

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra aplikované elektroniky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Návrh a optimalizace aktivních reproduktorových
soustav pro počítačové pracoviště**

Michal Jirák

2014

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Bc. Michal JIRÁK
Osobní číslo: E12N0140P
Studijní program: N2644 Aplikovaná elektrotechnika
Studijní obor: Aplikovaná elektrotechnika
Název tématu: Návrh a optimalizace aktivních reproduktorových soustav pro počítačové pracoviště
Zadávací katedra: Katedra elektroenergetiky a ekologie

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Stanovte technické parametry reproduktorových soustav, které by byly vhodné pro kontrolní poslech zvukových snímků na počítačovém pracovišti.
2. Na základě předchozího bodu navrhnete aktivní reproduktorové soustavy, provedte jejich optimalizaci z hlediska dosažení co nejnižší ceny a minimálních rozměrů při dodržení definovaných technických parametrů.
3. Zrealizujte vzorek reproduktorových soustav a změřte jejich technické parametry.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran

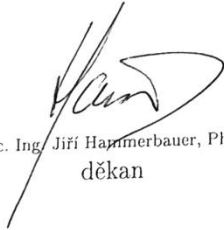
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:


Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Jiří Stifter, Ph.D.
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

Datum zadání diplomové práce: 14. října 2013
Termín odevzdání diplomové práce: 12. května 2014


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na návrh, optimalizaci a následnou realizaci aktivní reproduktorové soustavy pro počítačové pracoviště. Práce se v první části věnuje návrhu ozvučnice, v druhé části návrhu aktivní elektroniky. Zohledňujícími parametry při vývoji jsou nízká cena a přijatelné rozměry soustavy. Při návrhu se využije profesionálního simulačního programu LEAP. Na realizované soustavě je následně provedeno měření v akustické bezodrazové komoře.

Klíčová slova

Reproduktor, měnič, výhybka, aktivní elektronika, pásmová propust, zesilovač, ozvučnice, bassreflex, cenová optimalizace.

Abstract

The presented diploma thesis is focused on the design, optimization and realization of active sound monitors. In the first part is described design of enclosure, the other is dedicated to active electronics. Important parameters are low cost and acceptable dimensions of the monitor. For designing is used professional simulation software LEAP. Realized monitor is then measured an anechoic acoustic chamber.

Key words

Loudspeaker, crossover, active electronics, bandpass filter, amplifier, enclosure, bassreflex, price optimization, vented box

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této práce. Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 12.5.2014

Michal Jirák

OBSAH

Seznam symbolů a zkratk	9
Úvod	10
1. Definice technických parametrů reproduktorové soustavy	11
2. Výběr měničů	12
2.1. Kritéria výběru měničů	12
2.2. Basový měnič.....	14
2.3. Výškový měnič.....	15
3. Návrh ozvučnice	16
3.1. Výpočet objemu ozvučnice	16
3.2. Volba mezi uzavřenou / bassreflexovou ozvučnicí	17
3.3. Materiál ozvučnice	18
3.4. Tlumení ozvučnice.....	19
3.5. Návrh ozvučnice v programu Enclosure Shop.....	20
3.5.1. Rozměry ozvučnice	20
3.5.2. Bassreflexový nátrubek.....	22
3.5.3. Vytlumení ozvučnice	23
3.5.4. Poloha měniče	23
4. Návrh elektroniky	27
4.1. Obvod NE 5532.....	27
4.2. Obvod LM 4780	27
4.2.1. Ochrana reproduktoru funkcí MUTE	27
4.2.2. Ochrana proti stejnosměrné složce	28
4.2.3. Ochrana proti přepětí a přehřátí	28
4.3. Obvod THAT 1206	28
4.4. Obvod THAT 2181	29
4.5. Určení požadovaného výkonu koncového zesilovače	29
4.6. Výpočet maximálního ztrátového výkonu a určení potřebného chladiče	32
4.6.1. Určení napájecího napětí.....	32
4.6.2. Určení proudu protékajícího zátěží	33
4.6.3. Určení maximálního ztrátového výkonu obvodu LM4780	34

4.6.4.	Výpočet tepelného odporu chladiče.....	35
4.7.	Napájení	37
4.7.1.	Výpočet návrhu transformátoru	37
4.7.2.	Obvod napájení.....	38
4.8.	Symetrický zesilovač.....	39
4.9.	Korekce vstupní citlivosti	40
4.10.	Subsonický filtr	42
4.11.	Filtr nadakustického pásma.....	43
4.12.	Návrh výhybek.....	44
4.12.1.	Návrh dolní propusti	44
4.12.2.	Návrh horní propusti.....	45
4.13.	Ekvalizace.....	47
4.14.	Koncový zesilovač	50
4.14.1.	Výpočet zesílení.....	51
4.15.	Levné varianty vybraných obvodů.....	52
4.15.1.	Symetrický zesilovač.....	52
4.15.2.	Korekce vstupní citlivosti	53
4.15.3.	Ekvalizace	54
5.	Realizace ozvučnice.....	56
6.	Realizace elektroniky.....	57
7.	Měření.....	58
7.1.	Měření kmitočtových charakteristik měničů.	58
8.	Cenová kalkulace	60
Závěr	61	
Seznam použité literatury	62	
Přílohy	64	
Příloha A:	Technické výkresy soustavy.....	64
Příloha B:	Elektronická schémata.....	69
Příloha C:	Desky plošných spojů.....	75
Příloha D:	Seznam použitých součástek.....	79
Příloha E:	Fotografie soustavy.....	82

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Q_{es}	elektrický činitel jakosti [-]
Q_{ms}	mechanický činitel jakosti [-]
Q_{ts}	celkový činitel jakosti [-]
f_s	rezonanční kmitočet reproduktoru ve volném prostoru [Hz]
f_s	rezonanční kmitočet reproduktoru v ozvučnici [Hz]
V_{as}	ekvivalentní objem [l]
Z, R_z	impedance měniče [Ω]
EBP	činitel účinnosti šířky pásma [Hz]
λ	vlnová délka [m]
v	rychlost zvukové vlny ve vzduchu [$m \cdot s^{-1}$]
THD.....	celkové harmonické zkreslení [%]
L_p	úroveň akustického tlaku [dB]
S_L	citlivost měniče [$1m \cdot 1W^{-1}$]
P	výkon [W]
U_{ef}	efektivní hodnota napětí [V]
U_m	amplituda napětí [V]
U_B	napájecí napětí [V]
$R_{\theta jc}$	tepelný odpor styku mezi přechodem a pouzdrem obvodu [$^{\circ}C/W$]
$R_{\theta cs}$	tepelný odpor styku mezi pouzdrem obvodu a chladičem [$^{\circ}C/W$]
T_{jmax}	maximální teplota přechodu [$^{\circ}C$]
T_{out}	teplota okolí chladiče [$^{\circ}C$]

ÚVOD

Obsahem předkládané diplomové práce je návrh reproduktorového systému, s implementovanou aktivní elektronikou (výhybka, napájení, zesilovač...)

Soustava je předurčena pro poslech na počítačovém pracovišti, pro které je nejprve nutné nadefinovat technické parametry, které by měla soustava splňovat. Při definování požadovaných parametrů se bude vycházet z údajů, kterých dosahují aktivní monitory od různých výrobců.

Další kapitola je věnována výběru reproduktorů pro dvoupásmovou soustavu čili výškového a středo - basového měniče společně s přiblížením některých parametrů charakterizující reproduktory.

V následujícím bodě bude detailněji probrán návrh ozvučnice, který je doplněn výstupy zprostředkované simulačním programem Enclosure Shop, který je součástí programového balíku LEAP od společnosti LinearX.

Elektronická část bude odsimulována v programu TINA od společnosti Texas Instruments. K návrhu aktivní výhybek bude použit program CrossOver Shop, který je součástí programového balíku LEAP. Vzhledem k cenové optimalizaci soustavy je nutno při počítání obvodů s velkým proudovým zatížením brát v úvahu parametry reálného hudebního signálu, které při zobecnění dávají informaci o výkonových poměrech mezi různými kmitočtovými pásmy (basy, výšky). Za pomoci těchto informací společně s určeným požadovaným výkonem soustavy, lze dopočítat optimální požadavky na napájecí zdroj a na rozměry chladiče použitého na chlazení koncového výkonového stupně. V rámci cenové optimalizace se pro vybrané elektronické obvody navrhnou alternativní cenově dostupnější varianty.

Ozvučnice bude realizována svépomocí za pomoci objednaného nářadí na fakultě. Pro návrh desek plošných spojů je využit program Eagle.

Na závěr práce proběhne měření realizované soustavy v bezdrazové komoře a bude provedeno zhodnocení výsledků společně s cenovou kalkulací.

1. DEFINICE TECHNICKÝCH PARAMETRŮ REPRODUKTOROVÉ SOUSTAVY

K určení technických parametrů soustavy se bude vycházet z údajů, kterých dosahují aktivní monitory od různých výrobců. Byli vybráni tři zástupci z odlišných cenových hladin. Sestavy byly voleny tak, aby byly podobné z hlediska elektronického (aktivní výhybka s koncovým zesilovačem na každý kanál), a zároveň aby se přibližně shodovaly i rozměry měničů.

Nejlevnější varianta je od firmy M-Audio model BX5-D2. Tento model je vybrán pro svou velmi nízkou cenu (2 500Kč za kus) [1]. Výrobce udává poměrně málo údajů v katalogovém listu. Druhý zástupce je ze střední cenové hladiny (13 890Kč za kus) od společnosti Genelec 8030B [2]. Třetím, nejdražším monitorem je KRK Exposé E8B. Za relativně vysokou cenu (64 790Kč za kus) výrobce garantuje následující parametry [3]:

	M-Audio BX-D2	Genelec 8030B	KRK Exposé E8B
provedení ozvučnice	bassreflexová	bassreflexová	bassreflexová
počet pásem	2	2	2
rozměr hlubokotónového měniče	5"	5"	8"
rozměr vysokotónového měniče	1"	¾"	1"
frekvenční rozsah (± 2dB) ⁽¹⁾	56Hz – 22kHz	58Hz – 20kHz	40Hz – 30kHz
max. hlad. akust. tlaku (1m) trvale	-	97 dB	-
max. hlad. akust. tlaku (1m) krátkodobě	-	108 dB	115 dB
výkon zesilovače pro nízké frekvence	40 W	40 W	120 W
vysoké frekvence	30 W	40 W	120 W
celkový výstupní výkon	70 W	80 W	240 W
max. úroveň vlastního šumu (1m)	-	≤ 10dBA	-
materiál ozvučnice	MDF	litý hliník	MDF
cena (kus)	2 500 Kč	13 890 Kč	64 790 Kč

Tab. 1: Technické parametry vybraných aktivních monitorů.

K tučně vyznačeným parametrům, bude snaha se přiblížit.

(1) Frekvenční rozsah pro monitor M-Audio BX-D2 je udán v katalogovém listu bez příslušné tolerance.

2. VÝBĚR MĚNIČŮ

Reproduktory neboli akustické měniče, jsou charakterizovány mnoha parametry. Pomocí určení těchto parametrů lze nahrubo vybrat vyhovující měniče. Reprodukty popisujících parametrů je velké množství a všemi se zde nebudeme zabývat, nejsou předmětem této práce. Více informací o T-S parametrech reproduktorů lze nalézt např. knize „Theory & Design of Loudspeaker Enclosures“ od J. E. Bensona. Za přiblížení parametrů stojí jen ty, ke kterým bylo při výběru měničů přihlíženo, a které budou v následujících kapitolách použity.

2.1. KRITÉRIA VÝBĚRU MĚNIČŮ

Rozměr

Kvůli požadavku na co nejmenší rozměry ozvučnice bude basový měnič volen v rozmezí 13 cm až 16 cm.

Frekvenční charakteristika

je závislost hladiny akustického tlaku v určitém bodě před reproduktorem na frekvenci, při konstantním napětí na svorkách reproduktoru. Udává se většinou pro bod v ose reproduktoru a vzdálenosti 1m od měniče. Frekvenční charakteristika se měří ve volném prostoru (tj. v bezdozvukové a bezodrazové komoře). Spodní mezní kmitočet se odvíjí od použité ozvučnice a jejího provedení (uzavřená, bassreflexová atd.). Požadovaný rozsah středobasového měniče je alespoň do 4kHz. Frekvenční rozsah výškového měniče by se měl pohybovat v mezích 1kHz – 15kHz [4].

Směrová charakteristika

je závislost akustického tlaku před reproduktorem na úhlu, který svírá osa reproduktoru a spojnice reproduktoru a měřícího mikrofону (eventuelně posluchače). Většinou se vyjadřuje v polárních souřadnicích. Pro náš účel nehraje směrová charakteristika velkou roli, jelikož bude posluchač ve stálé poloze oproti soustavám [5].

Citlivost měniče

je průměrná velikost efektivního akustického tlaku v daném kmitočtovém pásmu, v ose reproduktoru, ve vzdálenosti 1m a při standartním příkonu 1VA. Většinou se vyjadřuje v dB jako poměr naměřeného akustického tlaku k referenční hodnotě, která je $2 \cdot 10^{-5}$ Pa. Čím

vyšší je citlivost měniče, tím méně výkonu do něj musíme přivést pro dosažení požadovaného akustického tlaku [6]. Kvůli výkonovým poměrům budeme hledat měnič s citlivostí alespoň 85 dB (1W/1m).

Q_{es} – elektrický činitel jakosti

je bezrozměrný parametr, a čím je nižší, tím je generovaný proud pohybující se cívkou v magnetickém poli vyšší - pohyb cívky je tlumenější, protože generovaný proud působí proti pohybu cívky, takže se snižuje celkový proud tekoucí cívkou, výchylka i citlivost kolem rezonančního kmitočtu f_s [7].

Q_{ms} – mechanický činitel jakosti

neboli mechanické tlumení. Jedná se o mechanické ztráty ovlivňující (tlumící) pohyb membrány. Q_{ms} je bezrozměrný parametr a čím je vyšší, tím je ztrát méně, tzn. vyšší je i výchylka a citlivost ve spodním pásmu, pohybuje se kolem 0,4 až 25 [7].

Q_{ts} – celkový činitel jakosti

celkový činitel jakosti, zahrnuje v sobě oba předchozí parametry (elektrický Q_{es} a mechanický Q_{ms}). Pohybuje se v hodnotách cca od 0,08 až 0,6, výjimečně až 3. Podle [7] je rozumným kompromisem pro ozvučnici bassreflexovou Q_{ts} pohybující se mezi 0.3 až 0.4, pro ozvučnici uzavřenou pak 0.5 až 0.7.

$$Q_{ts} = \frac{(Q_{ms} \cdot Q_{es})}{(Q_{ms} + Q_{es})} \quad (1)$$

f_s – rezonanční kmitočet reproduktoru ve volném prostoru

uvádí se v Hz. f_s je výsledkem poměru mezi hmotností kmitacího systému M_{ms} a poddajností zavěšení C_{ms} . Těžší kmitací systém (membrána včetně aktivních částí závěsů + cívka a její nosič) nebo poddajnější závěsy způsobují nižší f_s . Na tomto kmitočtu má reproduktor impedanční maximum Z_{max} - je to bod, kde se otáčí elektrická fáze, je v nule (rovnost kapacitance a induktance - reaktance), reproduktorem protéká nejvyšší proud.

Vložení reproduktoru do uzavřené ozvučnice jeho f_s , vlivem omezeného množství stlačovaného vzduchu za membránou, vzroste. f_s nám říká jak nízko je schopen měnič zahrát, za touto hodnotou efektivita reproduktoru rychle klesá [7]. Rezonanční kmitočet měniče by měl být co nejnižší, alespoň 60 Hz.

V_{as} – ekvivalentní objem

uvádí se v litrech. V_{as} vyjadřuje objem vzduchu, který má stejnou, tedy ekvivalentní, poddajnost jako zavěšení reproduktoru (C_{ms}) při působení plochy S_d . Reproduktry s tuhým zavěšením mívají V_{as} menší a obecně vyžadují menší pracovní objemy ozvučnice a naopak. Pozor, neplést si parametr V_{as} s doporučeným objemem. K určení vhodného objemu je třeba ještě znát výsledné Q_{ts} viz kapitola 4.1. „Výpočet objemu ozvučnice“ [7].

Z – impedance měniče

má vliv na schopnost zesilovače dodat do něj určitý výkon, čím větší impedanci měnič má, tím méně Wattů je do něj zesilovač schopen dodat. Má-li zesilovač udáno $2 \times 100W/4\Omega$, do 8Ω zátěže to může být jen polovina. Impedance lze různě řadit - sériově či paralelně, viz Ohmův zákon [7].

Cena

Z hlediska cenové optimalizace řešení soustavy byl výběr jednotlivých měničů zúžen do cenové kategorie nepřesahující 1 000 Kč.

2.2. BASOVÝ MĚNIČ

Z předchozích parametrů si lze určit toleranční meze hodnot požadovaného měniče, ke kterým budou následně dohledány vyhovující měniče reálné. Toleranční meze a reálné hodnoty měničů jsou uvedeny v následující tabulce:

	požadovaná hodnota	Visaton W 130 S	Monacor SPH-6M	Fatial Pro Fe
rozměr	13 cm – 16 cm	13 cm	13 cm	16 cm
frekvenční rozsah	f_s - 5kHz	f_s - 12kHz	f_s - 5kHz	f_s - 5kHz
citlivost [dB]	≥ 85 (1W/1m)	87 (1W/1m)	88 (1W/1m)	91 (1W/1m)
rezonanční kmitočet - f_s	≤ 60 Hz	52	39	61
ekvivalentní objem - V_{as}	≤ 15 l	12	17,6	14,1
celk. činitel jakosti - Q_{ts}	0,3 – 0,5	0,47	0,3	0,54
impedance - Z	4 Ω nebo 8 Ω	8 Ω	8 Ω	8 Ω
cena	$\leq 1\,000$ Kč	538 Kč	1\,070 Kč	960 Kč

Tab. 2: Srovnání dostupných měničů s požadovanými vlastnostmi [8], [9], [10].

Do užšího výběru se dostaly tyto 3 měniče: Visaton W 130 S, Monacor SPH-6M a Fatial Pro Fe. Vzhledem k tomu, že soustavu chceme před realizací namodelovat v simulačním programu Enclosure Shop, zúžil se výběr na měnič Visaton W 130 S, který je jediný obsažen v knihovně v uvedeném programu. Pro použití zbylých dvou měničů v simulačním programu, by bylo potřeba měření zjistit jejich parametry a nainportovat je do programu, což není předmětem této práce.

2.3. VÝŠKOVÝ MĚNIČ

Na předešlé parametry není u výškového měniče kladen tak veliký důraz. Výškové měniče nepotřebují tak veliký objem ozvučnice a mají většinou zapouzdřenou zadní stranu membrány z důvodu, aby nedošlo k ovlivnění vyzařování měniče vlivem velkých tlaků v ozvučnici. Jako cenově výhodný měnič s přijatelnými vlastnostmi byl vybrán měnič Visaton SC 10 N.

Visaton SC 10 N	
rozměr membrány	25 mm
frekvenční rozsah	1 kHz – 20 kHz
citlivost	90 dB (1W/1m)
impedance - Z	8 Ω
cena	389 Kč

Tab. 3: Technické parametry výškového měniče[11].

3. NÁVRH OZVUČNICE

Ozvučnice je důležitá z hlediska oddělení prostoru před a za měničem, aby nedocházelo k vzájemnému vyrušení vln vlivem skládání vln nacházejících se v protifázi. Umístěním reproduktoru do ozvučnice se zároveň posune rezonanční kmitočet reproduktoru směrem nahoru z f_s na f_c a dojde ke zvýšení činitele jakosti z Q_{ts} na Q_{tc} [6]. V neposlední řadě je ozvučnice důležitá pro umístění aktivní elektroniky a napájecího transformátoru.

Při návrhu ozvučnice byl využit program Enclosure Shop od společnosti LinearX. Návrh je nejprve popsán teoreticky a následně modelován v simulačním programu. Pro finální návrh jsou stěžejní výstupy z programu Enclosure Shop.

3.1. VÝPOČET OBJEMU OZVUČNICE

Objem ozvučnice ovlivňuje nejen rozměry soustavy, ale ovlivňuje i spodní kmitočet reprodukovatelný soustavou. Pro poslechové reproduktorové soustavy v počítačové laboratoři, je kladen důraz jak na kompaktní rozměry soustavy, tak na věrnou reprodukci celého slyšitelného zvukového spektra. Výsledná velikost sestavy je kompromisem mezi těmito dvěma parametry.

Pro přibližné určení objemu soustavy lze použít vzorec převzatý z [6].

$$V = \left| V_{as} \frac{Q_{ts}^2 - 1}{k} \right| \quad [l], \quad (2)$$

kde k je konstanta mající vliv na výslednou frekvenční charakteristiku a dosahuje hodnot $k = 0,4 - 0,8$. Pro ozvučnici typu bassreflex jsou vhodné menší hodnoty konstanty k , pro uzavřenou naopak. Po dosažení parametrů použitého reproduktoru dostáváme předběžnou hodnotu objemu:

$$V = \left| 12 \frac{0,47^2 - 1}{0,5} \right| = 18,7 \text{ l}, \quad (3)$$

Finální hodnota objemu bude určena na základě dosažených výsledků v simulačním programu.

3.2. VOLBA MEZI UZAVŘENOU / BASSREFLEXOVOU OZVUČNICÍ

Ozvučnice můžeme rozdělit na několik druhů, mezi nejběžnější patří uzavřená ozvučnice a ozvučnice typu bassreflex. Při uzavřené ozvučnici se veškeré vyzářování zadní stranou membrány přemění v dále nevyužitelné teplo uvnitř ozvučnice. V ozvučnici s bassreflexovým nátrubkem, se část vln v bedně odrazí a vyzáří se k posluchači. Laděním nátrubku, jeho průměru a délky určujeme jeho vlastní rezonanční kmitočet. Žádoucí je, aby rezonanční kmitočet nátrubku ležel pod rezonančním kmitočtem měniče v ozvučnici, dojde tak k rozšíření kmitočtového pásma, které je soustava schopna reprodukovat. Použitím nátrubku také dojde k zvýšení strmosti dolní frekvenční charakteristiky z 12dB/oktávu na 24db/oktávu. Bassreflexová ozvučnice se tedy chová jako horní propust 4. řádu [6].

Některé výhody a nevýhody použití bassreflexové ozvučnice jsou shrnuty v tabulce 4.

Výhody	Nevýhody
Menší potřebný objem ozvučnice pro reprodukci nízkých kmitočtů.	Složitější návrh.
Větší účinnost měniče na nízkých kmitočtech.	Problémy s nelaminárním prouděním uvnitř nátrubku.
Menší výchylka (a zkreslení) reproduktoru v oblasti rezonanční frekvence soustavy.	Větší výchylka reproduktoru pod rezonanční frekvencí soustavy.

Tab. 4: Výhody a nevýhody bassreflexové ozvučnice [6], [12].

Vzhledem k větší výchylce reproduktoru pod rezonanční frekvencí soustavy u bassreflexové ozvučnice hrozí, že se můžeme přiblížit k limitům maximální výchylky reproduktoru a kromě zkreslení reprodukce hrozí i mechanické poškození reproduktoru. Jako ochrana před hrozbou poškození měniče, je třeba zařadit do signálové cesty tzv. supersonický filtr, který odfiltruje nízké kmitočty obsažené v signálu.

Nelze říci, že by byl každý měnič vhodný pro použití v konkrétním typu ozvučnice. Orientačním výpočtem, lze zjistit, do jaké ozvučnice je reproduktor vhodnější. Výpočet se provádí zpoměřováním parametrů rezonančního kmitočtu reproduktoru f_s a elektrického činitele jakosti Q_{es} čímž získáme činitel EBP (efficiency bandwidth product) [6]. Hodnota kolem a pod 50 značí vhodnost použití ozvučnice uzavřené, mezi 60 až 90 je to libovolné, nejlépe je zkusit oba typy (uzavřená, bassreflexová), hodnota kolem a nad 100 značí použití ozvučnice

bassreflexové nebo band-pass. Nutno podotknout, že tento výpočet není směrodatný, spíše pomocný [7].

$$EBP = \frac{f_s}{Q_{es}} \text{ [Hz]} \quad (4)$$

$$EBP = \frac{52}{0,59} = 88,14 \text{ Hz}, \quad (5)$$

Tento výsledek nepředurčuje použití zvoleného měniče (Visaton W 130 S) do konkrétní ozvučnice, kvůli optimalizaci rozměrů ozvučnice bude použita ozvučnice basreflexová, která dovolí při kompaktnějších rozměrech reprodukovat i nízké kmitočty.

Při návrhu bassreflexového nátrubku je potřeba brát v úvahu rychlost proudění vzduchu v něm samotném. Na nízkých kmitočtech dochází k velké výchylce membrány, tím pádem i velkému proudění vzduchu v nátrubku, který by mohl vyvolat efekt podobný píšťale. Tomuto jevu předcházíme použitím nátrubku o alespoň 25% průřezu vztaženému k velikosti průřezu membrány měniče, čímž se sníží rychlost proudícího vzduchu v nátrubku oproti tomu, než kdyby se použil nátrubek o průřezu menším [12].

Délku nátrubku lze spočítat pomocí vztahu [12]:

$$l = \frac{9,22 \cdot 10^4 \cdot r^2}{f_B^2 V_B} - 0,58 \cdot r \text{ [cm]}, \quad (6)$$

kde r je poloměr nátrubku v centimetrech, f_B je požadovaná rezonanční frekvence nátrubku v Hertzích a V_B je objem ozvučnice v litrech.

3.3. MATERIÁL OZVUČNICE

Prvotním účelem ozvučnice je oddělit prostor před a za membránou reproduktoru. Za tímto účelem musí být vybraný materiál pro zhotovení ozvučnice dostatečně tuhý.

Uvnitř ozvučnice vznikají nezanedbatelné změny tlaku, které vznikají hlavně na nízkých kmitočtech. Při nedostatečně tuhé ozvučnici, se stává vnitřní objem ozvučnice proměnlivým a tento efekt se ještě zvětšuje ohybovými rezonancemi stěn, to má za následek deformaci

průběhu frekvenční charakteristiky. Z těchto faktů plyne, že pokud jde o tuhost, musí být dostatečně tuhá celá konstrukce ozvučnice, nejen materiál, z kterého je zhotovena [13].

Další významnou vlastností materiálu je jeho vnitřní tlumení, které je definováno jako schopnost materiálu přeměňovat mechanickou energii vibrací na teplo. [14]

Pomineme-li sice provozními vlastnostmi dobré, ale konstrukčně špatně zpracovatelné a nedostupné materiály jako jsou plastifikovaný litý beton nebo různé horniny (žula), je k dispozici na tvorbu ozvučnice několik materiálů na bázi dřeva – dřevotříska, překližka z břízy, překližka z topolu a materiál MDF (medium density fibre board).

Pro použití soustavy v počítačové laboratoři, je nevhodnější použití MDF desek, které jsou tuhé, těžké, mají vysoké vnitřní tlumení a hmotnost soustavy nebude pro své rozměry neúnosná. Optimální tloušťka materiálu závisí na rozměrech ozvučnice a nepřímo tedy na jejím objemu. Na základě tvrzení z publikace „Stavíme reproduktorové soustavy“ od RNDr. Sýkory: “Pro objemy do 5 l stačí obvykle materiály do 12 mm tloušťky, pro objemy do 20 l je vhodnější použít tloušťku 15 až 18 mm. Pro větší objemy je tloušťka 18 mm minimem” byla pro naši soustavu o předběžně vypočteném objemu 18,7l (viz výpočet č. 3) zvolena tloušťka desky 22mm, která zajistí bytelnou konstrukci.

3.4. TLUMENÍ OZVUČNICE

Hlavním důvodem vyplnění ozvučnice tlumícím materiálem, je potlačení stojatého vlnění uvnitř soustavy. Stojaté vlnění vzniká skládáním dvou harmonických vln o stejné amplitudě i kmitočtu postupujících v opačných směrech. K tomuto jevu dochází při odrazu vln od stěn ozvučnice, protože odražená vlna se od překážky odráží vždy v protifázi vůči vlně dopadající [15]. Důsledkem stojatého vlnění je výrazné zvlnění průběhu kmitočtové charakteristiky soustavy.

Použití tlumících materiálů ovlivňuje i další parametry soustavy. Při použití materiálů s nízkou objemovou hustotou (skelná vata, vlna), dochází ke zvýšení poddajnosti ozvučnice a soustavě se zdánlivě zvětší její vnitřní objem, v praxi až o 15% - 25%. Mezi negativní ovlivnění z důvodu použití tlumícího materiálu je možné zbarvení reprodukováného zvuku [12].

Dalším řešením pro potlačení stojatých vln je uspořádání stěn ozvučnice tak, aby byly mezi sebou co nejméně rovnoběžné.

Jako tlumicí materiál se používají různé materiály s vysokým činitelem pohltivosti α který má hodnotu od 0 do 1,00. Nula představuje nulovou absorpci (úplný odraz) a 1,00 představuje úplnou absorpci nárazového zvuku a jeho přeměnu v teplo.

3.5. NÁVRH OZVUČNICE V PROGRAMU ENCLOSURE SHOP

Velikost, tvar, tlumení ozvučnice i umístění měničů, to vše má vliv na výsledné frekvenční průběhy soustavy. Představu o chování soustavy při změně zmíněných parametrů poskytne návrhový a simulační program Enclosure Shop od společnosti LinearX. Z hlediska těchto změn nemá výškový měnič příliš velký vliv na výsledné chování soustavy (použitý výškový měnič má uzavřenou zadní část membrány v samostatné komůrce), navrhuje se proto ozvučnice především pro měnič basový. Použitý basový měnič Visaton W 130 S se nachází v databázi programu, avšak některé zde uvedené parametry se oproti parametrům udávaným výrobcem nepatrně liší. V tabulce č. 5 je uvedeno několik vybraných parametrů, které se neshodují. Dále je v tabulce obsažena procentuální odchylka údaje z databáze oproti údaji udávaným výrobcem.

	Visaton W 130 S		
	parametry udané výrobcem	parametry použité v programu	odchylka
rezonanční kmitočet - f_s	52 Hz	49 Hz	5,77 %
mech. činitel jakosti - Q_{ms}	2,26	2,12	6,19 %
el. činitel jakosti - Q_{es}	0,59	0,54	8,47 %
celk. činitel jakosti - Q_{ts}	0,47	0,43	8,51 %
ekvivalentní objem - V_{as}	12 l	14,2 l	18,33 %

Tab. 5: Vybrané parametry měniče Vistaon W 130 S udané výrobcem a programem.

Neshoda těchto údajů může mít vliv na výsledné frekvenční průběhy.

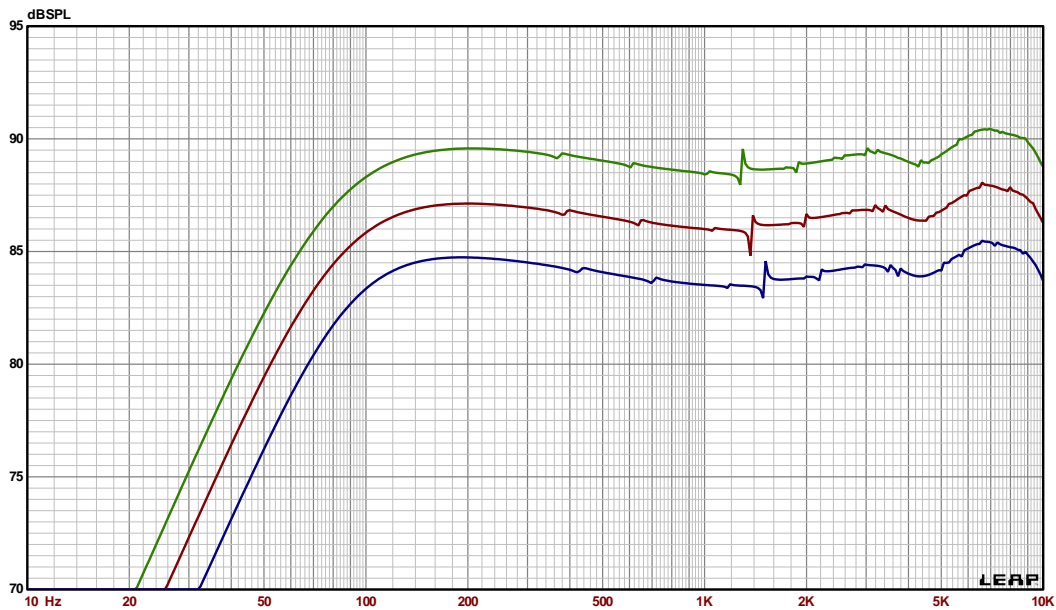
3.5.1. ROZMĚRY OZVUČNICE

Součástí této práce je optimalizovat ozvučnici na minimální rozměry při dodržení stanovených technických parametrů. Postup návrhu bude spočívat v nasimulování ozvučnice o předběžně spočítaném objemu 18,7 l (výpočet č. 3), který bude následně zmenšován a současně budou sledovány frekvenční a impedanční charakteristiky. Vhodný objem bude stanoven na základě těchto charakteristik. Podle literatury [ŠKVOR, Zdeněk. Akustika a elektroakustika. Vyd. 1. Praha : Akademie věd České republiky, 2001. 527 s. ISBN 80-200-0461-0.], je z hlediska rozložení vlastních kmitů vhodné volit rozměry stran délka : šířka : výška v poměru 2,5 : 1,5 : 1.

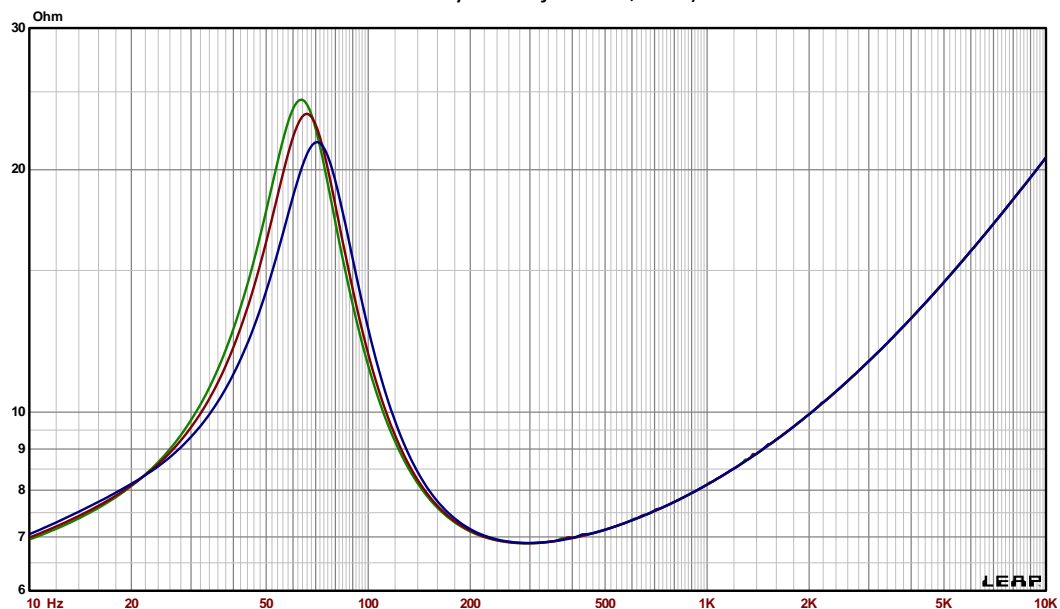
Ve výchozí ozvučnici bude poloha umístění basového měniče ve středu přední desky. Simulace proběhly pro více rozměrů, ze kterých byly vybrány pro ilustraci tyto:

barva průběhu	vnější rozměry (šířka x výška x hloubka)	tloušťka stěny	čistý objem
zelená	28 cm x 36 cm x 29 cm	22 mm	18 l
červená	26 cm x 35 cm x 28 cm	22 mm	15 l
modrá	26 cm x 32 cm x 24 cm	22 mm	12 l

Tab. 6: Rozměry ozvučnice použité při simulaci.



Obr. 1: Frekvenční charakteristiky ozvučnic o rozdílných rozměrech (grafy jsou pro přehlednost odsazeny navzájem o 2,5 dB).



Obr. 2: Impedanční charakteristiky ozvučnic o rozdílných rozměrech.

Zmenšování objemu se projevuje zejména v posunu rezonančního kmitočtu soustavy. Při výraznějším zmenšení objemu by se posouval i spodní mezní kmitočty soustavy směrem vzhůru. Nyní se pohybujeme na spodním mezním kmitočtu okolo 65 Hz. Jako optimální

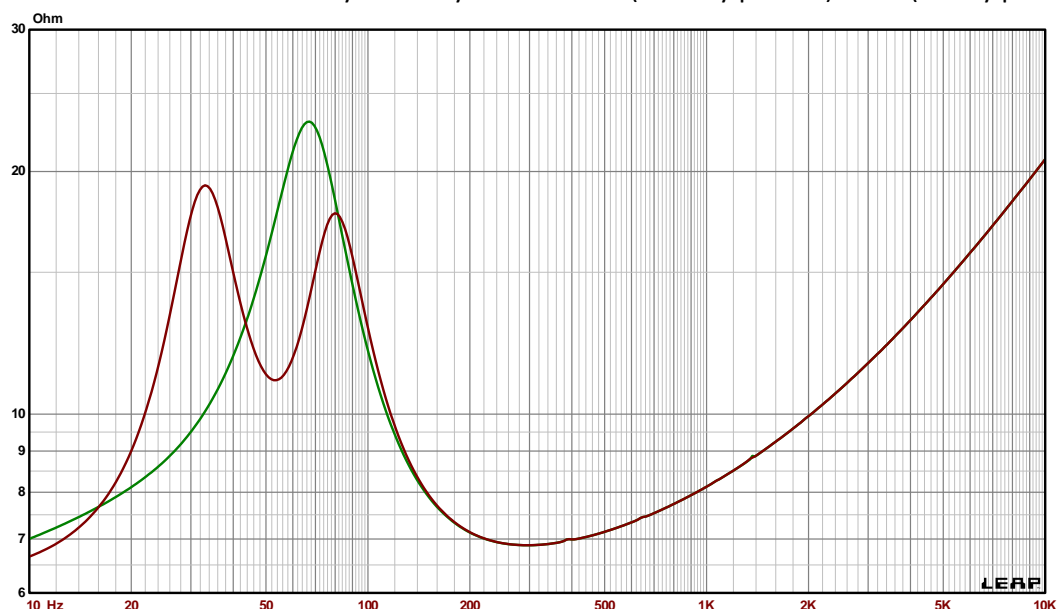
rozměry byly vybrány rozměry, které náležejí červenému průběhu a objemu 15l. Ve výpočtech musíme počítat, že elektronika zabudovaná v soustavě ubere od čistého objemu zhruba 1l.

3.5.2. BASSREFLEXOVÝ NÁTRUBEK

Pro zvýšení účinnosti soustavy na nízkých kmitočtech je použit bassreflexový nátrubek podle pravidel popsaných v kapitole „3.2. Volba mezi uzavřenou / bassreflexovou ozvučnicí“



Obr. 3: Frekvenční charakteristiky soustavy s nátrubkem (červený průběh) a bez (zelený průběh).



Obr. 4: Impedanční charakteristiky soustavy s nátrubkem (červený průběh) a bez (zelený průběh).

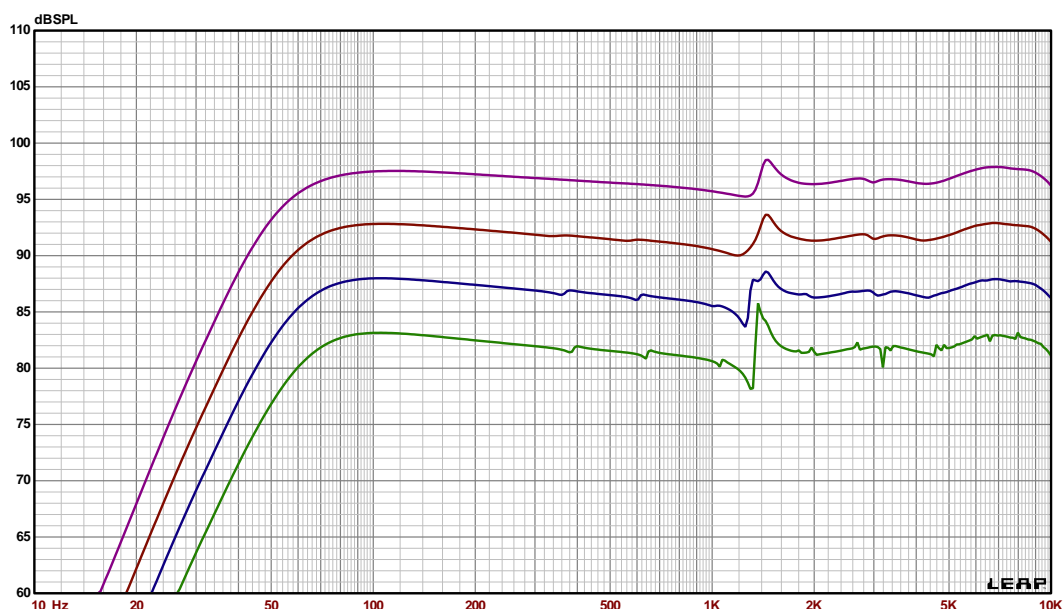
Laděná frekvence	52 Hz
Poloměr	26 mm
Délka	90 mm

Tab. 7: Parametry bassreflexového nátrubku.

Přidání nátrubku do soustavy posune spodní mezní kmitočet z 65 Hz na 52 Hz, současně se ale zvýší rozkmit na frekvenci 1,3 kHz, který mají za následek vlastní kmity v ozvučnici. Odstraněním vlastních kmitů se budeme dále zabývat. Na impedanční charakteristice se objevil rezonanční kmitočet nátrubku.

3.5.3. VYTLUMENÍ OZVUČNICE

Vzhledem, k vzniku stojatých vln v ozvučnici a s tím spojenými problémy je nutnost ozvučnici vytlumit materiálem s velkou pohltivostí. Jako tlumící materiál byla použita skelná vata o objemové hustotě $23,5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Vatou byly pokryty vnitřní boky ozvučnice vrstvou o tloušťce 4 cm, celkově tlumení v ozvučnici zabírá 31%. Z obr. č. 5 lze vypočítat, že použití většího množství tlumícího materiálu nemá význam.



Obr. 5: Graf srovnávající vliv potlačení stojatého vlnění v ozvučnici v závislosti na množství použitého tlumícího materiálu (pro přehlednost jsou od sebe navzájem grafy odsazeny o 5 dB).

Barva průběhu	zelená	modrá	červená	fialová
Objem tlumení	0 %	15 %	31 %	60 %

Tab. 8: Objem tlumení v ozvučnici (legenda ke grafu).

3.5.4. POLOHA MĚNIČE

Poloha reproduktoru na čelní desce ovlivňuje zvlnění frekvenční charakteristiky soustavy. Zvuková vlna šířící se od měniče, se na hranách přední desky ozvučnice ohýbá a tyto hrany se tak chovají jako přídavný zdroj zvukového vlnění. Takto vzniklé vlny se skládají s přímými vlnami vyzářenými měničem a výsledkem je vznik lokálních minim či maxim na kmitočtové

charakteristice na konkrétních frekvencích. Pokud je měnič umístěn na středu přední desky tak, že je jeho vzdálenost od každé hrany stejná (čtvercový tvar přední desky), projeví se vzájemné skládání zvukových vln v největší míře. Pro měření výsledných frekvenčních charakteristik musíme soustavu měřit v plně otevřeném prostoru.

Umístíme-li reproduktor o průměru d [m] do krychlové ozvučnice, lze přibližně spočítat kritický kmitočet, kde se vzájemné skládání vln vzniklých difrakcí na hranách přední desky uplatní. Mějme základní vztah mezi vlnovou délkou, kmitočtem a rychlostí šíření zvukové vlny $v = 331 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$:

$$\lambda = \frac{v}{f} \text{ [m]} \quad (7)$$

Vyjděme si z frekvence:

$$f = \frac{v}{\lambda} \text{ [Hz]} \quad (8)$$

Za λ dosadíme vzdálenost hrany měniče od hrany ozvučnice.

$$\lambda = \frac{l-d}{2} \text{ [m]} \quad (9)$$

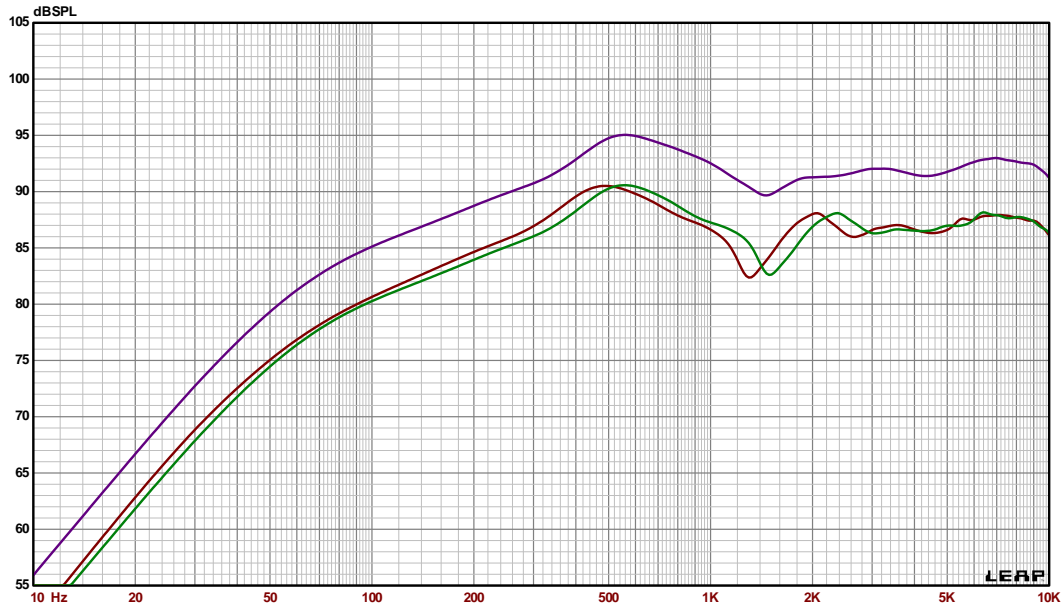
Protože se při skládání uplatňují již zvukové půlvlny, je nutno vypočtenou vlnovou délku λ vynásobit dvěma, výsledný vztah pak dostává tvar [16]:

$$f_{\text{krit}} = \frac{v}{\frac{l-d}{2}} \cdot 2 = \frac{v}{l-d} \text{ [Hz]} \quad (10)$$

Pro ukázkou zvolíme dvě krychlové ozvučnice se stranami o rozměrech: $l_1 = 35 \text{ cm}$, $l_2 = 40 \text{ cm}$ a měnič o průměru $d = 13 \text{ cm}$.

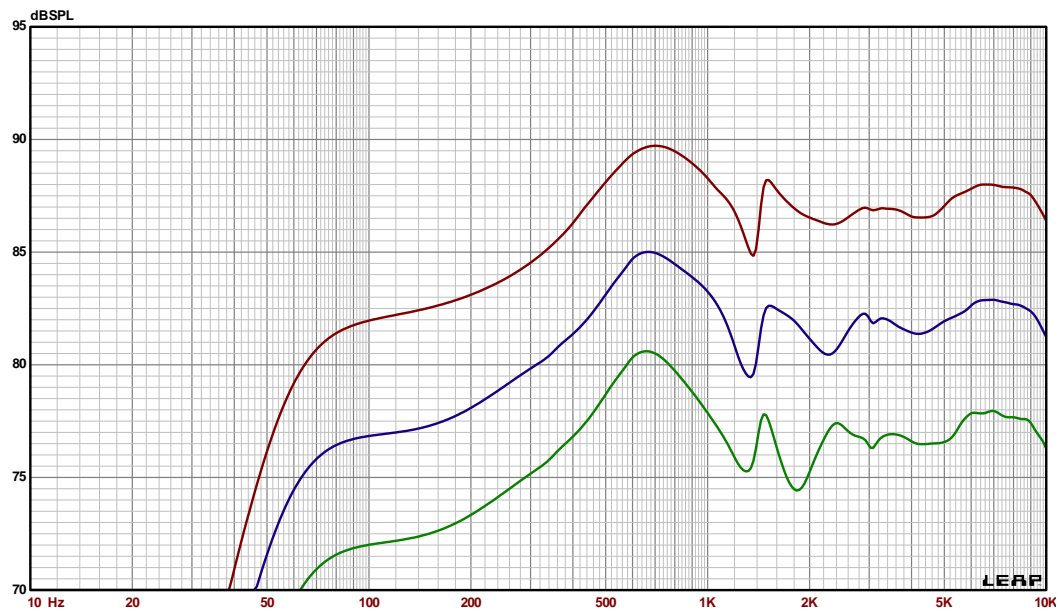
barva průběhu	délka strany ozvučnice	vzdálenost měniče od hrany (λ)	kritický kmitočet (f_{krit})
zelená	35 cm	11 cm	1,5 kHz
červená	40 cm	13,5 cm	1,23 kHz

Tab. 9: Vliv rozměrů ozvučnice na kritickou hodnotu kmitočtu, při které se negativně projeví vzájemné skládání zvukových vln vzniklých ohybem na hranách přední desky ozvučnice.



Obr. 6: Kmitočtový propad získaný simulací v programu Enclosure Shop. Fialový průběh je výsledkem simulace, kdy je měnič umístěn tak, že jsou jeho jednotlivé vzdálenosti od hran ozvučnice rozdílné (pro větší přehlednost je posunut o 5 dB nahoru oproti skutečnosti).

Možným řešením jak předejít takto velkému skládání odražených vln, je zvolit polohu umístění měniče tak, aby byly vzdálenosti mezi měničem a hranám desky ve všech směrech rozdílné viz obrázek č.6 - fialový průběh. Dalším řešením je zkosení či lépe zaoblení hran soustavy. V navrhované soustavě vychází průběhy pro měnič umístěný uprostřed a s offsetem následovně. V grafu je též zohledněno zkosení předních hran, délka úkosu je 17 mm.



Obr. 7: Graf vlivu umístění měniče na přední desce a vliv zkosení předních hran (měnič umístěný na středu desky – zeleně, měnič s offsetem – modře, měnič s offsetem + ozvučnice se zkosenými hranami - červeně).

Kompletní dokumentace s rozměry, údaji o polohách měničů a tlumení je obsažena v dokumentaci nacházející se v přílohách.

4. NÁVRH ELEKTRONIKY

4.1. OBVOD NE 5532

Při návrhu elektroniky musíme zajistit, aby aktivní prvky nevnášely do signálu přílišné zkreslení, šum či jiné nepříznivě ovlivňující vlivy. Z toho důvodu je třeba vybírat obvody s vyhovujícími parametry.

parametr	rychlost přeběhu	ekvivalentní vstupní šumové napětí		celkové harmonické zkreslení (THD)	
hodnota	9 V/ μ s	f = 30 Hz	8 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$	f = 30 Hz	0,002 %
		f = 1 kHz	5 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$	f = 20 kHz	0,004 %

Tab. 10: Vybrané parametry operačního zesilovače NE5532 [17].

Ve všech obvodech kde se vyskytuje operační zesilovač, jsem použil tento nízkošumový obvod NE5532 od společnosti Texas Instruments.

4.2. OBVOD LM 4780

Jako koncový zesilovací stupeň poslouží obvod LM4780. Součástka se vyznačuje příznivými parametry a rozumným výkonem. Další výhodou je, že v sobě integruje zesilovač pro dva kanály, to umožňuje použití jednoho integrovaného obvodu jako koncový zesilovač pro oba měniče. Součástí obvodu jsou i ochrany, které se v audiotechnice běžně používají, odpadá tak jejich realizace z diskretních součástek. Napájení je řešeno symetricky +/- 35V.

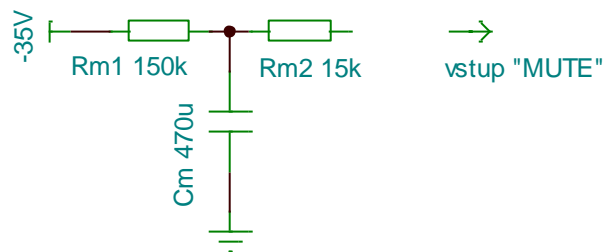
parametr	rychlost přeběhu	výkon	celkové harmonické zkreslení (THD), P = 30 W		odstup signál-šum
hodnota	19 V/ μ s	2 x 60 W	f = 100 Hz	0,0015 %	\geq 97 dB
			f = 10 kHz	0,0200 %	(P = 1 W)

Tab. 11: Vybrané parametry obvodu LM4780 [18].

4.2.1. OCHRANA REPRODUKTORU FUNKCÍ MUTE

Obvod LM4780 je vybaven několika ochranami. Jednou z nich je funkce „MUTE“. Ta se dá použít pro ztlumení signálu v obvodu o 110 dB. Dále lze využít vstup MUTE jako ochranu při zapínání napájecího napětí. Obvod LM4780 se nachází v pracovním stavu, připojíme-li na svorku MUTE kladné napětí. Vložením zpožďovacího RC členu mezi zdroj napětí -35 V a svorku MUTE vytvoříme časovou prodlevu mezi zapnutím hlavního napěťového spínače a uvedením koncového zesilovače do aktivní činnosti. Na obrázku č. 8 vidíme RC kombinaci

odporů R_{m1} , R_{m2} a kondenzátoru C_m , která zajistí časové zpoždění sepnutí obvodu cca o 1,5 s. Reproduktor je tak chráněn proti případným proudovým a napěťovým špičkám při připojení soustavy k síti [18].



Obr. 8: Obvod zajišťující zpožděné dosažení obvodu do aktivního stavu.

4.2.2. OCHRANA PROTI STEJNOSMĚRNÉ SLOŽCE

Podpěťové ochrany obvodu po zapnutí systému zajistí, aby se napájecí zdroj a vyhlazovací kondenzátory za můstkovým usměrňovačem nabily na jejich jmenovité hodnoty před tím, než se obvod LM4780 zapne do provozního stavu. Tímto se omezí jakýkoliv průnik stejnosměrných signálu na výstup zesilovače. Při vypnutí hlavního napájení se výstupy obvodu LM4780 uzemní, čímž se zabrání přechodovým jevům na výstupu [18].

4.2.3. OCHRANA PROTI PŘEPĚTÍ A PŘEHŘÁTÍ

LM4780 obsahuje přepětovou ochranu obvodů, která omezuje výstupní proud. Obvod také obsahuje ochranu automatického přerušování činnosti při překročení teploty 150°C [18].

4.3. OBVOD THAT 1206

Obvod THAT 1206 slouží jako vstupní převodník symetrického signálu na signál nesymetrický. Nevýhodou běžných symetrických zesilovačů je nízký činitel potlačení souhlasného rušení při buzení z mírně nevyvážené vstupní impedance. Pro vysoký činitel potlačení je žádoucí vysoký vstupní odpor symetrického zesilovače. Použití odporů do vstupních obvodů s vysokými hodnotami nelze doporučit, vzhledem k velkému vnitřnímu šumu, který by se na nich generoval. Dále by se dal ve vstupním obvodu použít transformátor, který má své nevýhody v ceně, zkreslení a velikosti. Z tohoto důvodu byl použit obvod THAT1206 [19].

parametr	rychlost přeběhu	činitel potlačení souhlasného rušení	celkové harmonické zkreslení (THD)	vlastní generovaný šum
hodnota	12V/ μ s	90 dB (60 Hz)	0.0005% (20 kHz)	-107 dBu (20 kHz)
		85 dB (20 kHz)		

Tab. 12: Vybrané parametry obvodu THAT1206 [19].

4.4. OBVOD THAT 2181

V aplikacích které vyžadují řízenou změnu zesílení operačního zesilovače lze této změny dosáhnout změnou poměru odporů ve zpětné vazbě. Jiné řešení nabízí operační zesilovač, jehož zisk lze řídit přivedeným napětím do řídicích vstupů, hovoříme pak o „napěťově řízeném operačním zesilovači“. Zisk obvodu THAT 2181 lze napěťově řídit v rozsahu -90 dB až -30 dB, přičemž zkreslení nepřesáhne 0.005% [20].

4.5. URČENÍ POŽADOVANÉHO VÝKONU KONCOVÉHO ZESILOVAČE

Pro určení maximálního akustického tlaku soustavy, musíme určit, v jaké vzdálenosti chceme tohoto tlaku dosáhnout. Podle normy IEC 60268-5, musí být výsledek vztažen na jmenovitou vzdálenost 1 m [21]. Jelikož je mnou navrhovaný monitor primárně určen pro poslech na počítačovém pracovišti, bude poslechový bod volen ve vzdálenosti 0,75m od soustavy. Pro výpočet akustického tlaku za předpokladu, že známe citlivost měniče S_L , výkon zesilovače P a vzdálenost poslechového místa od soustavy l slouží výraz [22]:

$$L_P = S_L + 10 \log \frac{P}{I^2} \text{ [dB]} \quad (11)$$

Tento vztah platí pro všesměrový zářič umístěný ve volném prostoru, kde se neuplatňuje skládání odražených zvukových vln, které by interferovali s hlavní zvukovou vlnou vyzářenou z osy měniče. Pro relativně krátké poslechové vzdálenosti, kde se neuplatňuje vliv difuzního akustického pole lze tento vztah použít, jinak by se výpočet znatelně komplikoval.

Hlasitost hudebního signálu není po celou dobu nahrávky stejná. Při určování požadované maximální hladiny akustického tlaku, musíme zároveň zajistit dostatek výkonu pro náhodné signálové špičky v nahrávce. Velikost těchto špiček v decibelech oproti průměrné hladině akustického tlaku vyjadřuje tzv. „crest faktor“. Tabulka 13 zobrazuje přehledové hodnoty trvalých úrovní akustického tlaku a hodnoty crest faktoru u různých

žánrů nahrávek, které se získaly analýzou nahrávek skriptem v programu Matlab, který vytvořil student ZČU.

Žánr	typické úrovně akustického tlaku [dB]	crest faktor [dB]	
		basová část	výšková část
New age	60-70	15,4	48,6
Folk	75-90	6,9	35,2
Jazz	80-95	10,8	20,3
Pop	90-95	12,3	20,5
Classical	100	11,8	32,4
Techno	110	10,1	18,7
Rock	95-110	7,3	18,6
Metal	110	8,1	22,0
Průměr	97,5	10,3	27,0

Tab. 13: Orientační maximální trvalé požadované úrovně akustického tlaku pro různé žánry podle [23] a hodnoty crest faktoru.

Při výpočtu velikosti výkonu koncového stupně, vycházíme z předpokladu, že chceme dosáhnout hodnoty trvalé maximální úrovně akustického tlaku $L_p = 100$ dB ve vzdálenosti $l = 0,75$ m. Tato hodnota byla vybrána na základě hodnot z tabulky č. 13 a je dostačující pro pokrytí většiny zvukových záznamů. Vyjádřením ze vzorce č. 11 dostáváme výraz pro výpočet výkonu koncového zesilovače, při známé citlivosti měniče 87 dB (1m/1W):

$$P = l^2 \cdot 10^{\frac{L_p - S_L}{10}} \text{ [W]} \quad (12)$$

$$P = 0,75^2 \cdot 10^{\frac{100 - 87}{10}} = 11,2 \text{ W} \quad (13)$$

11,2 W je hodnota výkonu, kterou musí dodat koncový zesilovač do zátěže v jedné větvi. Vybraný integrovaný zesilovač LM4780, je schopen dodávat krátkodobý výkon 2 x 60 W, při dosažení tohoto výkonu do vzorce č. 14 pak dostáváme:

$$L_p = 87 + 10 \log \frac{60}{0,75^2} = 107,25 \text{ dB} \quad (14)$$

to znamená, že můžeme bez zkreslení reprodukovat špičky převyšující trvalý akustický tlak o 7,25 dB.

Výstupní výkon obvodu	frekvence budícího signálu	hodnota harmonického zkreslení THD+N
11,2 W	1 kHz	0,006%
	20 kHz	0,030%
60 W	1 kHz	0,006%
	20 kHz	0,030%

Tab. 14: Hodnoty harmonického zkreslení obvodu LM4780 závislé na výstupním výkonu a budícím signálu [18].

Při návrhu vícepásmové soustavy, lze optimalizovat trvalý výkon na jednotlivých pásmech (v jednotlivých větvích zesilovače). To je umožněno díky nerovnoměrnému rozložení hudebního spektra signálu. Analýzu nahrávek provedeme opět skriptem v programu Matlab. V něm je možno analyzovaný *.wav soubor rozdělit do dvou pásem, které odděluje dělicí frekvence výhybky (v našem případě 3kHz). Dostaneme tak procentuální zastoupení spektrálních složek, které se vyskytují pod a nad dělicím kmitočtem. Tedy informaci, kolik zpracuje středobasový měnič a kolik vysokotónový měnič. Velký vliv na toto rozdělení má charakter nahrávky, my se omezíme na dělení nahrávek podle různých hudebních žánrů.

Žánr	procentuální zastoupení spektrálních složek [%]	
	basová část	výšková část
New age	99,3	0,7
Folk	98,0	2,0
Jazz	85,3	14,7
Pop	77,5	22,5
Classical	97,2	2,8
Techno	77,6	22,4
Rock	80,3	19,7
Metal	86,3	13,7
Průměr	87,7	12,3

Tab. 15: Procentuální zastoupení spektrálních složek signálu v závislosti na druhu žánru.

Po zprůměrování dat vychází, že potřebný trvalý výkon dodávaný do výškového měniče je 7 krát menší než dodávaný do měniče basového. Z důvodu přihlídnutí k nejhorší možné poměrové situaci (žánr pop), je trvalý výkon do váškového měniče zvolen 3 krát menší než trvalý výkon dodaný do basového měniče. Z cenového hlediska se rozdílné výkony promítnou při navrhování chladiče a napájecího transformátoru, kde počítáme s menším celkovým výkonem koncového stupně zesilovače. Výpočty proto musíme rozdělit do dvou částí, veličiny pro basový měnič budou mít přívlástek „lo“ a pro výškový „hi“.

$$P_{hi} = P_{lo} * \frac{1}{3} \text{ [W]} \quad (15)$$

$$P_{hi} = 11,2 * \frac{1}{3} = 3,73 \doteq 4 \text{ W} \quad (16)$$

4.6. VÝPOČET MAXIMÁLNÍHO ZTRÁTOVÉHO VÝKONU A URČENÍ POTŘEBNÉHO CHLADIČE

Vstupní hodnoty pro výpočty:

veličina	popis	hodnota	jednotka
P_{lo}	výkon dodávaný do měniče (pro SPL= 100dB v 0,75m)	11,2	W
$R_{z_{lo}}$	impedance měniče	8	Ω
P_{hi}	výkon dodávaný do měniče	4	W
$R_{z_{hi}}$	impedance měniče	8	Ω
$R_{\theta_{jc}}$	tepelný odpor styku mezi přechodem a pouzdrem obvodu	0,8	$^{\circ}\text{C/W}$
$R_{\theta_{cs}}$	tepelný odpor styku mezi pouzdrem obvodu a chladičem	0,4	$^{\circ}\text{C/W}$
T_{jmax}	maximální teplota přechodu	150	$^{\circ}\text{C}$
T_{out}	teplota okolí chladiče	45	$^{\circ}\text{C}$
U_B	napájecí napětí	35	V

Tab. 16: Parametry pro výpočet ztrátového výkonu a chladiče.

4.6.1. URČENÍ NAPÁJECÍHO NAPĚTÍ

Výstupní výkon na zátěži při sinusovém buzení vyjádříme na základě znalosti, že:

$$I = \frac{U}{R} \text{ [V]}, \quad (17)$$

$$P = RI^2 \text{ [W]}, \quad (18)$$

$$U_{ef} = \frac{U_{max}}{\sqrt{2}}, \quad (19)$$

kde I je proud zátěží, R je odpor zátěže, P je výkon vznikající na zátěži, U je napětí na zátěži, U_{ef} je efektivní hodnota napětí na zátěži a U_{max} je jeho amplituda.

Potom:

$$P_v = \frac{U_{ef}^2}{R_z^2} R = \frac{U_{ef}^2}{R_z} = \frac{U_m^2}{2R_z} \text{ [W]}, \quad (20)$$

kde R_z je impedance měniče, P_v je výkon na zátěži.

Úpravou tohoto vzorce vypočteme amplitudu napětí při zadaném výkonu:

$$U_m = \sqrt{2PR_z} \text{ [V]} \quad (21)$$

$$U_{m_lo} = \sqrt{2 \cdot 11,2 \cdot 8} = 13,39 \text{ V} \quad (22)$$

$$U_{m_hi} = \sqrt{2 \cdot 4 \cdot 8} = 8,00 \text{ V} \quad (23)$$

4.6.2. URČENÍ PROUDU PROTÉKAJÍCÍHO ZÁTĚŽÍ

Amplituda proudu protékající zátěží při trvalém výkonu bude:

$$I_m = \frac{U_m}{R_z} \text{ [A]} \quad (24)$$

$$I_{m_lo} = \frac{13,39}{8} = 1,67 \text{ A} \quad (25)$$

$$I_{m_hi} = \frac{8}{8} = 1,00 \text{ A}, \quad (26)$$

kde I_m značí amplitudu proudu protékající zátěží.

Vyšší hodnotu proudu 1,67A porovnáme s maximálním výstupním stejnosměrným proudem integrovaného obvodu. U obvodu LM4780 je maximální hodnota výstupního stejnosměrného proudu omezena na 7 A po dobu maximálně 10ms. Těchto hodnot nebude dosaženo.

Dále z amplitudy proudu vypočítáme proudový odběr ze zdroje, při nesymetrickém napájení je roven střední hodnotě amplitudy:

$$\frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi i(t) dx = \frac{1}{\pi} [-\cos(x)]_0^\pi = \frac{1}{\pi} (-\cos \pi - (-\cos 0)) = \frac{2}{\pi} = 0,637 I_m \quad (27)$$

Při symetrickém napájení napájí každý zdroj zesilovač jen v jedné půlperiodě tj. proud za celou periodu z jedné větve.

$$I_s = \frac{2}{\pi} I_m = \frac{I_m}{\pi} \text{ [A]} \quad (28)$$

$$I_{s_lo} = \frac{1,67}{\pi} = 0,53 \text{ A} \quad (29)$$

$$I_{s_hi} = \frac{1,00}{\pi} = 0,32 \text{ A}, \quad (30)$$

kde I_s je střední hodnota proudu.

Střední hodnota proudu z jedné větve je pro napájení obou zesilovačů při plném vybuzení:

$$I_s = I_{s_lo} + I_{s_hi} \text{ [A]} \quad (31)$$

$$I_s = 0,53 + 0,32 = 0,85 \text{ A} \quad (32)$$

4.6.3. URČENÍ MAXIMÁLNÍHO ZTRÁTOVÉHO VÝKONU OBVODU LM4780

Celkový příkon koncového zesilovače LM4780 je při plném vybuzení dán součtem příkonů z obou napájecích větví:

$$P_{P_dílčí} = 2 \cdot U_B I_s \text{ [W]} \quad (33)$$

$$P_{P_lo} = 2 \cdot 35 \cdot 0,53 = 37,1 \text{ W} \quad (34)$$

$$P_{P_hi} = 2 \cdot 35 \cdot 0,32 = 22,4 \text{ W} \quad (35)$$

$$P_p = P_{P_lo} + P_{P_hi} = 59,5 \text{ W}, \quad (36)$$

kde U_B je napájecí napětí.

Tato hodnota ovšem nepředstavuje maximální ztrátový výkon. Uvažujme nyní, že výstupní tranzistory tvoří proměnnou zátěž napájecího zdroje, jehož vnitřní odpor představuje R_z . Z podmínky výkonového přizpůsobení plyne, že na proměnné zátěži bude

maximální výkon tedy, když se výstupní výkon právě rovná výkonu ztrátovému (zde na R_z).

Příkon tedy musí být dvojnásobkem výkonu:

$$P_z = P_v, \quad \text{tedy } P_z = \frac{P_p}{2} \quad (37)$$

$$P_v = \frac{U_m^2}{2R_z} = U_B I_s = \frac{P_p}{2} = U_B \left(\frac{1}{\pi} \frac{U_m}{R_z} \right), \quad (38)$$

kde P_z je ztrátový výkon. Z předchozího výrazu lze vyjádřit U_m jako:

$$U_m = \frac{2}{\pi} U_B = 0,636 U_B \quad (39)$$

Při této hodnotě výstupního napětí je výkon právě:

$$P_v = \frac{U_m^2}{2R_z} = \left(\frac{2}{\pi} \right)^2 \frac{U_B^2}{2R_z} = 0,405 \frac{U_B^2}{2R_z} \text{ [W]} \quad (40)$$

Z tohoto vztahu plyne, že maximální ztrátový výkon bude pro napájecí napětí U_B roven:

$$P_{z \max} = \frac{U_{mt}^2}{2R_z} = \left(\frac{2}{\pi} \right)^2 \frac{U_B^2}{2R_z} \text{ [W]} \quad (41)$$

$$P_{z \max_lo} = \left(\frac{2}{\pi} \right)^2 \frac{35^2}{2,8} = 31,03 \text{ W} \quad (42)$$

$$P_{z \max_hi} = \left(\frac{2}{\pi} \right)^2 \frac{35^2}{2,8} = 31,03 \text{ W} \quad (43)$$

$$P_{z \max} = P_{z \max_lo} + P_{z \max_hi} = 62,06 \text{ W} \quad (44)$$

Oba kanály jsou integrovány v jednom obvodu, který bude umístěn na jednom chladiči, proto je třeba chladič navrhovat pro výkon 62,06 W.

4.6.4. VÝPOČET TEPELNÉHO ODPORU CHLADIČE

K určení hodnoty tepelného odporu chladiče, potřebujeme mezní hodnoty tepelných odporů obvodu (Tab. č. 16). Vypočítáme celkový tepelný odpor:

$$R_{\theta} = \frac{T_{j\max} - T_{out}}{P_{z \max}} \text{ [}^{\circ}\text{C/W]} \quad (45)$$

$$R_{\theta} = \frac{150 - 35}{62,06} = 1,85 \text{ }^{\circ}\text{C} / \text{W}, \quad (46)$$

kde $T_{j\max}$ je maximální teplota přechodu součástky a T_{out} je teplota okolí chladiče.

Obvod LM4780 bude ke chladiči přichycen přes hliníkový kvádr o rozměrech 20 mm x 35 mm, vzdálenost integrovaného obvodu od chladiče tak bude 18 mm. Tepelná vodivost hliníku je $\lambda_{Al} = 245 \text{ W/m}\cdot^{\circ}\text{C}$. A tepelný odpor kvádrů se spočte [24]:

$$R_{\theta_{\text{kvádr}}} = \frac{l}{\lambda S} \text{ } [^{\circ}\text{C/W}] \quad (47)$$

$$R_{\theta_{\text{kvádr}}} = \frac{0,18}{245 \cdot 0,20 \cdot 0,35} = 0,01 \text{ } [^{\circ}\text{C/W}], \quad (48)$$

kde S je průřez kvádrů a l je vzdálenost obvodu od chladiče.

Mezi pouzdrem obvodu a chladičem je umístěna izolační podložka a teplovodivá pasta, tepelný odpor styku mezi pouzdrem obvodu a chladičem se zvýší o 0,4 $^{\circ}\text{C/W}$. Tepelný odpor chladiče bude [24]:

$$R_{\theta_{sa}} = R_{\theta} - R_{\theta_{jc}} + R_{\theta_{cs}} + R_{\theta_{\text{kvádr}}} \text{ } [^{\circ}\text{C/W}] \quad (49)$$

$$R_{\theta_{sa}} = 1,85 - 0,8 + 0,4 + 0,01 = 0,651 \text{ }^{\circ}\text{C/W}, \quad (50)$$

kde $R_{\theta_{jc}}$ je tepelný odpor styku mezi přechodem a pouzdrem obvodu a $R_{\theta_{cs}}$ tepelný odpor styku mezi pouzdrem obvodu a chladičem.

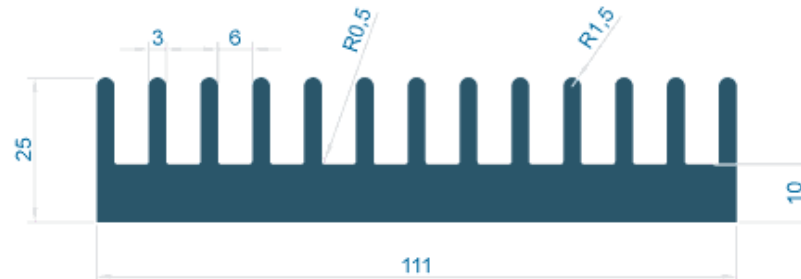
Výkonový obvod bude umístěn v polovině chladiče, tímto případně na každou polovinu chladiče požadavek vychladit ztrátový výkon o poloviční hodnotě, tj. 31W viz výpočet XY. Celkový tepelný odpor chladiče pro každou polovinu se rovná [24]:

$$R_{\theta_{sa_{\text{celk}}}} = 2 \cdot R_{\theta_{sa}} = 2 \cdot 0,651 = 1,302 \text{ }^{\circ}\text{C/W} \quad (51)$$

Tato hodnota celkového tepelného odporu chladiče umožňuje použití chladiče od firmy ALUCAD Bohemia s. r. o. z hliníkové slitiny, který má tepelný odpor $R_{\theta_{sa}} = 1,15 \text{ }^{\circ}\text{C/W}$ na 100mm. Musíme navrhnout celkovou délku chladiče dvojnásobnou (200mm), tak že každá jeho polovina dokáže vychladit ztrátový výkon o hodnotě 31W. Vzhledem ke skladové dostupnosti modelu 0610 byl vybrán právě tento model:

produkt	hmotnost	$R_{\theta sa}$ (pro 100mm)	materiál
chladič 0610	4,45 kg/m	1,15 °C/W	AlMgSi0.5

Tab. 17: Technické parametry chladiče 0610.



Obr. 9: Rozměry chladiče 0610.

4.7. NAPÁJENÍ

Aktivní elektronika vyžaduje napájení stejnosměrným napětím o určité hodnotě. K tomu je zapotřebí přetransformovat síťové napětí (230V) na napětí o takové hodnotě, které je potřeba pro napájení obvodu s nejvyšším napájecím napětím. V tomto případě se jedná o koncový zesilovací stupeň LM4780, který vyžaduje symetrické napájení +/- 35V. Bude použit transformátor s toroidním jádrem, ze kterého budou vyvedeny dvě větve napájení a jeden vodič s nulovým potenciálem. Toroidní transformátor má oproti klasickému menší rozptylový tok, to je výhodné z hlediska nižší možnosti naindukování síťového kmitočtu (brumu) do signálových cest, které by mohli vést v blízkosti transformátoru.

4.7.1. VÝPOČET NÁVRHU TRANSFORMÁTORU

Při návrhu toroidního transformátoru se symetrickým výstupem potřebujeme určit výstupní proud a napětí na sekundárním vinutí.

Střední hodnota proudu v sekundárním vinutí transformátoru, je rovna součtu středních hodnot proudů tekoucích v basové a výškové zátěži. Vzorec č. 32:

$$I_{s_opt} = 0,85 A$$

Tento proud bude procházet oběma symetrickými vinutími na sekundární straně transformátoru.

Koncový výkonový zesilovač (LM4780) je napájen +/- 35 V stejnosměrně [18]. Operační zesilovače (NE5532) použité v aktivní výhybce budou napájeny +/- 18 V [17]. Tohoto napětí dosáhneme pomocí napěťových stabilizátorů (LM317, LM337). Při návrhu napětí na výstupu transformátoru je třeba zohlednit veškeré úbytky napětí mezi jeho svorkami a koncovým zesilovacím stupněm. První úbytky napětí nastanou na usměrňovači zapojeném do Graetzova můstku. Každá půlvlna musí projít přes dvě usměrňovací diody, jejich celkový úbytek napětí na obou je $U_f = 1$ V [25]. Protože je napětí na transformátoru střídavé, musíme vypočtenou hodnotu vydělit odmocninou ze dvou, pro získání efektivní hodnoty napětí. Požadované napětí na výstupu transformátoru je tedy:

$$U_{\text{trafo}} = \frac{U_{\text{usm}} + U_f}{\sqrt{2}} \text{ [V]} \quad (52)$$

$$U_{\text{trafo}} = \frac{35 + 1}{\sqrt{2}} = 25,45 \text{ V}, \quad (53)$$

kde U_{usm} je požadované stejnosměrné napětí za můstkovým usměrňovačem (pro nás 35 V pro napájení obvodu LM4780).

Vypočítaný transformátor byl zhotoven na zakázku u společnosti JK-ELTRA.

parametr (sekundární vinutí)	napětí	proud	zdánlivý el. výkon	cena
hodnota	+26 V, - 26V	2 x 1,9 A	99 VA	709 Kč

Tab. 18: Parametry objednaného transformátoru.

V rámci cenové optimalizace lze použít levnější transformátor, nevýhodou takového řešení může být nižší životnost transformátoru. Jako alternativa k transformátoru od společnosti JK-ELTRA je možno zakoupit transformátor s následujícími parametry od společnosti INDEL.

parametr (sekundární vinutí)	napětí	proud	zdánlivý el. výkon	cena
hodnota	+28 V, - 28V	2 x 1,78 A	100 VA	473 Kč

Tab. 19: Parametry alternativního transformátoru.

4.7.2. OBVOD NAPÁJENÍ

Schéma napájení je obsaženo v příloze. Na vstupu obvodu se nachází můstkový usměrňovač (KBU8J), za kterým jsou dva vyhlazovací kondenzátory o hodnotě 10 000uF. Na usměrňované napětí o hodnotě +/-35V jsou paralelně připojeny stabilizátory napětí (LM317,

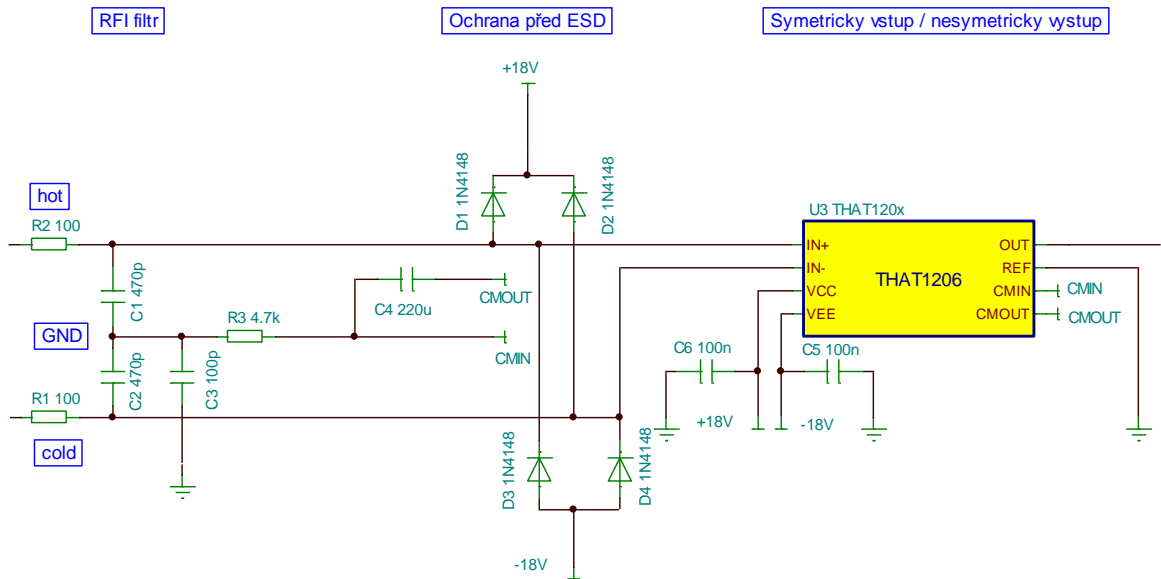
LM337) se zapojenými ochrannými diodami proti zkratu, které zajišťují napájení +/-18V pro operační zesilovače a ostatní obvody.

4.8. SYMETRICKÝ ZESILOVAČ

K přivedení signálu do reprobedny je použit symetrický způsob připojení. Tento způsob se využívá u všech poloprofesionálních / profesionálních řešení. Symetrické zapojení využívá dva vodiče na vedení signálu, signál je v jednom vodiči veden v normální polaritě (vodič „hot“) a v druhém v obrácené polaritě signálu (vodič „cold“). Na zem se připojuje jen stínění kabelu. Signál je přiveden na vstupy obvodu THAT1206. V tomto zesilovači se část signálu z jedné žíly odčítá od druhé části z druhé žíly. Protože se ve stejný moment na obou žilách vyskytuje stejně velký, ale opačný potenciál, je ve výsledku sečten. Většina šumu, která se na vedení nachytala po cestě, má v obou žilách stejnou polaritu a odečte se. Útlum obvodu je 6 dB, ve výsledku je amplituda signálu na výstupu obvodu stejná, jako je amplituda signálu v jedné vstupní větvi.

Stejně jako většina polovodičových součástek je i obvod THAT1206 náchylný na radiové rušení (RFI). Vlivem tohoto rušení se může obvod stát nelineární a na výstupu se objeví slyšitelný šum. Z tohoto důvodu je vhodné toto rušení na vstupu obvodu filtrovat. Obecně se toto provádí pomocí malých kondenzátorů zapojených mezi signální vstupy a zem. Kondenzátory by se měly umísťovat co nejbližší vstupních konektorů, jak je to možné.

Dalším ochranný obvod slouží k minimalizaci poškození součástky vlivem působení elektrostatického impulzu (ESD).



Obr. 10: Symetrický zesilovač s nesymetrickým výstupem a ochrannými obvody [19].

4.9. KOREKCE VSTUPNÍ CITLIVOSTI

Protože se v audiotechnice můžeme setkat s různými pracovními úrovněmi signálů, zařazujeme do signálové cesty obvod pro korekci citlivosti signálu. V profesionální audiotechnice se obvykle používá linková úroveň o hodnotě +4dBu (1.23 V) [26]. 4dBu je zároveň hodnota 0 dBr, na kterou je signál přizpůsoben po korekci a tento signál vstupuje do koncového zesilovače. dBu je jednotkou pro absolutní úroveň napětí a její hodnota je vztažena k normálovému napětí 0,775V. Pro jednotku dBV, která se používá v komerční technice je hodnota normálového napětí rovna 1V. Absolutní úroveň napětí spočteme jako: [27].

$$L_u = 20 \log \frac{U_x}{0,775} \text{ [dBu]}, \quad (54)$$

kde U_x je hodnota napětí signálu ve vedení.

Korekce citlivosti vstupního signálu je přepínatelná ve čtyřech krocích pro vstupní signál o hodnotě -10dBV, +4dBu, +6dBu, +12dBu. Jelikož je pro nás hodnota + 4dBu = 0 dBr budou požadované výsledné hodnoty zesílení rozdílné. Tabulka č. 20 je přehledem možných voleb a jejich hodnot včetně napěťové hladiny a hodnoty zesílení výstupního signálu obvodu THAT 2181 oproti signálu vstupnímu. DL_u značí zesílení/útlum obvodu, tak aby výstup se výstup obvodu nacházel na hladině + 4dBu = 0 dBr.

L_u (hodnota vstupního signálu)	DL	U_{x_0dBu} [V]	A [-]
12 dBu	-8dB	3,085	4,000
6 dBu	-2 dB	1,546	2,000
4 dBu	0 dB	1,228	1,585
-10 dBV (\cong - 7,8 dBu)	+ 11,8 dB	0,316	-3,886

Tab. 20: Tabulka hodnot úrovní signálu, jeho napětí a zesílení oproti 0 dBu.

Dopočítání hodnoty U_x provedeme upravením vzorce č. 54 a dosazením do něj.

$$U_x = 0,775 \cdot 10^{\frac{L_u}{20}} \text{ [V]} \quad (55)$$

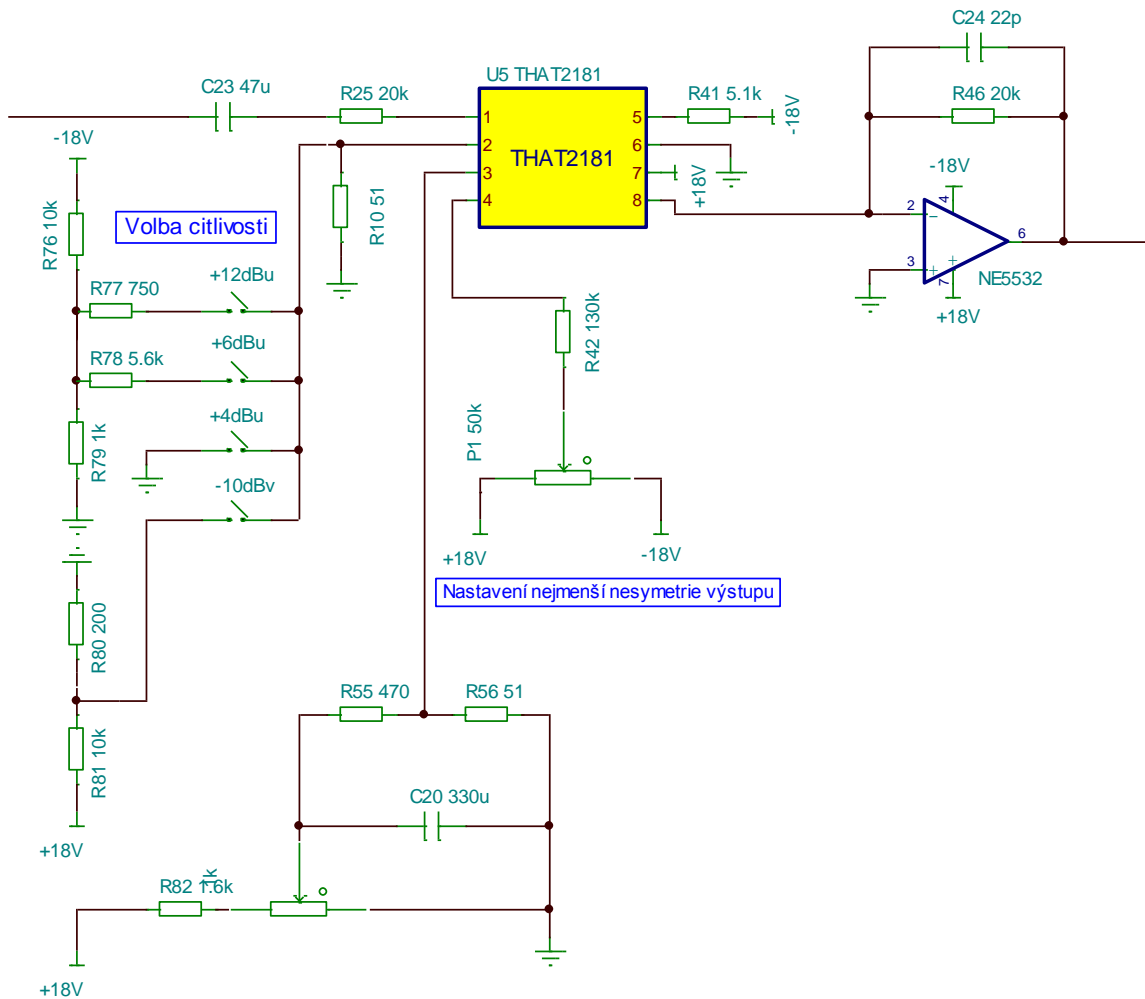
Změna zesílení je realizována obvodem THAT 2181, jedná se o operační zesilovač s napěťově řízeným ziskem. Při použití běžného operačního zesilovače, kde by zesílení bylo řízeno změnou poměru odporů ve zpětné vazbě, by hrozilo naindukování nežádoucího brumu do signálových vodičů, které by vedli do zadního ovládacího panelu, který je umístěn blízko transformátoru. Velikost napětí vedoucí do regulačního vstupu OZ je použitím napěťového děliče přednastavena tak, aby vyhovovala změně velikosti zesílení. Platí, že změna napětí na řídicí pin o velikosti 6,1 mV změní zesílení obvodu o 1dB, požadované řídicí napětí lze tedy dopočítat ze vzorce [20]: .

$$U_{x_0dBBr} = \Delta L \cdot 0.0061 \text{ [V]}, \quad (56)$$

kde, DL je požadované zesílení/útlum obvodu a U_{x_0dBBr} je napětí přiváděné do ovládacích vstupů obvodu THAT 2181 pro získání určeného zesílení/útlumu DL.

L_u (hodnota vstupního signálu)	DL	U_{x_0dBBr} [mV]
12 dBu	-8dB	48,8
6 dBu	-2 dB	12,2
4 dBu	0 dB	0,0
-10 dBV (\cong - 7,8 dBu)	+ 11,8 dB	-72,0

Tab. 21: Tabulka hodnot úrovní signálu, jeho zesílení a napětí oproti 0 dBu.



Obr. 11: Schéma zapojení korekce vstupní citlivosti.

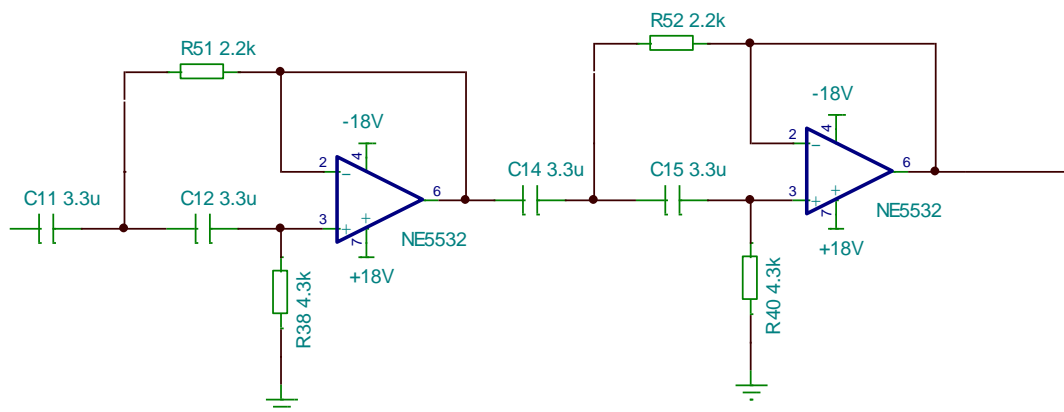
V obvodu je obsažena dodatečná korekce útlumu celého obvodu pomocí potenciometru, který je připojen na vývod č. 3. Tímto potenciometrem lze regulovat útlum od hodnoty 0dB až do - 52dB. Korekce je provedena na stejném principu jako předchozí korekce citlivosti, s každým 6,1 mV přivedeným na vstup obvodu získáme útlum obvodu 1dB. Navržený napěťový dělič umožňuje při plném vytočení potenciometru dosáhnout napětí 317 mV, této hodnotě odpovídá onen útlum 52dB. Protože by mohl být levný potenciometr zdrojem nežádoucího slyšitelného „prskání“ do výstupu, je potenciometr přemostěn filtračním kondenzátorem C20.

4.10. SUBSONICKÝ FILTR

K odstranění nízkofrekvenčních signálů, které by zbytečně výkonově a tepelně zatěžovaly středobasový měnič bez vlivu na žádoucí reprodukci je využit aktivní filtr zapojený jako horní propust. V simulačním programu Enclosure Shop si lze zobrazit maximální výchylku

membrány měniče. Při buzení plným výkonem 60W dosahuje velikost výchylky 8,6 cm na frekvenci 28 Hz. Maximální velikost výchylky udávaná výrobcem je 8 cm. Použitím subsonického filtru, laděného nad touto frekvencí zamezíme mechanickému poškození reproduktoru vlivem vyšší než povolené výchylky.

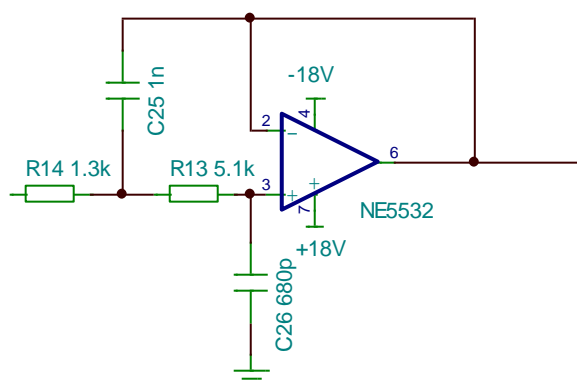
Mezní frekvence filtru je nastavena na 30 Hz. Filtr 4. řádu je složen ze dvou ARC obvodů a za mezní frekvencí vykazuje sklon útlumu 24 dB/oktávu. U filtru byla použita Butterworthova aproximace.



Obr. 12: ARC filtr typu horní propust.

4.11. FILTR NADAKUSTICKÉHO PÁSMÁ

K odstranění přebytečných frekvencí nacházejících se nad akustickým pásmem, je použit filtr typu dolní propust 2. řádu. U filtru byla použita Besselova aproximace, mezní kmitočet filtru je 72 kHz.



Obr. 13: ARC filtr typu dolní propust.

4.12. NÁVRH VÝHYBEK

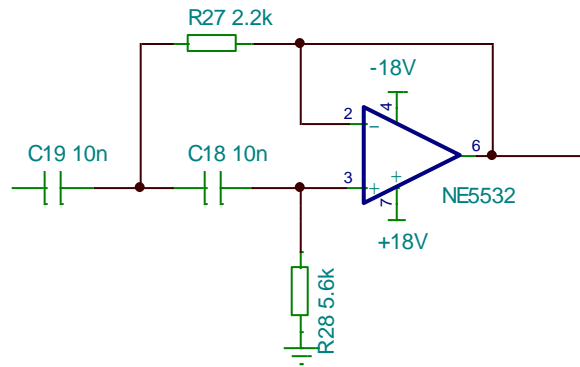
Výhybkou se rozumí kmitočtově závislý filtr. Patří sem čtyři základní skupiny filtrů: dolní propust DP, horní propust HP, pásmová propust PP a pásmová zadrž PZ. U dvoupásmové reproduktorové soustavy potřebujeme rozdělit signál do dvou částí filtry typu DP a HP. Filtry se dále dělí podle použitých součástek na LC, RC a RLC filtry. Z energetického hlediska se filtry konstruují buď jako pasivní, nebo jako aktivní. Největším problémem při realizaci pasivního filtru je požadavek na kvalitu, rozměry a cenu cívek [28]. Další nevýhodou těchto filtrů je, že vykazují určitý útlum v propustném pásmu [29]. Aktivní filtry (ARC) přinášejí výhodu, kterou je možnost realizace elektronické indukčnosti vhodným zapojením zesilovače a kondenzátoru ve zpětné vazbě. Nastavením zpětné vazby můžeme měnit i zesílení filtru. ARC filtry lze kaskádně řadit za sebe a dosáhnout tak filtru vyššího řádu [30].

Při návrhu tolerančních polí kmitočtového filtru bývá problém nalezení koeficientů přenosové funkce. V praxi se nejčastěji setkáváme s několika typy základních variant aproximací. **Besselova** se vyznačuje zachováním tvaru signálu v propustném pásmu. **Čebyševova** aproximace umožňuje dosáhnout největší strmosti charakteristiky za cenu větší nelinearity fázové charakteristiky. Kompromisem mezi linearitou fázové charakteristiky a dosaženým útlumem může být **Butterworthova** aproximace [28].

4.12.1. NÁVRH DOLNÍ PROPUSTI

Pro návrh výhybky byl využit program CrossoverShop od společnosti LinearX. Výhodou tohoto řešení je možnost naimportovat do programu naměřené kmitočtové průběhy měničů. Díky tomu navrhujeme výhybku přímo na konkrétní aplikaci s danými vlastnostmi.

V tomto programu byla zvolena výhybka 4. řádu s aproximací typu Butterworth. Jedná se o kaskádní zapojení dvou ARC obvodů s celkovým sklonem 24dB/okt za mezním kmitočtem. K dosažení požadovaného sklonu ale vystačí filtr druhého řádu, jelikož se měnič sám chová jako dolní propust [31]. Zapojení se díky tomu zjednoduší. Obvod je tvořen dvěma kondenzátory a dvěma rezistory (R_{27} , R_{28} , C_{18} , C_{19}), jež určují svou hodnotou rezonanční kmitočet [28].



Obr. 14: ARC filtr 2. řádu typu dolní propust.

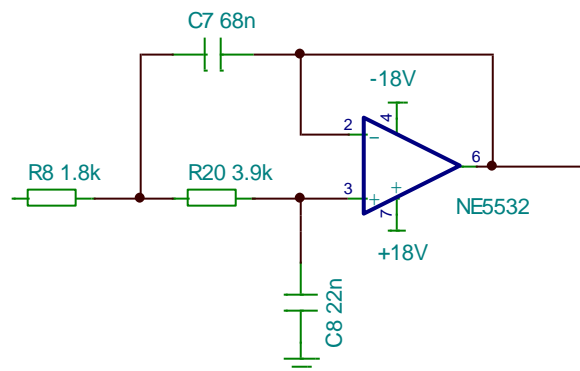
Hodnota mezního kmitočtu (-3dB) lze spočítat pomocí vztahu [28]:

$$F_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad (57)$$

Mezní kmitočet je zvolen na 4,53 kHz, tak, aby výsledná charakteristika byla co nejvíce vyrovnaná. Pomocí programu CrossoverShop určíme hodnoty pasivních součástek.

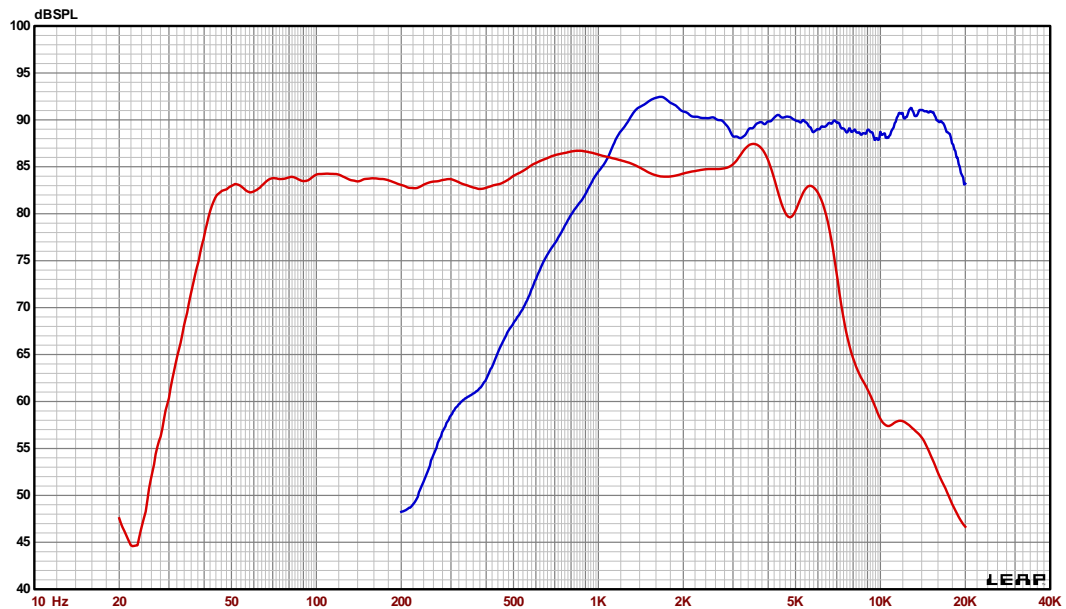
4.12.2. NÁVRH HORNÍ PROPUSTI

Postup je obdobný jako při navrhování DP. Naimportování změřených kmitočtových průběhů do programu, vybrání příslušného typu aproximace (**Butterworthova**) a zadání mezního kmitočtu filtru. Program vygeneruje funkční bloky filtru, ze kterých se dále vygenerují obvody o konkrétních hodnotách součástek. Opět stačí jeden ARC obvod pro dosažení strmosti 24 dB/oktávu. Mezní kmitočet výhybky vyšel na 1,55 kHz.

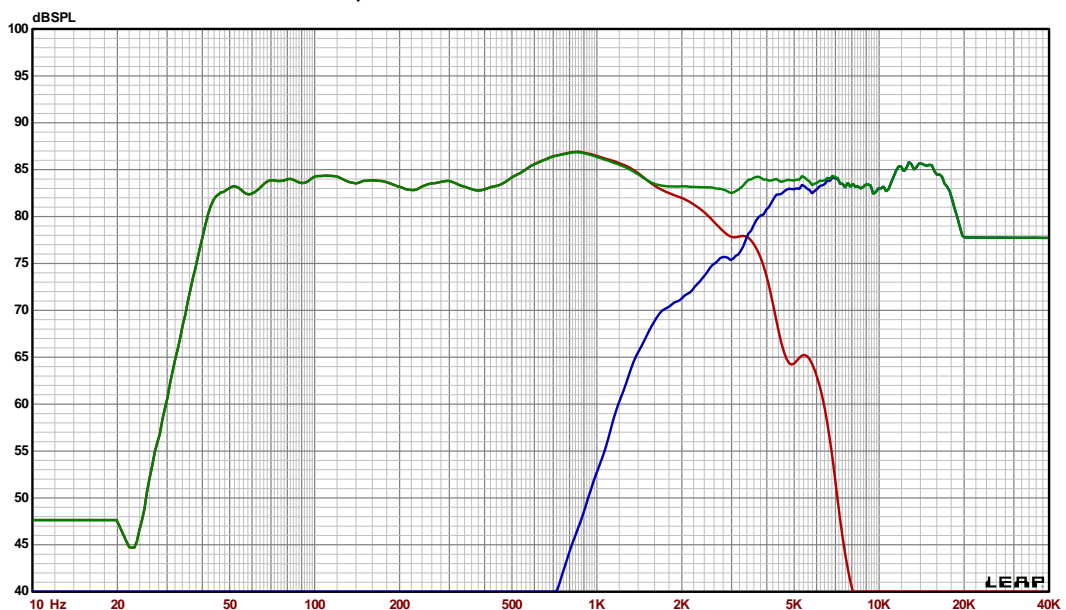


Obr. 15: ARC filtr 2. řádu typu horní propust.

Na následujících grafech jsou zobrazeny frekvenční průběhy měničů před a po zapojení výhybek. Průběhy jsou naměřené ve vzdálenosti 1 m od soustavy v ose výškového reproduktoru při výkonu 1 W. Výhybka je počítána a optimalizována na vzdálenost soustavy 0,75 m od posluchače.

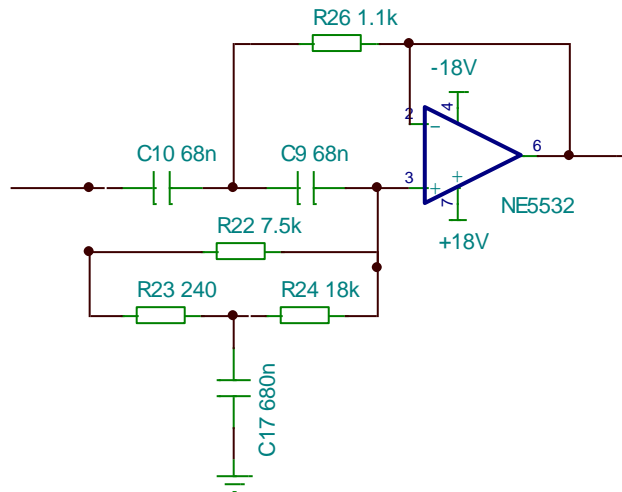


Obr. 16: Naměřené závislosti vyzářeného akustického tlaku měničů na frekvenci v soustavě.



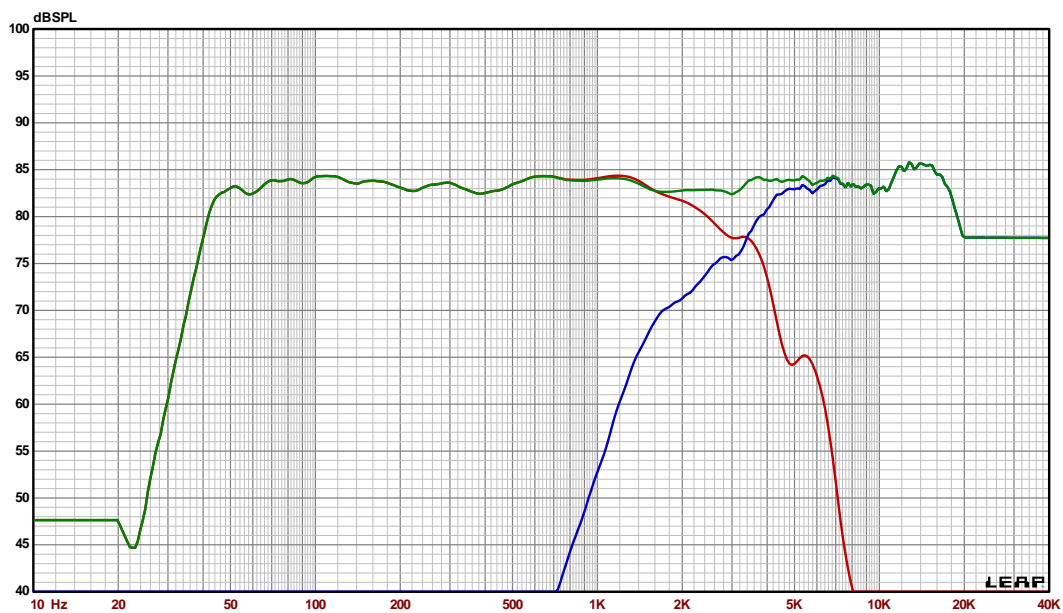
Obr. 17: Hladina akustického tlaku soustavy s navrženými výhybkami v simulačním programu (zeleně).

Pro doladění průběhu, je potřeba srazit hrbol mezi frekvencemi 500 Hz a 1,6 kHz. Pro tento účel se využil ARC filtr navržený v programu Crossover Shop, který má na frekvenci 1 kHz útlum 3dB.



Obr. 18: Filtr s útlumem 3dB na frekvenci 1kHz.

Výsledný frekvenční rozsah se pohybuje mezi mezními kmitočty 50Hz až 18kHz s maximálním zvlněním 3 dB.

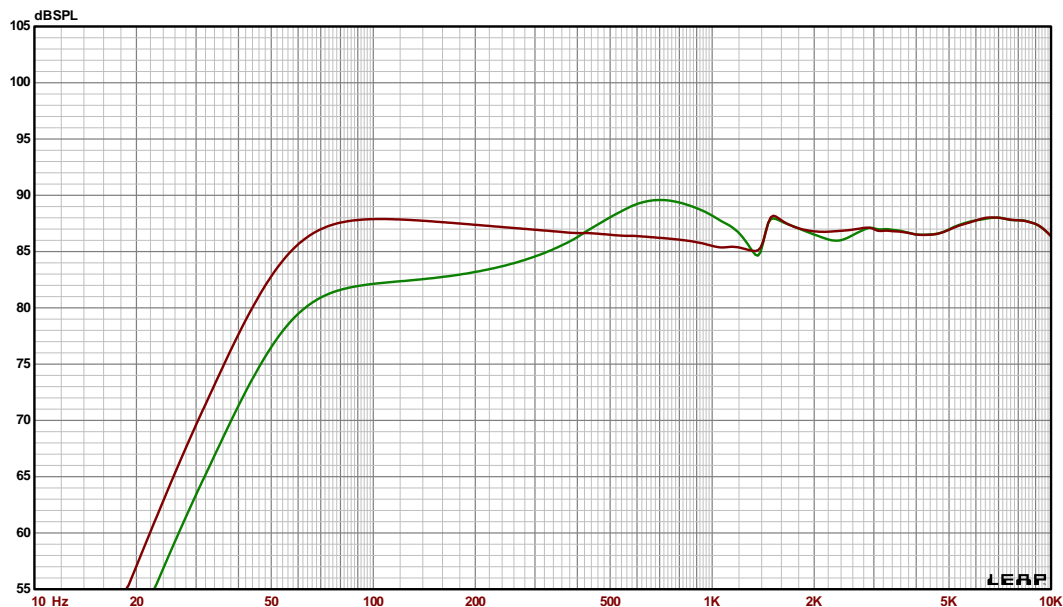


Obr. 19: Výsledný průběh frekvenční charakteristiky soustavy v simulačním programu.

4.13. EKVALIZACE

Při navrhování reprosoustavy je snaha o co nejvyrovnanější kmitočtovou charakteristiku mezi mezními kmitočty. Ty se nacházejí v místech, kde charakteristika vykazuje poklesu o -3 dB. Měříme-li reproduktor umístěný v ozvučnici s nekonečně velkou přední deskou, uplatňují se zde odrazy zvukových vln od této desky a celkový akustický tlak vyzářený do prostoru

vzroste o 6 dB oproti měření, bez nekonečné přepážky. Při umístění měniče do ozvučnice s konečným rozměrem a měříme-li charakteristiku ve volném prostoru, uplatňuje se tento nárůst pouze na vyšších frekvencích o vlnové délce odpovídajících zhruba polovině rozměru přední desky ozvučnice. Pro reprobedny jsou typické poklesy SPL o 6 dB v pásmu frekvencí kolem 500 Hz a méně [12].

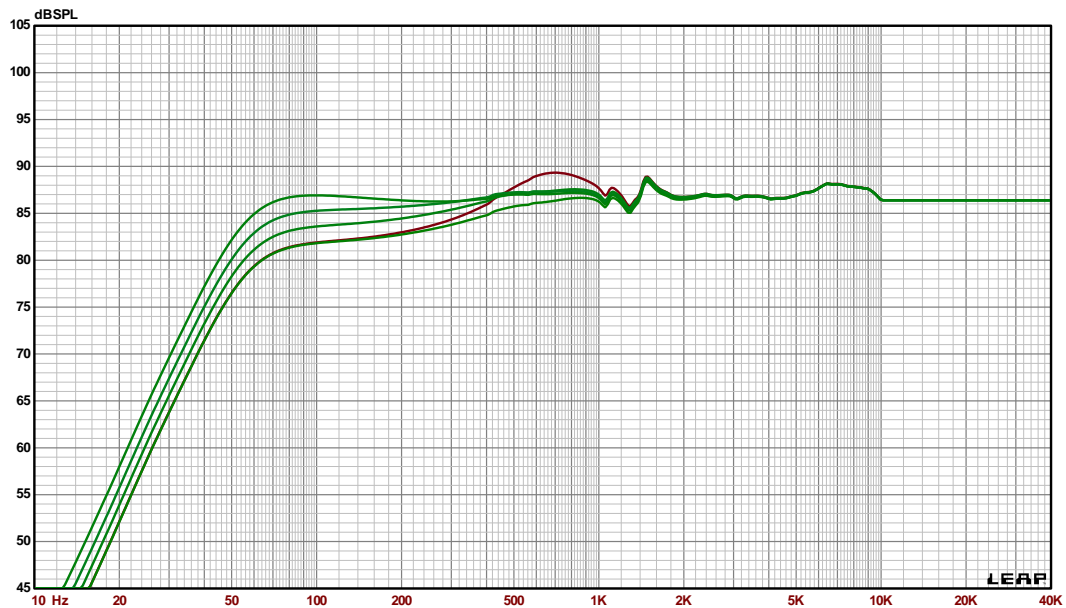


Obr. 20: Pokles o 6 dB na nízkých kmitočtech při umístění reprobedny ve volném prostoru (zelený průběh, graf ze simulace).

V reálné situaci se však nenacházíme ani v jednom případě. Obvykle se pak bavíme o umístění reprobedny v poloprostoru, čtvrtprostoru aj. Pro tyto případy se při návrhu používají kmitočtové filtry použité jako ekvalizéry. Ty mají za úkol zvednout požadovanou úroveň akustického tlaku na takovou hodnotu, aby byla výsledná kmitočtová charakteristika co nejvyrovnanější při konkrétním umístění reprobedny v prostoru.

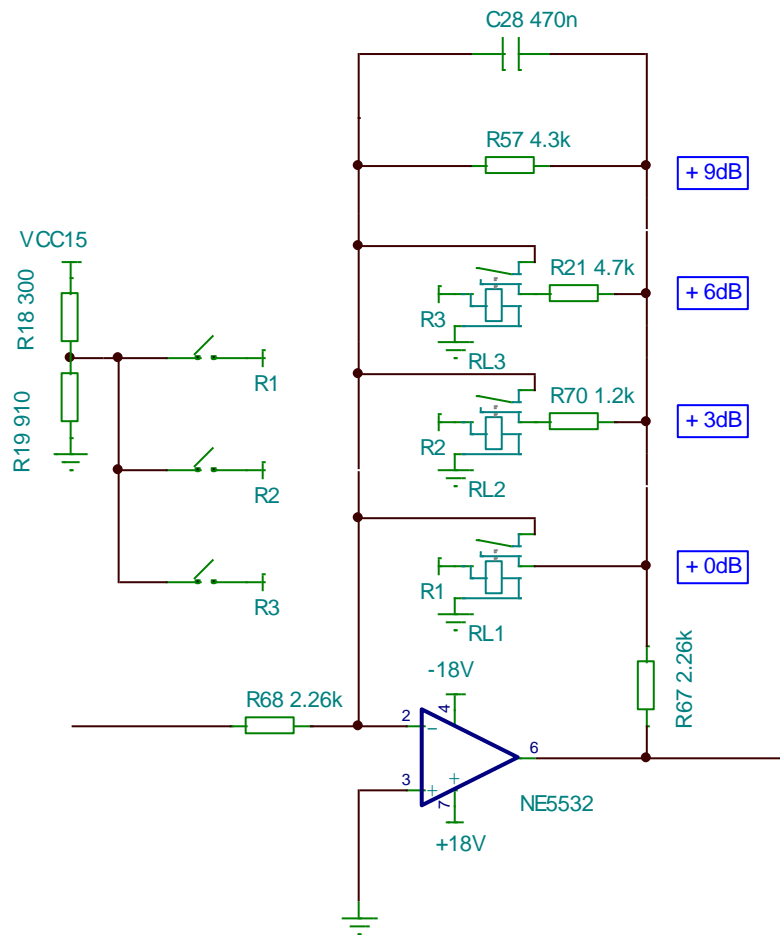
K vyrovnávání kmitočtové charakteristiky jsem zvolil filtr, který umožňuje nastavovat zesílení o 3 dB na frekvencích do 440 Hz (místo kde se obě křivky protínají) ve čtyřech krocích.

K navrhnutí filtrů opět posloužil program Crossover Shop, který je součástí balíku LEAP 5 od společnosti LinearX.



Obr. 21: Možnosti změny zesílení basové části ve čtyřech krocích (zeleně), původní charakteristika bez ekvalizací (červeně).

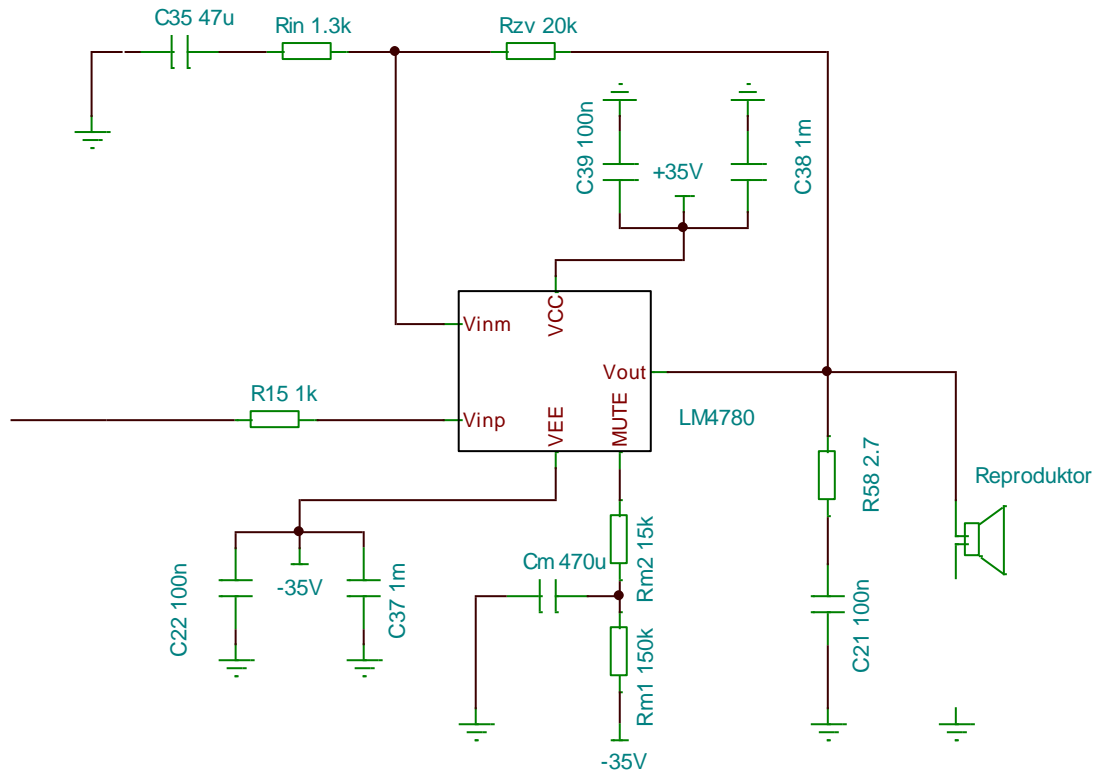
Filtr je typu Lowpass shelving (LEQ) s mezní frekvencí 440 Hz a jeho zesílení je nastavitelné pomocí přepínání velikostí odporů ve zpětné vazbě. Tyto odpory jsou spínány pomocí jazýčkových relé, které jsou ovládány stejnosměrným napětím. Toto opatření je použito opět z důvodu možnosti naindukování brumu do signálových vodičů, které by hrozilo, pokud by vedli do ovládacího panelu nacházejícího se blízko transformátoru.



Obr. 22: Schéma zapojení ekvalizačního filtru.

4.14. KONCOVÝ ZESILOVAČ

Použit byl již dříve popsáný integrovaný obvod koncového zesilovače LM4780 v základním zapojení podle katalogového listu [18].



Obr. 23: Schéma zapojení jedné větve koncového zesilovače.

4.14.1. VÝPOČET ZESÍLENÍ

Chceme-li nastavit zesilovač tak, aby byl schopen zesilovat s maximálním výkonem, musíme spočítat a nastavit jeho zesílení. Pracujeme-li v průběhu signálové cesty se signálem o velikosti napětí 1,228V (+4dBu) musíme nejprve učit požadovanou velikost napětí pro dosažení potřebného výkonu. Jelikož je obvod LM7480 schopen dodávat až 60 W na jeden kanál, spočteme pro tento výkon odpovídající velikost napětí:

$$P = U_{ef} \cdot I_{ef} = \frac{U_{ef}^2}{R_z} \quad [W] \quad (58)$$

$$U_{ef} = \sqrt{P \cdot R_z} = \sqrt{60 \cdot 8} = 21,9 \text{ V}, \quad (59)$$

kde R_z je odpor zátěže v našem případě měniče.

Obvod LM7480 je zapojen jako neinvertující zesilovač, vztah pro výstupní napětí bude [29]:

$$U_{\text{out}} = \left(1 + \frac{R_{\text{zv}}}{R_{\text{in}}}\right) U_{\text{in}} [\text{V}], \quad (60)$$

hodnota odporu ve zpětné vazbě R_{zv} byla zvolena 20 k Ω , dopočteme hodnotu vstupního odporu R_{in} pro dosažení požadovaného zisku obvodu.

$$R_{\text{in}} = R_{\text{zv}} \left(\frac{U_{\text{out}}}{U_{\text{in}}} - 1\right)^{-1} = 20000 \left(\frac{21,9}{1,228} - 1\right)^{-1} = 1,18 \text{ k}\Omega \quad (61)$$

Při takovémto zesílení bychom se pohybovali na hraně možností obvodu, použijeme tedy vstupní odpor R_{in} o velikosti 1,3 k Ω . Výsledné zesílení bude:

$$A = \frac{R_{\text{zv}}}{R_{\text{in}}} = \frac{20000}{1300} = 15,4 \quad (62)$$

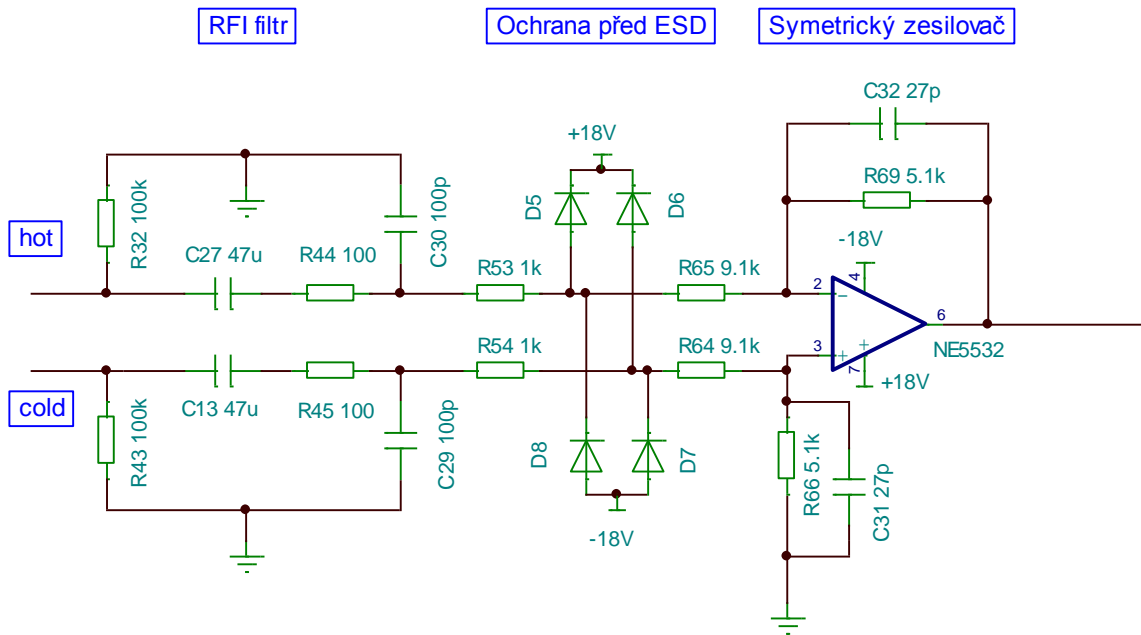
Obvod LM4780 se nachází na pokraji stability při zesílení 10 a méně [18], v našem výpočtu se pohybujeme bezpečně nad touto hladinou.

4.15. LEVNÉ VARIANTY VYBRANÝCH OBVODŮ

Předmětem diplomové práce je i cenová optimalizace soustavy. Při výběru standartních komponent bylo hleděno nejen na cenu, ale i na kvalitu součástek. Vybrané obvody by se daly nahradit a realizovat i levnějšími způsoby, které jsou schopny zajistit bezproblémový provoz soustavy, avšak pro své některé nedostatky se použití těchto komponent nedoporučuje. Levnější varianty obvodů jsou navrženy tak, aby mohly nahradit dražší varianty bez jakýchkoliv dalších nutných úprav ostatních obvodů.

4.15.1. SYMETRICKÝ ZESILOVAČ

Signál je přiveden na diferenciální zesilovač o vstupním odporu 10k Ω . Zesílení obvodu je rovno jedné polovině (-6dB). Jako operační zesilovače jsou ve všech případech použity nízkošumové obvody NE5532. Řešení je opět opatřeno RFI filtrem a ochranou před elektrostatickým výbojem.



Obr. 24: Symetrický zesilovač s nesymetrickým výstupem.

4.15.2. KOREKCE VSTUPNÍ CITLIVOSTI

Jak již bylo popsáno, pro ochranu, před nežádoucím brumem, který by se mohl naindukovat do signálových vodičů, byl použit k řízení citlivosti obvod THAT 2181. Levnější varianta spočívá v řízení změny zesílení obvodu přímým přepínáním odporů ve zpětné vazbě operačního zesilovače, což vede k jeho změně zesílení. Referenční amplituda napětí signálu je 1,228V (+4dBu). Přivedeme-li na vstup signál o hodnotě +12dBu, potřebujeme korekcí snížit jeho amplitudu o 8dBu na naší referenční úroveň. Vycházíme ze vztahu XY, že:

$$U = 0,775 \cdot 10^{\frac{L[\text{dBu}]}{20}} [\text{V}], \quad (63)$$

$$U = 0,775 \cdot 10^{\frac{-8}{20}} = 0,308 \text{ V}, \quad (64)$$

z vypočítané hodnoty napětí určíme požadované zesílení obvodu:

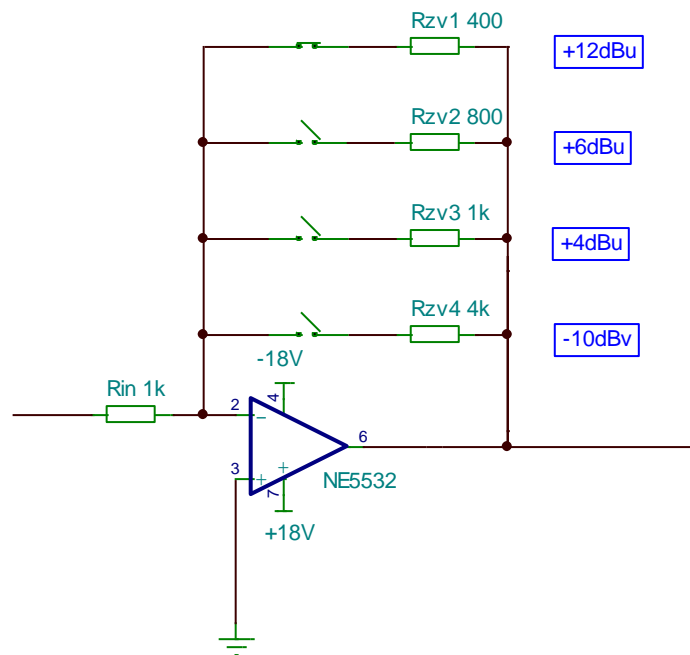
$$A = \frac{0,308}{0,775} \cong 0,4 \quad (65)$$

Při zvolení vstupního odporu $R_{in} = 1\text{k}\Omega$ musíme dopočítat odpor ve zpětné vazbě:

$$R_{zv} = R_{in} \cdot A, \quad (66)$$

$$R_{zv} = 1000,4 = 400\Omega \quad (67)$$

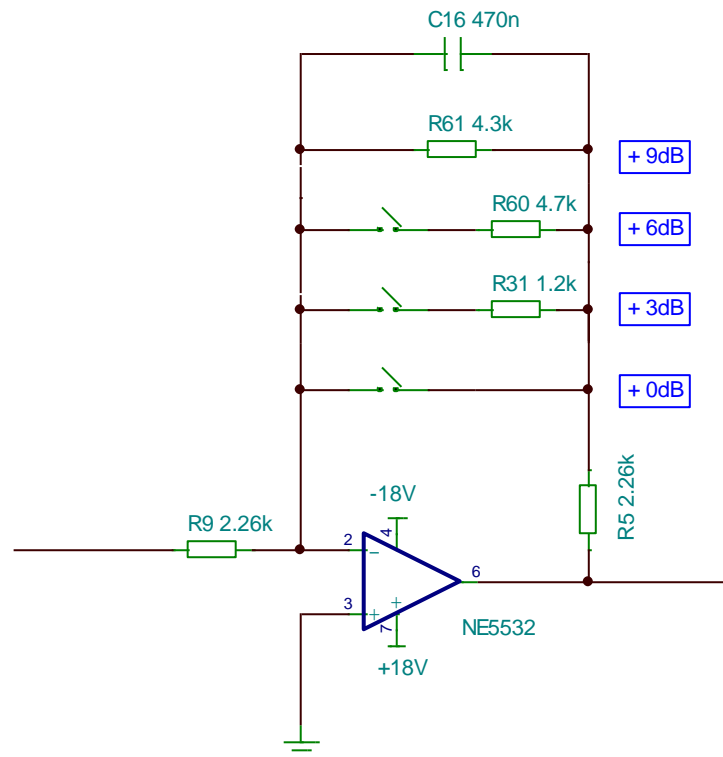
Přivedeme-li do soustavy signál o úrovni +12dBu, musíme přepnout otočný spínač do polohy tak, aby signál protékal ve zpětné vazbě odporem o hodnotě 400Ω. Ostatní polohy jsou spočteny obdobně.



Obr. 25: Schéma zapojení obvodu korekce vstupní citlivosti.

4.15.3. EKVALIZACE

Levnější varianta provedení ekvalizace spočívá ve vypuštění spínacích relé. Signál ve zpětné je veden až na ovládací panel, kde se nachází otočný přepínač. Sepnuté odpory v jednotlivých polohách pak určují výsledný zisk filtru. Při tomto řešení hrozí možnost naindukování nežádoucího brumu z transformátoru nacházejícího se blízko ovládacího panelu stejně, jako by k tomu mohlo dojít i v předchozím případě.



Obr. 26: Schéma zapojení ekvalizačního filtru.

5. REALIZACE OZVUČNICE

K možnosti realizace ozvučnice bylo zapotřebí určitého vybavení. Nářadí se muselo objednat, a zde vyvstanul první problém. Společnost poslala zakoupené nářadí později, než bylo předpokládáno, a tak došlo ke zdržení ve výrobě ozvučnice. Zakoupená fréza navíc nebyla schopna odebírat materiál v malém poloměru o velikosti měničů a bassreflexového nátrubku, což se muselo řešit na zakázku vyrobeným adaptérem na frézu. Na zhotovené a osazené ozvučnici muselo být nadále provedeno měření kmitočtové charakteristiky reproduktorů, které je důležité z hlediska návrhu výhybek. Časový harmonogram měření musel být tedy posunut.

Výroba ozvučnice započala nařezáním MDF desek na potřebný rozměr. Následně byly do přední desky vyfrézovány otvory pro měniče a bassreflexový nátrubek, zároveň byl odebrán materiál kolem otvorů potřebný k zapuštění měničů. Na zadní desku ozvučnice byl vyfrézován otvor pro umístění chladiče a otvor pro umístění ovládacího panelu. Pospojování všech desek bylo zhotoveno pomocí dřevěných špalíčků, otvory pro špalíčky byly vylité lepidlem a po přilnutí jednotlivých stěn k sobě, byly tyto desky dodatečně prošroubovány vruty. K zajištění dostatečné tuhosti ozvučnice, byly v horní části ozvučnice použity dva vyztužovací dřevěné hranoly. Ozvučnice byla po zaschnutí lepidla zevnitř vysilikována v rozích. Hrany přední desky byly sraženy pomocí nástavce k tomu určeného upevněného do frézy. Vytlumovací materiál byl přilepen na boční stěny zevnitř ozvučnice. Veškerá technická dokumentace a obrázky postupu výroby jsou obsaženy v příloze.

6. REALIZACE ELEKTRONIKY

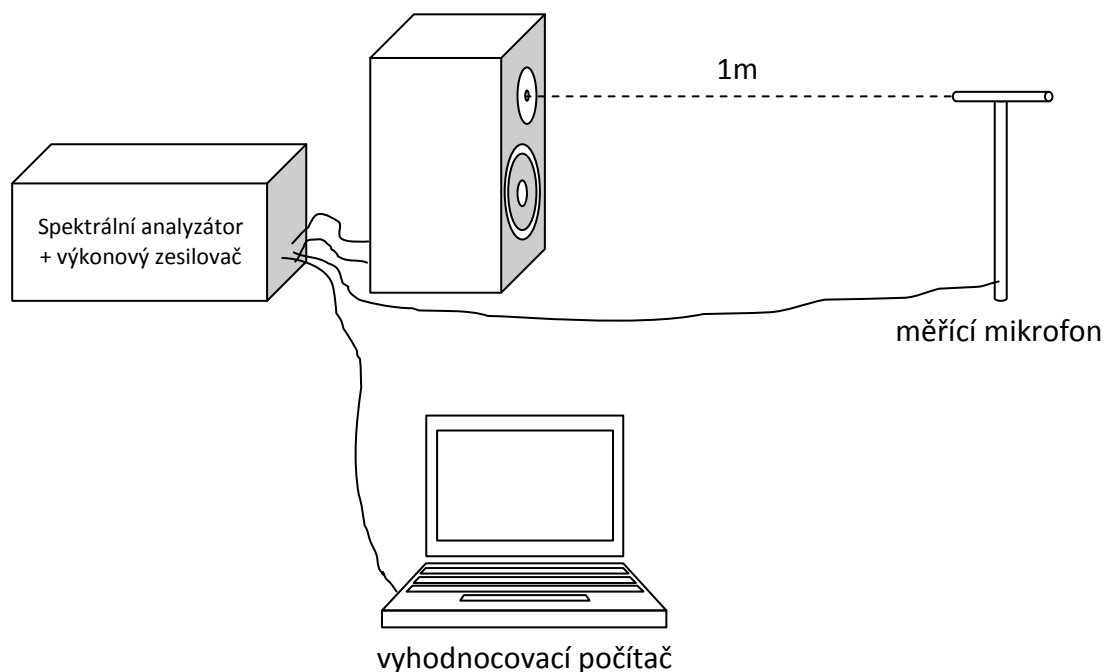
Elektronická část projektu byla nejprve navržena a odsimulována v simulačním programu TINA od společnosti Texas Instrument (kromě návrhu výhybek a ekvalizací, které byly posléze v programu TINA nakresleny a odsimulovány). K dalšímu zpoždění bohužel došlo, když byl odřeknut dohodnutý termín k provedení měření frekvenční charakteristiky měničů osazené v ozvučnici v bezdrazové měřící komoře. Měření tak proběhlo se zpožděním v provizorních podmínkách v učebně. Po proběhnutí měření, byly navrženy výhybky v programu Crossover Shop od společnosti LinearX.

Plošné spoje byly nakresleny v programu Eagle. DPS jsou vzhledem k velkému počtu součástek celkem čtyři a) napájecí část, b) elektronika, c) koncový zesilovací stupeň, d) DPS pro ovládací panel. Všechny plošné spoje jsou oboustranné. Vodivé cesty, ve kterých mohou téct vyšší proudy, byly nakresleny tloušťkou 3mm. U všech DPS byla použita rozlitá měď pro nulový potenciál. Výroba plošných spojů byla z důvodu rozbitého leptacího stroje na ZČU uskutečněna doma svépomocí leptáním fotocitlivých cuprexitových desek osvícených přes vytisknuté motivy na průhledných foliích. Bohužel bylo problémové získat některé součástky, z důvodu předchozích zdržení, se nepodařilo z časových problémů doručit všechny součástky potřebné ke zhotovení elektronických obvodů. Veškeré podklady a schémata jsou obsaženy v přílohách.

7. MĚŘENÍ

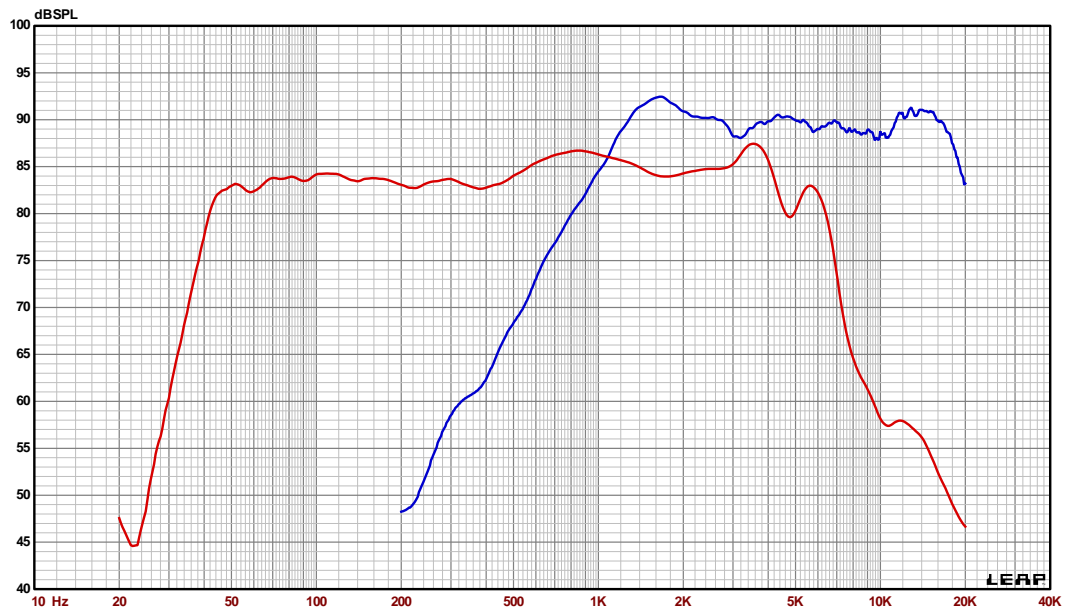
Vzhledem k nesehnání všech elektronických součástek v krátkém časovém limitu nemohlo být měření dokončené soustavy provedeno. Je zde tedy uveden pouze postup měření kmitočtových charakteristik měničů osazených v ozvučnici. Současnou platnou normou zabývající se měřením reproduktorů je ČSN IEC 268 - 1 až 5.

7.1. MĚŘENÍ KMITOČTOVÝCH CHARAKTERISTIK MĚNIČŮ.



Obr. 27: Schéma zapojení měření frekvenčních charakteristik měničů.

Na obrázku č. 27 je schéma zapojení použité při proměrování frekvenčních charakteristik měničů. Měřicí mikrofon musí být umístěn ve vzdálenosti 1 m od soustavy tak, aby byl v ose výškového měniče. Výstup zesilovače dodává do soustavy pseudonáhodný širokopásmový šumový signál, o efektivní hodnotě napětí $U = 2,83 \text{ V}$ (1W při $R_z=8\Omega$). Měřicí mikrofon snímá širokopásmový signál vyzářený soustavou a spektrální analyzátor následně vyhodnocuje zastoupení jednotlivých vyzářených frekvenčních složek. Ve vyhodnocovacím počítači se vykreslí naměřené kmitočtové průběhy. Výsledky tohoto měření jsou k vidění na obr. č. 16.



Obr. 28: Naměřené závislosti vyzářeného akustického tlaku měničů na frekvenci v soustavě.

8. CENOVÁ KALKULACE

Jedním z kritérií návrhu soustavy byla výsledná cena řešené soustavy. K realizované soustavě bylo doplnkově navrženo několik levnějších variant obvodů, které slouží jako alternativy k nejdražším použitým elektronickým obvodům v zapojení.

varianta soustavy	odlišné komponenty	cena	rozdíl	
realizovaná	- symetrický zesilovač - korekce vstupní citlivosti - obvod ekvalizace - transformátor	4 752 Kč	608 Kč	12,8 %
cenově dostupnější		4 144 Kč		

Tab. 22: Cenové srovnání realizované soustavy a soustavy s navrženými levnějšími komponentami.

Na cenově dostupnější variantě soustavy lze ušetřit 608 Kč, osobně bych doporučil variantu s kvalitativně lepšími obvody, uživatel dostane soustavu odolnější proti rušení a s kvalitnějším transformátorem, který se může promítnout do delší životnosti soustavy.

ZÁVĚR

Po nadefinování požadovaných parametrů soustavy byl k návrhu aktivní reproduktorové soustavy pro počítačové pracoviště z velké části využit program Enclosure Shop, který ve velké míře dokázal předpovídat chování soustavy. Postupným doladováním pozic umístění měničů a tvaru ozvučnice se podařilo dosáhnout ozvučnice s přijatelnými rozměry a nízkými difrakcemi na jejích hranách.

Na zrealizované ozvučnici proběhlo změření kmitočtových průběhů reproduktorů umístěných v ozvučnici. Programem Crossover Shop byly navrženy aktivní výhybky, díky kterým se podařilo udržet maximální rozkmit 3 dB na celkové výsledné kmitočtové charakteristice. Při návrhu některých ostatních elektronických obvodů bylo myšleno i na různé ochrany eliminující možné nepříznivé vlivy, které by se mohly projevit na snížení kvality reprodukce, či životnosti soustavy. Proti radiovým vlnám vyskytujících se v okolí je zařazena v symetrickém zesilovači RFI ochrana. Ovládací obvody nacházející se poblíž transformátoru jsou voleny tak, aby jejich ovlivnění rozptylovým tokem transformátoru nemělo vliv na výslednou kvalitu reprodukce. Korekce zisku soustavy je realizována napěťově řízeným operačním zesilovačem, a tak se signálové cesty soustavy nemusí vést až do ovládacího panelu kolem transformátoru. K ovládní ekvalizace jsou obdobně použity jazýčková relátka ovládané stejnosměrným napětím. Většina obvodů je také chráněna diodami proti elektrostatickým výbojům a zkratům. Kompletní elektronika byla simulována v programu Tina.

Vzhledem k problémům při nákupu součástek a při výrobě DPS nemohly být desky plošných spojů v zadaném čase osazeny, a tak není k dispozici finální měření soustavy. Měření reproduktorové soustavy by v budoucnu mohlo být zadáno např. v rámci semestrální práce některému ze studentů předmětu „Audio vizuální technika“.

Jedním z bodů zadání diplomové práce byla cenová optimalizace soustavy. Optimalizace proběhla navržením obvodů přesně na míru soustavě, zejména transformátoru, chlazení a výběrem optimálních měničů. Výslednou cenu lze případně snížit použitím cenově dostupnějších obvodů, které jsou v práci teoreticky navrženy. Výsledná cena 4 752 Kč za kus činí soustavu při svých parametrech konkurenceschopnou.

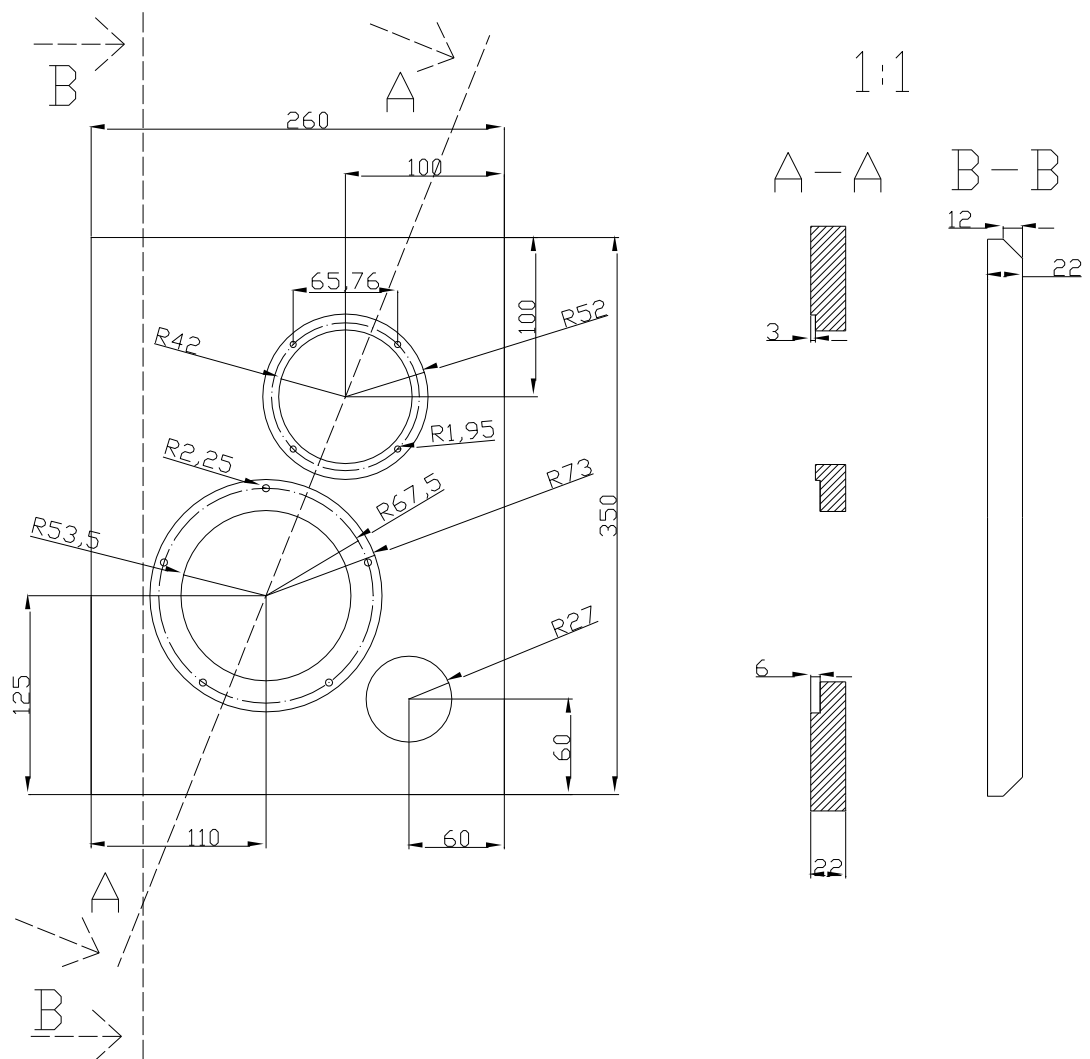
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] *M-Audio BX5 D2 Datasheet* [online]. verze 1. [cit. 2014-05-08] Dostupné z: <<http://www.m-audio.com/images/global/manuals/BX5 D2 single - User Guide - v1.0.pdf>>
- [2] *Genelec 8030B Datasheet* [online]. poslední úprava – říjen 2013. [cit. 2014-05-08] Dostupné z: <http://www.genelec.com/documents/opmans/Genelec_8030B_op.man.pdf>
- [3] *KRK Exposé E8B Datasheet* [online]. [cit. 2014-05-08] Dostupné z: <http://www.krksys.com/manuals/expose/expose_datasheet.pdf>
- [4] Encyklopedie fyziky. *Frekvenční charakteristika reproduktoru* [online]. [cit. 2014-05-08]. Dostupné z: <<http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/392-frekvencni-charakteristika-reproduktoru>>
- [5] Encyklopedie fyziky. *Směrová charakteristika reproduktoru* [online]. [cit. 2014-05-08]. Dostupné z: <<http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/393-smerova-charakteristika-reproduktoru>>
- [6] TOMAN, Kamil. *Reproduktory a reprosoustavy*. 1. vyd. Orlová: Kamil Toman, 2003, 212 s. ISBN 859-1459280805.
- [7] Audioweb.cz. *Význam T-S parametrů* [online]. 2012. vyd. [cit. 2014-05-08]. Dostupné z: <<http://www.audioweb.cz/viewtopic.php?id=15624>>
- [8] Visaton - The Loudspeaker Specialist. *W 130 S* [online]. [cit. 2014-05-08]. Dostupné z: <http://www.visaton.com/en/chassis_zubehoer/tiefmittelton/w130s_8.html>
- [9] *Monacor SPH-6M Datasheet* [online]. poslední úprava – 08.05.2014. [cit. 2014-05-08]. Dostupné z: <http://www.monacor.de/pdf/produkte/detailseite_en.php?artikelid=8447>
- [10] *Fatral Pro 6FE100 Datasheet* [online]. [cit. 2014-05-08]. Dostupné z: <http://www.fatralpro.com/products/files/6FE100/8/6FE100_datasheet_8.pdf>
- [11] Visaton - The Loudspeaker Specialist. *SC 10 N* [online]. [cit. 2014-05-08]. Dostupné z: <http://www.visaton.com/en/chassis_zubehoer/ht_kalotten/sc10n_8.html>
- [12] DICKASON, By Vance. *The loudspeaker design cookbook*. 7. edition. Peterborough, N. H: Audio Amateur Press, 2006. ISBN 18-825-8047-8.
- [13] SÝKORA, Bohumil. *Stavíme reproduktorové soustavy I-XLVIII*. Praktická elektronika A Radio 10/1997 – 9/2001. Praha AMARO, 1997 – 2001.
- [14] TROJANPÁ, Zuzana. *Co jsou to HIDAMETS?*. Pokroky matematiky, fyziky a astronomie. Vol. 39, 1994. issue 6, pp. 331-346
- [15] PAZDERA, Luboš. *Mechanické kmitání a vlnění*. Brno. Studijní opory. Vysoké učení technické v Brně.
- [16] VANDERKOOY, J. *A Simple Theory of Cabinet Edge Diffraction*. JAES, Vol. 39. 1991. pp. 923-933

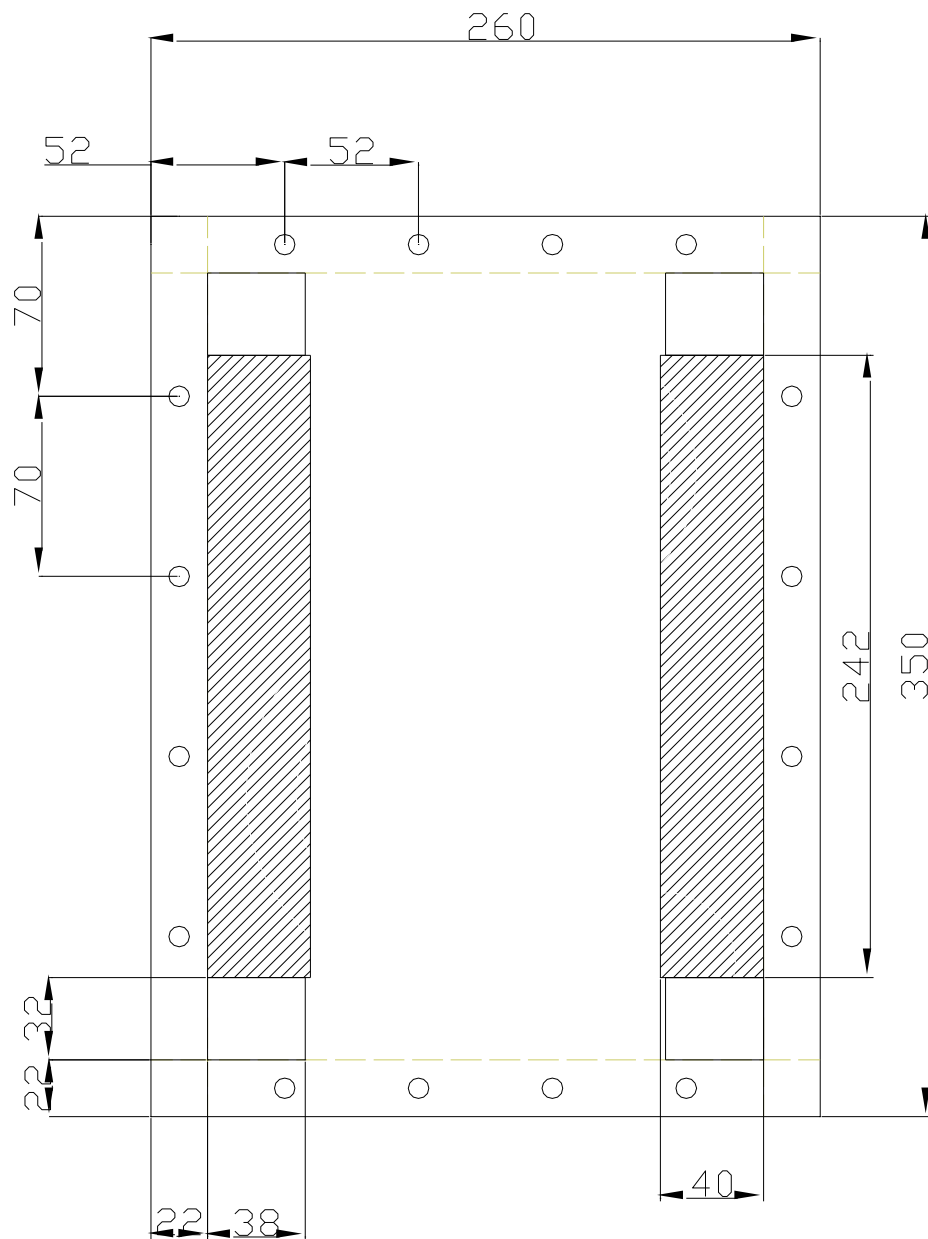
- [17] *NE5532 Datasheet* [online]. poslední úprava – duben 2009. [cit. 2014-05-08] Dostupné z: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ne5532.pdf>>
- [18] *LM4780 Datasheet* [online]. poslední úprava – duben 2013. [cit. 2014-05-08] Dostupné z: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm4780.pdf>>
- [19] *THAT 1206 Datasheet* [online]. revize 00. [cit. 2014-05-08] Dostupné z: <http://www.thatcorp.com/datashts/THAT_1200-Series_Datasheet.pdf>
- [20] *THAT 2181 Datasheet* [online]. revize 02. [cit. 2014-05-08] Dostupné z: <http://www.thatcorp.com/datashts/THAT_2180-Series_Datasheet.pdf>
- [21] RUMSEY, Francis. *Multichannel surround sound systems and operations*. 2001. Technical document. AES Technical Council.
- [22] MORFEY, C. *Dictionary of acoustics*. San Diego: Academic Press, c2001, xvi, 430 p. ISBN 01-250-6940-5.
- [23] Crown Audio. *How Much Amplifier Power Do I Need?* [online]. [cit. 2014-05-08]. Dostupné z: <http://www.crownaudio.com/how_much_power.htm>
- [24] KAZDA. Výpočty chlazení elektronických součástí: s řešenými příklady. Pracovní text.
- [25] *KBU8M Datasheet* [online]. [cit. 2014-05-08] Dostupné z: <http://www.ges.cz/sheets/k/kbu8x_dc.pdf>
- [26] Lenard Audio Institute. *Signal level* [online]. 2013 [cit. 2014-05-08]. Dostupné z: http://lenardaudio.com/education/09_mix_3.html
- [27] VALENTA, Jaroslav. *Úroveň signálu, útlum a zisk*. Plzeň. Učební text. Západočeská univerzita v Plzni.
- [28] HÁJEK, Karel. *Kmitočtové filtry*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2002, 535 s. ISBN 80-730-0023-7.
- [29] FROHN, M. *Elektronika: polovodičové součástky a základní zapojení*. 1. české vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006, 479 s. ISBN 80-730-0123-3.
- [30] LÁNÍČEK, R. *Elektronika obvody, součástky, děje*. Praha: BEN, 1998, 478 s. ISBN 80-860-5625-2.
- [31] LINEARX SYSTEMS INC. LEAP CrossoverShop: Application Manual. USA, 2003.

PŘÍLOHY

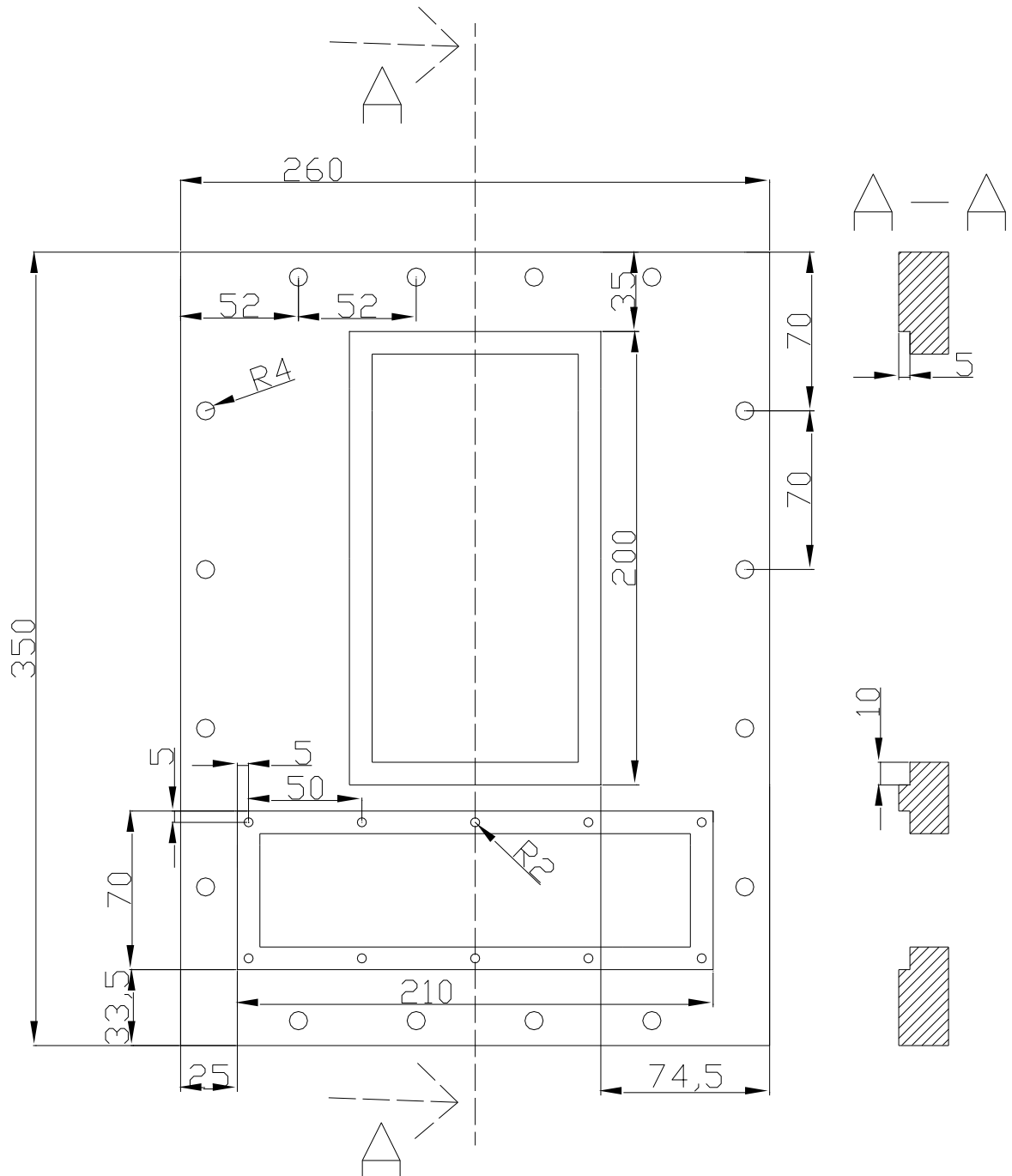
PŘÍLOHA A: TECHNICKÉ VÝKRESY SOUSTAVY



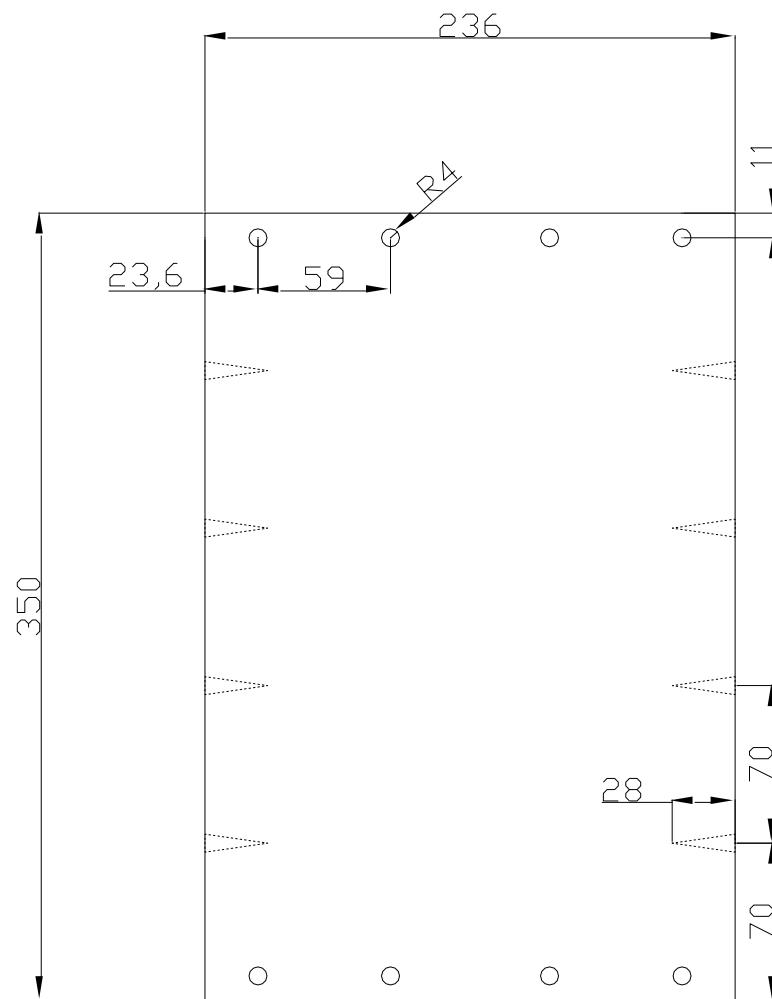
Obr.A1: Výkres osazení přední desky.



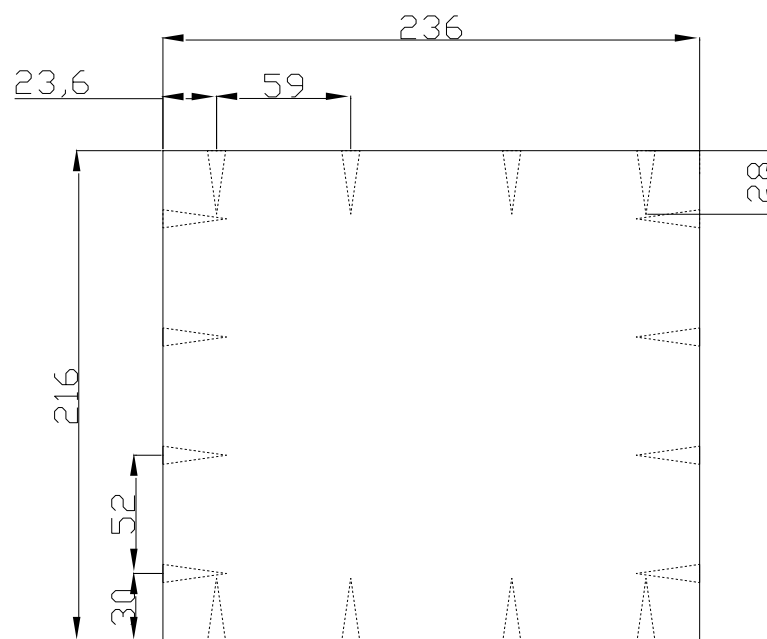
Obr.A2: Výkres umístění tlumení a vyztužovacích hranolků v ozvučnici. Ve výkresu jsou vyznačeny montážní otvory sloužící ke spojování pomocí dřevěných kolíčků.



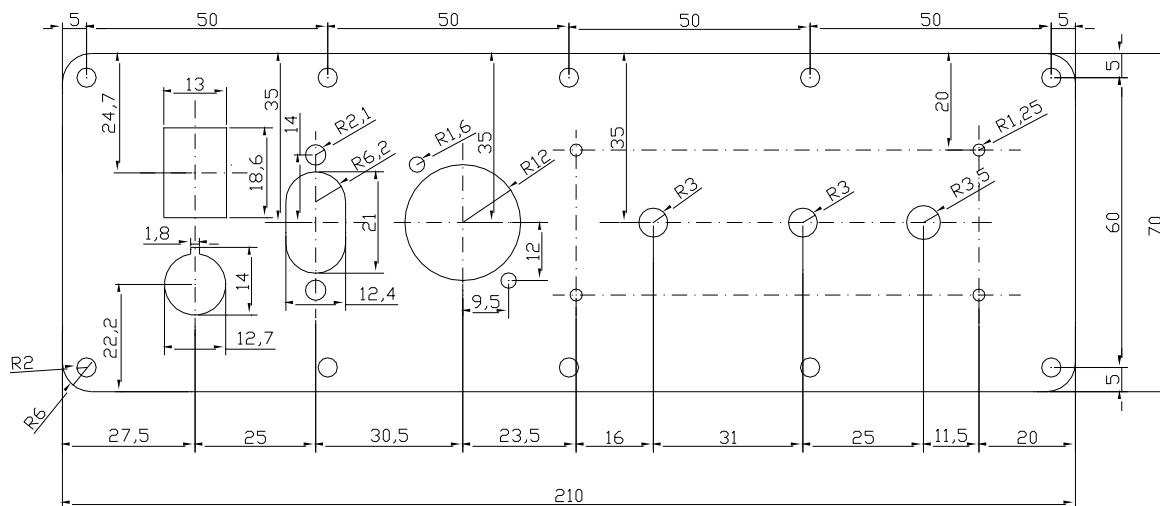
Obr.A3: Výkres zadní stěny ozvučnice.



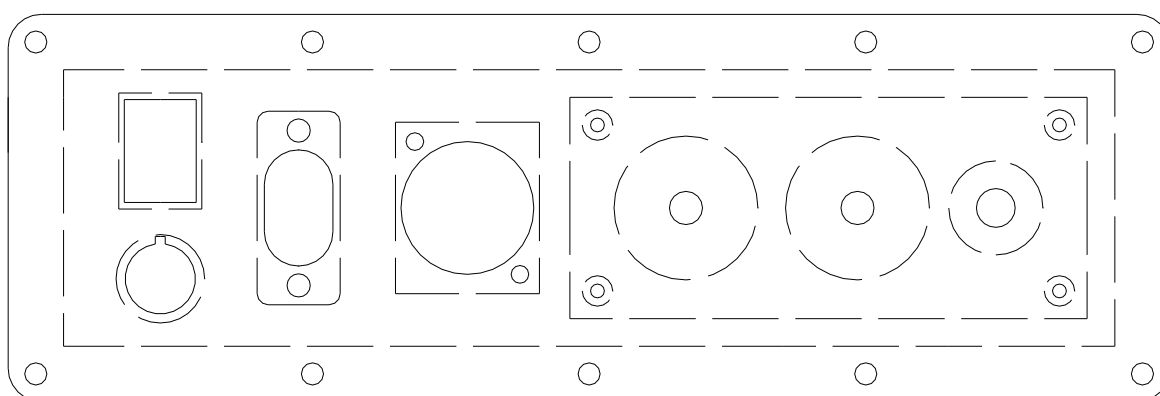
Obr.A4: Výkres boční stěny ozvučnice s montážními otvory (2x).



Obr.A5: Výkres horní a spodní stěny ozvučnice s montážními otvory (2x).



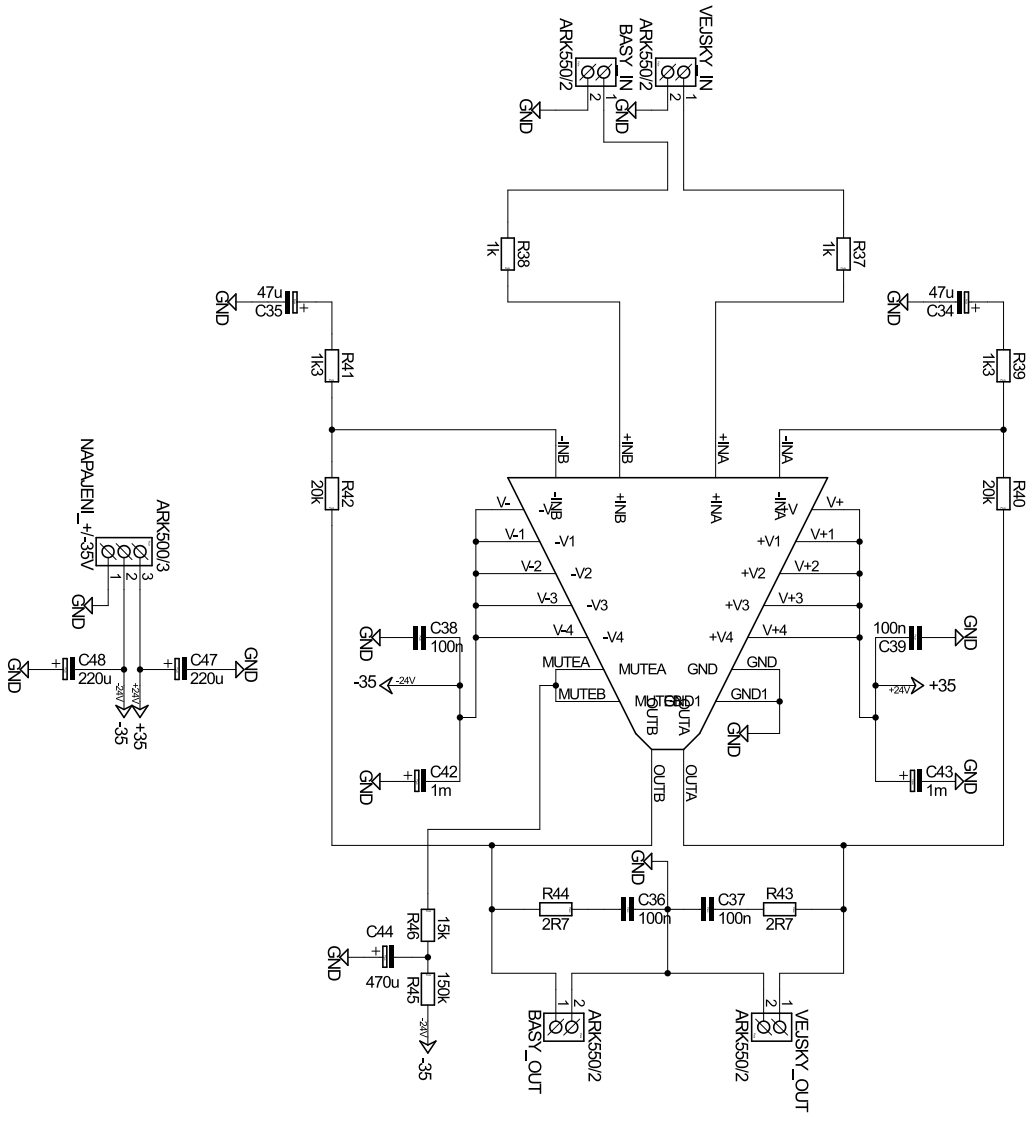
Obr.A6: Výkres ovládacího panelu.



Obr.A7: Výkres osazeného ovládacího panelu.

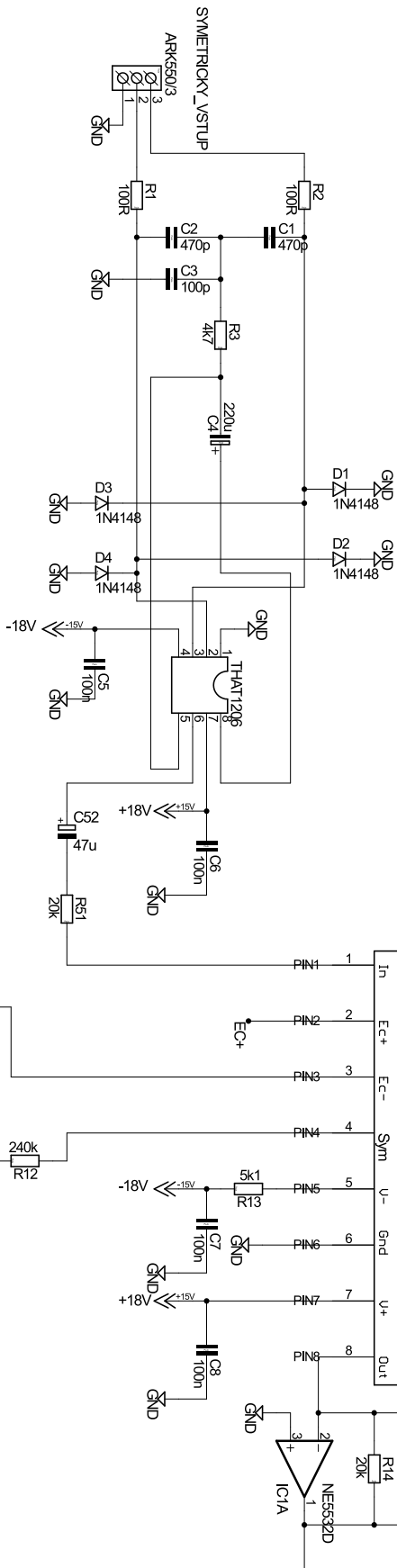
PŘÍLOHA B: ELEKTRONICKÁ SCHÉMATA

Koncový zesilovač - schema



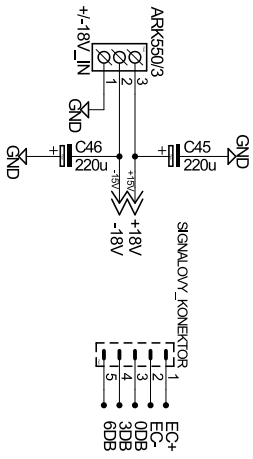
Elektronika - schema

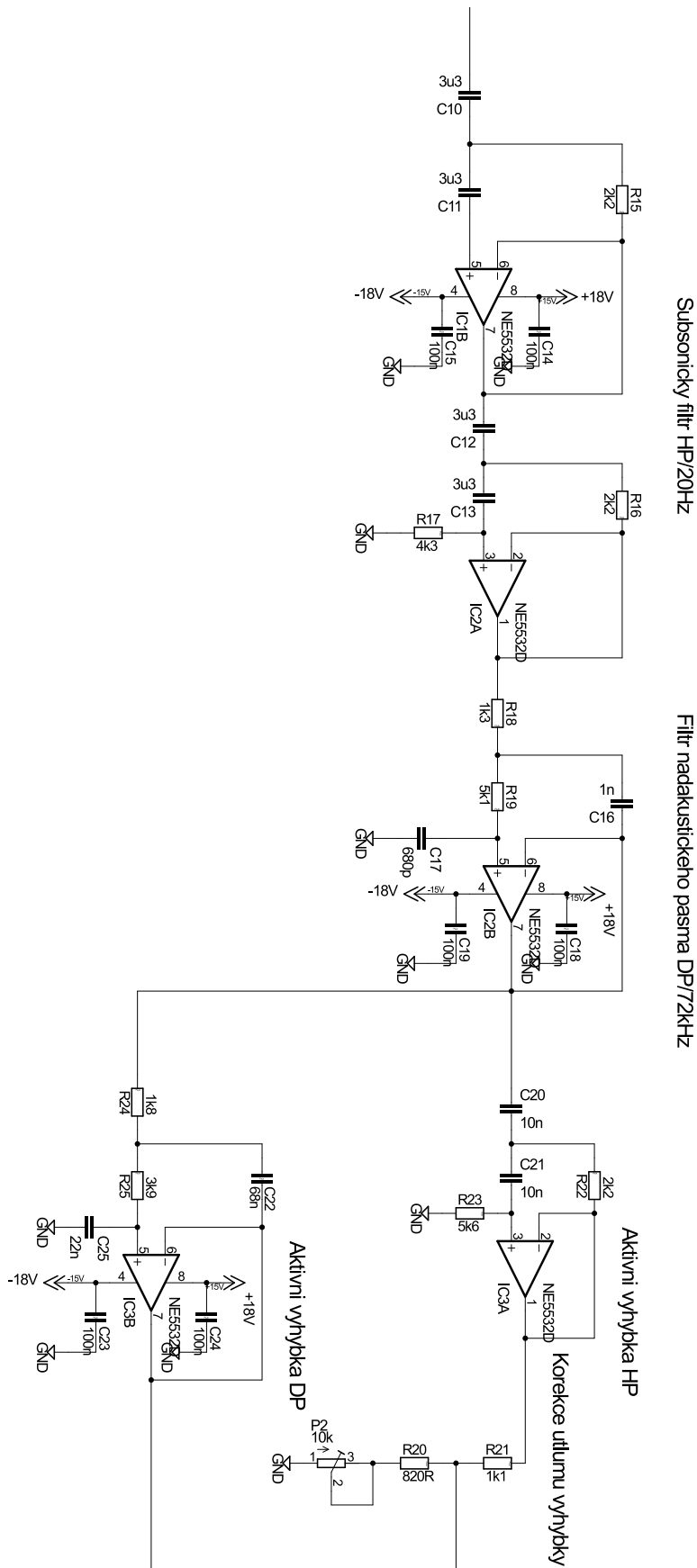
Symetrický zesilovač

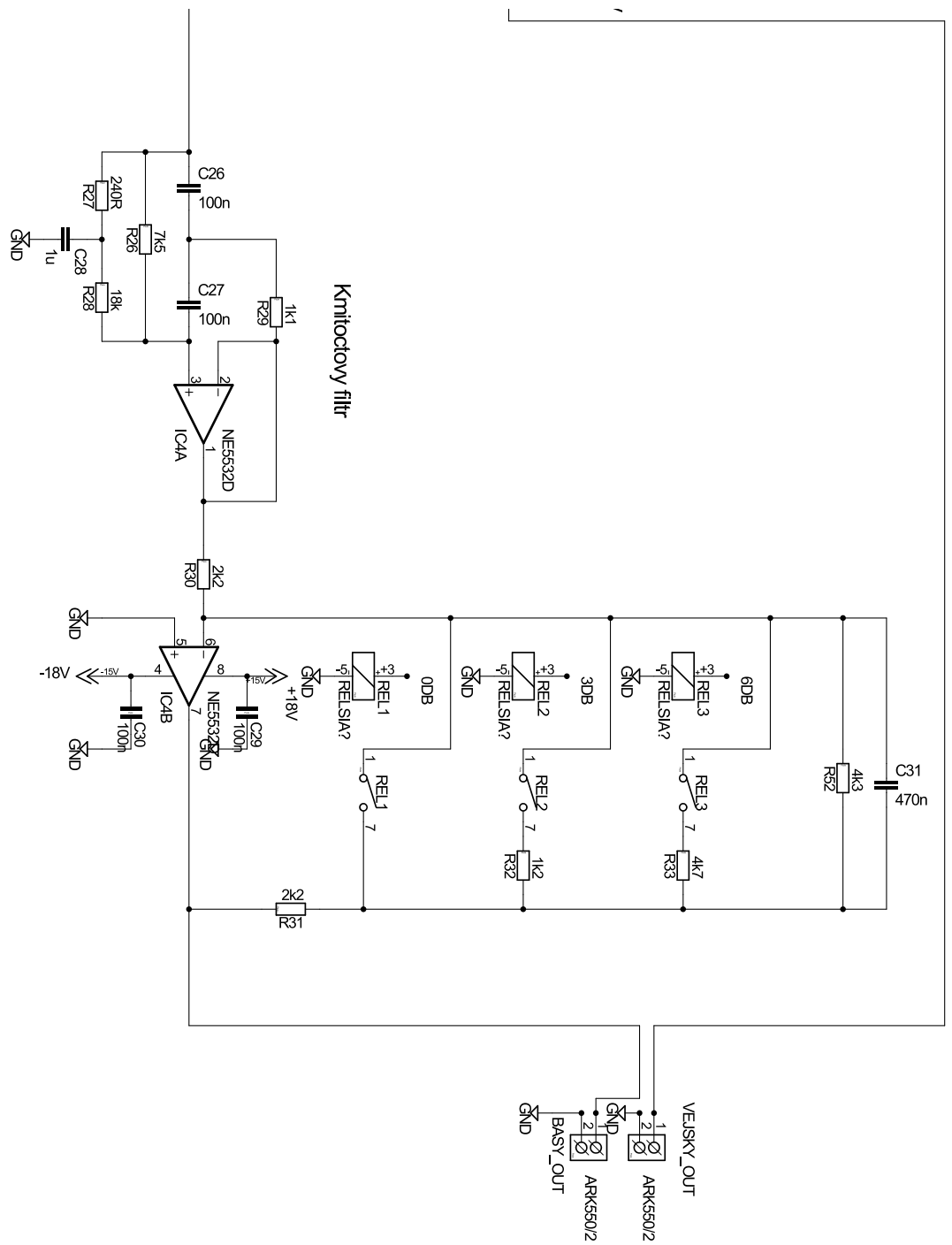


Regulace vstupní citlivosti

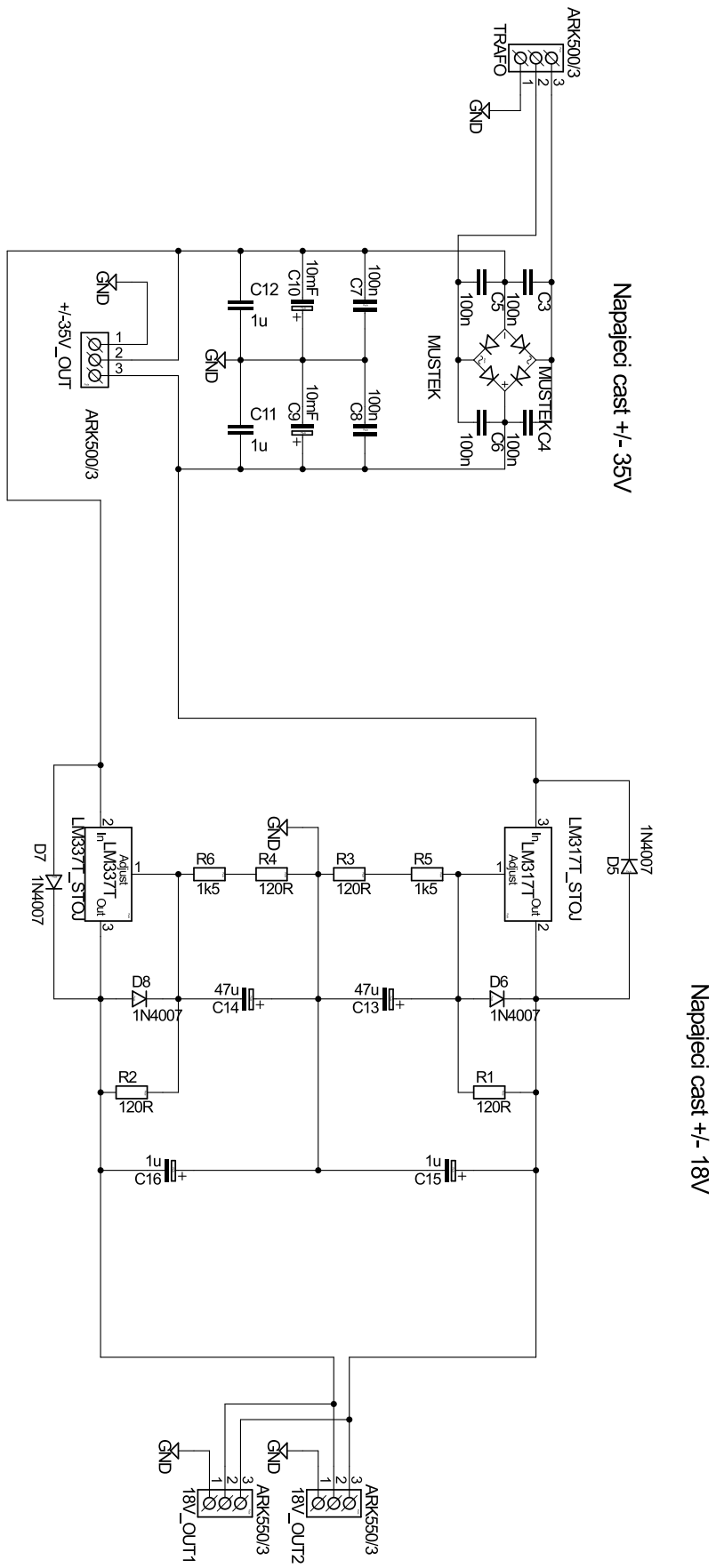
Vstup napajeni z napajeci casti a konektory



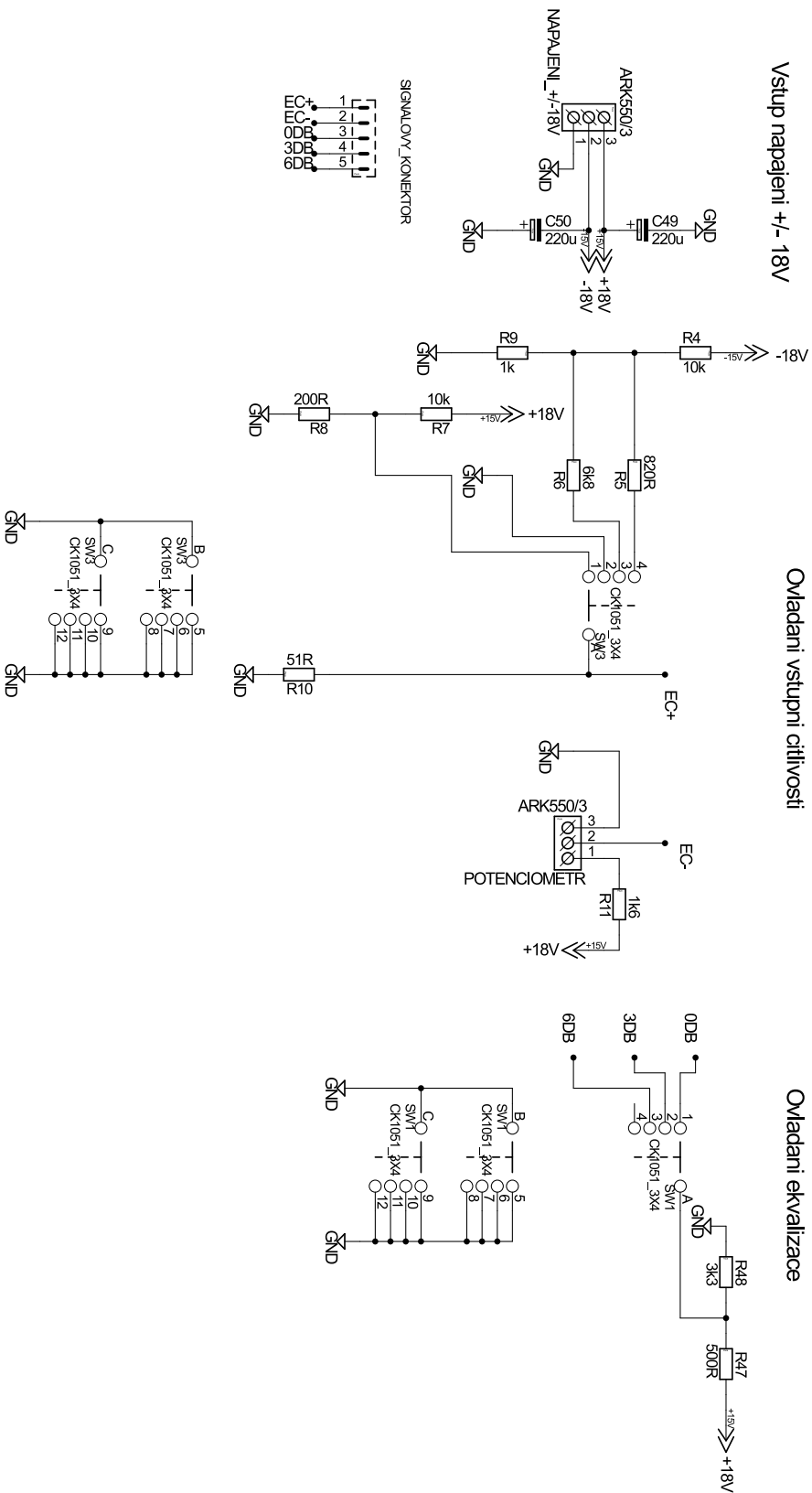




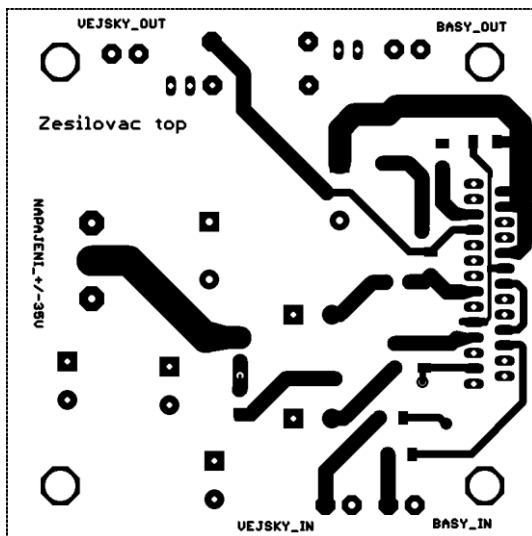
Napajeci cast - schema



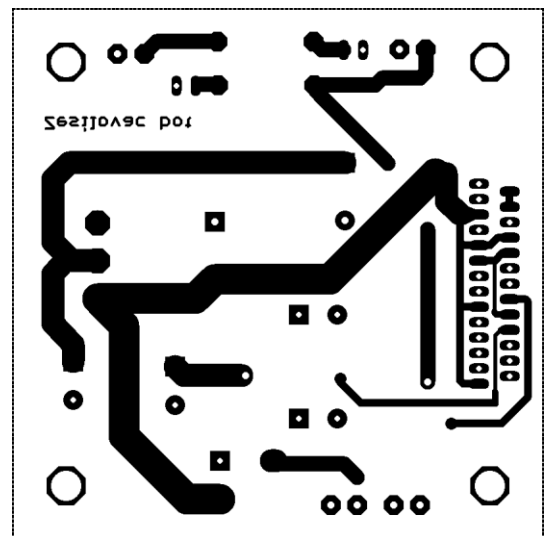
Ovladací panel - schema



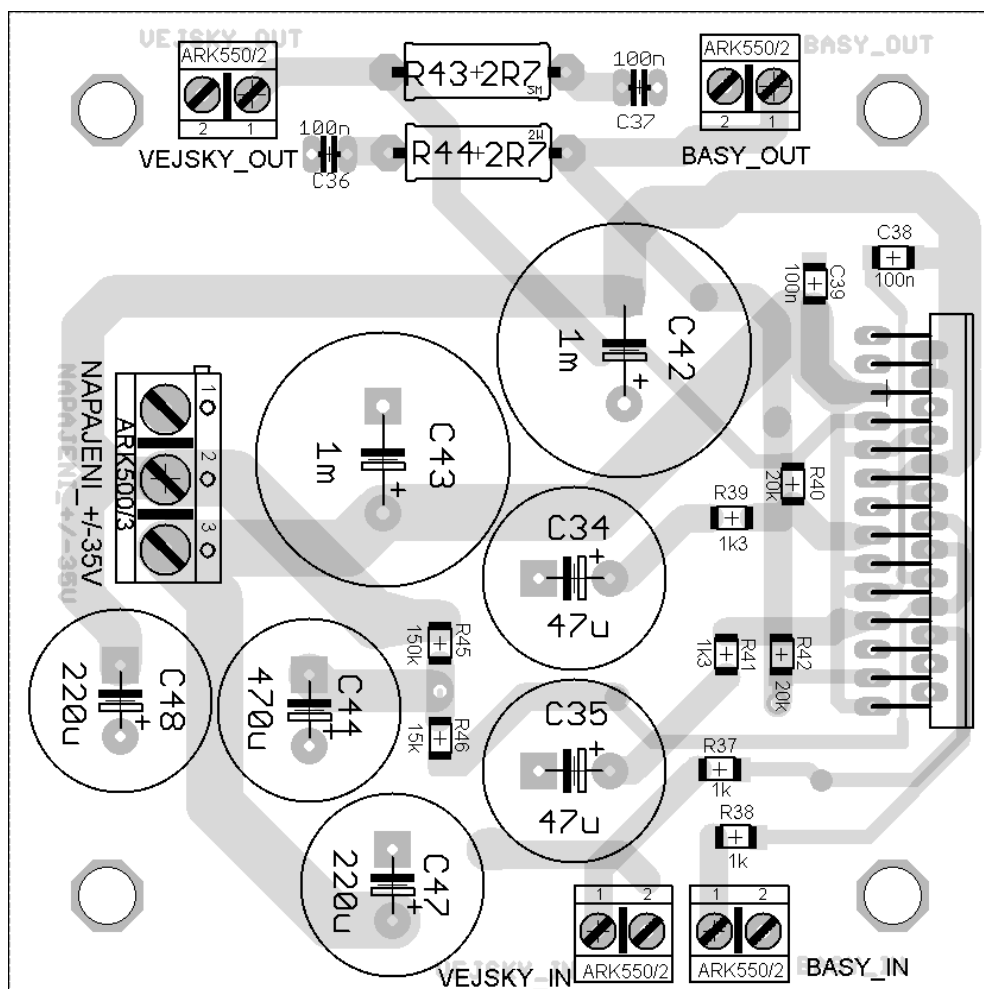
PŘÍLOHA C: DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ



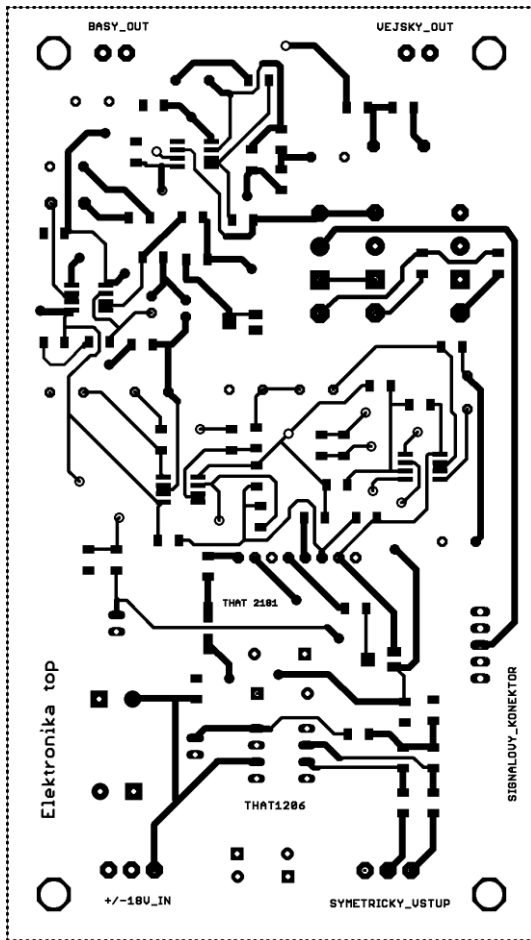
Obr.C1: DPS zesilovače, vodivé cesty, vrchní strana.



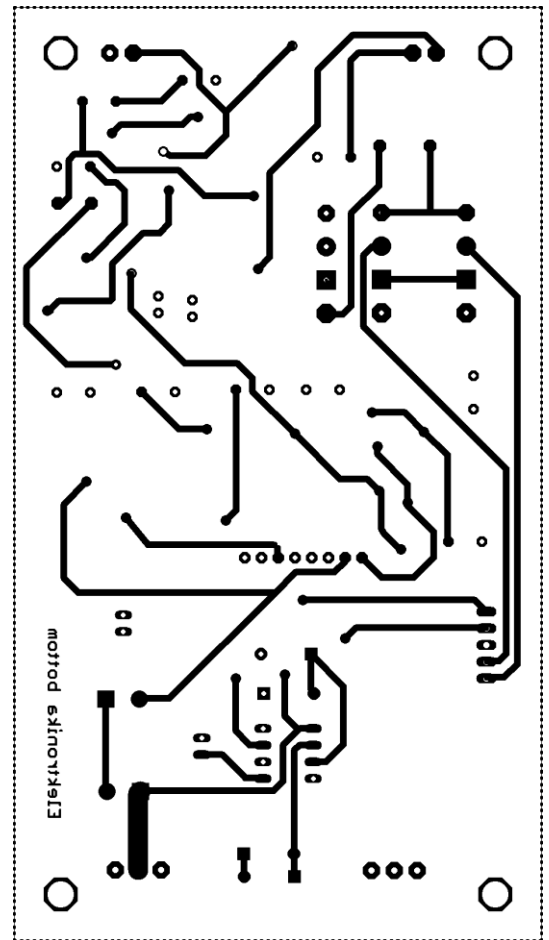
Obr.C2: DPS zesilovače, vodivé cesty, spodní strana.



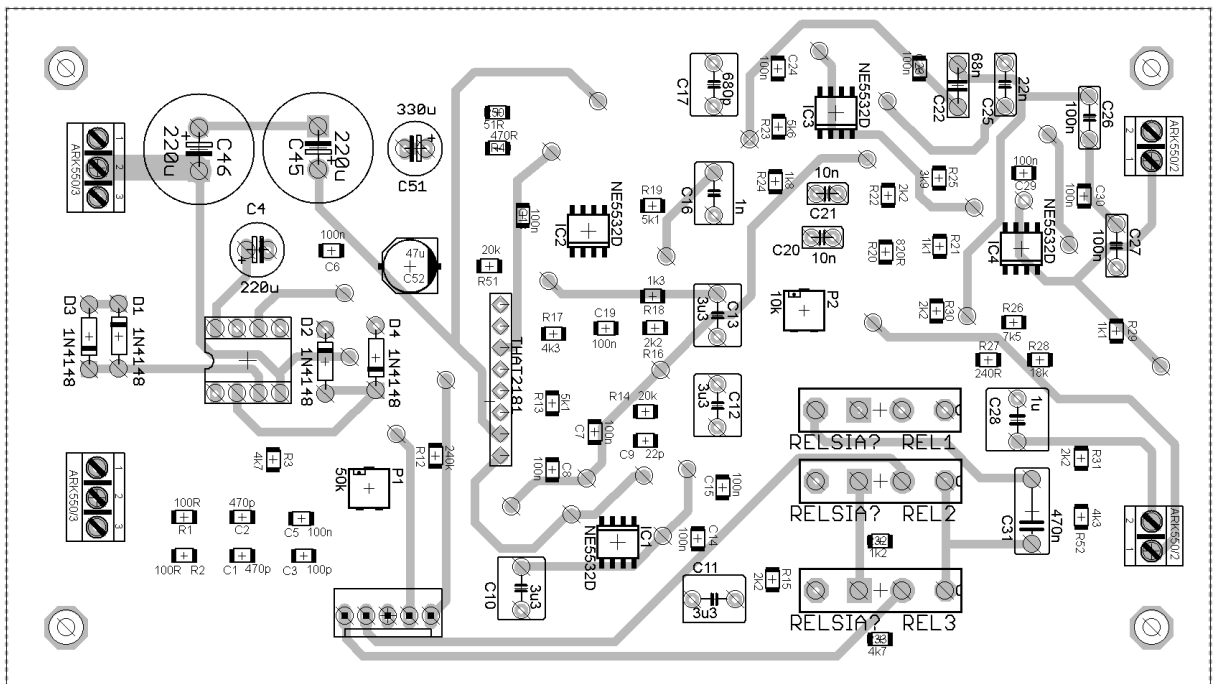
Obr.C3: DPS zesilovače, osazení.



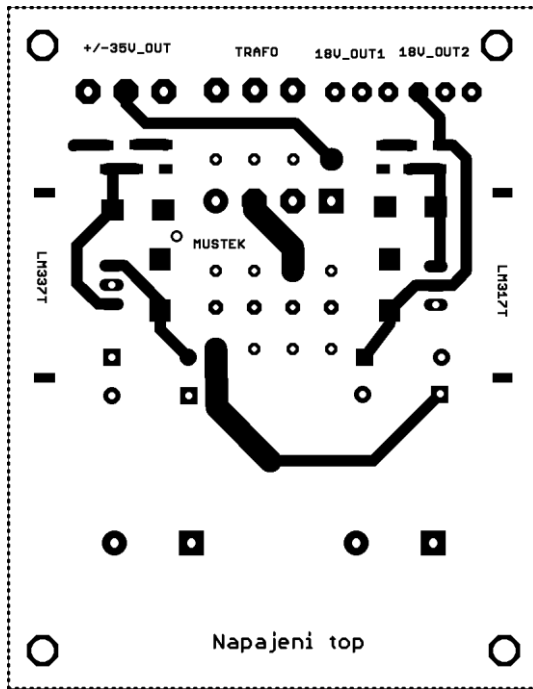
Obr.C4: DPS elektroniky, vodivé cesty, vrchní strana.



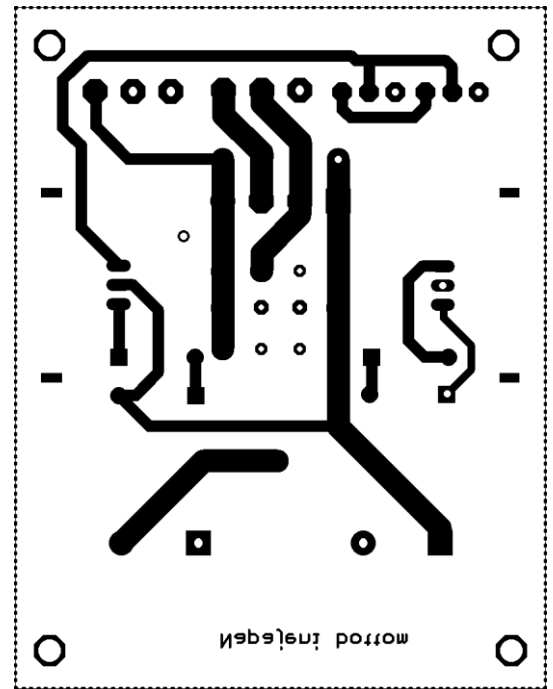
Obr.C5: DPS elektroniky, vodivé cesty, spodní strana.



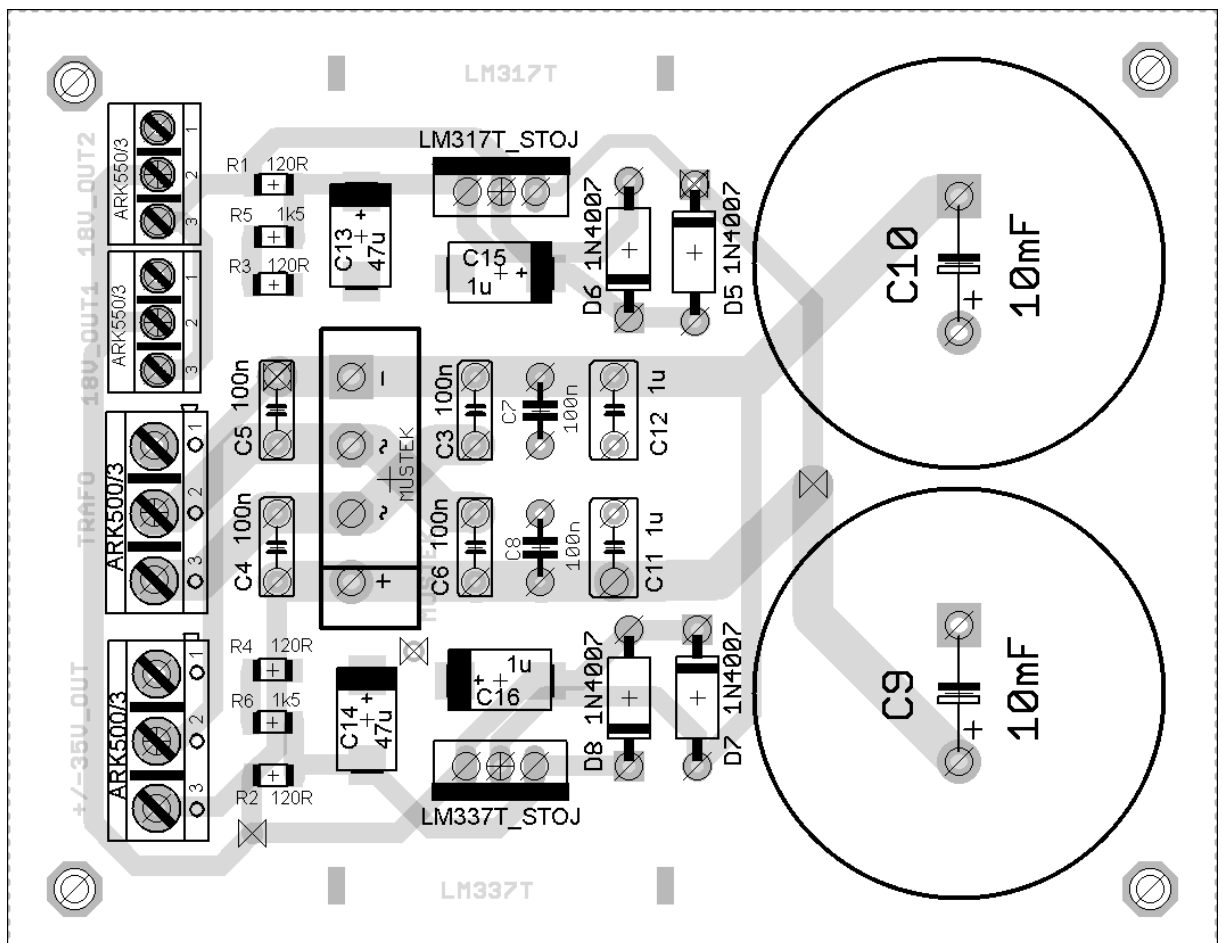
Obr.C6: DPS elektroniky, osazení.



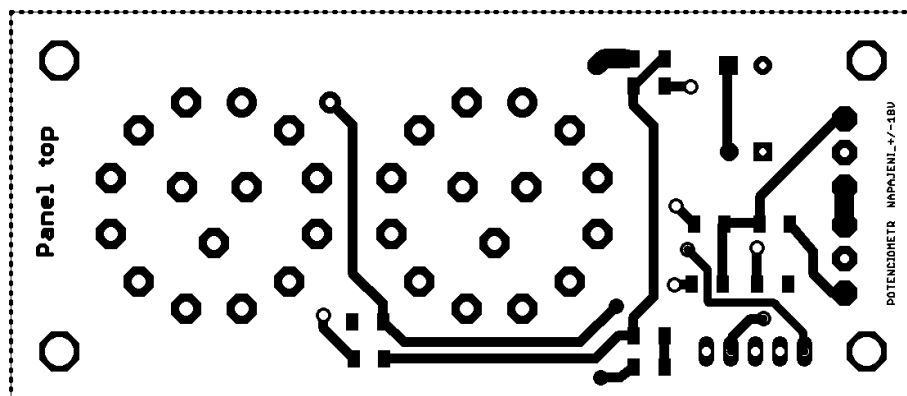
Obr.C7: DPS napájení, vodivé cesty, vrchní strana.



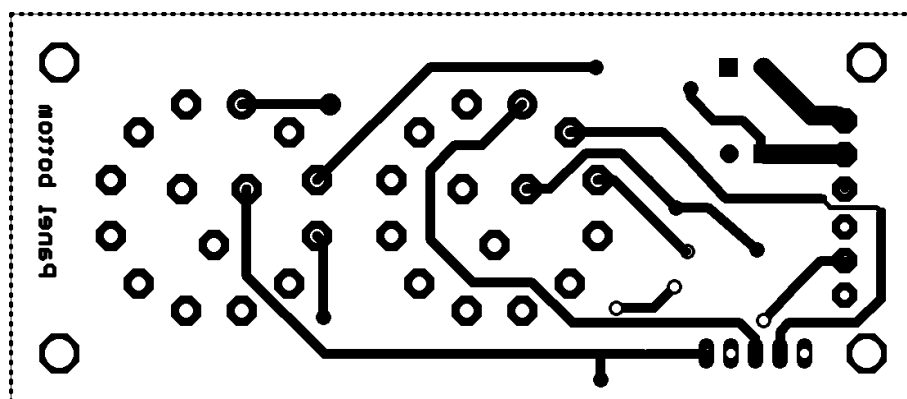
Obr.C8: DPS napájení, vodivé cesty, spodní strana.



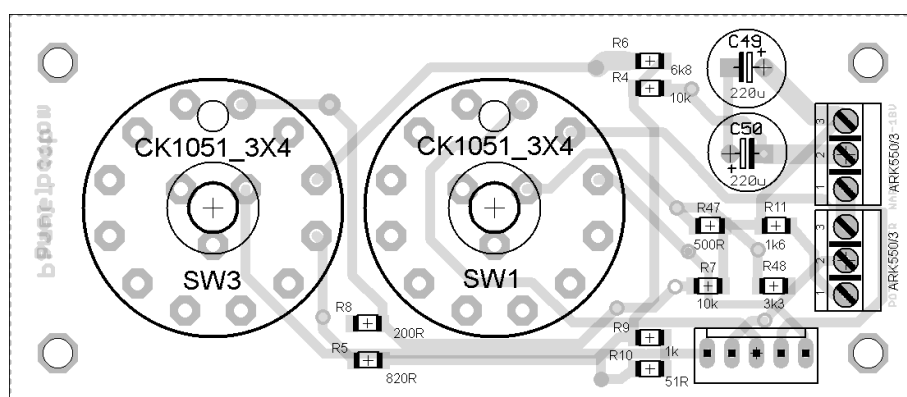
Obr.C9: DPS napájení, osazení.



Obr.C10: DPS panelu, vodivé cesty, vrchní strana.



Obr.C11: DPS panelu, osazení, spodní strana.



Obr.C12: DPS panelu, osazení.

PŘÍLOHA D: SEZNAM POUŽITÝCH SOUČÁSTEK

Kondenzátory						
Množství	Název součástky	Hodnota	Provedení	Pouzdro / rozteč vývodů	Cena za kus (19.4.14)	Cena celkem
2	C1,2	470p	SMD, keramika	1206	1.37	2.74
1	C3	100p	SMD, keramika	1206	1.05	1.05
1	C4	220u	elektrolyt, Jamicon	RM = 2 mm	1.12	1.12
12	C5,6,7,8,14,15,18,19,23,24,29,30	100n	SMD, keramika	1206	0.8	9.6
1	C9	22p	SMD, keramika	1206	1.16	1.16
4	C10,11,12,13	3u3	svitkový	RM = 5 mm	21.5	86
1	C16	1n	svitkový	RM = 5 mm	4.48	4.48
1	C17	680p	svitkový	RM = 5 mm	7.46	7.46
2	C20,21	10n	svitkový	RM = 2,5 mm	6.83	13.66
1	C22	68n	svitkový	RM = 5 mm	1.12	1.12
1	C25	22n	svitkový	RM = 5 mm	1.68	1.68
2	C26,27	100n	svitkový	RM = 5 mm	1.68	3.36
1	C28	1u	svitkový	RM = 5 mm	9.07	9.07
1	C31	470n	svitkový	RM = 7,5 mm	5.6	5.6
2	C34,35	47u	elektrolyt, Jamicon	RM = 5 mm	8.18	16.36
4	C38,39	100n	SMD, keramika	1206	1	4
2	C42,43	1000u	elektrolyt, Jamicon	RM = 7,5 mm	16.24	32.48
1	C44	470u	elektrolyt, Jamicon	RM = 5 mm	3.92	3.92
4	C45,46,47,48	220u	elektrolyt, Jamicon	RM = 5 mm	3	12
2	C49,50	220u	elektrolyt, Jamicon	RM = 3,5 mm	2.35	4.7
1	C51	330u	elektrolyt, Jamicon	RM = 2,5 mm 10V	1.12	1.12
1	C52	47u	elektrolyt, Jamicon SMD	RM = 7,8 mm	2.35	2.35
2	C36,37	100n	keramika, THT	RM = 2,54	2.8	5.6

Odpory						
Množství	Název součástky	Hodnota	Provedení	Pouzdro	Cena za kus (19.4.14)	Cena celkem
2	R1,2	100R	SMD	1206	1.05	2.1
2	R4,7	10k	SMD	1206	1.05	2.1
1	R45	150k	SMD	1206	1.05	1.05

1	R46	15k	SMD	1206	1.05	1.05
1	R28	18k	SMD	1206	1.05	1.05
3	R9,37,38	1k	SMD	1206	1.05	3.15
2	R21,29	1k1	SMD	1206	1.05	2.1
1	R32	1k2	SMD	1206	1.05	1.05
3	R18,39,41	1k3	SMD	1206	1.05	3.15
1	R11	1k6	SMD	1206	1.05	1.05
1	R24	1k8	SMD	1206	1.05	1.05
1	R8	200R	SMD	1206	1.05	1.05
4	R14,40,42,51	20k	SMD	1206	1.05	4.2
1	R12	249k	SMD	1206	0.05	0.05
1	R27	240R	SMD	1206	1.05	1.05
6	R15,16,22,30,31,43	2k2	SMD	1206	1.05	6.3
2	R43,44	2R7	THT, 2W	411	3.36	6.72
1	R48	3k3	SMD	1206	1.05	1.05
1	R25	3k9	SMD	1206	1.05	1.05
1	R49	470R	SMD	1206	1.05	1.05
2	R17,52	4k3	SMD	1206	1.05	2.1
1	R33	4k7	SMD	1206	1.05	1.05
1	R47	510R	SMD	1206	1.05	1.05
2	R10,50	51R	SMD	1206	1.05	2.1
2	R13,19	5k1	SMD	1206	1.05	2.1
1	R23	5k6	SMD	1206	1.05	1.05
1	R6	6k8	SMD	1206	1.05	1.05
1	R26	7k5	SMD	1206	1.05	1.05
2	R5,20	820R	SMD	1206	1.05	2.1
1	potenciometr	5k	-	-	40.66	40.66
1	trimr(P1)	50k	SMD	-	28.22	28.22
1	trimr(P2)	10k	SMD	-	18.03	18.03

Diody						
Množství	Název součástky	Hodnota	Provedení	Pouzdro	Cena za kus (19.4.14)	Cena celkem
4	D1,2,3,4	1N4148	THT	DO35	1.12	4.48
4	D5,6,7,8	1N4007	THT	DO41	1.12	4.48

Integrované obvody						
Množství	Název součástky	Hodnota	Provedení	Pouzdro	Cena za kus (19.4.14)	Cena celkem
1	THAT 1206	-	-	DIP8	225	225
1	THAT2181	-	-	SIP8	148	148
4	NE5532	-	-	SO8	8.18	32.72
1	LM4780	-	-	SIL27	334	334
1	USM mustek	-	-	-	18	18

Konektory						
Množství	Název součástky	Hodnota	Provedení	Rozteč kontaktů	Cena za kus (19.4.14)	Cena celkem
6	svorkovnice	2 kontakty	ARK550/2	RM = 3,5 mm	8.62	51.72
6	svorkovnice	3 kontakty	ARK550/3	RM = 3,5 mm	12.77	76.62
3	svorkovnice	3 kontakty	ARK500/3	RM = 5 mm	8.18	24.54
2	konektor	5 pinů	-	RM = 2,54 mm	2.8	5.6
1	XLR konektor	-	-	-	60	60
1	Napájecí konektor	-	mini	-	24.52	24.52

Měníče						
Množství	Název součástky	Výrobce	Model	Rozměr	Cena za kus (19.4.14)	Cena celkem
1	basový měnič	Visaton	W 130 S	13 cm	538	538
1	výškový měnič	Visaton	SC 10 N	25 mm	389	389

Ostatní						
Množství	Název součástky	Hodnota	Provedení	Pouzdro	Cena za kus (19.4.14)	Cena celkem
3	relé	12V	-	RM = 5 mm	25.76	77.28
1	spínač	230V	-	-	28.1	28.10
2	přepínač	4x3	-	-	84	168.00
1	termistor - ochrana před proud. špičkami	-	THT	-	57	57.00
1	pojistkové pouzdro	-	-	-	42.32	42.32
1	pojistka	4A	trubičková	-	3	3.00
1	transformátor	100 VA	toroidní	-	709	709.00
1	chladič	-	AlMgSi0.5	-	162	162.00

Konstrukční materiál						
Množství	Název součástky	Rozměr	Provedení	Pouzdro	Cena za kus (19.4.14)	Cena celkem
1	tmel	-	-	-	50	50.00
1	vruty	-	-	-	50	50.00
1	MDF desky	0,45 m ²	MDF	-	107	107.00
1	ovládací panel	210 mm x 70 mm	dural	-	484	484.00
1	bassreflexový nátrubek	r = 26 mm, d = 90 mm	plast	-	200	200.00
1	tlumicí materiál	0,00457 m ³	skelná vata 23,5 kg/m ³	-	10	10.00
1	plošné spoje	2,6 dm ²	oboustranný	-	295	295.00

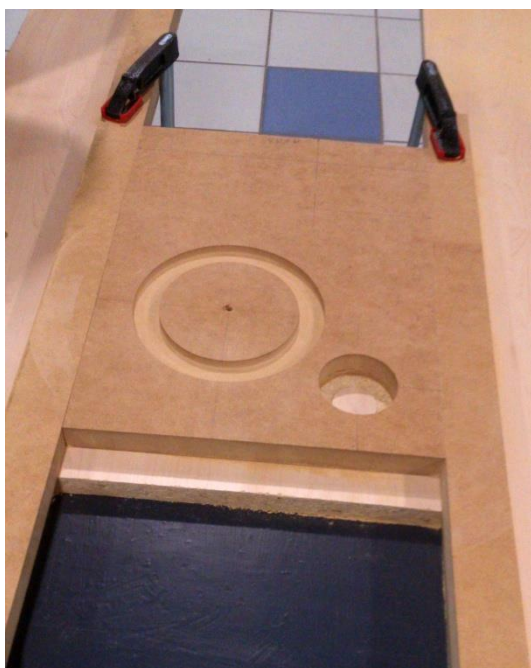
Pozn.: Veškeré uvedené ceny jsou v Kč s DPH.

Celková cena: 4752

PŘÍLOHA E: FOTOGRAFIE SOUSTAVY



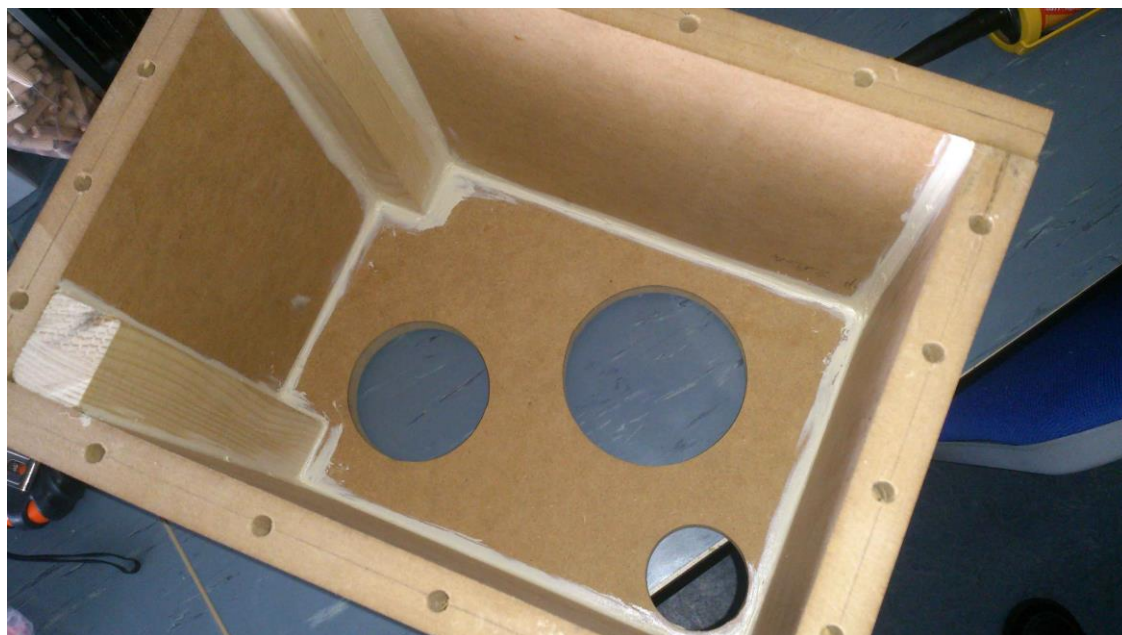
Obr. E1: Nařezané desky ozvučnice.



Obr. E2: Frézování přední desky.



Obr. E3: Neosazená ozvučnice.



Obr. E4: Vysilikonování rohů ozvučnice.



Obr. E5: Umístění tlumení v ozvučnici.



Obr. E6: Nalepené těsnění pod měniči.



Obr. E7: Osazená soustava.