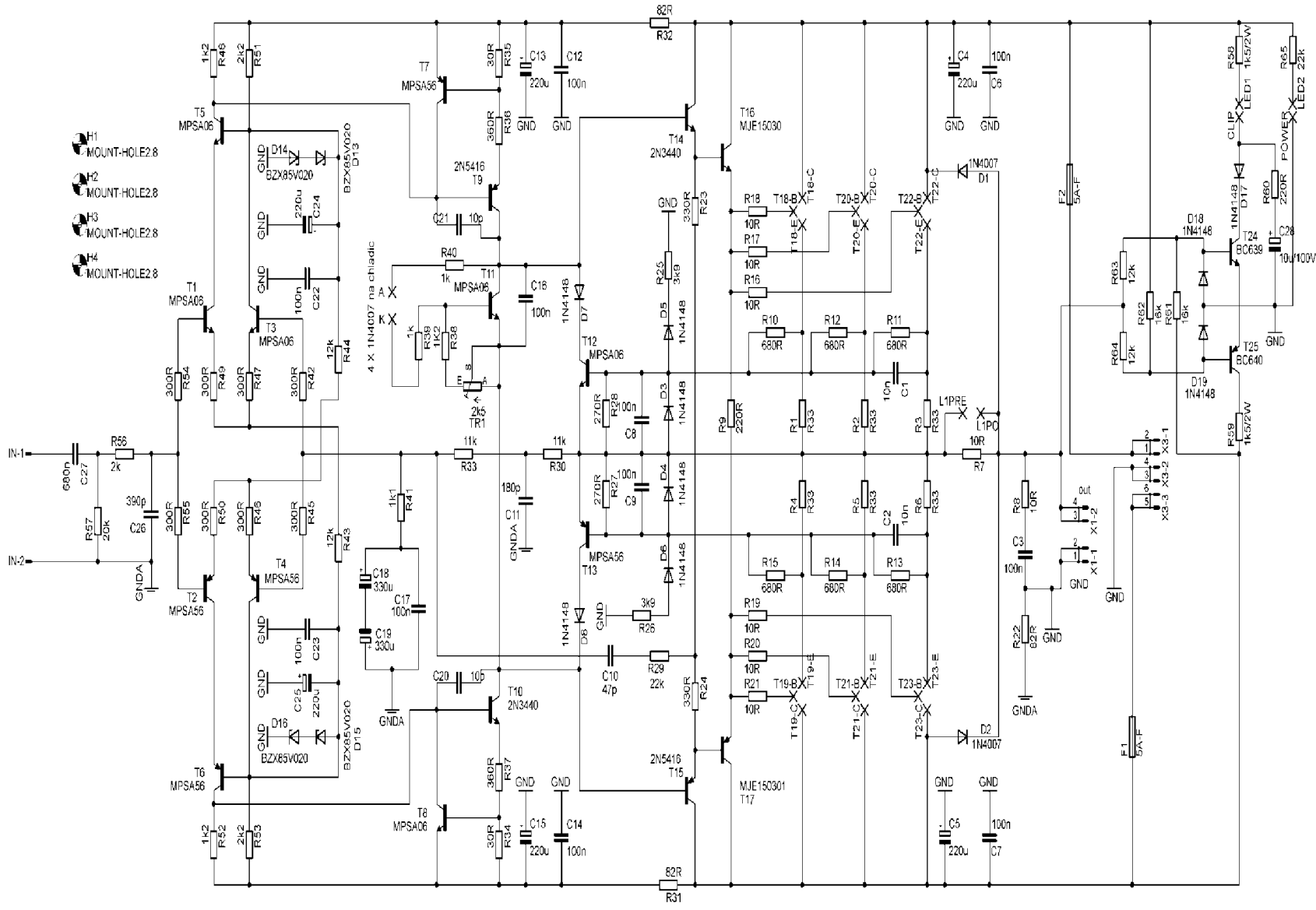


B.2 Kompletní reproduktorová soustava

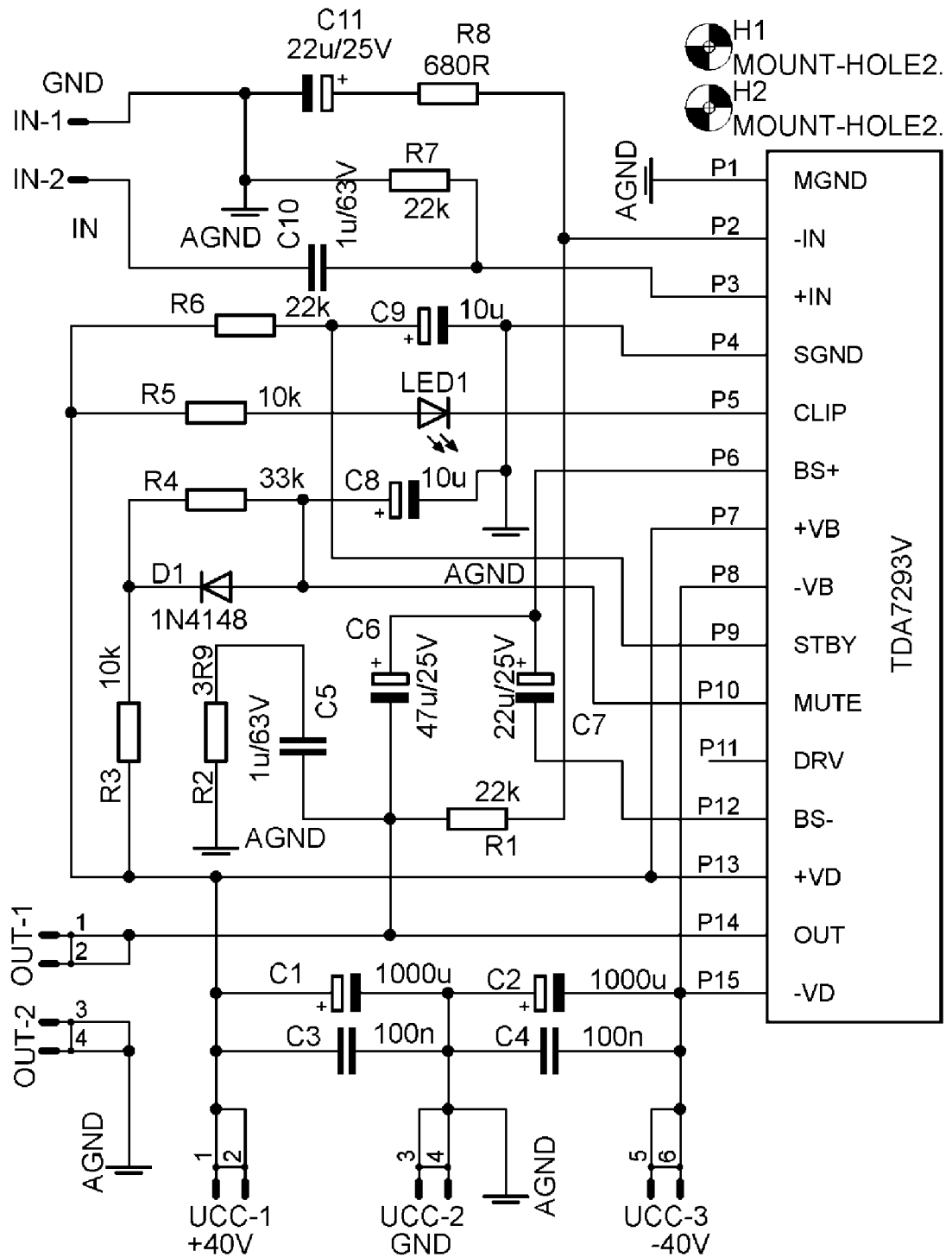


C SCHÉMA ZAPOJENÍ

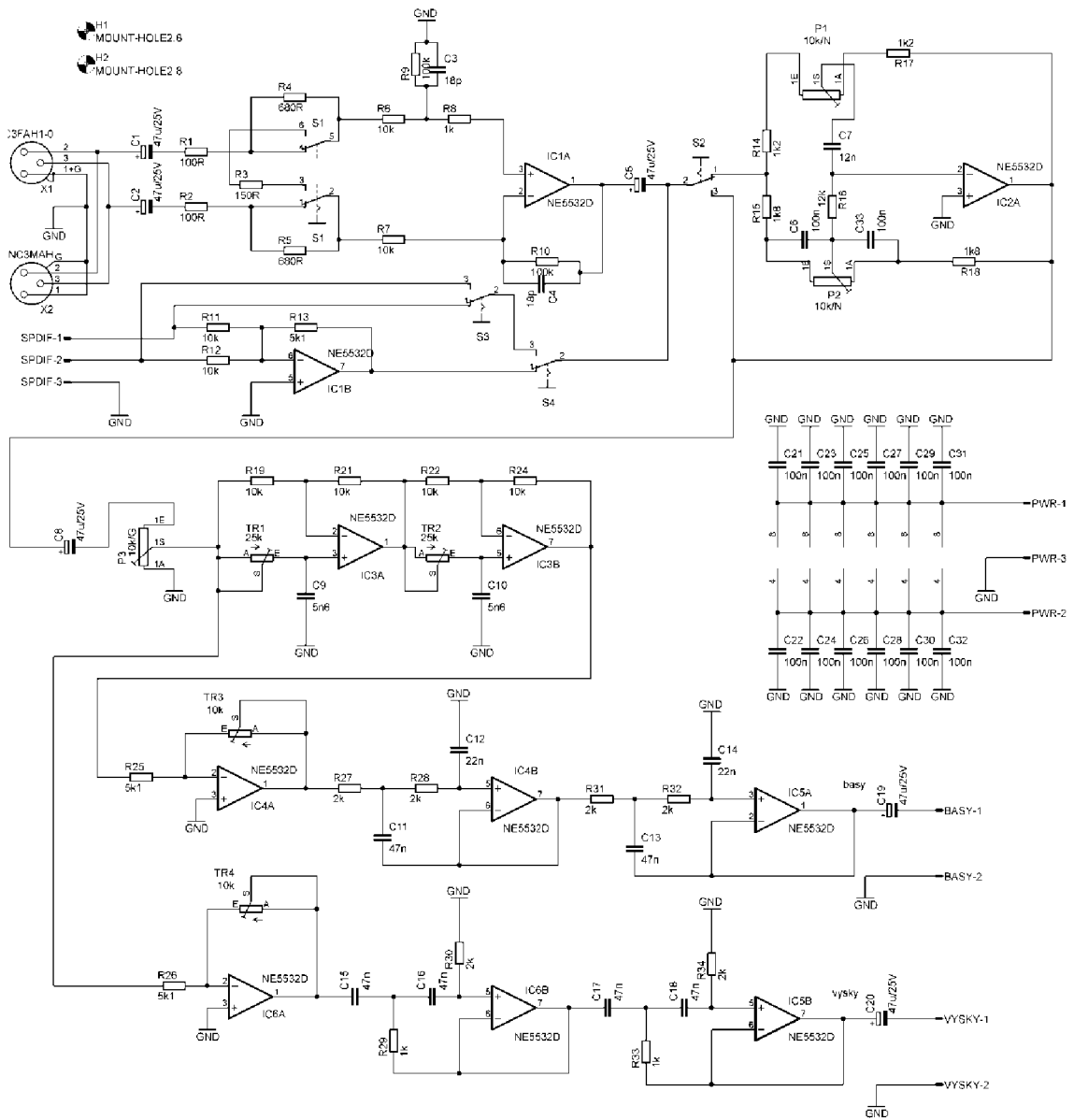
C.1 Zesilovač pro hlubokotónový reproduktor



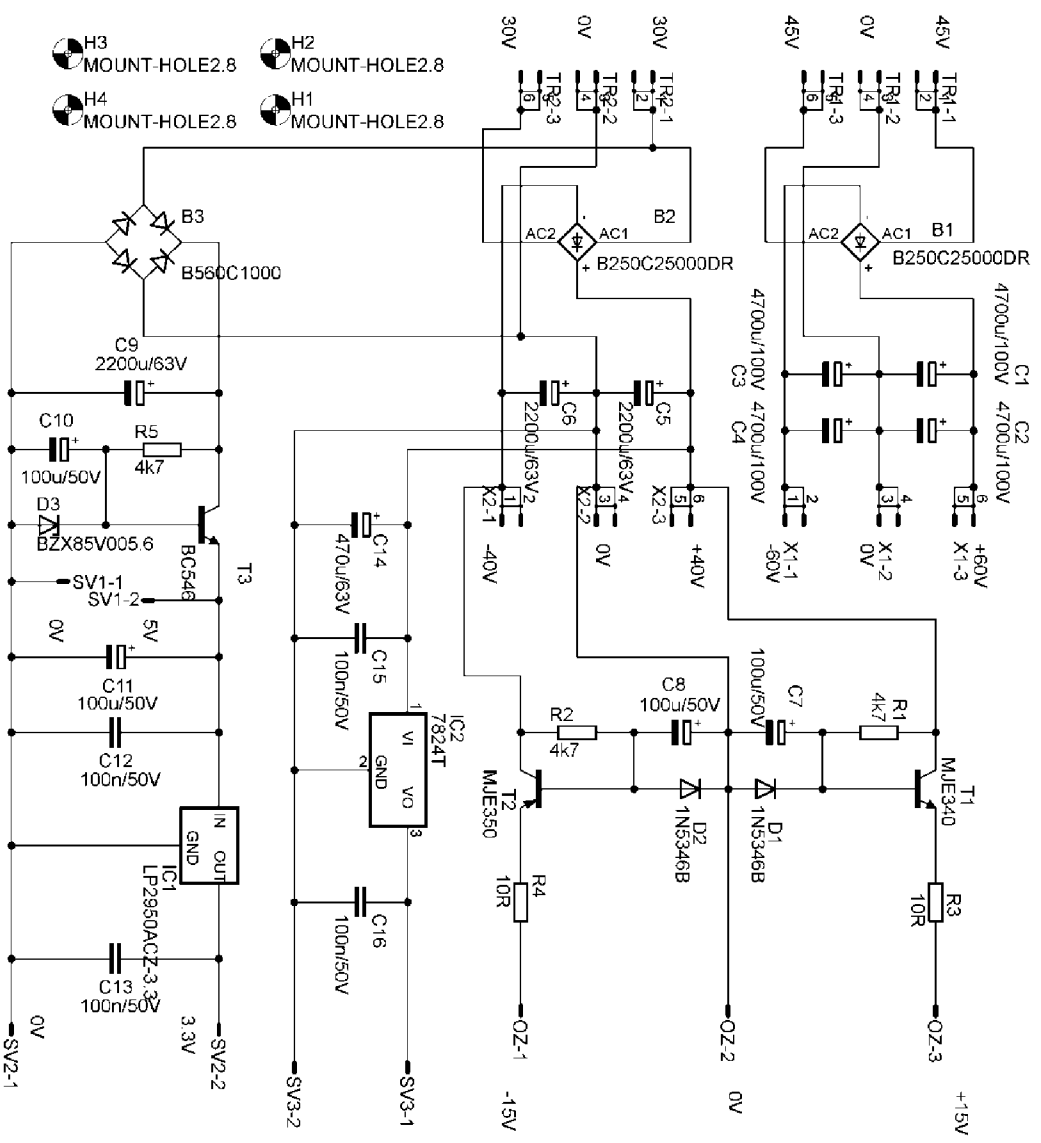
C.2 Zesilovač pro vysokotónový reproduktor



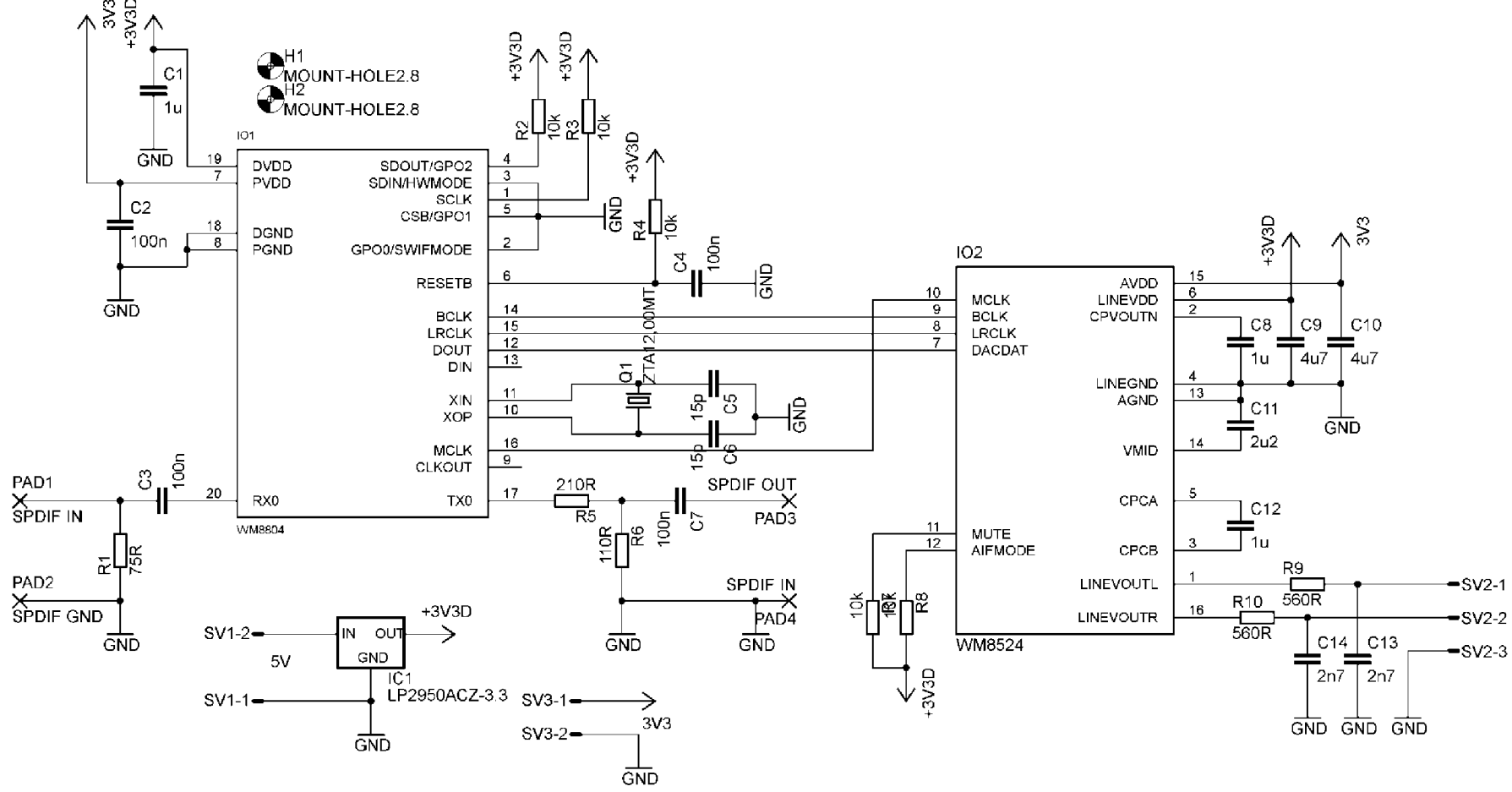
C.3 Celkové schéma vstupních obvodů



C.4 Zdroj

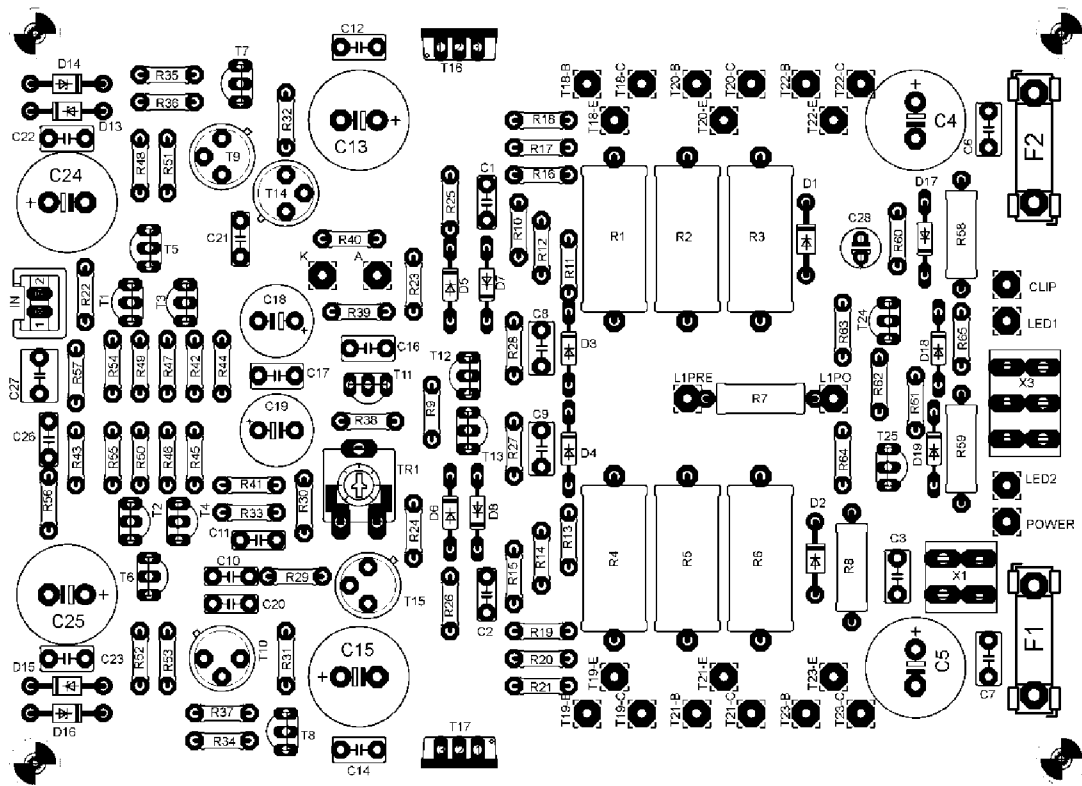


C.5 S/PDIF

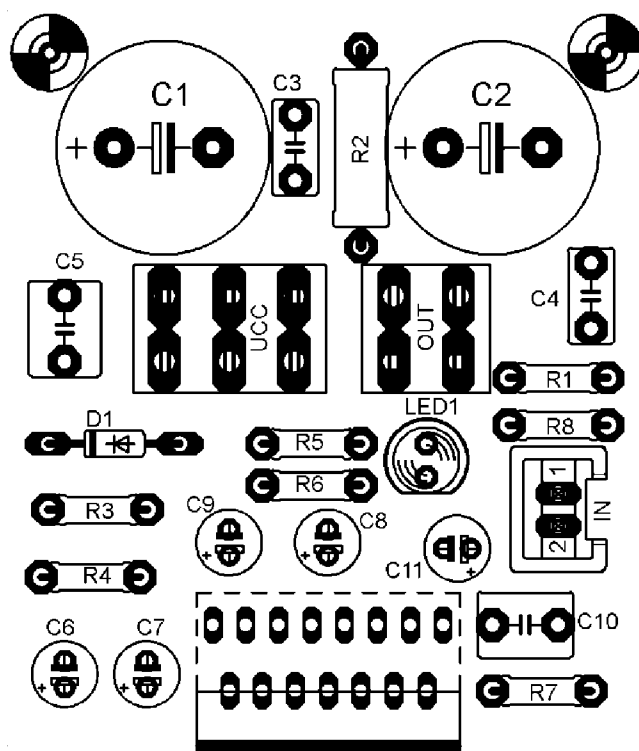


D OSAZOVACÍ PLÁNY

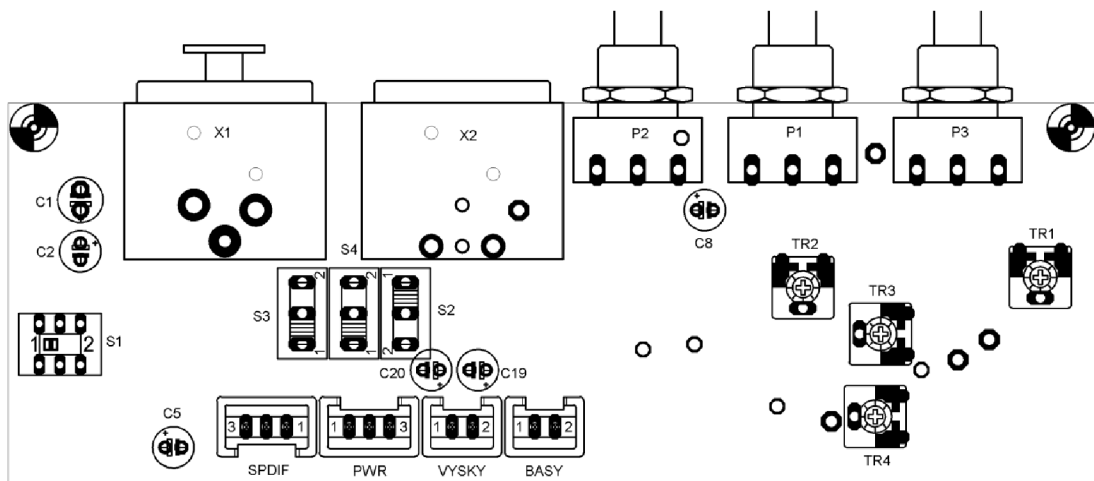
D.1 Zesilovač pro hlubokotónový reproduktor



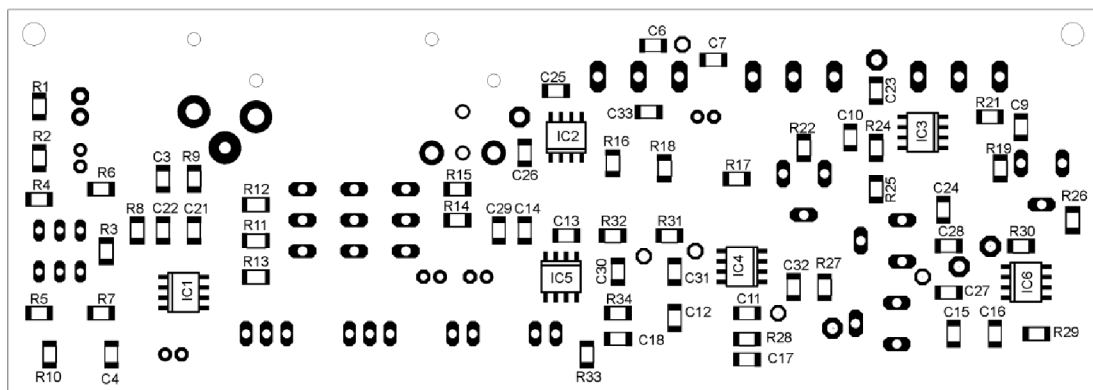
D.2 Zesilovač pro vysokotónový reproduktor



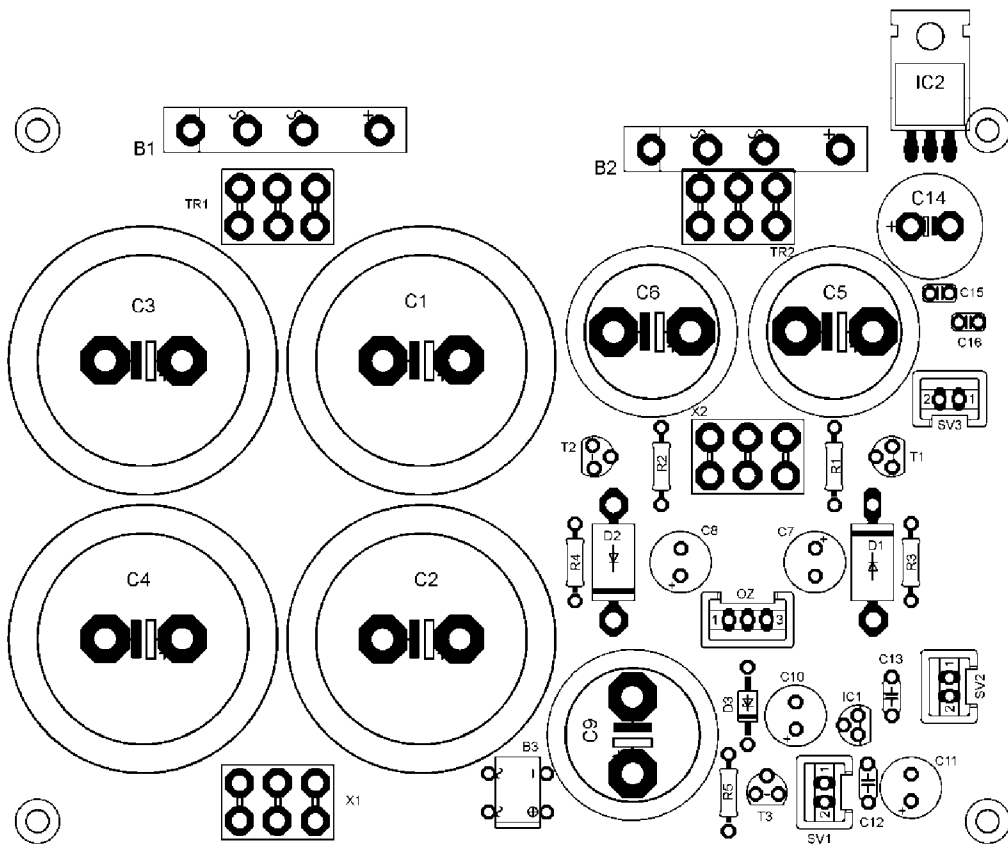
D.3a Celkové schéma vstupních obvodů – TOP



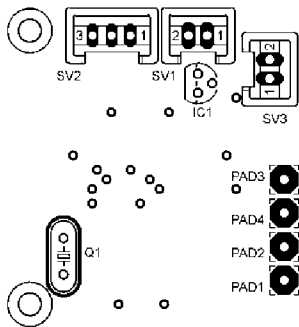
D.3b Celkové schéma vstupních obvodů – BOTTOM



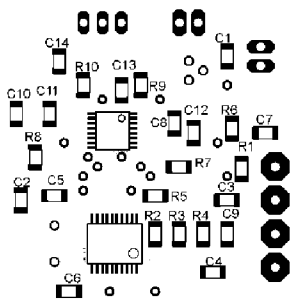
D.4 Zdroj



D.5a S/PDIF - TOP

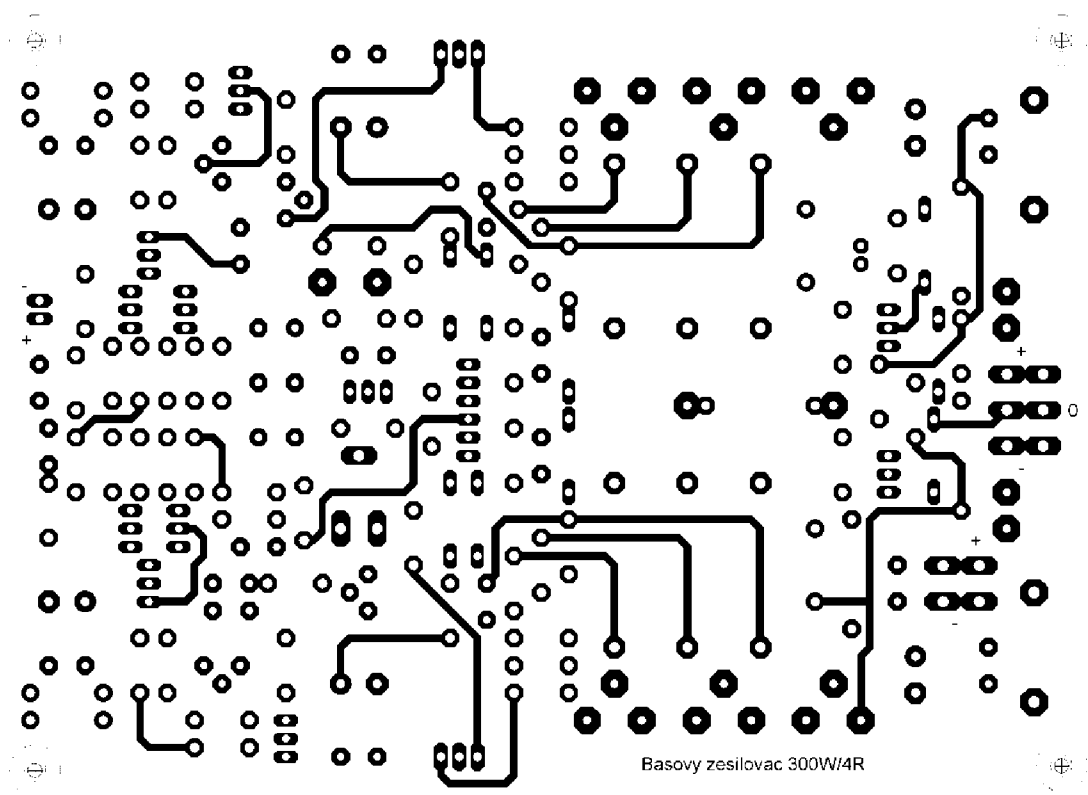


D.5a S/PDIF - BOTTOM

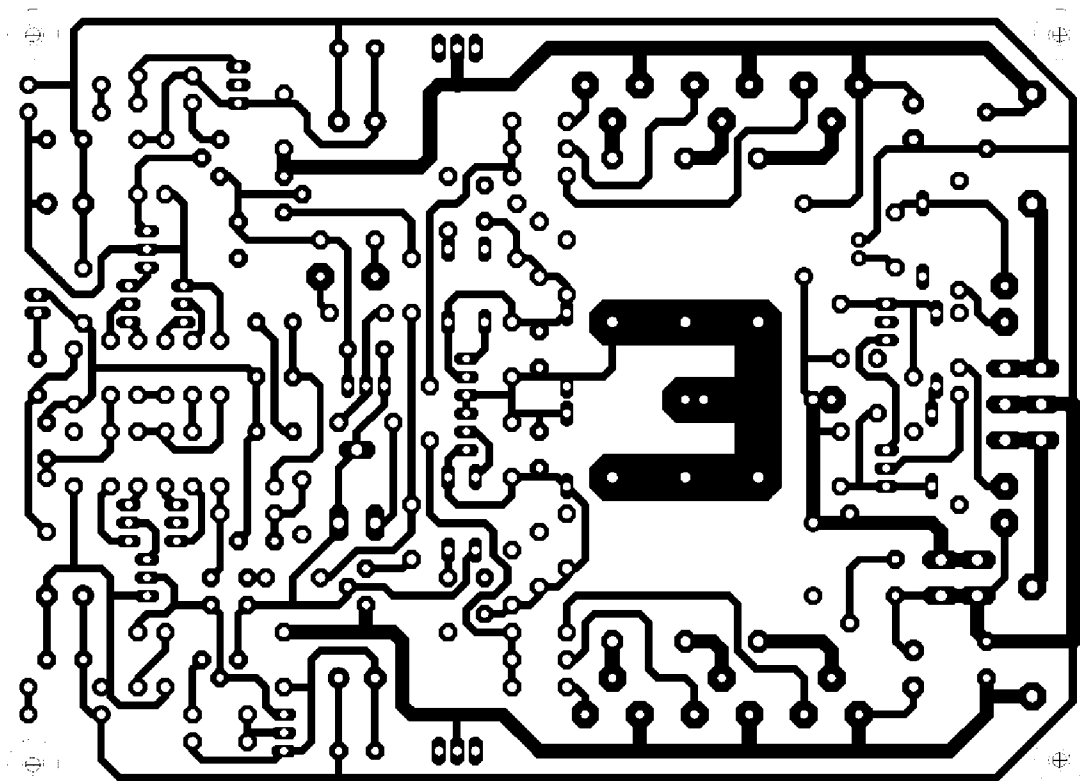


E DPS

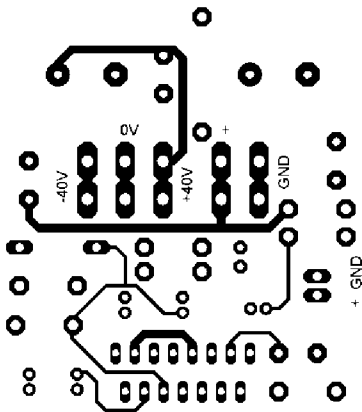
E.1a Zesilovač pro hlubokotónový reproduktor – TOP



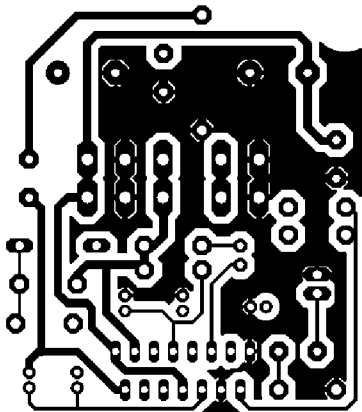
E.1b Zesilovač pro hlubokotónový reproduktor – BOTTOM



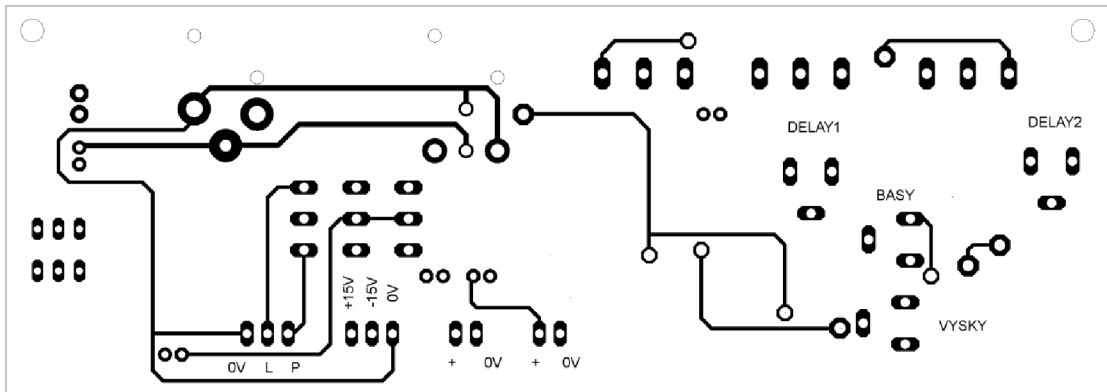
E.2a Zesilovač pro vysokotónový reproduktor – TOP



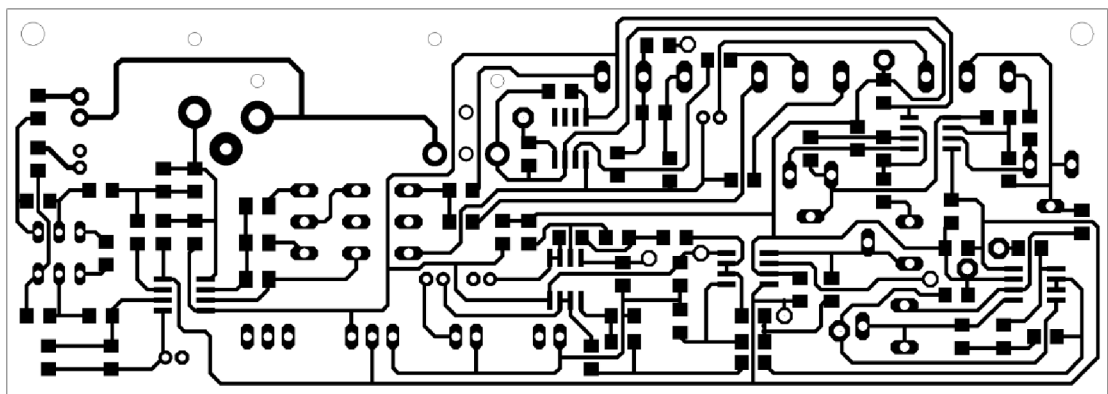
E.2b Zesilovač pro vysokotónový reproduktor – BOTTOM



E.3a Celkové schéma vstupních obvodů – TOP



E.3b Celkové schéma vstupních obvodů – BOTTOM



F SEZNAM SOUČÁSTEK

F.1 Zesilovač pro hlubokotónový reproduktor

Označení	Hodnota součástky/typ	Poznámka
R1,R2,R3,R4,R5,R6	0,33 Ω / 5 W	
R7,R8	10 Ω / 5 W	
R9,R60	220 Ω	
R10,R11,R12,R13,R14,R15	680 Ω	
R16,R17,R18,R19,R20,R21	10 Ω	
R22,R31,R32	82 Ω	
R23,R24	330 Ω	
R25,R26	3,9 kΩ	
R27,R28	270 Ω	
R29,R65	22 kΩ	
R30,R33	11 kΩ	
R34,R35	30 Ω	
R36,R37	360 Ω	
R38,R48,R52	1,2 kΩ	
R39,R40	1 kΩ	
R41	1,1 kΩ	
R42,R45,R46,R47,R49,R50,R54,R55	300 Ω	
R43,R44,R63,R64	12 kΩ	
R51,R53	2,2 kΩ	
R56	2 kΩ	
R57	20 kΩ	
R58,R59	1,5 kΩ	
R61,R62	16 kΩ	
C1,C2	10 nF/100 V	fóliový
C3,C6,C7,C12,C14,C22,C23,C8,C9,C16,C17	100 nF/100 V	fóliový
C4,C5,C13,C15,C24,C25	220 μF/100 V	elektrolytický
C11	180 pF/50 V	keramický
C18,C19	330 μF/63 V	elektrolytický
C10	47 pF/50 V	keramický
C20,C21	10 pF/50 V	keramický
C26	390 pF/50 V	keramický
C27	680 nF/63 V	fóliový
C28	10 μF/ 100 V	elektrolytický
D1,D2,(D9,D10,D11,D12)	1N4007	
D3,D4,D5,D6,D7,D8,D17,D18,D19	1N4148	
D13,D14,D15,D16	BZX85V020	zenerova dioda
T1,T3,T5,T8,T11,T12	MPSA06	80V/0,5A NPN
T2,T4,T6,T7,T13	MPSA56	80V/0,5A PNP
T10,T14	2N3440	250V/1A/1W NPN
T9,T15	2N5416	300V/1A/10W PNP
T16	MJE15030	150V/8A/50W NPN
T17	MJE15031	150V/8A/50W PNP

Označení	Hodnota součástky/typ	Poznámka
T18,T20,T22	MJ15003	140V/20A/250W NPN
T19,T21,T23	MJ15004	140V/20A/250W PNP
T24	BC639	80V/1A NPN
T25	BC640	80V/1A PNP
F1,F2	F5A	rychlá
pojistkové pouzdro	držák na pojistku 5x20	
TR1	2,2 k Ω	
IN	PSS 2 piny	
IN protikus	PSS 2 piny	
IN kontakty	PSS 2 piny	
X1,X3	faston do DPS	
X1,X3 protikus	faston na kabel	protikus
LED1	červená 3 mm	indikace clipu 2V/10mA
LED2	zelená 3 mm	indikace napájení 2,15V/20mA
-	slídová podložka	pod tranzistory
-	izolační podložka	

ů

F.2 Zesilovač pro vysokotónový reproduktor

Označení	Hodnota součástky/typ	Poznámka
R1,R6,R7	22 k Ω	
R2	3,9 Ω	metaloxid (lépe drátový)
R3,R5	10 k Ω	
R4	33 k Ω	
R8	680 Ω	
C1,C2	1000 μ F/ 63 V	elektrolytický
C3,C4	100 nF/100 V	fóliový
C5,C10	1 μ F/ 63 V	fóliový
C6	47 μ F/ 25 V	elektrolytický
C7,C11	22 μ F/ 25 V	elektrolytický
C8,C9	10 μ F/ 63 V	elektrolytický
D1	1N4148	zenerova dioda
IO1	TDA7293V	zesilovač
LED1	červená 5 mm	indikace klipu
UCC,OUT	faston do DPS	
UCC,OUT protikus	faston na kabel	protikus
IN	PSS 2 piny	
IN protikus	PSS 2 piny	
IN kontakty	PSS 2 piny	

F.3 Vstupní obvody

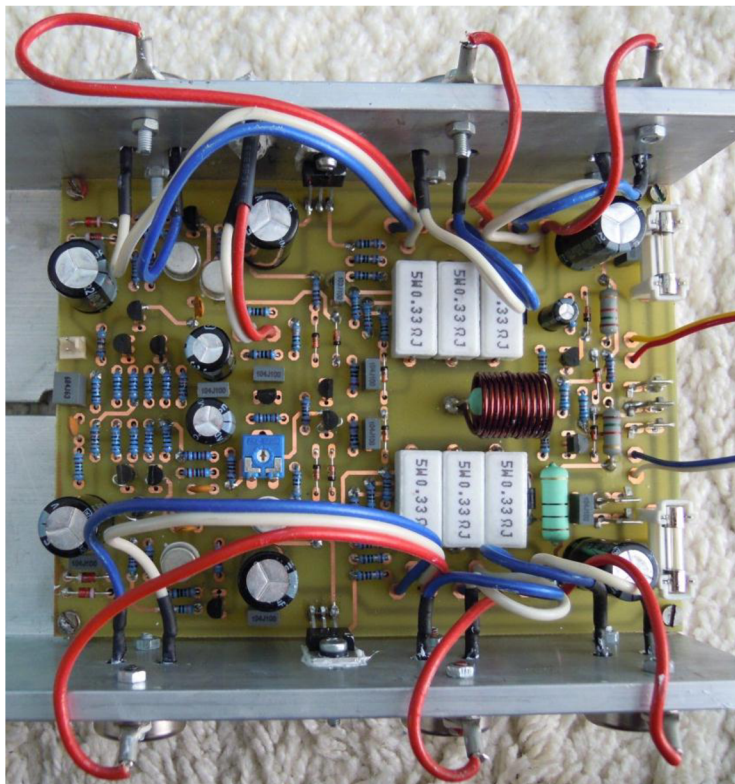
Součástka	Hodnota součástky/typ	Poznámka
R1,R2	100 Ω	SMD
R2	150 Ω	SMD
R4,R5	680 Ω	SMD
R6,R7,R9,R10,R11,R12,R19,R21,R22,R24	10 k Ω	SMD
R8,R29,R33	1 k Ω	SMD
R13,R25,R26	5,1 k Ω	SMD
R14,R17	1,2 k Ω	SMD
R15,R18	1,8 k Ω	SMD
R16	12 k Ω	SMD
R27,R28,R30,R31,R32,R34	2 k Ω	SMD
C1,C2,C5,C8,C19,C20	47 μ F/50 V	elektrolytický
C3,C4	18 pF/50 V	keramický SMD
C7	12 nF/50 V	keramický SMD
C9,C10	5,6 nF/50 V	keramický SMD
C11,C13,C15,C16,C17,C18	47 nF/50V	keramický SMD
C12,C14	22 nF/50 V	keramický SMD
C21,C22,C23,C24,C25,C26,C27,C28, C29,C30,C31,C32,C6,C33	100 nF/50 V	keramický SMD
IC1,IC2,IC3,IC4,IC5,IC6	NE5532	OZ SMD verze
P1,P2	10 k Ω lineární	co nejkratší hřídelka!! RM=5mm
P3	10 k Ω logaritmický	co nejkratší hřídelka!! RM=5mm
TR1,TR2	25 k Ω	
TR3,TR4	10 k Ω	
X1	NC3FAH1-0	neutric konektor do DPS
X2	NC3MAH	neutric konektor do DPS
S1	2 póly přepínač	s pájecími očky
S2,S3,S4	1 pólový přepínač	s pájecími očky
BASY,VÝŠKY	PSS 2 piny	
BASY,VÝŠKY protikus	PSS 2 piny	
SPDIF,PWR	PSS 3 piny	
SPDIF,PWR protikus	PSS 3 piny	
BASY,VÝŠKY,SPDIF,PWR kontakty	PSS 2 piny	10 kontaktů celkem pro konektory

F.4 Zdroj

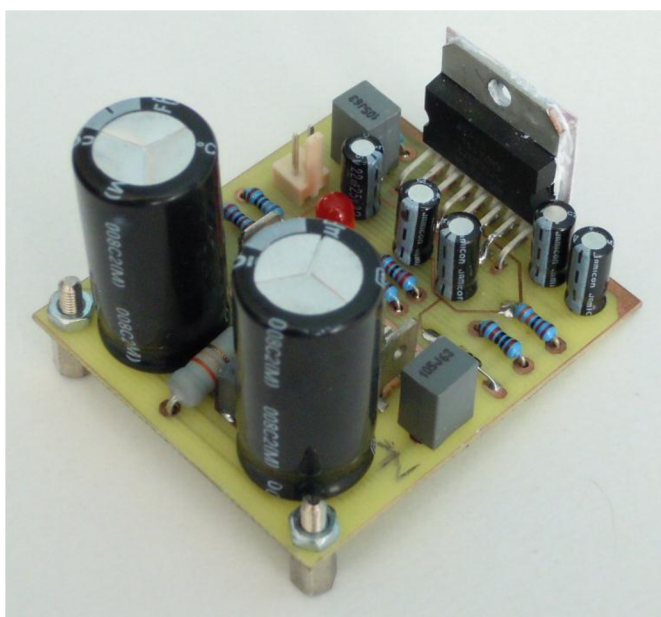
Součástka	Hodnota součástky/typ	Poznámka
R1,R2,R5	4,7 k Ω	
R3,R4	10 Ω	
C1,C2,C3,C4	4700 μ F/100 V	elektrolytický
C5,C6,C9	2200 μ F/63 V	elektrolytický
C7,C8,C10,C11	100 μ F/50 V	elektrolytický
C14	470 μ F/63 V	elektrolytický
C12,C13,C15,C16	100 nF/50V	keramický
D1,D2	1N5346B	zenerova dioda 9,1V/5W
D3	BZX85V005.6	zenerova dioda 5,6V/1,3W
T1	MJE340	NPN
T2	MJE350	PNP
T3	BC546A	NPN, I _c =0,1A, TO92
B1,B2	800 VAC/25 A	Greatzův můstek
B3	500 V/1 A	Greatzův můstek
IC1	stabilizátor	
IC2	stabilizátor	
TR1,TR2,X1,X2	faston do DPS	
TR1,TR2,X1,X2 protikus	faston na kabel	protikus
SV1,SV2,SV3	PSS 2 piny	
SV1,SV2,SV3 protikus	PSS 2 piny	
OZ	PSS 3 piny	
OZ protikus	PSS 3 piny	
SV1,SV2,SV3,OZ kontakty	PSS 2 piny	9 kontaktů celkem pro konektory

G FOTOGRAFICKÁ DOKUMENTACE

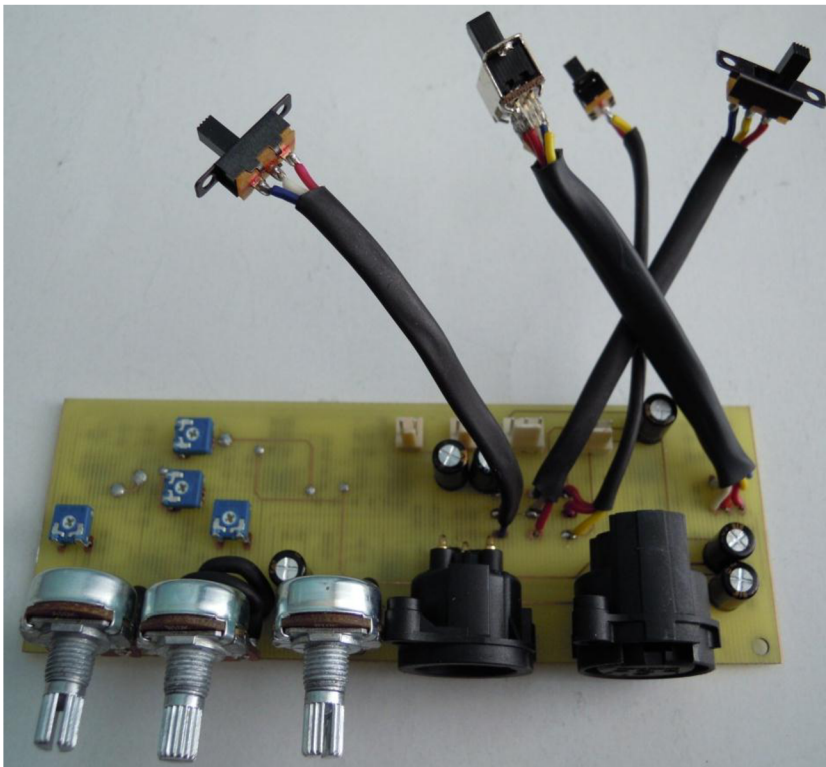
G.1 Zesilovač pro hlubokotónový reproduktor



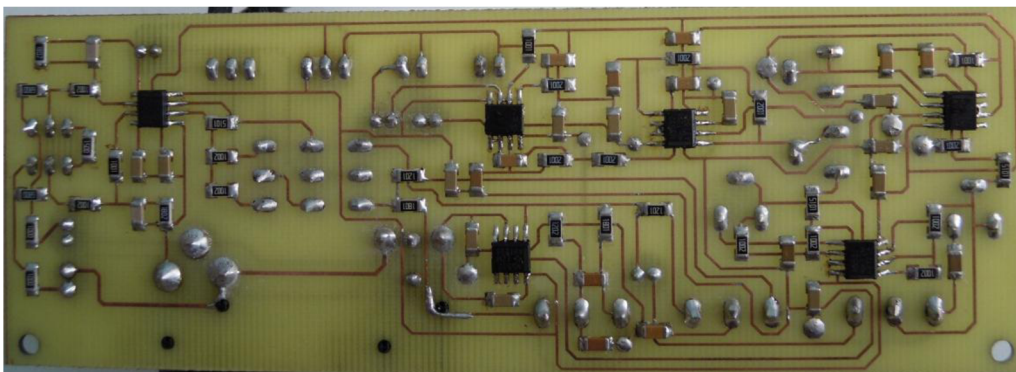
G.2 Zesilovač pro vysokotónový reproduktor



G.3a Celkové schéma vstupních obvodů – TOP



G.3b Celkové schéma vstupních obvodů – BOTTOM



G.4 Zdroj



G.5 Elektronika reproduktorové soustavy

