



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY

A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

ANALOGOVÝ STUDIOVÝ KOMPRESOR S PŘELADITELNÝM PÁSMOVÝM FILTREM

ANALOG STUDIO COMPRESSOR WITH ADJUSTABLE BAND-PASS FILTER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Matej Ledvina

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Roman Šotner, Ph.D.

BRNO 2022

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Elektronika a komunikační technologie**

Ústav radioelektroniky

Student: Matej Ledvina

ID: 221339

Ročník: 3

Akademický rok: 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

Analogový studiový kompresor s přeladitelným pásmovým filtrem

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

V teoretické části práce navrhnete blokovou a obvodovou strukturu analogového studiového kompresoru s obecně uvažovanou topologií napěťově řízených zesilovačů (VCA) a pásmového filtru, kterým lze omezit kmitočtový rozsah, který kompresor zpracuje, nebo také kmitočtový rozsah, na který kompresor reaguje. Při návrhu filtru zvažte aplikaci napěťově řízených aktivních filtrů, např. typu State-variable, apod. Všechny návrhy ověřte simulacemi včetně citlivostní a toleranční analýzy.

V praktické části práce vytvořte kompletní konstrukční podklady k realizaci návrhu (schéma zapojení, návrh desky plošného spoje, rozložení a soupiska součástek, atd.). Navržený studiový kompresor realizujte formou funkčního prototypu, experimentálním měřením ověřte jeho činnost a výsledky srovnajte s předpoklady. Výsledky měření zpracujte formou standardního protokolu o měření.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] WIRSUM, Siegfried. Abeceda nf techniky. Praha: BEN - technická literatura, 1998. ISBN 80-86056-26-0.

[2] VLACHÝ, Václav. Praxe zvukové techniky. 3., aktualiz. a dopl. vyd. Praha: Muzikus, c2008. ISBN 978-80-86253-46-6.

Termín zadání: 11.2.2022

Termín odevzdání: 1.6.2022

Vedoucí práce: doc. Ing. Roman Šotner, Ph.D.

doc. Ing. Lucie Hudcová, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Práca sa zaoberá návrhom kompresoru dynamiky spojeného s laditeľným pásmovým filtrom. Zhotovené zariadenie má disponovať väčším rozsahom použitia ako štandardný dynamický kompresor a zároveň byť schopné zastúpiť špeciálne kompresory ako napríklad tie slúžiace na odstraňovanie sykaviek. Prezentované riešenie využíva riadené aktívne filtre typu KHN na obmedzenie pásma, ktoré kompresor spracováva alebo na ktoré reaguje. Ovládanie dynamiky je realizované integrovanými napäťovo riadenými zosilňovačmi. Návrh je overený počítačovou simuláciou.

Kľúčové slová

analogový kompresor, dynamika zvuku, napäťovo riadený zosilňovač, aktívny filter, trojpásmová výhybka, transkonduktančný zosilňovač

Abstract

This thesis deals with design of a dynamic range compressor complemented by an adjustable band pass filter. This device features wider usability than a standard dynamic compressor while simultaneously being able to replace specialized ones. Presented solution utilizes voltage controlled filters of KHN topology to limit the bandwidth of either the processed signal or the controlling signal and integrated voltage controlled amplifiers for adjustment of dynamics. The design requirements are verified by computer simulation.

Keywords

analog compressor, sound dynamics, voltage controlled amplifier, active filter, 3 band crossover, transconductance amplifier

Bibliografická citácia:

LEDVINA, Matej. *Analogový studiový kompresor s preladiteľným pásmovým filtrom*. Brno, 2022. Semestrálna práca. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačných technológií, Ústav radioelektroniky. Vedúci práce Roman Šotner.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a přímení studenta: Matej Ledvina
VUT ID studenta: 221339
Typ práce: Bakalářská práce
Akademický rok: 2021/22
Téma závěrečné práce: Analogový studiový kompresor s
přeladitelným pásmovým filtrem

Prohlašuji, že svou semestrální práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené semestrální práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této semestrální práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne:

.....
podpis autora

Pod'akovanie

Ďakujem môjmu vedúcemu práce doc. Ing. Romanovi Šotnerovi, Ph.D. za cenné rady pri riešení práce, poskytnutie potrebnej literatúry a meracích prístrojov.

V Brne dňa:

podpis autora

Obsah

| | |
|---|-----------|
| Úvod | 8 |
| 1 Teoretické východiská | 9 |
| 1.1 Kompresory | 9 |
| 1.1.1 Princíp funkcie | 9 |
| 1.1.2 Ovládacie prvky kompresorov | 11 |
| 1.1.3 Napät'ovo riadené zosilňovače | 12 |
| 1.2 Analógové filtre | 14 |
| 1.2.1 Matematický popis filtrov | 14 |
| 1.2.2 Delenie filtrov | 15 |
| 1.2.3 Aktívne prvky používané na konštrukciu filtrov | 16 |
| 1.3 Vybrané pojmy z oblasti hudobnej techniky | 17 |
| 2 Návrh..... | 19 |
| 2.1 Kompresor a pásmový filter | 19 |
| 2.2 Popis zapojenia prístroja | 19 |
| 2.3 Návrh vstupného obvodu | 20 |
| 2.4 Návrh filtra | 21 |
| 2.5 Návrh kompresoru dynamiky | 25 |
| 2.5.1 Aktívny usmerňovač | 25 |
| 2.5.2 Časovací obvod..... | 26 |
| 2.5.3 Obvody regulácie zosilnenia a kompresnej úrovne. | 27 |
| 2.5.4 Zapojenie napät'ovo riadených zosilňovačov..... | 27 |
| 2.5.5 Výsledky simulácií..... | 28 |
| 2.6 Návrh výstupného obvodu | 31 |
| 2.7 Návrh napájacieho zdroja..... | 33 |
| 2.8 Tolerančná analýza..... | 34 |
| 3 Realizácia | 35 |
| 3.1 Meranie | 37 |
| 3.1.1 Meranie vstupného a výstupného obvodu..... | 37 |
| 3.1.2 Meranie parametrov filtra | 38 |
| Záver | 43 |

Zoznam obrázkov

| | |
|---|----|
| Obrázok 1.1 Bloková schéma spätnoväzobného kompresoru | 10 |
| Obrázok 1.2 Bloková schéma doprednoväzobného kompresoru..... | 10 |
| Obrázok 1.3 Bloková schéma kombinovaného kompresoru | 10 |
| Obrázok 1.4 Reakčný čas kompresoru za prítomnosti časových konštánt Attack (t_A) a Release (t_R)..... | 11 |
| Obrázok 1.5 Napät'ový prenos kompresoru pri rôznych kompresných pomeroch | 12 |
| Obrázok 1.6 Napät'ovo riadený zosilňovač log-antilog s dvoma tranzistormi | 13 |
| Obrázok 1.7 Vnútorňa štruktúra integrovaného obvodu THAT2180 [6] | 13 |
| Obrázok 1.8 Filter ako dvojbran | 14 |
| Obrázok 1.9 Kmitočtovo závislý napät'ový delič | 14 |
| Obrázok 1.10 a) Kmitočtová charakteristika filtra dolná priepusť b) Fázová charakteristika filtra dolná priepusť | 15 |
| Obrázok 1.11 Náhradný obvod operačného zosilňovača..... | 17 |
| Obrázok 1.12 Náhradný obvod transkonduktančného zosilňovača..... | 17 |
| Obrázok 2.1 Bloková schéma celého zariadenia | 19 |
| Obrázok 2.2 Modulová charakteristika vstupného obvodu | 21 |
| Obrázok 2.3 Vstupný obvod kompresoru | 21 |
| Obrázok 2.4 Základná schéma zapojenia aktívneho filtra typu KHN v kombinovanom zapojení s jedným operačným zosilňovačom a dvoma transkonduktormi s napät'ovými sledovačmi. | 22 |
| Obrázok 2.5 Výstup pásmovej priepusti filtra KHN pri menení kľudového prúdu cez zdroj v krokoch medzi 1V až 10V | 23 |
| Obrázok 2.6 Schéma prúdového zdroja riadeného napät'ím pre riadenie g_m transkonduktorov. | 23 |
| Obrázok 2.7 Výstupy spodného, stredného a horného pásma filtrov zapojených ako výhybka..... | 23 |
| Obrázok 2.8 Kmitočtová a fázová charakteristika výhybky po správnom sčítaní všetkých výstupov..... | 24 |
| Obrázok 2.9 Zapojenie referenčného zdroja napätia | 25 |
| Obrázok 2.10 Schéma presného usmerňovača | 26 |
| Obrázok 2.11 Schéma časovacieho obvodu | 27 |

| | |
|---|----|
| Obrázok 2.12 Zapojenie vedľajšieho riadeného zosilňovača | 28 |
| Obrázok 2.13 Odozva pri pridanom zisku signálu výstupu. Je taktiež možno pozorovať správnu funkciu konštanty Release..... | 29 |
| Obrázok 2.14 Porovnanie správania pri nízkej a vysokej hodnote Threshold..... | 29 |
| Obrázok 2.15 Porovnanie odozvy pri rôznych kompresných pomeroch, od vrchu 2:1, 4:1 a 10:1..... | 30 |
| Obrázok 2.16 Porovnanie odozvy pri rôznych nastaveniach časovej konštanty Attack, od vrchu 0.1ms, 1ms a 3ms..... | 31 |
| Obrázok 2.17 Zapojenie výstupného sumačného obvodu, ktorý zároveň vytvára balancovaný výstup zariadenia | 32 |
| Obrázok 2.18 Kmitočtová charakteristika výstupu zariadenia | 32 |
| Obrázok 2.19 Schéma napájacieho zdroja | 33 |
| Obrázok 2.20 Posun medzného kmitočtu vplyvom tolerancie súčiastok | 34 |
| Obrázok 3.1 Ovládacie prvky predného a zadného panelu prístroja | 35 |
| Obrázok 3.2 Kmitočtová charakteristika vstupného obvodu | 37 |
| Obrázok 3.3 Kmitočtová charakteristika výstupného obvodu..... | 38 |
| Obrázok 3.4 Ladiaca charakteristika filtra v hornom rozsahu..... | 38 |
| Obrázok 3.5 Odozva výstupu filtra na jednotkový skok | 39 |
| Obrázok 3.6 Ladiaca charakteristika filtra v dolnom rozsahu | 39 |
| Obrázok 3.7 Charakteristika hornej, dolnej a pásmovej prepusti prvého filtra | 40 |
| Obrázok 3.8 Charakteristika výstupu stredného pásma výhybky | 40 |
| Obrázok 3.9 Charakteristika výstupu bočných pásiem..... | 41 |
| Obrázok 3.10 Charakteristika výstupu celého zariadenia..... | 41 |
| Obrázok 3.11 FFT analýza výstupného signálu z ktorej bolo odčítané skreslenie. Vstupné napätie 2V | 42 |
| Obrázok 3.12 FFT analýza výstupného signálu z ktorej bolo odčítané skreslenie. Vstupné napätie 1V | 42 |

Úvod

Analógová štúdiová technika je dodnes vo veľkom rozsahu používaná aj napriek pokročilým DSP technológiám, ktoré sú v dnešnej dobe dostupné. Kompresory dynamiky sú toho dobrým príkladom [1]. V súčasnej hudbe sa kompresor dynamiky vyskytuje skoro na každom kanáli nahrávanej skladby, niekedy dokonca aj niekoľkokrát. Sú často používané spôsobmi veľmi odlišnými od toho, na ktorý boli pôvodne navrhnuté. Využívajú sa rôzne typy kompresorov v kombinácii s pomocnými obvodmi priamo na manipulovanie charakteru zvuku. Vznikla teda myšlienka navrhnuť analógový kompresor s preladiteľným pásmovým filtrom. Kombinácia filtra a kompresoru je dosť častá, pretože ponúka riešenia na niekoľko technických problémov, spojených s nahrávaním ako odstraňovanie sykaviek alebo nemožnosť efektívneho použitia bežného kompresoru na skladbu s veľkým množstvom nízkych kmitočtov. Konštrukcia kompresoru s univerzálnym filtrom poskytuje možnosť použiť toto zariadenie na širokú škálu známych aj nových aplikácií a dokáže v mnohom nahradiť napríklad multipásmové kompresory [2], ktoré sú veľmi drahé a zložité.

Prvá kapitola má uviesť čitateľa hlbšie do problematiky práce, zoznámiť ho s funkciou filtrov a kompresorov, ich delením, použitím a súčiastkami, ktoré sa pri ich návrhu využívajú. Ďalej popisuje ovládacie prvky kompresorov a často používané termíny v oblasti hudobnej techniky.

Druhá kapitola práce sa venuje priamo návrhu zariadenia. Predstavuje celé obvody riešenie a detailne popisuje princíp funkcie každého obvodu, ktorý je v riešení použitý. Obsahuje návrhové rovnice k výpočtu kľúčových hodnôt súčiastok a výsledky simulácií všetkých obvodov zariadenia.

Tretia kapitola práce sa venuje praktickej realizácii zariadenia. Popisuje postup výroby, prezentuje merané výsledky a porovnáva ich s tými dosiahnutými simuláciou v programe SPICE.

1 Teoretické východiská

1.1 Kompresory

V hudobnej technike sú kompresory zariadenia, ktoré sa používajú na menenie dynamického rozsahu signálov. Obecne kompresory fungujú ako riadený ovládač hlasitosti, ktorý signál utlmuje vtedy, keď dosiahne určitú napäťovú úroveň, čím efektívne znižujú jeho dynamiku. V hudobnej technike má kompresor veľké množstvo využití. Používa sa napríklad na pocitové zvýšenie celkovej hlasitosti hudobnej skladby a prispôsobenie pre moderného poslucháča, ktorý si často skladbu vypočuje v aute alebo inom hlučnom prostredí, kde by sa tiché pasáže stratili v hluku okolia. Používajú sa aj na ochranu ozvučovacej a nahrávacej techniky pred náhlymi napäťovými špičkami, ktoré by mohli spôsobiť vznik nežiadaného skreslenia alebo dokonca drahé vybavenie poškodiť [1].

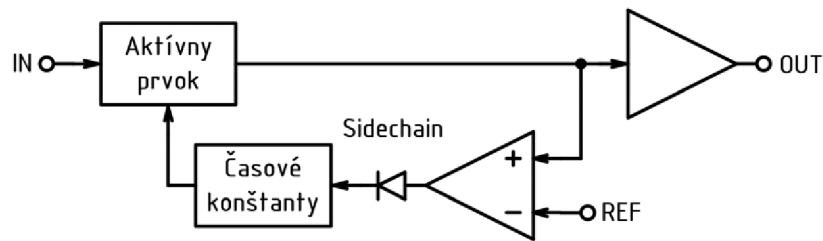
1.1.1 Princíp funkcie

Kompresory fungujú na báze aktívneho prvku nazývaného napäťovo riadený zosilňovač (VCA). Jedná sa o zosilňovač, ktorého zisk sa dá jednoducho meniť privedením napätia na jeho riadiaci vstup. Signál privedený na kompresor je spracovaný cez tento riadený zosilňovač. Dynamiku signálu je potom možné meniť cez tzv. slučku sidechain. Je pomenovaná tak preto, že ňou prechádzajúci signál je vedľajší a nedostane sa na výstup kompresoru. V tejto slučke je obvod, ktorý signál zosilní a privedie na komparačný obvod. Po presiahnutí nastavenej úrovne pustí komparačný obvod signál ďalej do usmerňovača. Takto upravený signál je zakončený na riadiacom vstupe spomínaného zosilňovača, z čoho vyplýva, že úroveň signálu je riadená sama sebou. V mnohých kompresoroch je na vstup obvodu sidechain možné pripojiť externý signál a dynamiku zvuku riadiť ním. Všetky realizácie ale túto možnosť nemajú [1][2].

Podľa toho, odkiaľ je signál do riadiaceho zosilňovača privedený, delíme kompresory na spätnoväzobné, doprednoväzobné a kombinované.

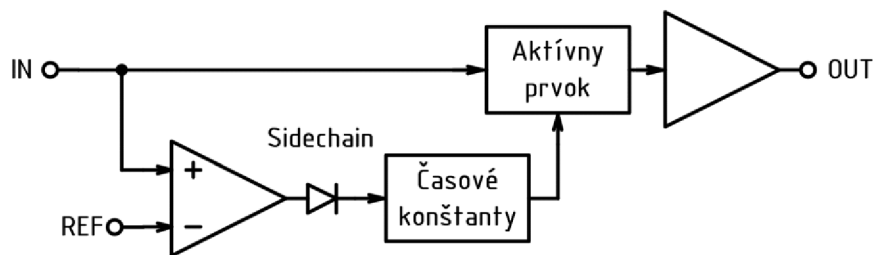
Spätnoväzobné kompresory privádzajú na vstup riadeného zosilňovača signál z jeho výstupu. Vytvára sa tak záporná spätná väzba. Tento typ kompresorov má výhradne lineárnu odozvu a nie je závislý na napäťovom zisku aktívneho prvku. Z toho vyplýva,

že spätnoväzobné kompresory nie je možné riadiť externým signálom cez spomínanú slučku sidechain [1].



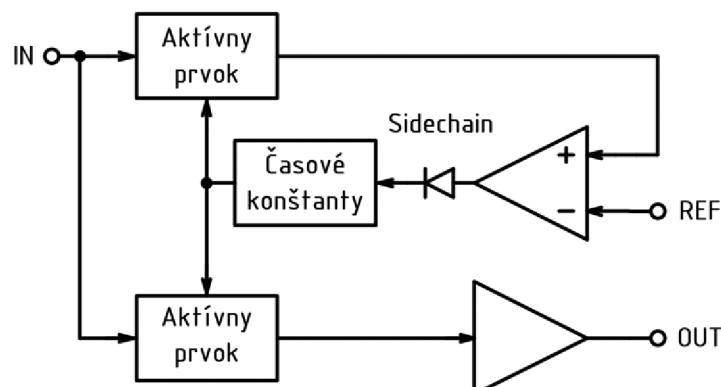
Obrázok 1.1 Bloková schéma spätnoväzobného kompresoru

Doprednoväzobné kompresory berú vstupný signál a aplikujú ho do vstupu riadeného zosilňovača. Nevýhodou tohto zapojenia je, že pokiaľ je aktívny prvok v zosilňovači nelineárny, táto nelinearita sa plne prejaví, pretože zosilnenie a dynamický rozsah sú priamo závislé na jeho prenose.



Obrázok 1.2 Bloková schéma doprednoväzobného kompresoru

Kombinované kompresory majú v sebe implementovanú spätnú aj doprednú väzbu. Sú síce zložitejšie na konštrukciu, ale získaná odozva je kombináciou oboch topológií. Takéto kompresory umožňujú riadiť zisk externým signálom a spätnoväzobná slučka minimalizuje nelinearitu vplyvom aktívneho prvku. Práca sa ďalej zaoberá návrhom kompresoru práve s touto topológiou [1] [3].



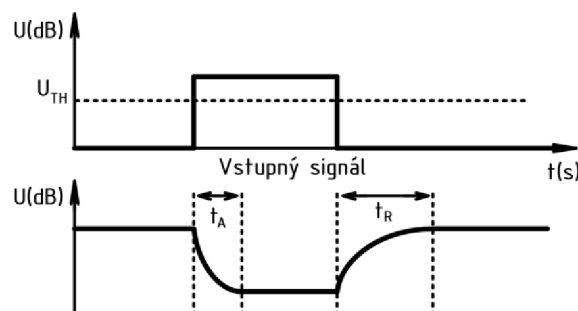
Obrázok 1.3 Bloková schéma kombinovaného kompresoru

Ďalšie delenie kompresorov je podľa typu aktívneho prvku, ktorý sa používa vo funkcii riadeného zosilňovača. Časté sú kompresory optické využívajúce rezistívne optočleny. Tieto kompresory nemajú veľmi lineárnu odozvu a čas reakcie je relatívne pomalý. Kompresory s tranzistormi riadenými poľom sú dosiaľ často využívané, pretože majú skoro nulové skreslenie, keď dynamika signálu nie je menená. Staršie konštrukcie využívali špeciálne elektrónky s premenlivým ziskom (pôvodne určené pre vysokofrekvenčné zmiešavače). Toto riešenie nemalo príliš dobré vlastnosti a bolo zložité na konštrukciu vyžadujúc špeciálne oddeľovacie transformátory. Dnes sú veľmi často používané moderné aktívne prvky ako transkonduktory alebo integrované riadené zosilňovače, napr. s Blackmerovým článkom. Tieto konštrukcie sú síce zložitejšie, ale majú väčšie možnosti riadenia priebehu kompresie [1] [2] [3].

1.1.2 Ovládacie prvky kompresorov

Často je v praxi žiadané, aby sa dali parametre priebehu kompresie meniť. Od doby, kedy boli kompresory prvýkrát používané (v prvých rozhlasoch a telefónnych ústredniach), sa štandardne používajú tieto základné ovládacie prvky: Threshold, Attack, Release a Ratio.

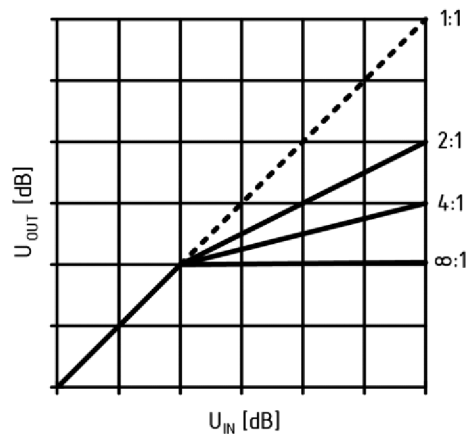
Threshold je parameter určujúci úroveň, od ktorej kompresor pracuje. Po dosiahnutí tejto úrovne začína byť signál utlmený, pričom parametre Attack a Release určujú rýchlosť reakcie. Nízka hodnota parametru Threshold spôsobí, že signál bude mať veľmi malý dynamický rozsah. Vysoká úroveň parametru nemusí signál ovplyvniť vôbec. Sú dva spôsoby vyhodnocovania presiahnutia úrovne. Podľa špičkovej úrovne signálu alebo podľa efektívnej hodnoty. Detekcia podľa špičkovej úrovne je účinnejšia na ochranu techniky a je jednoduchšia na realizáciu. Detekcia podľa efektívnej hodnoty signálu spôsobuje kompresiu, ktorá je bližšia ľudskému vnímaniu hlasitosti, ale vyžaduje špeciálne obvody na prepočet efektívnej hodnoty signálu.



Obrázok 1.4 Reakčný čas kompresoru za prítomnosti časových konštánt Attack (t_A) a Release (t_R)

Attack a Release sú parametre určujúce dobu reakcie na dosiahnutie prahovej úrovne Threshold. Ich zvyšovaním spomaľujeme reakčný čas kompresoru, takže útlm nebude náhly, ale bude postupne dosahovať želanú úroveň (u parametru Attack) a postupne sa zasa vraciať na nulu (u parametru Release).

Ratio je parameter určujúci pomer kompresie. Napríklad pomer 4:1 znamená, že výstupná hodnota signálu, ktorý presiahol úroveň Threshold o 4 dB, bude znížená na úroveň 1 dB nad úrovňou Threshold. Takže signál bude utlmený o 3 dB. Špeciálny typ kompresoru, ktorý má kompresný pomer blížiaci sa $\infty:1$ sa nazýva limiter. Výstupný signál limiteru bude vždy rovný úrovni Threshold po jej dosiahnutí vstupným signálom [2] [3].



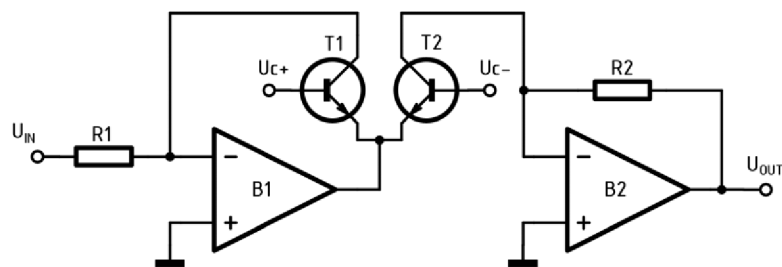
Obrázok 1.5 Napätový prenos kompresoru pri rôznych kompresných pomeroch

1.1.3 Napät'ovo riadené zosilňovače

Napät'ovo riadené zosilňovače majú v hudobnej a štúdiovej technike široké využitie, ako napríklad obvody automatického riadenia hlasitosti, procesory dynamiky, napät'ovo riadené filtre, digitálne riadenie analógových obvodov... Podmienky na kvalitu riadených zosilňovačov v hudobnej technike sú odlišné od tých používaných v iných odvetviach. Tam nás zaujíma veľká šírka pásma, rýchly čas reakcie a vysoká linearita. Hlavné požiadavky pre aplikácie v hudobnej technike sú vysoký odstup od šumu, malé skreslenie a vysoký dynamický rozsah. Kvalitný riadený zosilňovač je vždy kompromisom medzi šírkou pásma, dynamickým rozsahom a nízkym skreslením. Sú preto používané primárne dve zapojenia, ktoré vychádzajú z tej istej topológie [4].

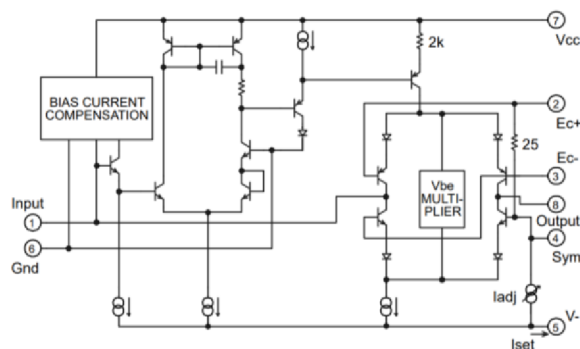
Napät'ovo riadené zosilňovače pre hudobnú techniku fungujú na báze zapojenia log-antilog. Toto zapojenie využíva logaritmickú závislosť napätia báza-emitor

a kolektorového prúdu bipolárneho tranzistoru. Zapojením tranzistorov ako na obrázku 1.6 získame obvod, v ktorom lineárna zmena riadiaceho napätia spôsobí exponenciálnu zmenu zisku zosilňovača. Odozva zosilňovača je teda dB/V, čo je veľmi výhodné pre aplikácie v hudobnej technike. Pre správnu funkciu je kľúčové, aby tranzistory v tomto zapojení mali čo najbližšie parametre a boli termálne viazané, keďže spomínaná závislosť je teplotne závislá. Obvod na obrázku 1.6 bude reagovať len na kladné napätia, zatiaľ čo obvody používané v komerčných riadených zosilňovačoch sú schopné spracovávať napätia oboch polarít [4] [5].



Obrázok 1.6 Napätovo riadený zosilňovač log-antilog s dvoma tranzistormi

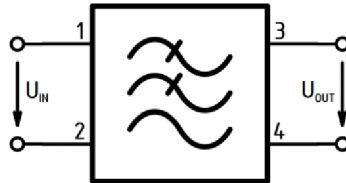
Prvú topológiu napätovo riadeného zosilňovača postavenú na týchto konceptoch uviedol na svet David Blackmer, podľa ktorého bola aj pomenovaná. Má vysoký dynamický rozsah, ale veľmi obmedzené pracovné pásmo. Autorom druhej topológie na tomto koncepte je Daniel Talbot, ktorý rozšíril pracovné pásmo zosilňovača na úkor dynamického rozsahu. Blackmerov zosilňovač bol uvedený na trh formou hybridného integrovaného obvodu od firmy DBX, Inc. pod označením DBX 202. Obvod si prešiel niekoľkými iteráciami s postupne zlepšujúcimi sa vlastnosťami po každej úprave. Moderné riadené zosilňovače postavené na tejto technológii vyrába spoločnosť THAT Corporation pod označením THAT2181, THAT2180 a sú bežne dostupné u väčšiny dodávateľov [4] [5] [6].



Obrázok 1.7 Vnútroštruktúra integrovaného obvodu THAT2180 [6]

1.2 Analógové filtre

Filtrami sa v elektronike rozumejú dvojbrany, ktorých výstupom je obmedzené kmitočtové spektrum signálu na vstupe. Filtre majú definované tzv. priepustné pásmo, v ktorom harmonické zložky signálu prepustia (ideálne bez útlmu) a nepriepustné pásmo, v ktorom ich naopak silne utlmia. Mieru útlmu, šírku pásma a medzné kmitočty určuje prenosová funkcia filtra a dajú sa odčítať z jeho kmitočtovej charakteristiky [7].

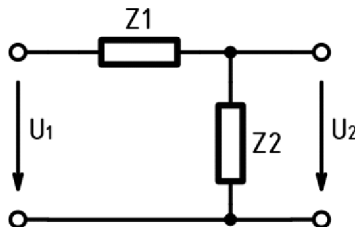


Obrázok 1.8 Filter ako dvojbran

Elektronické analógové filtre využívajú pre svoju funkciu prvky, ktoré sú kmitočtovo závislé (napr. kondenzátor). Umiestnením takéhoto prvku do napäťového deliča (1.1) získame obvod, ktorého výstupné napätie je závislé na kmitočte vstupného napätia (obr. 1.9) [7]

$$K(s) = \frac{U_2}{U_1} = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}. \quad (1.1)$$

1.2.1 Matematický popis filtrov

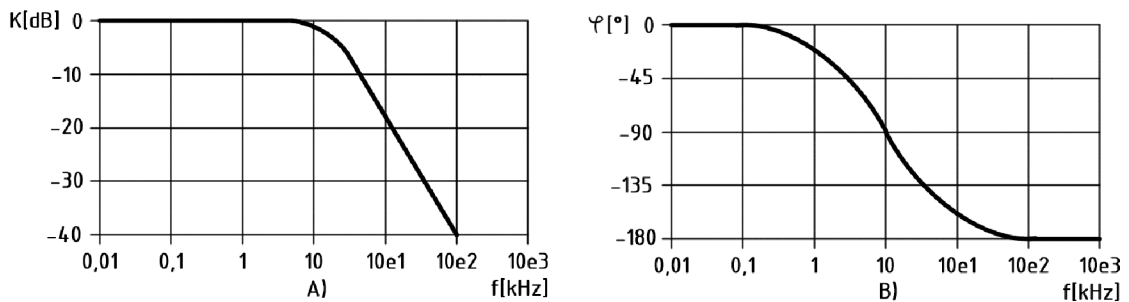


Obrázok 1.9 Kmitočtovo závislý napäťový delič

Pre aplikáciu obvodu filtra je potrebné poznať jeho prenosovú funkciu. Prenosová funkcia je matematické vyjadrenie charakteristiky filtra. Je definovaný ako vzťah medzi vstupným a výstupným napätím alebo menej často prúdom a je vyjadrený ako podiel dvoch polynomov. Korene polynomu v čitateli sú nuly a korene v menovateli póly

$$K(s) = \frac{U_2}{U_1} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{N(p)}{D(p)}. \quad (1.2)$$

Obecne je prenos filtra (v kmitočtovej doméne) vyjadrený ako pomer dvoch polynomov, ktorý možno získať obvodovou analýzou. Rád polynomu vo funkcii určuje rád popisovaného filtra. Zámenou $s = j\omega$ v prenosovej funkcii môžeme rovnicu prenosu riešiť na rôznych kmitočtoch. Následne môžeme zakresliť kmitočtovú charakteristiku (1.3), čiže zmenu amplitúdy výstupu vzťahom ku meniacemu sa kmitočtu, ako aj fázovú charakteristiku (1.4), zmenu fázy výstupného signálu vzťahom ku kmitočtu. Kvôli prehľadnosti údajov sa modulová charakteristika prenosu vykresľuje v decibeloch [7] [8]



Obrázok 1.10 a) Kmitočtová charakteristika filtra dolná priepusť b) Fázová charakteristika filtra dolná priepusť

$$|K(\omega)| = \sqrt{(\text{Re } K)^2 + (\text{Im } K)^2} \quad (1.3)$$

$$\varphi(\omega) = \arctg \frac{\text{Im } K}{\text{Re } K} \quad (1.4)$$

1.2.2 Delenie filtrov

Analógové filtre delíme podľa typu prenosu na dolnú priepusť, hornú priepusť, pásmovú priepusť, pásmovú zádrž a fázovací filter. Ďalšie dôležité delenie filtrov je podľa použitých prvkov na aktívne a pasívne.

Pasívne filtre sa skladajú výhradne z pasívnych prvkov (odporov, cievok a kondenzátorov). Sú to filtre s jednoduchou konštrukciou a ziskom vždy menším ako 1. Pasívne filtre ako je už z názvu zrejmé, nepotrebujú žiadne napájanie. Sú preto preferované na jednoduché aplikácie aj tam, kde ich napájanie nie je možné. Taktiež sa pasívne filtre používajú v aplikáciách, kde musia spracovávať vysoký výkon alebo veľmi vysoké kmitočty. Nevýhodou je, že pasívne filtre spôsobujú v signálovej ceste útlm a pre nízke kmitočty sú fyzicky väčšie a ťažšie ako ich aktívne verzie. Pre dobré vlastnosti využívajú cievky, ktoré sú vo veľkých rozmeroch drahé na konštrukciu a sťažujú presné ladenie filtrov [8].

Aktívne filtre obsahujú aspoň jeden aktívny prvok a sú obecné konštrukčne zložitejšie. Často používané prvky sú napr. tranzistory, operačné zosilňovače, transkonduktory a gyrátory. Aktívne filtre môžu mať zisk väčší ako 1 a umožňujú riadenie ich jednotlivých vlastností, čím sa dá veľmi presne naladiť medzný kmitočet. Ponúka sa tým možnosť meniť podľa potreby vlastnosti filtra aj za chodu, napríklad meniť činiteľ Q . V moderných aktívnych filtroch sa nevyužívajú na konštrukciu cievky, ale ich funkciu nahrádzajú syntetické prvky tvorené blokmi ako sú gyrátory. Preto majú tieto aktívne filtre efektívne nulové elektromagnetické emisie, ktoré by mohli mať negatívny vplyv na okolité obvody a je tým taktiež možné realizovať filtre veľmi malých rozmerov [8].

Filtre ďalej delíme podľa rádu. Rád filtra určuje strmosť a tvar jeho kmitočtovej a fázovej charakteristiky.

Filter prvého rádu má najmenšiu strmosť (20 dB/dek.) a je možné ním realizovať len dolnú alebo hornú priepusť.

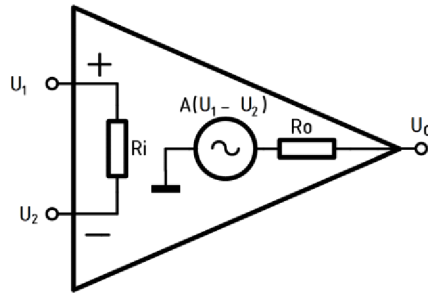
Filter druhého rádu má strmosť (40 dB/dek.) a je možné ním realizovať všetky typy filtrov. Často používaná skupina filtrov sú bikvady. Sú to aktívne rekurzívne filtre druhého rádu. Práca sa ďalej zaoberá návrhom filtra presne tohto typu.

Filter vyššieho rádu majú vyššiu strmosť (stupňujúcu sa podľa rádu filtra). Aj keď existujú známe topológie filtrov vyšších rádov, v praxi sa často vytvárajú kaskádovým zapojením niekoľkých filtrov druhého a prvého rádu často s omnoho lepšími vlastnosťami [7] [9].

1.2.3 Aktívne prvky používané na konštrukciu filtrov

Operačný zosilňovač je lineárny aktívny prvok s diferenciálnym vstupom a jedným výstupom. Ako dvojbran je operačný zosilňovač zdroj napätia riadený napätím. V praxi je to jeden z najpoužívanejších obvodov v analógovej elektronike. Vyznačuje sa veľmi vysokou vstupnou impedanciou, veľmi malou výstupnou impedanciou a vysokým zosilnením. Operačný zosilňovač berie rozdiel medzi jeho dvoma vstupmi (nazývanými invertovaný a neinvertovaný) a zosilní ho o svoj činiteľ zosilnenia [10]

$$U_o = A \cdot (U_2 - U_1). \quad (1.5)$$

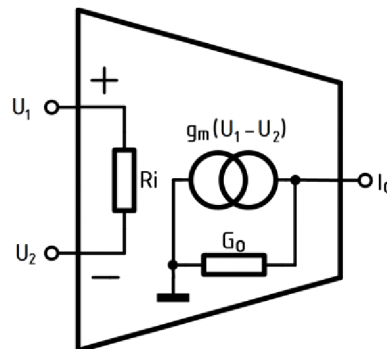


Obrázok 1.11 Náhradný obvod operačného zosilňovača

Operačný transkonduktančný zosilňovač (OTA) podobne ako operačný zosilňovač je aktívny prvok s dvoma diferenciálnymi vstupmi a jedným výstupom. Ako dvojbran je transkonduktančný zosilňovač zdroj prúdu riadený napätím. Výstupný prúd transkonduktančného zosilňovača je daný ako rozdiel napätí na vstupných svorkách vynásobený o parameter g_m (externe riadený). Platí teda

$$I_o = g_m \cdot (U_2 - U_1). \quad (1.6)$$

Jedná sa o prvok s veľmi širokým využitím. Okrem toho, že zjednodušuje mnohé zapojenia, dáva možnosť elektronického riadenia parametrov obvodov, čo je užitočné napríklad pri preladiteľných filtroch [9].



Obrázok 1.12 Náhradný obvod transkonduktančného zosilňovača

1.3 Vybrané pojmy z oblasti hudobnej techniky

Decibel je pomerová veličina v logaritmickej miere, ktorá sa používa na vyjadrovanie zisku alebo útlmu. Reálny rozmer táto veličina naberá len vtedy, keď je vyjadrená vo vzťahu k nejakej referenčnej hodnote. V praxi zvukovej techniky sa používajú nižšie uvedené jednotky [2] [11].

dBm – vzťahnuté k výkonu 1mW

dBu – vzťahnuté k napätiu 0,775 V (štandardná úroveň signálu v štúdiovej technike)

dBV – vzťahnuté k napätiu 1 V (štandardná úroveň signálu v komerčnej technike)

dB SPL – vzťahnuté k akustickému tlaku 20 μ Pa (prah počuteľnosti ľudského sluchu)

Linková úroveň signálu (line level) je štandardná špičková úroveň používaná na prenos signálu medzi všetkou zvukovou technikou, ktorá sama nie je zdrojom signálu (ako napr. mikrofóny, elektrické gitary...). V komerčnej technike je to -10 dBV, v štúdiovej technike $+4$ dBu [11].

Kmitočtová charakteristika je vyjadrenie prenosu zariadenia vzhľadom na kmitočty. Štandardný kmitočtový rozsah, ktorý sa používa v štúdiovej technike je 20 Hz až 20 kHz, a vyplýva z rozsahu počuteľnosti ľudského sluchu [11].

Činiteľ harmonického skreslenia je veličina udávajúca koľko percent užitočného harmonického signálu predstavuje zmes nežiadanych vyšších harmonických zložiek generovaná pozorovaným zariadením. Uvádza sa v % [2].

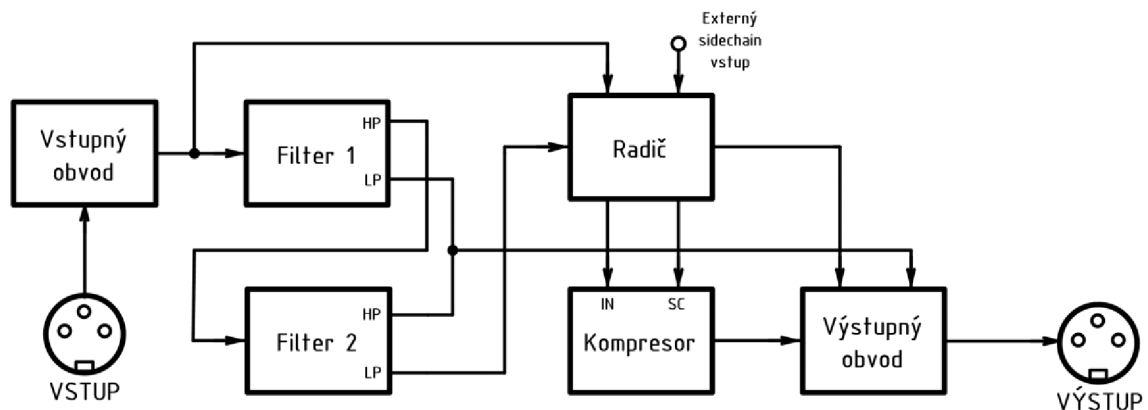
Vstupná a výstupná impedancia je impedancia vstupných a výstupných svoriek meraného zariadenia zapojeného ako dvojbran. Uvádza sa v Ω [2].

Dynamický rozsah je pomer maximálnej a minimálnej napäťovej úrovne, ktorú môže signál nadobudnúť, prípadne ktorú dokáže nejaké zariadenie preniesť. Uvádza sa v dB.

Odstup rušivých napätí je parameter, ktorý vyjadruje pomer užitočného signálu prenášaným k rušivému signálu. Vyjadruje sa v dB. Požiadavky na odstup od šumu v zariadeniach štúdiovej techniky je 100 dB [2].

Balancovaný signál využívame vtedy, keď je potrebné prenášať signál káblami na dlhú vzdialenosť. Aj kvalitné tienené káble pri prenose bežného nebalancovaného signálu na dlhej vzdialenosti akumulujú nežiadany šum vplyvom rušenia z prostredia. Balancovaný signál prenáša dve kópie pôvodného signálu dvoma vodičmi, jednu nezmenenú a druhú s otočenou fázou. Signál je v prijímacom zariadení spracovaný diferenciálnym zosilňovačom. Preto akýkoľvek šum, ktorý sa akumuloval na oboch kópiách signálu sa navzájom vyruší [2] [11].

2 Návrh



Obrázok 2.1 Bloková schéma celého zariadenia

2.1 Kompresor a pásmový filter

Analogový štúdiový kompresor dynamiky s pásmovým filtrom má ponúknuť riešenia na niekoľko problémov vyskytujúcich sa pri práci so zvukom, či už pri štúdiovom nahrávaní, rozhlasovom vysielaní alebo koncertovom ozvučovaní. Asi najčastejšie použitie filtra s kompresorom je na odstránenie sykaviek. Niektoré hlásky v ľudskej reči produkujú omnoho silnejšie zvukové vlny ako ostatné a pri nahrávaní reči cez mikrofón tieto hlásky pôsobia rušivo. Na odstránenie ich rušivého dojmu sa používa kompresor pracujúci len v úzkom kmitočtovom spektre, kde sa tieto hlásky vyskytujú. Ich výrazne vyššiu špičkovú hodnotu zníži natoľko, aby bola blízka zvyšku reči. Univerzálne zapojenie, ktoré má schopnosť filtrácie v ľubovoľnom rozsahu a dynamickej kompresie dokáže riešiť tento problém, a s ním mnohé iné ktoré tu popísané nie sú. Tým sa znižuje množstvo techniky, ktoré zvukový inžinier potrebuje mať k dispozícii, zároveň môže slúžiť aj ako kreatívny nástroj na úmyselné manipulovanie dynamiky s veľkým výberom možností.

2.2 Popis zapojenia prístroja

Celé zariadenie je prispôsobené tak, aby dokázalo pracovať so signálmi vyskytujúcimi sa v profesionálnej zvukovej technike a spĺňalo základné požiadavky na zariadenie pracujúce v tomto prostredí. Bloková schéma celého kompresoru je na obrázku 2.1.

Vstupný blok mení balancovaný signál zo vstupu na nebalancovaný. Signál je ďalej privedený do prvého bloku filtra, ktorý určuje horný medzný kmitočet pásmového filtra. Z tohto bloku je signál privedený na ďalší blok filtra, ktorý určuje dolný medzný kmitočet filtra. Výstupný signál spolu s vstupným nefiltrovaným signálom a externým signálom sidechain je privedený do radiča. Tento blok má za úlohu prepínať, ktorý signál bude kompresor spracovávať a na ktorý signál bude kompresor reagovať. Medzi filtrovaným a nefiltrovaným signálom je možnosť pripojiť externý signál, keďže táto funkcia sa používa v praxi veľmi často. Za kompresorom sa nachádza výstupný obvod ktorý plní dve funkcie. Prvou je spojenie výstupného signálu z kompresoru so zvyšnými pásmami vstupného signálu (pokiaľ bol zvolený v radiči vstupný signál kompresoru ten z filtra), a taktiež premieňa nebalancovaný signál na balancovaný.

2.3 Návrh vstupného obvodu

Vstupný obvod konvertuje balancovaný signál na nebalancovaný. Tento blok je realizovaný pomocou prístrojového zosilňovača. Jedná sa o zapojenie zosilňovača s vysokým vstupným odporom, diferenciálnym vstupom a nesymetrickým výstupom. Pre jeho dobré vlastnosti a relatívne jednoduchú konštrukciu bolo vybrané nasledujúce zapojenie prístrojového zosilňovača s jedným operačným zosilňovačom na obrázku 2.3. Predpokládáme $R_3 = R_4$ a $R_5 = R_6$. Potom celkový zisk obvodu je daný vzťahom

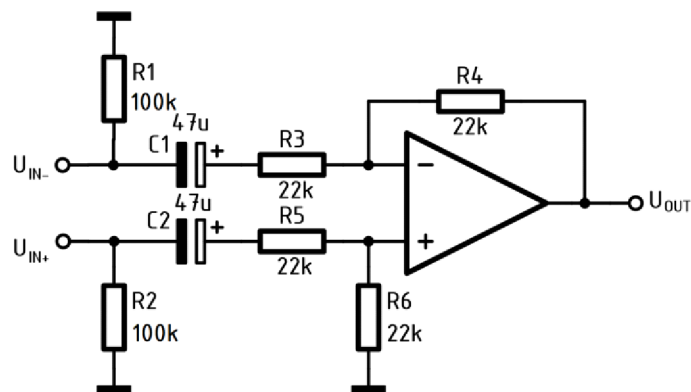
$$A_u = \frac{R_3}{R_4}. \quad (2.1)$$

Pre výstupné napätie potom platí

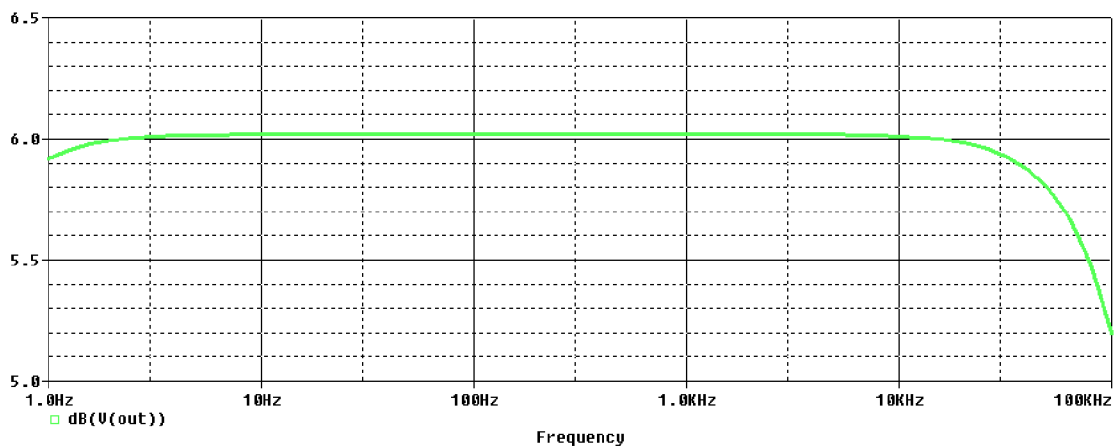
$$U_{OUT} = (U_{IN+} - U_{IN-}) \cdot A_u. \quad (2.2)$$

Pre zisk 1 boli zvolené všetky odpory rovnakej veľkosti a to 22 k Ω . Hodnoty odporov sú zvolené nižšie za účelom znížiť vplyv šumu. Kondenzátory C_1 a C_2 zabezpečujú striedavú väzbu pre vstup zosilňovača. Kondenzátory C_3 a C_4 slúžia na potlačenie rušenia vysokých kmitočtov. Odpory R_1 a R_2 slúžia na vybitie väzobných kondenzátorov. Transil D_1 slúži ako prepäťová ochrana a chráni zariadenie pred zničením dôsledkom nežiadanej napäťovej špičky na vstupe. Pre jeho dobré vlastnosti bol na realizáciu obvodu zvolený

operačný zosilňovač NE5534. Správna funkčnosť obvodu bola overená simuláciou. Obvod pracuje správne v celom požadovanom kmitočtovom pásme. [12]



Obrázok 2.3 Vstupný obvod kompresoru

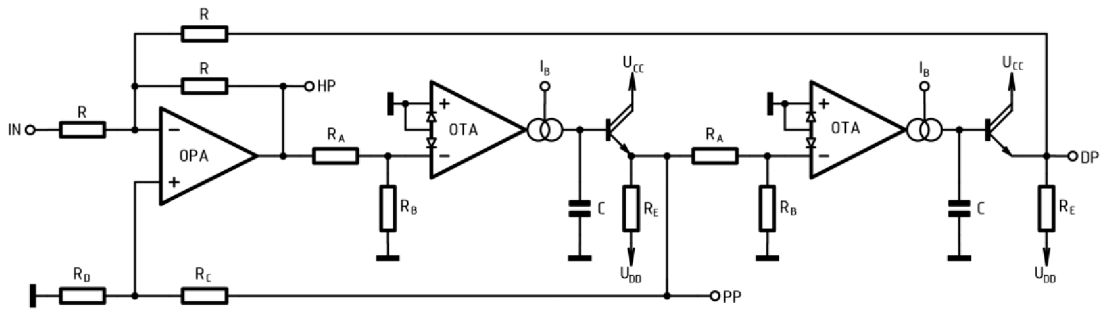


Obrázok 2.2 Modulová charakteristika vstupného obvodu

2.4 Návrh filtra

Obidva bloky filtra majú identickú vnútornú štruktúru. Ich kombinácia tvorí trojpásmovú výhybku (obrázok 2.5), pričom len signál zo stredného pásma je posielaný do kompresoru. Horné a dolné pásmo je posielané na koniec do sumačného zosilňovača, kde je celé spektrum signálu naspäť zložené.

Pre realizáciu bol zvolený filter typu KHN(Kerwin–Huelsman–Newcomb) podľa [13]. Jedná sa o rekurzívny aktívny filter druhého rádu, ktorý má dostupné výstupy dolnej, hornej aj pásmovej priespusti naraz, čo značne zjednodušuje návrh filtračného obvodu. Bolo zvolené kombinované zapojenie, ktoré využíva transkonduktory pre jednotlivé filtračné stupne a operačný zosilňovač pre sumačný stupeň. Možno tak použiť



Obrázok 2.4 Základná schéma zapojenia aktívneho filtra typu KHN v kombinovanom zapojení s jedným operačným zosilňovačom a dvoma transkonduktormi s napäťovými sledovačmi.

jeden obvod LM13700 (obsahujúci dva transkonduktory a dva napäťové sledovače) [14] na realizáciu jedného bloku filtra a riadiť medzný kmitočet externým prúdom. Na obrázku 2.4 je schéma použitého KHN filtra.

Nech $C_1 = C_2 = C$ a taktiež $g_{m1} = g_{m2} = g_m$. Potom medzný kmitočet filtra f_c je daný vzťahom

$$f_c = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{g_m R_B}{C(R_A + R_B)}, \quad (2.3)$$

a činiteľ kvality Q je daný vzťahom

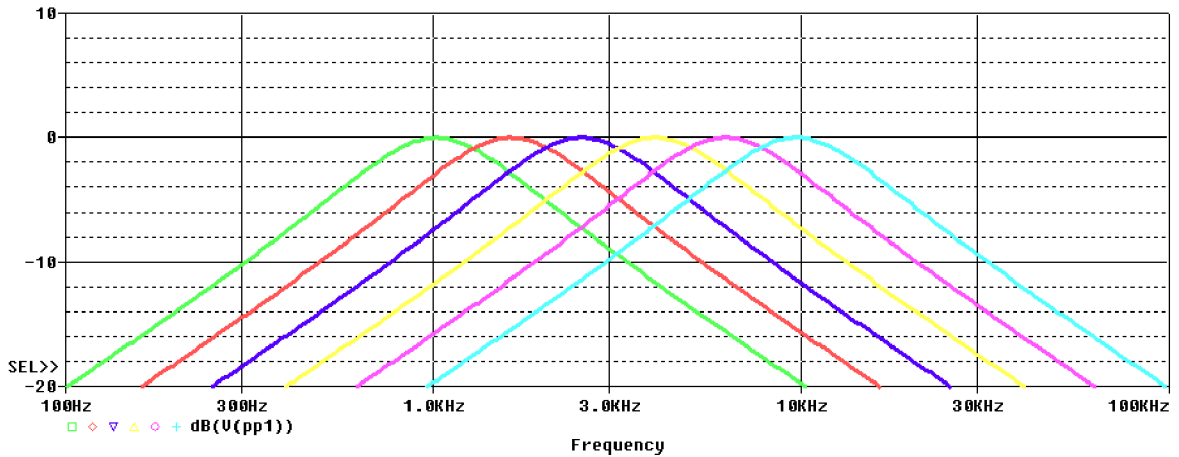
$$Q = \frac{(R_A + R_B) + (R_C + R_D)}{3R_D(R_A + 1)}. \quad (2.4)$$

Hodnoty boli zvolené nasledovne: $R_A = 22 \text{ k}\Omega$ a $R_B = 1 \text{ k}\Omega$ podľa katalógového listu, nasledovne bol dopočítaný $C = 3,3 \text{ nF}$. Takto vyhotovený filter bude pracovať na 1 kHz pri riadiacom prúde $I_B = 25 \text{ }\mu\text{A}$. Keďže riadenie g_m je lineárne, kmitočtu 10 kHz bude odpovedať prúd $250 \text{ }\mu\text{A}$. Pre zjednodušenie ovládania bol pre riadenie prúdu I_B použitý prúdový zdroj riadený napätím podľa [15] (obrázok 2.6). Výstupný prúd tohto obvodu je daný vzťahom

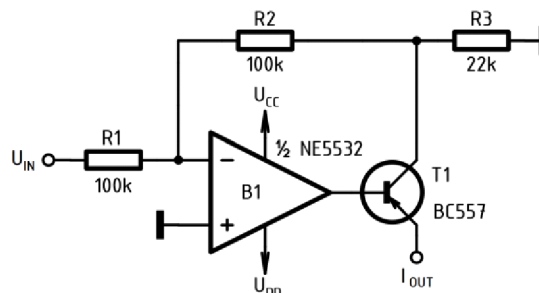
$$I_{OUT} = \frac{U_{IN} \cdot \frac{R_2}{R_1}}{R_3}. \quad (2.5)$$

Menením riadiaceho napätia od 1 do 10 V sa bude meniť riadiaci prúd obidvoch transkonduktorov od $25 \text{ }\mu\text{A}$ do $250 \text{ }\mu\text{A}$ a medzný kmitočet od 1 kHz do 10 kHz

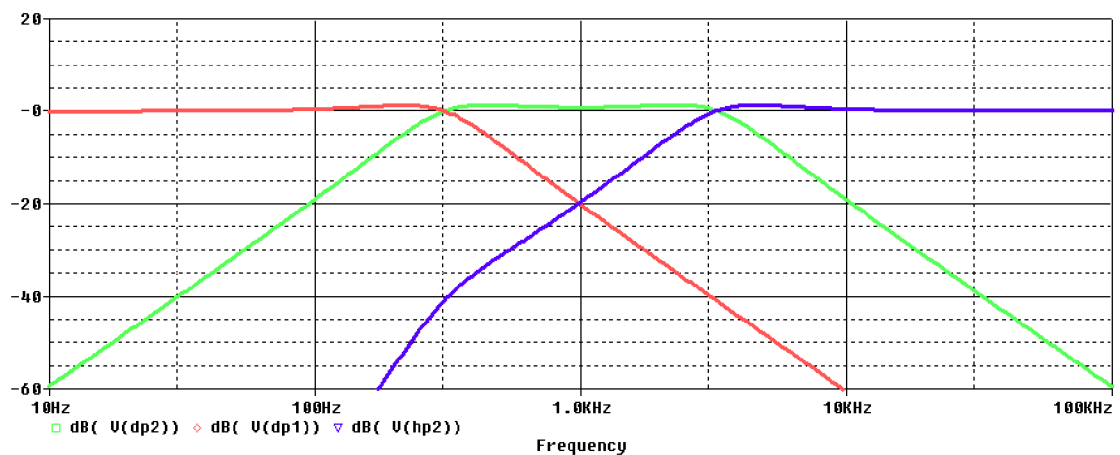
respektíve. Výmenou odporu R_1 za hodnotu $1\text{ M}\Omega$ je možné filter ladiť o jednu dekádu nižšie prúdom $2,5\ \mu\text{A}$ do $25\ \mu\text{A}$ na kmitočte 100 Hz až 1 kHz . Správna funkcia filtra bola overená simuláciou, ladenie pomocou prúdového zdroja má lineárny charakter a je veľmi presné (obrázok 2.7).



Obrázok 2.5 Výstup pásmovej priepusti filtra KHN pri menení kľudového prúdu cez zdroj v krokoch medzi 1 V až 10 V

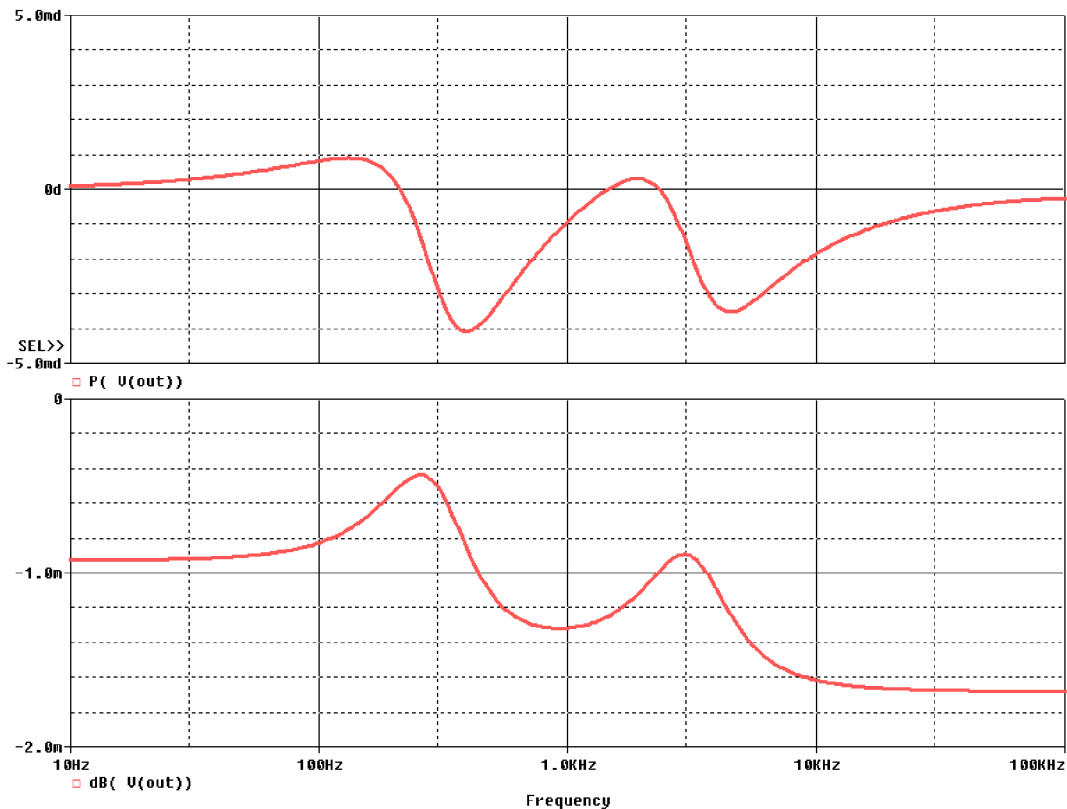


Obrázok 2.6 Schéma prúdového zdroja riadeného napätím pre riadenie g_m transkonduktorov.



Obrázok 2.7 Výstupy spodného, stredného a horného pásma filtrov zapojených ako výhybka

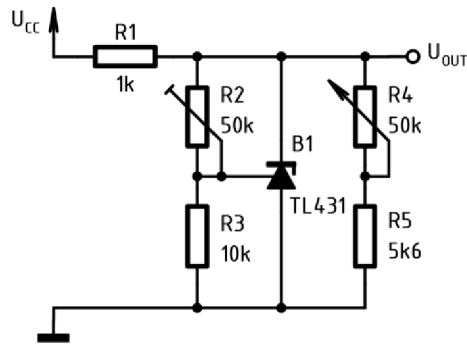
Pri obvodoch, ktoré kmitočtovo delia signál je dôležité, aby po tom ako je signál po delení znovu sčítaný bola fázová aj kmitočtová charakteristika nezmenená. Pri analógových filtroch je toto v praxi nemožné, avšak dobrým obvodovým návrhom je možné získať minimálnu kmitočtovú závislosť. Pokiaľ je činiteľ Q obidvoch obvodov filtra rovnaký, je možné jeho nastavením dosiahnuť zanedbateľný fázový posun výstupného signálu. Na obrázku 2.8 je kmitočtová a fázová charakteristika správne sčítaného signálu pre Q filtrov v obidvoch filtroch rovné 1,15.



Obrázok 2.8 Kmitočtová a fázová charakteristika výhybky po správnom sčítaní všetkých výstupov

Riadiace napätie filtra je generované presnou napät'ovou referenciou s obvodom TL431 [22] a následne vyvedené na delič pozostávajúci z potenciometra R_4 a odporu R_5 ktorým je možné lineárne napätie regulovať od 1V do 10V. Zapojenie zdroja riadiaceho napätia je na obrázku 2.9. Odpor R_1 obmedzuje maximálny prúd stabilizátoru. Potenciometer R_2 a odpor R_3 nastavujú výstupné napätie ktoré je dané vzťahom

$$U_{OUT} = 2,5 \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_3}\right). \quad (2.6)$$



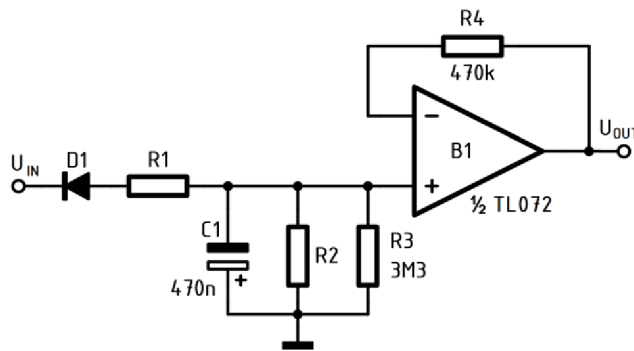
Obrázok 2.9 Zapojenie referenčného zdroja napätia

2.5 Návrh kompresoru dynamiky

Návrh kvalitného kompresoru s vlastnosťami, ktoré vyhovujú požiadavkám v štúdiovej praxi je obťažná záležitosť. Bolo preto pre konštrukciu zvolené overené zapojenie kompresoru z mixážnej konzoly SSL4000 [16]. Jedná sa o kompresor, ktorý využíva spätnú aj doprednú väzbu. Ako aktívne členy využíva kompresor SSL napäťovo riadené zosilňovače. Bloková schéma je na obrázku 1.3. Pôvodné zapojenie bolo prekreslené s použitím moderných súčiastok a publikované na stránke spoločnosti Gyraf Audio. Pre konštrukciu boli zvolené VCA THAT2180 [6], ktoré sú voľne dostupné u veľkých distribútorov ako napríklad Farnell. Kompresor používa dva riadené zosilňovače, jeden ako hlavný v dopredoväzobnom zapojení na ovládanie hlasitosti signálu a druhý ako vedľajší, zapojený spätnoväzobne slúžiaci na linearizáciu odozvy. Nižšie sú popísané všetky obvody kompresoru a ich funkcia.

2.5.1 Aktívny usmerňovač

Slúži na prevedenie vstupného signálu na jednosmerný, keďže takým sú riadené zosilňovače. Jedná sa o dva presné signálové jednocestné usmerňovače zapojené za sebou, čím získame signál plne usmernený. Tento obvod ďalej slúži na nastavenie kompresného pomeru. Do spätnej väzby druhého usmerňovača je zapojená zložitá sieť rezistorov, ktorých prepínaním sa bude meniť jeho zisk. Môžeme tak nastaviť rôzne pomery kompresie prepínaním sekcií siete 2:1, 4:1 alebo 10:1. Rezistorová sieť zároveň spôsobuje, že keď je úroveň signálu na vstupe usmerňovača pod 200 mV, je na jeho výstupe skoro nulové napätie.



Obrázok 2.11 Schéma časovacieho obvodu

2.5.3 Obvody regulácie zosilnenia a kompresnej úrovne.

Na konci spätnoväzobnej slučky sú dva skoro identické obvody zapojené paralelne, ktoré plnia dve veľmi odlišné funkcie. Jedná sa o invertujúci sumačný zosilňovač. Jeho výstupné napätie je dané vzťahom

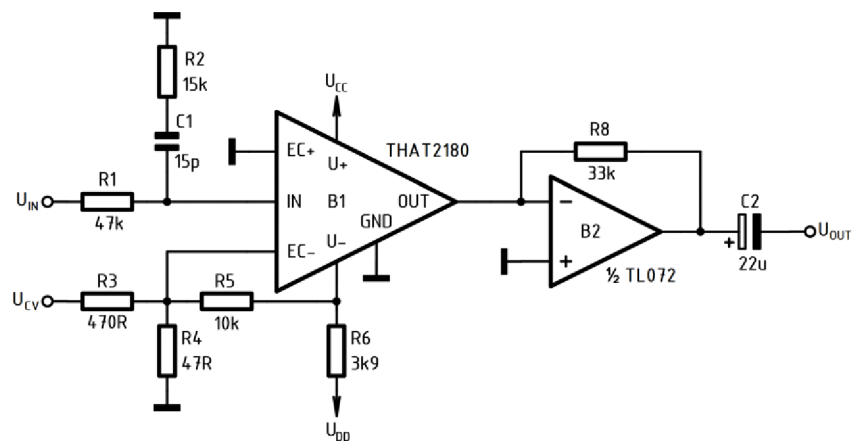
$$U_{OUT} = -U_{IN1} \left(\frac{R_3}{R_1} \right) - U_{IN2} \left(\frac{R_3}{R_2} \right). \quad (2.9)$$

Prvý slúži na nastavenie úrovne Threshold. Jeho výstup je privedený na riadiaci vstup druhého VCA, a tým uzatvára spätnoväzobnú slučku. Keďže usmerňovací obvod neprepúšťa signál pod 200 mV, vytvorí sa tak hluchá oblasť, kedy je VCA trvalo otvorený aj napriek tomu, že je na jeho vstupe signál. Tým, že do slučky privádzame záporné napätie, môžeme túto hluchú oblasť rozširovať vyššie a zosilňovač nebude dynamiku meniť ani pri väčšom signáli. Druhý identický obvod je pripojený na riadiaci vstup hlavného VCA a riadi zisk prichádzajúceho signálu. Pre zachovanie čo najmenšieho počtu prvkov v signálovej ceste je riadenie hlasitosti realizované externe cez jednosmerné napätie práve týmto externým zosilňovačom.

2.5.4 Zapojenie napäťovo riadených zosilňovačov

Riadené zosilňovače THAT2180 sú optimalizované pre audio aplikácie. Majú veľmi nízke skreslenie (0,01 % pre typ B) a široký dynamický rozsah (katalógový list uvádza až 120 dB). Zosilňovač má prúdový vstup aj výstup, takže je potrebné vstupný a výstupný prúd premeniť naspäť na napätie (najjednoduchšie rezistorom).

Riadiace napätie má invertujúci a neinvertujúci vstup, čo vyplýva z vnútornej štruktúry (diferenciálny zosilňovač). Pripojením kladnej elektródy na zem a menením zosilňovača cez záporný vstup získame nepriamoúmernú závislosť. Zosilňovač THAT2180 nemá lineárne riadenie, ale logaritmickú. Rozdiel napätia výstupu a vstupu o 1 dB odpovedá rozdielu 6 mV medzi riadiacimi vstupmi. Kvôli vysokej citlivosti je nutné riadiť zosilňovač cez napäťový delič, aby sa minimalizoval šum na výstupe. Zapojenie obidvoch zosilňovačov je odporúčané zapojenie z katalógového listu obvodu s mierne odlišnými hodnotami. Prúdový výstup je premenený na napäťový jedným operačným zosilňovačom. Operačný zosilňovač TL072 [20] bol vybraný pre zapojenie vedľajšieho zosilňovača pre jeho nižšiu cenu. Hlavný zosilňovač, ktorý je v signálovej ceste bol zvolený NE5532 pre jeho nižší šum a nižšie skreslenie [19].



Obrázok 2.12 Zapojenie vedľajšieho riadeného zosilňovača

2.5.5 Výsledky simulácií

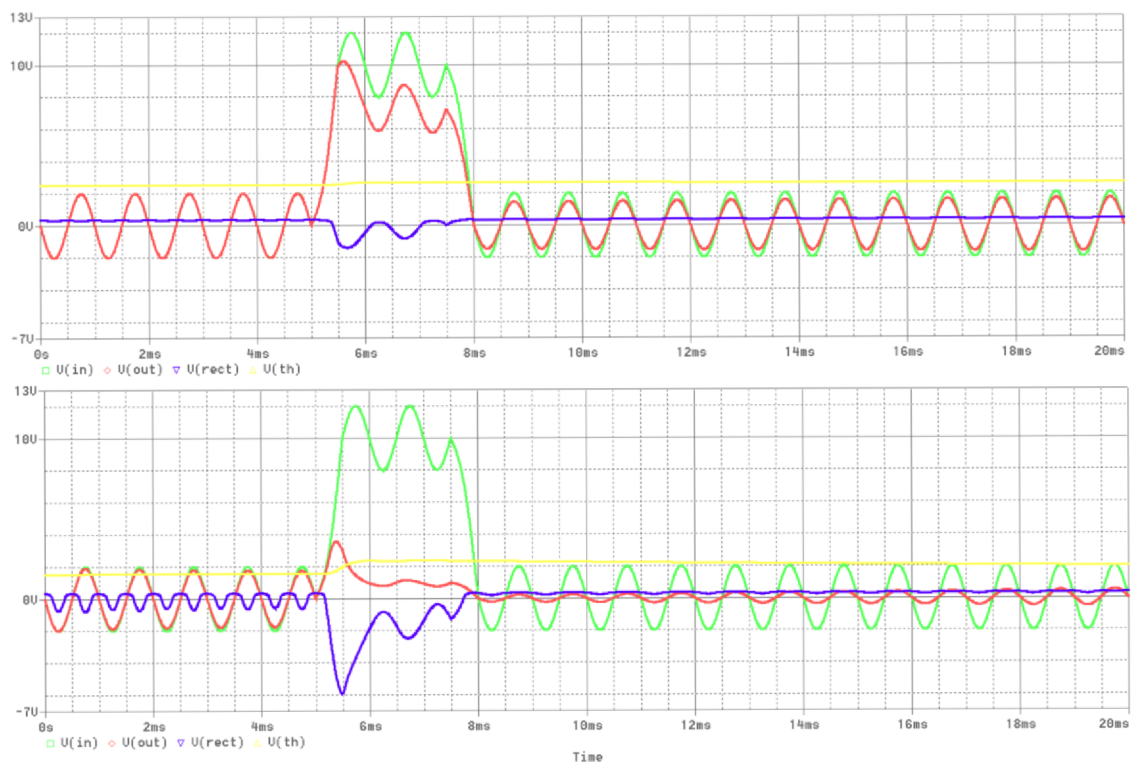
Správna funkcia celého obvodu kompresoru bola tak ako pri ostatných častiach zariadenia overená simuláciou. Makromodel zosilňovača THAT2180 je dostupný na stiahnutie priamo na stránke výrobcu [18]. Na simuláciu bol zvolený syntetický signál pozostávajúci zo sínusového priebehu sčítaného s krátkym kladným pulzom. Tento signál má pred-stavovať prudkú dynamickú zmenu, bežne vyskytujúcu sa v zvukovom signáli. Zobrazované veličiny boli vybrané tak, aby čo najjasnejšie zobrazovali celú funkciu kompresoru nasledovne:

V(in) vstupný signál kompresoru

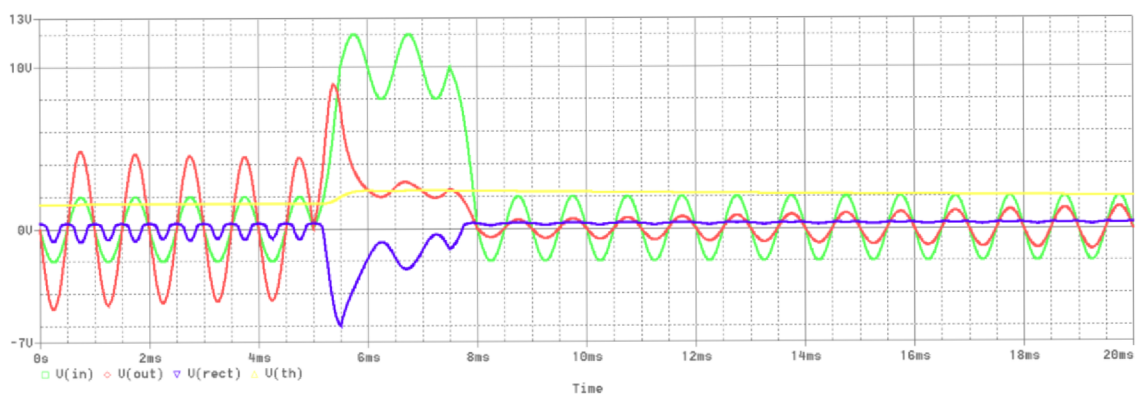
V(out) výstupný signál kompresoru

V(th) výstupný signál spätnoväzobného regulačného obvodu

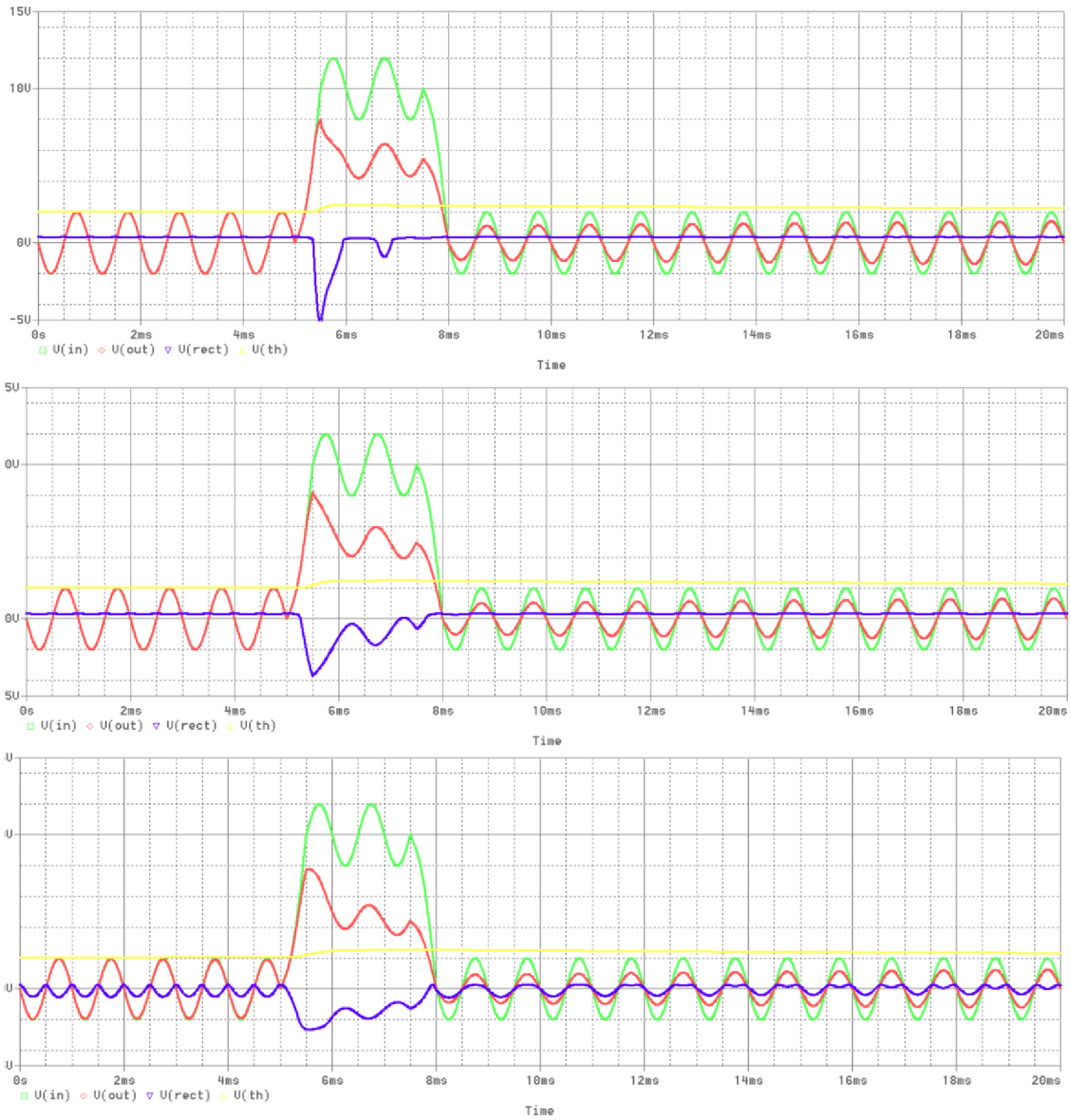
V(rect) výstupný signál usmerňovača



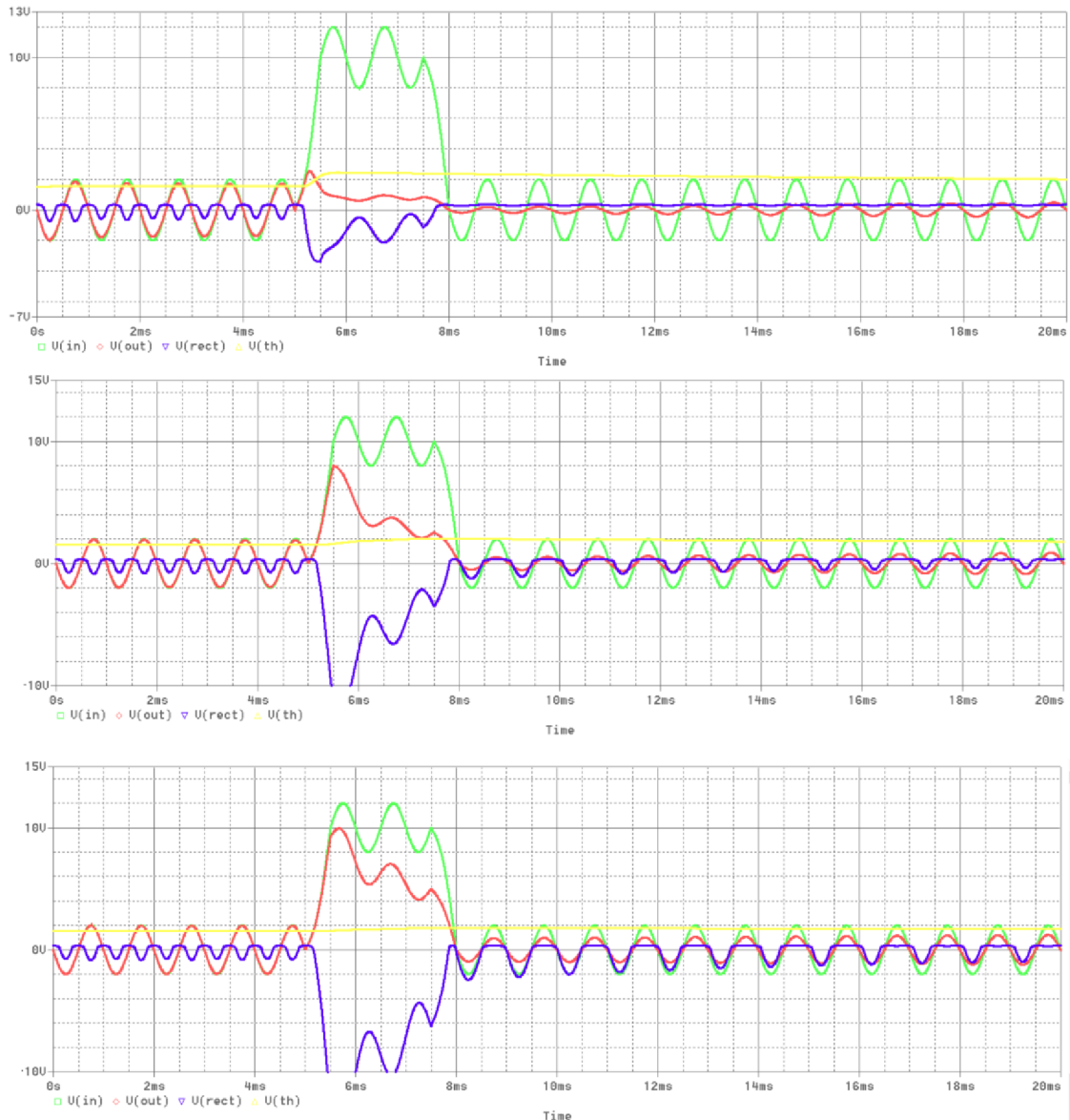
Obrázok 2.13 Odozva pri pridanom zisku signálu výstupu. Je taktiež možno pozorovať správnu funkciu konštanty Release



Obrázok 2.14 Porovnanie správania pri nízkej a vysokej hodnote Threshold



Obrázok 2.15 Porovnanie odozvy pri rôznych kompresných pomeroch, od vrchu 2:1, 4:1 a 10:1



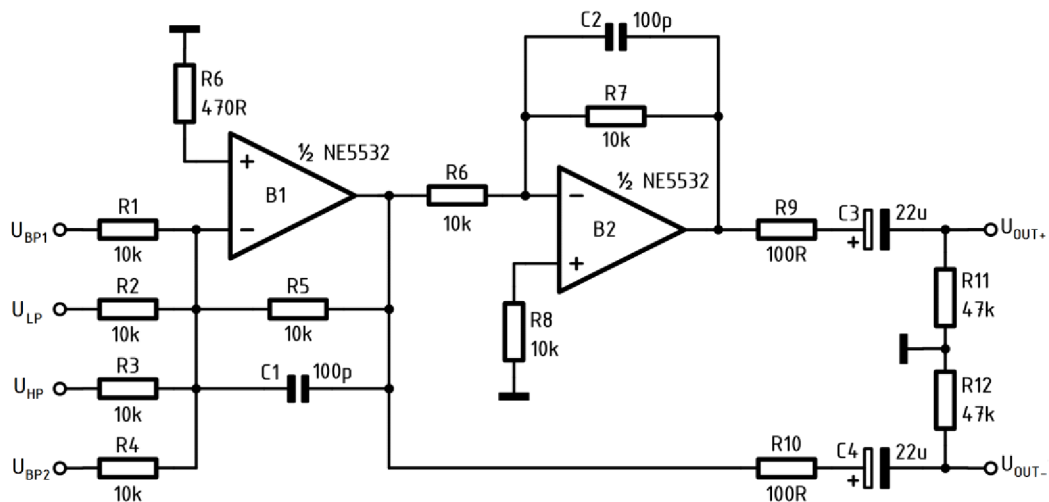
Obrázok 2.16 Porovnanie odozvy pri rôznych nastaveniach časovej konštanty Attack, od vrchu 0.1ms, 1ms a 3ms

2.6 Návrh výstupného obvodu

Výstupný obvod sa skladá zo sumačného zosilňovača spájajúci signál stredného pásma filtra (ktorý prešiel kompresorom) s horným a dolným pásmom filtra. Výstupný signál sumačného zosilňovača v zapojení na obrázku 2.16 je daný vzťahom

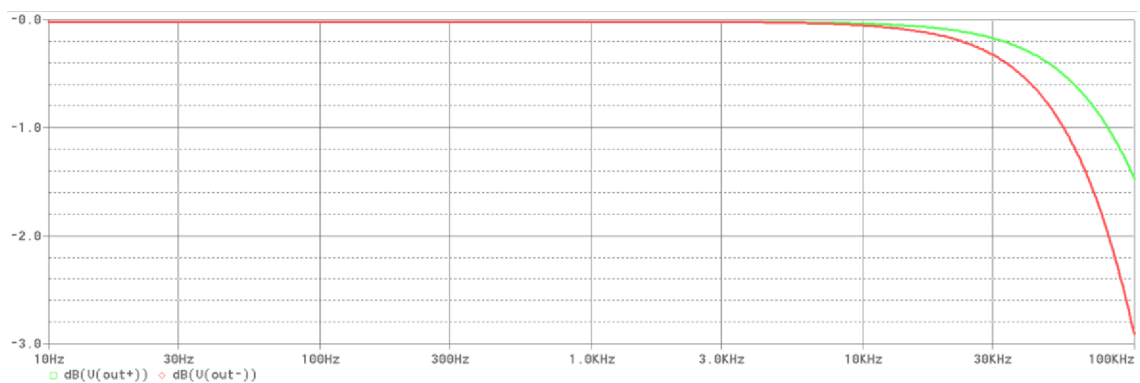
$$U_{OUT-} = -R_5 \left(\frac{U_{BP1}}{R_1} + \frac{U_{LP}}{R_2} + \frac{U_{HP}}{R_3} + \frac{U_{BP2}}{R_4} \right). \quad (2.9)$$

Keďže výstupný signál je invertovaný, bude predstavovať zápornú časť balancovaného výstupu. Kladnú časť získame opätovným invertovaním výstupného záporného signálu. Hodnoty odporov sú relatívne nízke za účelom zabrániť nadbytočnému šumu. Kondenzátory C_1 a C_2 slúžia na odfiltrovanie vysokofrekvenčného rušenia. Vázobné kondenzátory C_3 a C_4 oddeľujú výstup zariadenia od jeho vonkajšieho prostredia. Odpor R_{11} a R_{12} slúžia na vybitie kondenzátorov a uzemnenie výstupu vtedy, keď nie je na ňom pripojený žiadny signál.



Obrázok 2.17 Zapojenie výstupného sumačného obvodu, ktorý zároveň vytvára balancovaný výstup zariadenia

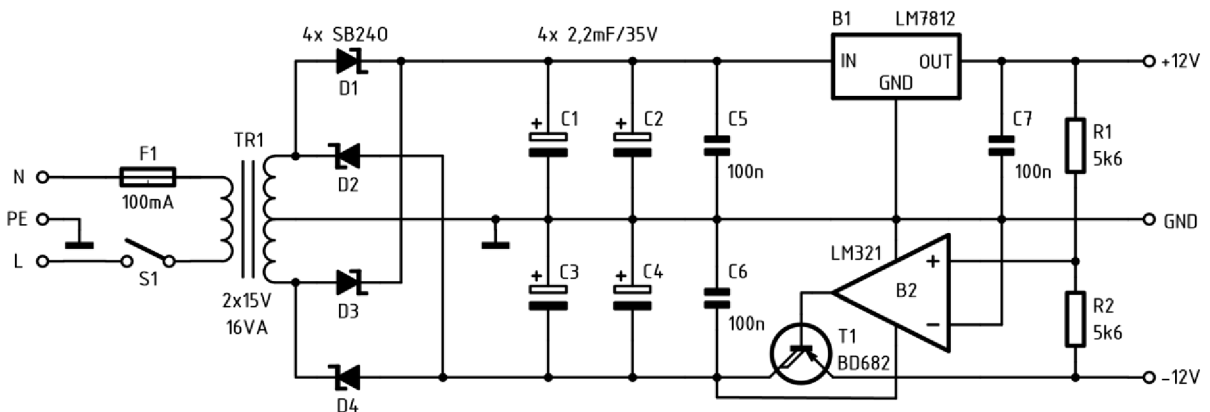
Správna funkcia obvodu bola overená simuláciou. Pre konštrukciu bol vybraný dvojitý operačný zosilňovač NE5532. Obvod funguje správne, kmitočtová charakteristika je na obrázku 2.17.



Obrázok 2.18 Kmitočtová charakteristika výstupu zariadenia

2.7 Návrh napájacieho zdroja

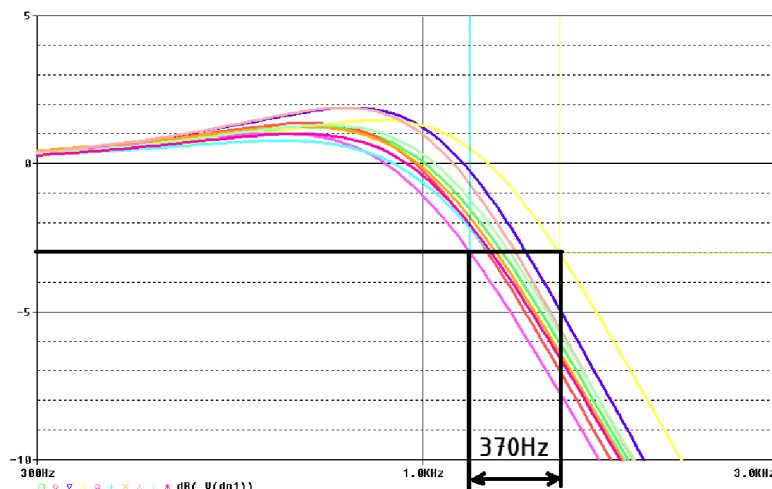
Keďže celé zariadenie pracuje len na signálovej úrovni, jeho celkový odber je veľmi malý. Zdroj pre zariadenia v oblasti štúdiovej techniky by mal mať čo najmenšie zvlnenie a šum, čo je možné najlepšie dosiahnuť s lineárnym zdrojom. Bol zvolený mierne nad dimenzovaný transformátor s maximálnym výstupným prúdom 1 A. Za normálnych okolností sa napájané zariadenie tomuto prúdu zďaleka nepriblíži, avšak zníži sa tým riziko klesnutia napätia pod minimálnu vstupnú hodnotu regulátora pri veľkom odbere prúdu tak ako aj a napät'ové špičky vznikajúce pri prevádzke jadra v saturácii. Na stabilizáciu napájania bol zvolený lineárny trojsvorkový stabilizátor LM7812 [23]. Na stabilizáciu záporného napätia bola zvolená kombinácia operačného zosilňovača LM321 [24] a darlingtonovho tranzistoru BD682 [25]. Na usmernenie striedavého prúdu bol zvolený mostík RS207 [26]. Aj napriek tomu, že existujú trojsvorkové stabilizátory záporného napätia, pri ich použití nesymetria výstupného napätia môže byť dosť veľká a posunúť virtuálnu zem zdroja, čo vnáša nepresnosť do všetkých obvodov s operačnými zosilňovačmi. Tento problém je ďalej zhoršený pri väčšom odbere, kde dochádza k zvýšeniu zvlnenia na výstupe, ktoré je medzi zápornou na kladnou vetvou vo fáze. Zapojenie s operačným zosilňovačom značne znižuje napät'ovú nesymetriu na hodnotu samotného použitého zosilňovača na jednotky mV a eliminuje druhý problém s pohybom nuly pri zvlnení napájania [27]. Zapojenie zdroja je na obrázku 2.19.



Obrázok 2.19 Schéma napájacieho zdroja

2.8 Tolerančná analýza

Na overenie správnej funkcie celého zariadenia s reálnymi súčiastkami bola vykonaná tolerančná analýza všetkých častí obvodu. Výhodné hodnoty súčiastok boli zvolené 5 % pre odpory a 20 % pre kondenzátory. Pri vstupných a výstupných obvodoch má tolerancia súčiastok najväčší vplyv na symetriu balancovaných vstupov a výstupov. Preto boli odpory nastavujúce zisk zosilňovačov zvolené s toleranciou 1 %. Tým boli dosiahnuté postačujúce výsledky. Obvod kompresoru sa javí veľmi stabilný, kompresný pomer aj konštanty Attack a Release opakovane dosahovali rovnakého výsledku. Menil sa však zisk výstupného signálu pri reakcii na napäťovú špičku. Boli preto znovu použité odpory s toleranciou 1 % všade, kde je nastavovaný zisk zosilňovačov. Pri obvode filtra vytvára tolerancia odporov v sumačnom zosilňovači rozdiel výstupného napätia, ktorý sa dá použitím odporov o tolerancii 1 % minimalizovať. Rozptyl kapacít ale vytvára príliš veľký rozdiel medzného kmitočtu asi 370 Hz pri medznom kmitočte 1 kHz (obrázok 2.18). Keďže cena presných kondenzátorov je veľmi vysoká a ich použitie by neponúklo úplné odstránenie tohto problému, bolo zvolené alternatívne riešenie. Ďalší faktor vnášajúci nepresnosť do nastavenia medzného kmitočtu je obvod riadenia kľudového prúdu napätím. Jednotné riešenie obidvoch problémov je náhrada odporu R_2 v spätnej väzbe operačného zosilňovača riadenia prúdu (obrázok 2.6) odporovým trimrom. Odporový trimmer bude tak isto nutné zaviesť pre riadenie činiteľa Q obidvoch blokov filtrov (R_C na obr. 2.4), keďže na správne fázové a amplitúdové sčítanie celého spektra signálu musia byť čo najbližšie.

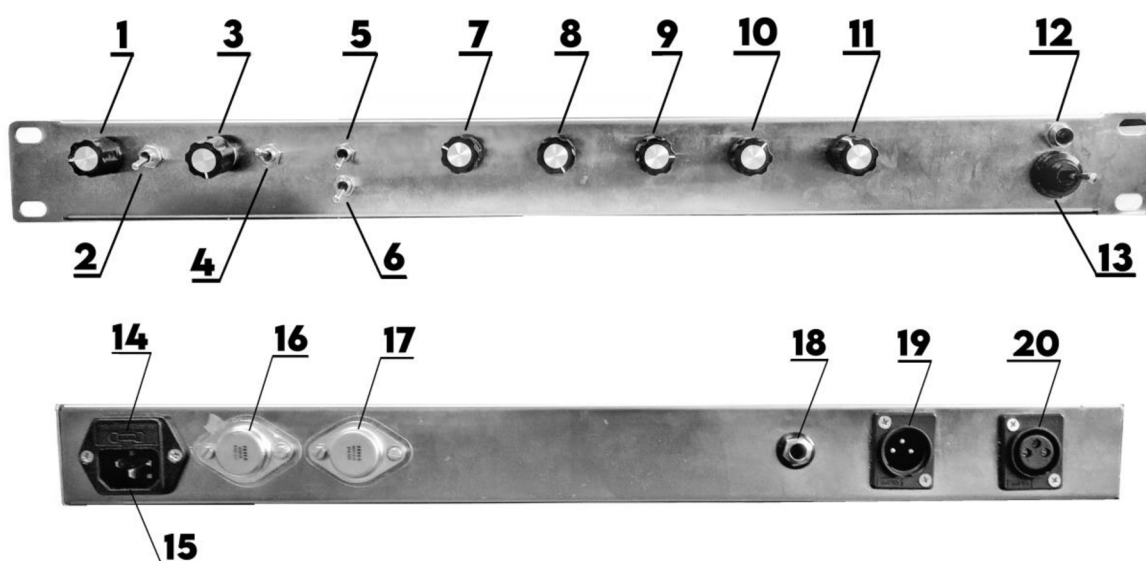


Obrázok 2.20 Posun medzného kmitočtu vplyvom tolerance súčiastok

3 Realizácia

Na vyhotovenie prístroja bola vybraná konštrukčná krabička, ktorá je kompatibilná s univerzálnym formátom 19“ rack, ktorý je už dlhé roky v štúdiovej technike zaužívaný. Jednotlivé časti prístroja boli zhotovené ako samostatné moduly na jednostranných doskách plošných spojov vyrobených v dielni Ústavu Radioelektroniky. Na osadenie bola zvolená kombinácia súčiastok typu SMT a THT, za účelom jednoduchšieho a efektívnejšieho návrhu. Z dôvodu dostupnosti bolo niekoľko súčiastok v realizácii použitých iných ako v teoretickom návrhu. V obvode kompresoru boli obvody THAT2181 nahradené ekvivalentom od neznámeho výrobcu. V obvode zdroja bol nahradený operačný zosilňovač LM321 zosilňovačom MAA741, tranzistor BD682 tranzistorami BC327 a KD617 v darlingtonovom zapojení a lineárny regulátor LM7812 ekvivalentom MA7812.

Osadené dosky boli v krabičke upevnené na podstavcoch a vzájomne prepojené káblami. Na signálové cesty boli zvolené tienené káble a ovládacie prvky boli prepojené štandardnými lankovými. Všetky ovládacie prvky boli vyvedené na predný panel zariadenia, zatiaľ čo konektory boli vyvedené na zadný panel. Výkonové prvky v puzdre TO-3 boli pripevnené na zadný panel cez sľudové izolačné podložky s teplovodivou pastou. Na obrázku 3.1 je fotografia predného a zadného panelu prístroja. Tu je podrobný popis všetkých prvkov, ktoré sú na paneloch viditeľné:



Obrázok 3.1 Ovládacie prvky predného a zadného panelu prístroja

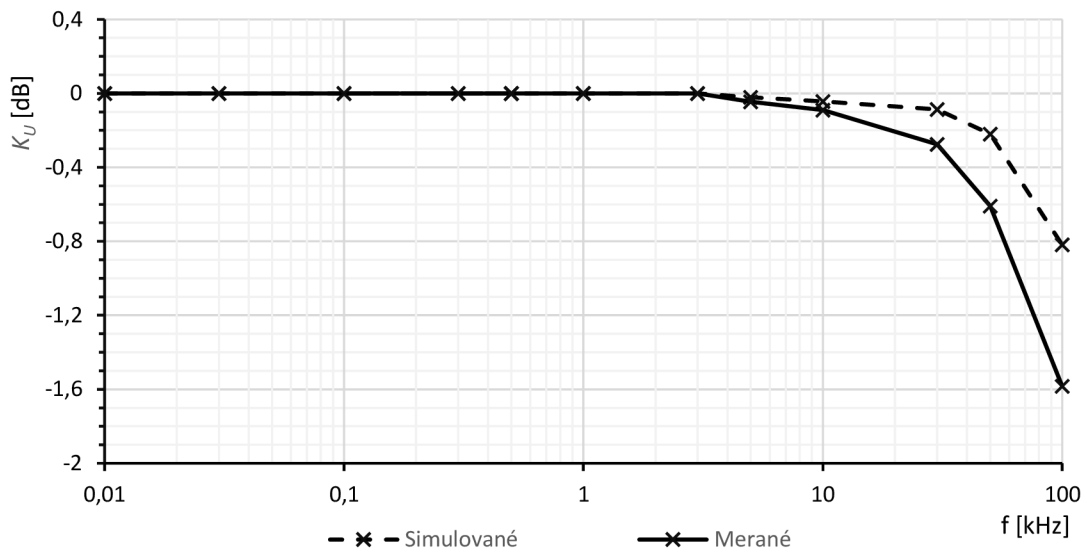
| | |
|---|---------------------------------|
| 1 – Nastavenie medzného kmitočtu horného filtra | 11 – Nastavenie zisku výstupu |
| 2 – Prepínač rozsahu horného filtra | 12 – Indikátor zapnutia |
| 3 – Nastavenie medzného kmitočtu dolného filtra | 13 – Sieťový vypínač |
| 4 – Prepínač rozsahu dolného filtra | 14 – Sieťová poistka |
| 5 – Prepínač signálu na vstupe kompresoru | 15 – Zásuvka sieťovej šnúry |
| 6 – Prepínač riadiaceho signálu kompresoru | 16 – Výkonový tranzistor zdroja |
| 7 – Nastavenie úrovne reakcie kompresoru | 17 – Lineárny regulátor zdroja |
| 8 – Nastavenie rýchlosti nábehu kompresie | 18 – Externý vstup „Sidechain“ |
| 9 – Nastavenie rýchlosti dobehu kompresie | 19 – Symetrický výstup |
| 10 – Nastavenie kompresného pomeru | 20 – Symetrický vstup |

Pri oživení aj pri meraní bol najprv každý modul odskúšaný na laboratórnom zdroji s prúdovým obmedzením. Po overení toho, že modul pracuje správne, bola vykonaná kalibrácia. V obvode filtra bol dostavený trimer referenčného napätia pre ladenie na 10,0 V. Ďalej boli trimry činiteľa Q obidvoch filtrov nastavené tak, aby bol v priepustnom pásme minimálny posuv vo fázovej charakteristike a minimálne rozdiely v amplitúde kmitočtovej charakteristiky v mieste, kde sa všetky pásma filtra sčítajú. Oživené moduly boli po overení správnej funkcie zapojené na vyhotovený zdroj. Modul kompresoru sa v čase písania tejto práce nepodarilo úspešne oživiť. Obvod THAT2181 bol od času odovzdania semestrálnej práce niekoľko mesiacov nedostupný, aj po údajnom naskladnení u distribútora. Z nutnosti bol teda zvolený náhradný obvod, údajný ekvivalent kúpený cez internetový obchod eBay s pochybnou originalitou. Pri pokuse o oživenie modulu kompresoru nepracoval správne a riadenie dynamiky nebolo možné. Pri pokuse o priame riadenie VCA jednosmerným napätím obvod nereagoval na zmenu. Presný dôvod nesprávnej funkcie nie je známy, autor práce ale nevyklučuje možnosť, že chyba môže byť aj v osadení alebo návrhu dosky.

3.1 Meranie

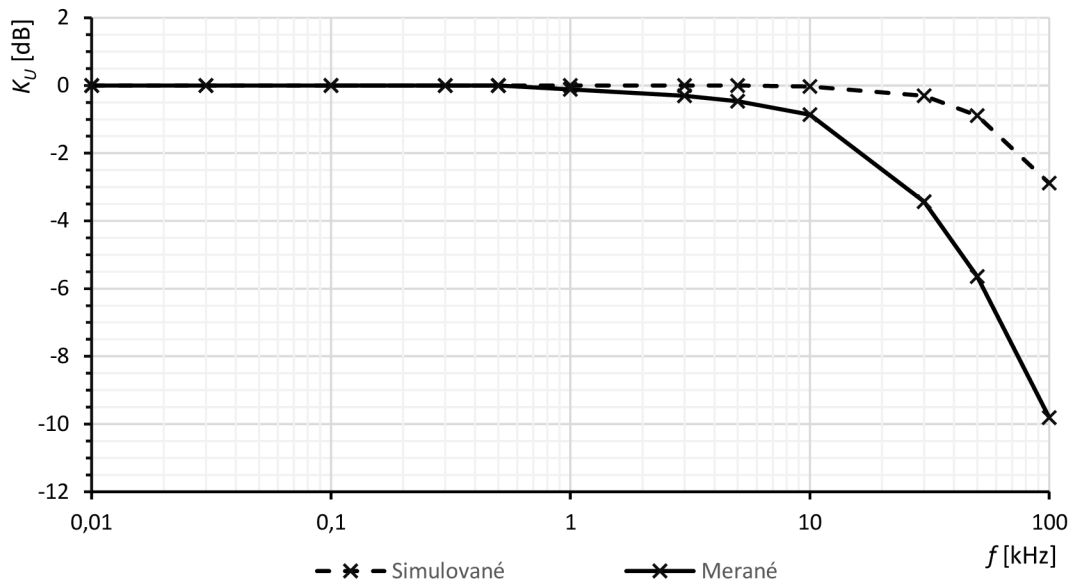
3.1.1 Meranie vstupného a výstupného obvodu

Dôležité parametre vstupného a výstupného obvodu sú nízke skreslenie a rovná kmitočtová charakteristika v audio pásme. Na obrázku 3.2 a 3.3 sú namerané kmitočtové charakteristiky. Z priebehov je zrejmé, že obvody pracujú podľa očakávania. Horné medzné kmitočty obidvoch obvodov sú nižšie ako bolo simulované, sú však stále vyhovujúce pre túto aplikáciu. Meraná úroveň výstupného signálu bola oproti simulovaným hodnotám taktiež nižšia. Pri vstupnom obvode o hodnotu 0,4 dB, pri výstupnom o 1,28 dB. Príčinou je pravdepodobne tolerancia odporov v spätnej väzbe zosilňovačov. Signál bolo generovaný na generátore Tektronix AFG310 a meranie úrovni a výstupných priebehov na osciloskope HP 54601B.



Obrázok 3.2 Kmitočtová charakteristika vstupného obvodu

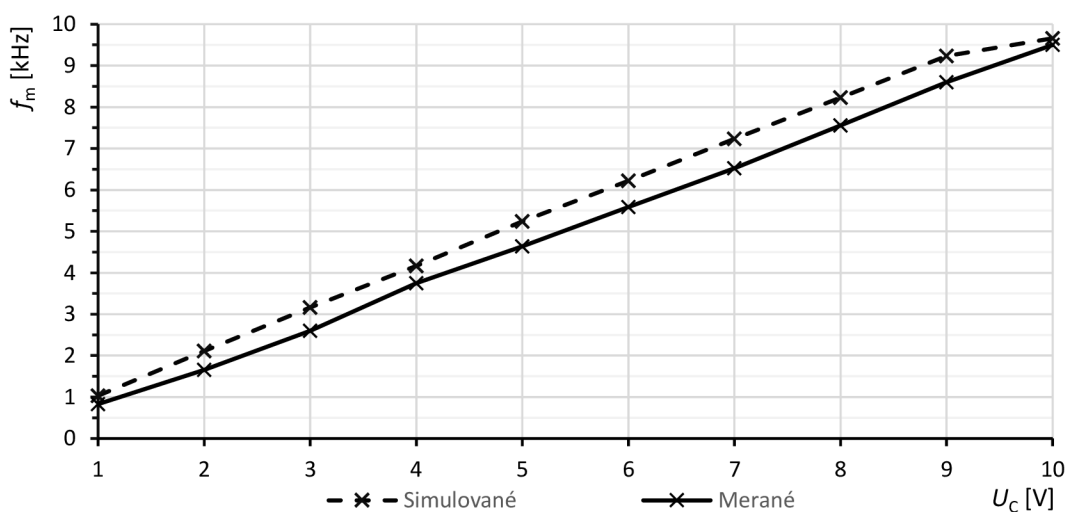
Harmonické skreslenie obidvoch obvodov bolo merané funkciou FFT na osciloskope Keysight DSOX3022T s použitím vnútorného generátoru. Skreslenie obidvoch obvodov bolo nižšie ako skreslenie vnútorného generátoru a hodnoty nebolo možné presne vyčísliť. Je však možné určiť, že skreslenie je menšie ako 0,3%, čo je nameraná hodnota skreslenia výstupného signálu generátoru.



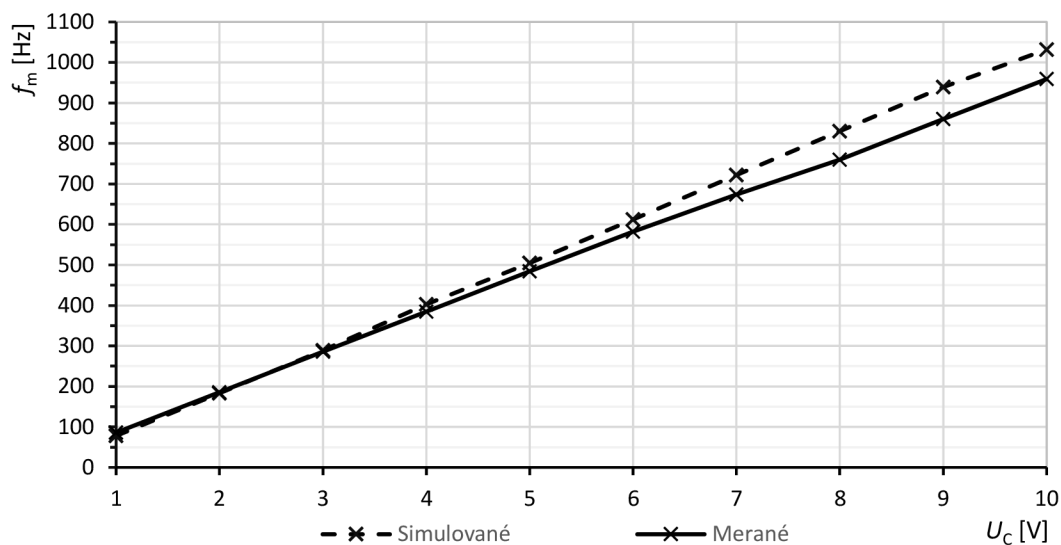
Obrázok 3.3 Kmitočtová charakteristika výstupného obvodu

3.1.2 Meranie parametrov filtra

Dôležité parametre obvodu filtra sú linearita ladenia riadiacim napätím, impulzná odozva filtra, skreslenie a správne amplitúdové a fázové sčítanie signálu na výstupe. Riadiace napätie bolo krokované v obidvoch pracovných pásmach a pomocou generátoru a osciloskopu bol odčítaný medzný kmitočet. Výsledné charakteristiky sú na obr. 3.4 a 3.6. Zobrazené grafy sú pre prvý filter v obvode, obdobne boli všetky merania vykonané na druhom filtri a dosiahnuté výsledky boli prakticky rovnaké. Ladiaca charakteristika filtra má lineárny charakter.

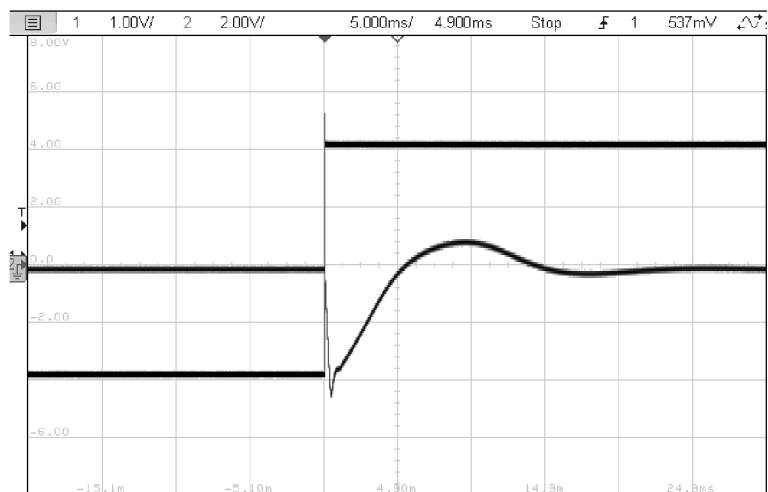


Obrázok 3.4 Ladiaca charakteristika filtra v hornom rozsahu



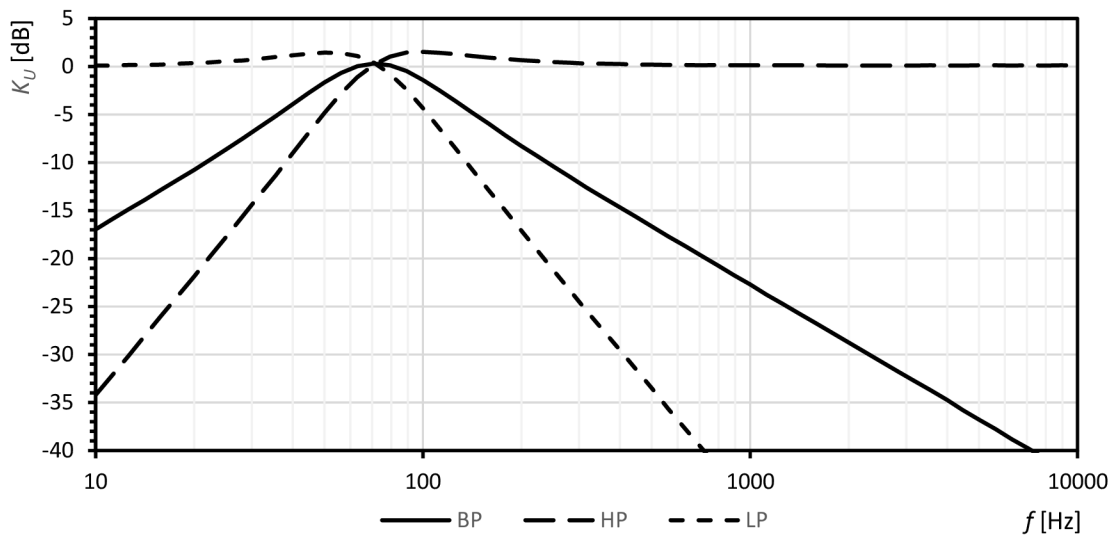
Obrázok 3.6 Ladiaca charakteristika filtra v dolnom rozsahu

Ďalej bola meraná odozva filtra na skok vstupného signálu. Výsledok je na obrázku 3.5. Obvod sa správa podľa očakávaní, v rámci normy pre tento typ filtra. Po dosiahnutí maximálnej hodnoty na výstupe filtra nastane zákmit v opačnom smere o polovici veľkosti impulzu a po 25 ms sa výstup filtra ustáli. Zákmit na počiatku nábežnej hrany vstupného signálu je spôsobený zákmitom generátoru použitého na vytváranie impulzu, nie filtrom.

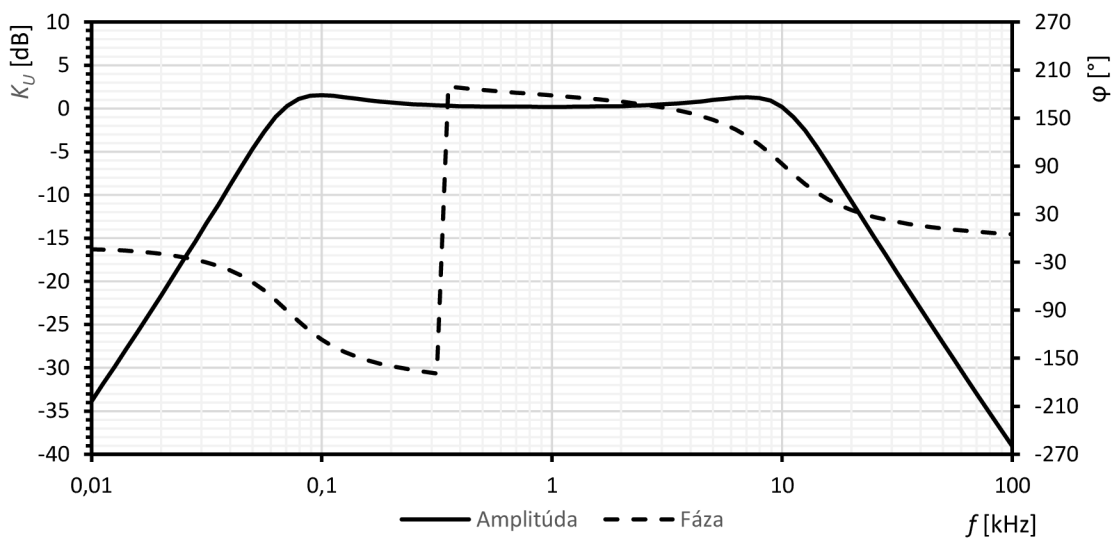


Obrázok 3.5 Odozva výstupu filtra na skok

Boli taktiež zmerané kmitočtové a fázové charakteristiky obidvoch filtrov. Na obrázku 3.7 je vidno výstupy všetkých troch funkcií prvého filtra (t.j. hornú, dolnú a pásmovú prepust') naladeného na kmitočet 76 Hz. Z obrázku je zrejmé, že filter pracuje správne podľa očakávaní. Strmosť útlmu mimo priepustné pásmo je 20 dB/dek, čo odpoovedá filteru druhého rádu. Na obrázku 3.8 je kmitočtová a fázová charakteristika dolnej prepusti na výstupe druhého filtra. Filtre sú zapojené do série ako trojpásmová výhybka tak, že horná priepust' prvého filtra je zapojená na vstup druhého filtra. Tento výstup teda tvorí stredné pásmo výhybky, ktoré bude spracované kompresorom. Na obrázku 3.9 je výstup horného a dolného pásma, ktoré kompresor nespracúva, ale je

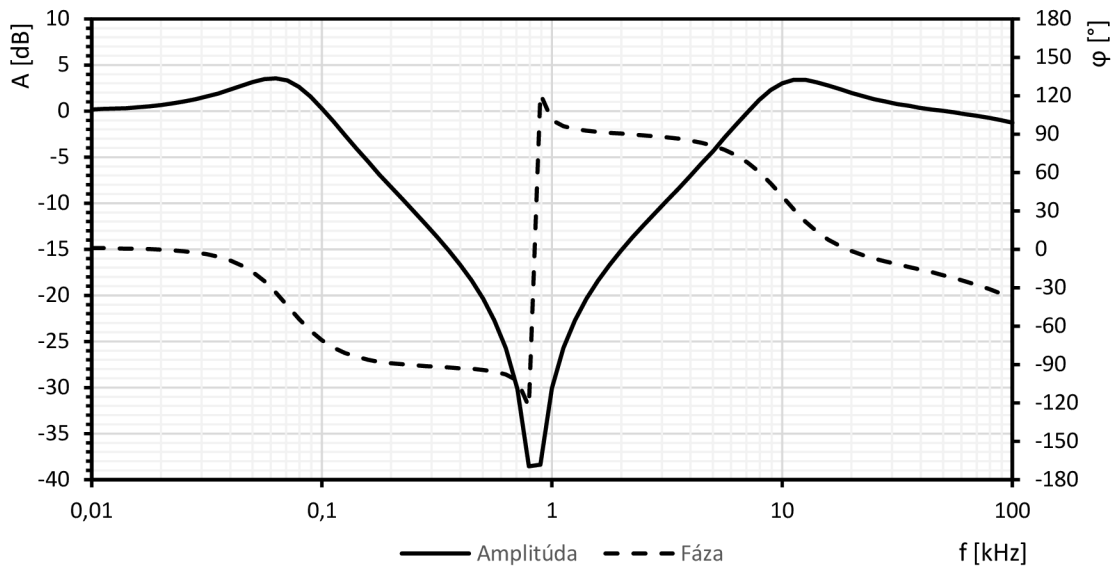


Obrázok 3.7 Charakteristika hornej, dolnej a pásmovej prepusti prvého filtra

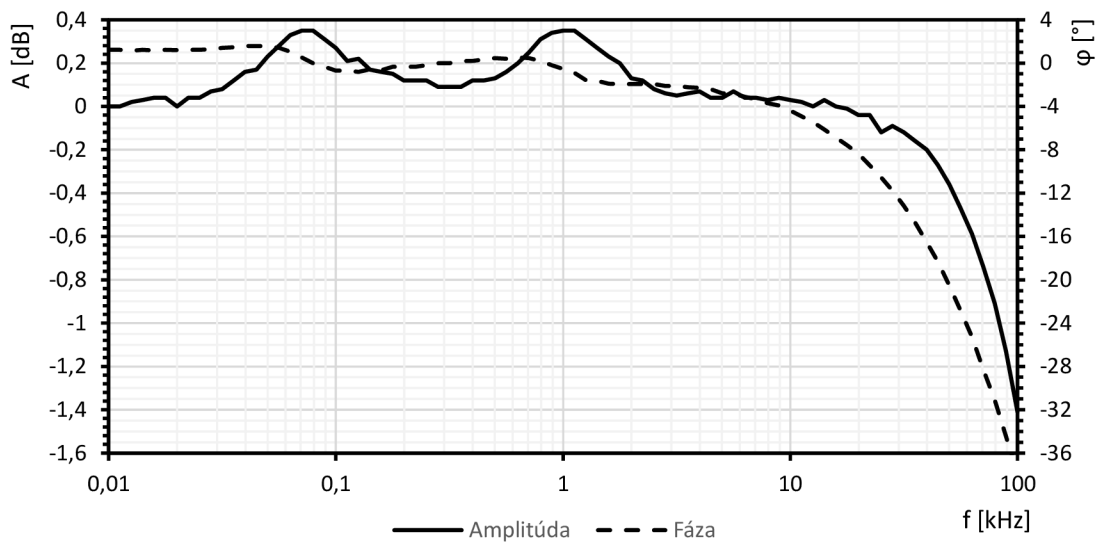


Obrázok 3.8 Charakteristika výstupu stredného pásma výhybky

vyvedený na výstup, aby sa tam sčítal so signálom z kompresoru. Na obrázku 3.10 je kmitočtová charakteristika výstupu celého zariadenia.



Obrázok 3.9 Charakteristika výstupu bočných pásiem

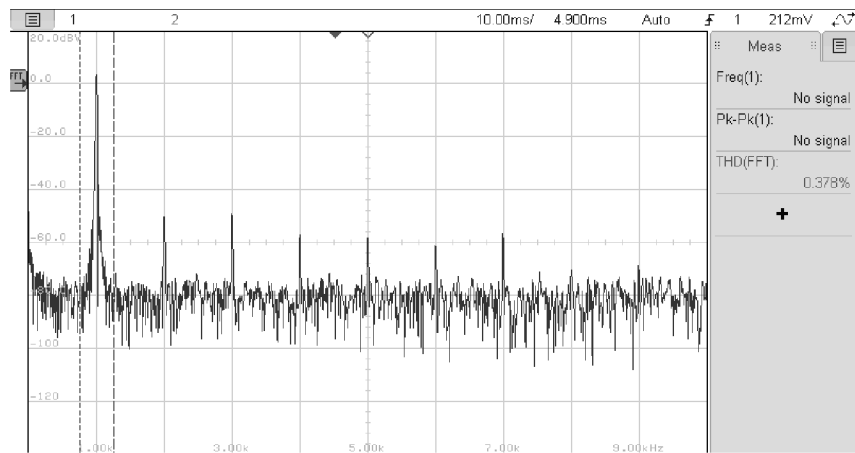


Obrázok 3.10 Charakteristika výstupu celého zariadenia

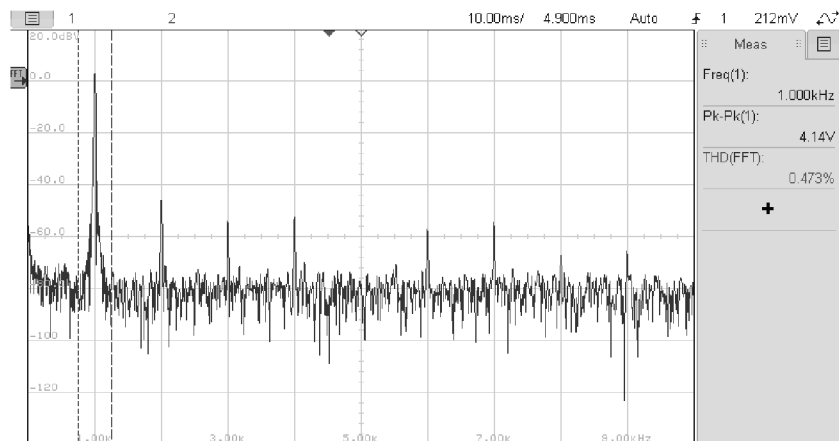
Fáza aj amplitúda sa mení vzhľadom na kmitočť len minimálne, čo je spôsobené dobrým nastavením činiteľa Q obidvoch filtrov. Na nastavenie boli použité jednotáčkové uhlíkové trimre. Použitím cermetových viacotáčkových trimrov by umožnilo nastavenie s omnoho väčšou citlivosťou, a tak by bolo možné dosiahnuť ešte menší pohyb fázy a amplitúdy. Blížiac sa k 100 kHz začne amplitúda aj fáza prudko klesať, čo je spôsobené kmitočtovým obmedzením výstupného obvodu (obrázok 3.3). Pre zvýraznenie tejto

skutočnosti je na charakteristike naladený iný kmitočet filtrov, 80 Hz pre prvý filter a 1 kHz pre druhý.

Harmonické skreslenie filtra bolo namerané veľmi malé, rovnako ako v prípade vstupného a výstupného obvodu bolo menšie ako skreslenie použitého generátoru. Pri zvýšení úrovne nad 1 V začne byť skreslenie filtra merateľné a bola nameraná hodnota 0,37 % a na signáli o amplitúde 2 V bolo namerané skreslenie 0,49 %. Všetky merania parametrov filtrov boli vykonané na osciloskope Keysight DSOX3022T.



Obrázok 3.12 FFT analýza výstupného signálu, z ktorej bolo odčítané skreslenie (vstupné napätie 1V).



Obrázok 3.11 FFT analýza výstupného signálu, z ktorej bolo odčítané skreslenie (vstupné napätie 2V).

Záver

V riešení práce bol vypracovaný kompletný obvodyový návrh zariadenia pozostávajúceho z preladiteľného pásmového filtra a analógového kompresoru. Najprv bola vyhotovená blokovaná schéma celého zariadenia a následne boli všetky funkčné bloky realizované pomocou vhodne vybraných alebo navrhnutých obvodov. Boli vybrané alebo vypočítané všetky súčiastky a následne bola správna funkčnosť každého bloku zariadenia overená simuláciou pomocou programu PSpice, z ktorého pochádzajú všetky grafy prezentované v návrhovej časti práci. Výsledkom je riešenie zadanej témy využívajúce bežne dostupné súčiastky. Vstupom aj výstupom zariadenia je balancovaný signál linkovej úrovne. Pásmový filter úspešne rozdeľuje spektrum vstupného signálu na dvoch medzných kmitočtoch, ktoré sa na výstupe naspäť sčítajú so zanedbateľným fázovým rozdielom a útlmom. Zapojenie kompresoru dynamiky funguje v simulácii správne a spracováva signál podľa očakávania.

Zariadenie bolo v jeho celosti vyrobené a teoretické hodnoty, ktoré boli získané simuláciami, boli overené na vyrobenom prototypu. Ladenie filtra pracuje správne, má lineárny charakter, avšak ako bolo už pri simulácii dokázané tolerancia súčiastok znižuje presnosť naladeného kmitočtu. Skreslenie celého zariadenia je menšie ako 0,3 % pri bežných signálových úrovniach. Pre dosiahnutie konštantnej fázovej a amplitúdovej odozvy na výstupe je potrebné presné nastavenie činiteľa Q trimrami, čím sa podarilo dosiahnuť fázovú charakteristiku, kde maximálny posun uhlu je 2 stupne v kladným aj záporným smerom a amplitúdovú charakteristiku, kde v bodoch naladenia filtra je zisk väčší o maximálne 0,4 dB. Je však možné dosiahnuť omnoho lepších výsledkov ako boli prezentované pri použití viacotáčkových trimrov. Z dôvodu neúspešného oživenia obvodu kompresoru, nie sú vo výsledkoch práce prezentované jeho merania ani demonštrácie praktických aplikácii celého zariadenia.

Použitá literatura

- [1] SELF, Douglas. *Small signal audio design*. Oxford: Focal Press, 2010. ISBN 978-0-240-52177-0.
- [2] VLACHÝ, Václav. *Praxe zvukové techniky*. 3., aktualiz. a dopl. vyd. Praha: Muzikus, 2008. ISBN 978-80-86253-46-6.
- [3] DRONEY, Mauren a MASSEY, Howard. [online]. *Compression applications*. TC Electronic, 2001. [cit. 13.11.2021]. Dostupné na internete: https://web.archive.org/web/20101231072136/http://www.tcelectronic.com/media/dron_ey_massey_2001_compres.pdf
- [4] TALBOT, Daniel. *Practical analog and RF electronics*. Boca Raton: CRC Press / Taylor & Francis Group, 2021.
- [5] HEBERT, Garry K. *An improved monolithic voltage-controlled amplifier*. New York: Journal of the Audio Engineering Society, 1995. Dostupné na internete: http://www.thatcorp.com/datashts/AES4055_An_Improved_Monolithic_VCA.pdf
- [6] THAT CorpoRation [online katalógový list] *THAT2180A, 2180B, 2180C*. posledné úpravy 2008 [cit. 13.11.2021]. Dostupné na internete: http://www.thatcorp.com/datashts/THAT_2180-Series_Datasheet.pdf
- [7] DOSTÁL, Tomáš. *Elektrické filtry: přednášky a numerická cvičení*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2004. ISBN 80-214-2561-X.
- [8] WILLIAMS, Arthur Bernard. *Electronic filter design handbook: LC, active, and digital filters*. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1988.
- [9] PACTITIS, S. A. *Active filters: Theory and design*. Boca Raton: CRC Press, 2008. ISBN 1-4200-5476-7.

- [10] SABIN, William E. a Edgar O. SCHOENIKE. *HF radio systems & circuits*. Revised 2nd edition. Edison, NJ: Scitech Publishing, 2013. ISBN 9781884932045.
- [11] WIRSUM, Siegfried. *Abeceda nf techniky*. Praha: BEN - technická literatura, 1998. ISBN 80-86056-26-0.
- [12] NICHOLSON, P.F. a MILLER, S. *The Bifet design manual: general purpose, low noise, low offset*. Texas Instruments, 1985.
- [13] DOSTÁL, T.; ŠOTNER, R. *Multifunctional tuned second-order ARC filter with commercially available transconductors*. In Proceedings of 17th International Conference Radioelektronika 2007. Brno: Dep. of Radio Electronics, Brno University of Technology, 2007. s. 389-392. ISBN 1-4244-0821-0.
- [14] Texas Instruments [online katalógový list] *LM13700*. posledné úpravy 2015 [cit 13.11.2021]. Dostupné na internete: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm13700.pdf>
- [15] CHAMBERLIN, Hal. *Musical applications of microprocessors*. 2nd ed. Hasbrouck Heights, N.J.: Hayden Book Co., c1985. ISBN 0810457687.
- [16] Gyraf Audio [online] *The SSL Mixbus Compressor Clone*, 2013 [cit 13.11.2021]. Dostupné na internete: <https://gyraf.dk/wp-content/uploads/2018/05/The-SSL-Mixbus-Compressor-Clone.pdf>
- [17] BIRD, J. O. *Electrical and electronic principles and technology*. Sixth edition. New York: Routledge, Taylor & Francis Group, 2017. ISBN 9781315561875.
- [18] THAT Corporation [online] *SPICE Macro Models*. [cit 13.11.2021]. Dostupné na internete: <http://www.thatcorp.com/datashts/THATMacroModels-Rev05.zip>
- [19] Texas Instruments [online katalógový list] *NE5532*. posledné úpravy 2015 [cit 13.11.2021]. Dostupné na internete: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ne5532a.pdf?ts=1640411769186>

- [20] Texas Instruments [online katalógový list] *TL072*. posledné úpravy 2021 [cit 21.12.2021]. Dostupné na internete: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl072.pdf?ts=1640627481263>
- [21] VISHAY [online katalógový list] *IN4148*. posledné úpravy 2017 [cit 21.12.2021]. Dostupné na internete: <https://www.vishay.com/docs/81857/1n4148.pdf>
- [22] Texas Instruments [online katalógový list] *TL431*. posledné úpravy 2018 [cit 28.5.2022]. Dostupné na internete: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl431.pdf?ts=1653708288858>
- [23] Texas Instruments [online katalógový list] *LM7812*. posledné úpravy 2016 [cit 28.5.2022]. Dostupné na internete: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm7800.pdf?ts=1653722132418>
- [24] Texas Instruments [online katalógový list] *LM321*. posledné úpravy 2014 [cit 28.5.2022]. Dostupné na internete: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm321.pdf?ts=1653655927438>
- [25] ON Semiconductor [online katalógový list] *BD682G*. posledné úpravy 2013 [cit 28.5.2022]. Dostupné na internete: <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/bd676-d.pdf>
- [26] RECTRON [online katalógový list] *RS207*. posledné úpravy 2013 [cit 28.5.2022]. Dostupné na internete: https://www.rectron.com/data_sheets/rs201-%20rs207.pdf
- [27] MALLAT, Jaroslav a Jiří KROFTA. *Stabilizované napájecí zdroje pro mikroelektroniku*. 2., dopl. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1986. Knižnice technických aktualit.

Zoznam skratiek a symbolov

Skratky:

| | |
|---------|--|
| DSP | digital signal processing |
| VCA | napäťovo riadený zosilňovač (voltage controlled amplifier) |
| OTA | operačný transkonduktančný zosilňovač |
| DP (LP) | dolná priepusť |
| PP (BP) | pásmová priepusť |
| HP | horná priepusť |
| THD | celkové harmonické skreslenie (total harmonic distortion) |
| IN | vstupná svorka |
| OUT | výstupná svorka |

Symboly:

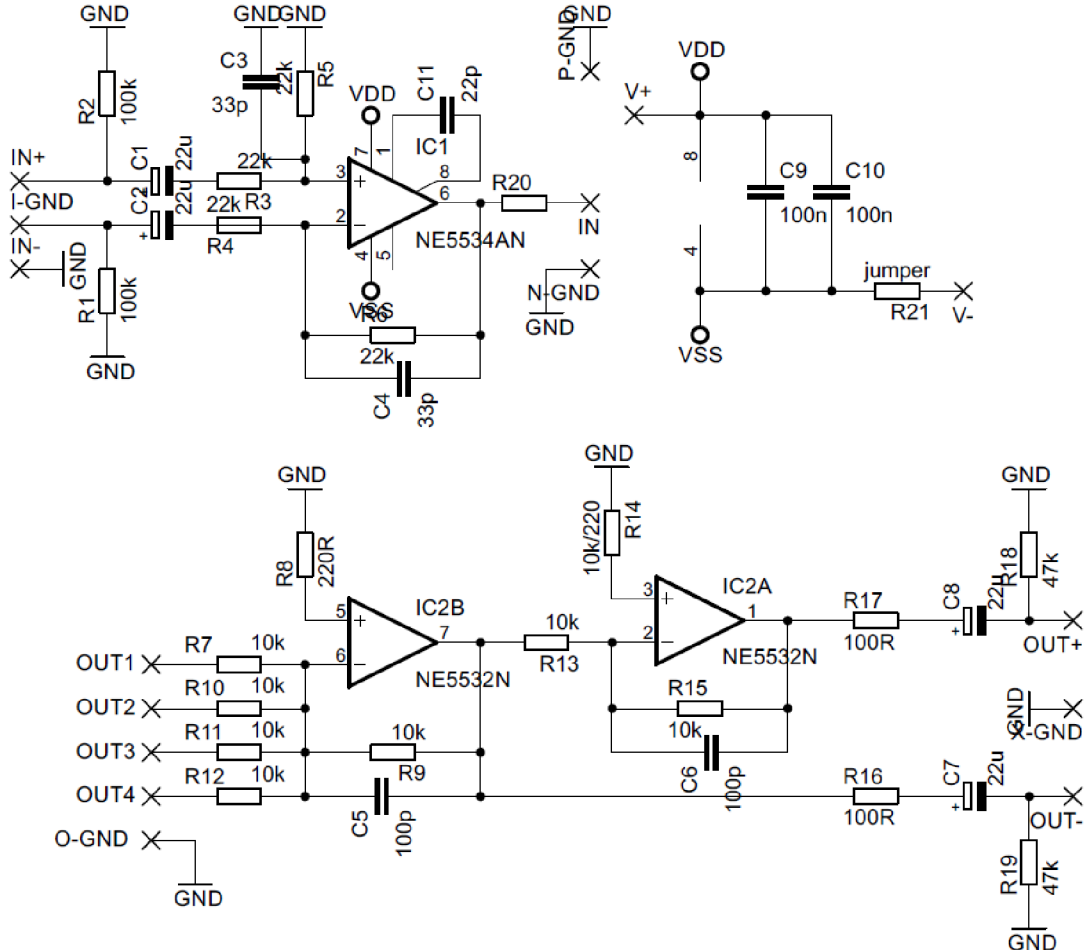
| | | |
|----------------|----------------|--------------|
| U | napätie | [V] |
| I | prúd | [A] |
| R | odpor | [Ω] |
| C | kapacita | [pF] |
| Z | impedancia | [Ω] |
| G | vodivosť | [S] |
| Q | činiteľ akosti | [-] |
| f | kmitočet | [Hz] |
| T | čas | [s] |
| A _U | zosilnenie | [-] |
| K | prenos | [-] |
| g _m | strmosť OTA | [mA/V] |

Zoznam príloh

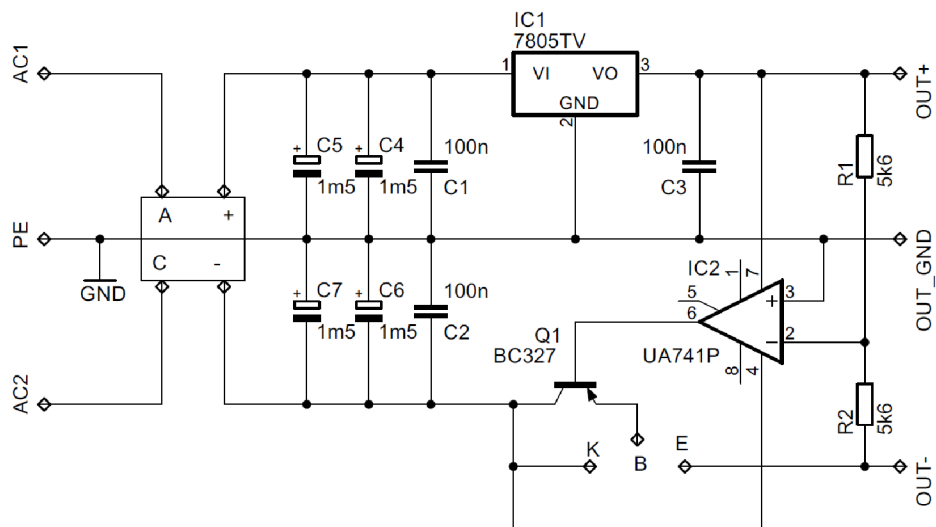
| | |
|--|-----------|
| Príloha A – Schémy zapojenia prístroja | 49 |
| Príloha A.1 Schéma dosky vstupného a výstupného obvodu | 49 |
| Príloha A.2 Schéma dosky napájacieho zdroja..... | 49 |
| Príloha A.3 Schéma dosky filtrov | 50 |
| Príloha A.4 Schéma dosky kompresoru..... | 51 |
| Príloha B – DPS zdroja | 52 |
| Príloha C – DPS vstupného a výstupného obvodu..... | 53 |
| Príloha D – DPS kompresoru | 54 |
| Príloha E – DPS filtra..... | 55 |
| Príloha F – Zoznam súčiastok..... | 57 |
| Príloha F.1 – Zoznam súčiastok vstupného a výstupného obvodu | 57 |
| Príloha F.2 – Zoznam súčiastok zdroja..... | 57 |
| Príloha F.2 – Zoznam súčiastok filtra | 58 |
| Príloha F.3 – Zoznam súčiastok kompresoru..... | 59 |
| Príloha G – fotografie z výroby práce..... | 60 |

Príloha A – Schémy zapojenia prístoroja

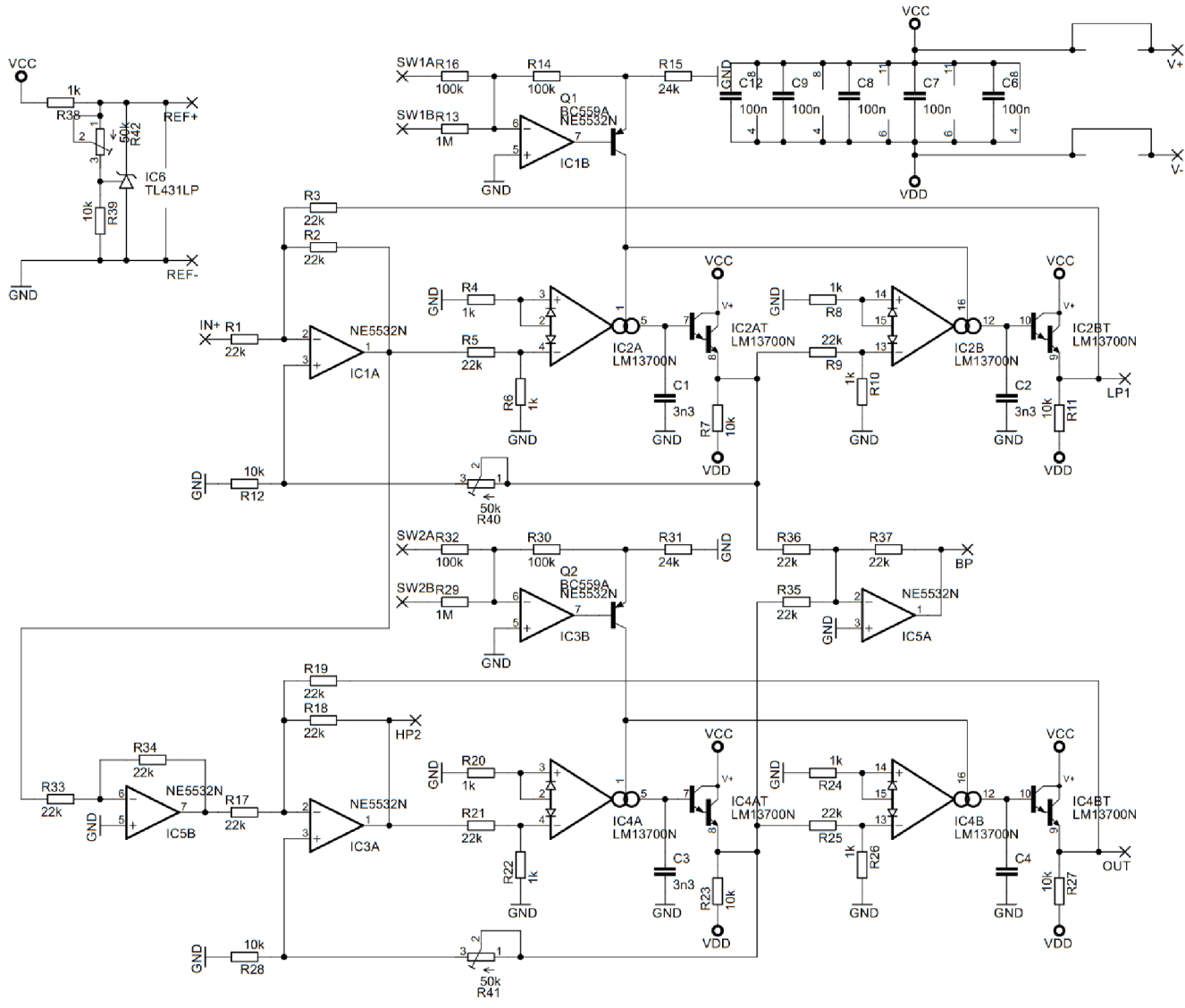
Príloha A.1 Schéma dosky vstupného a výstupného obvodu



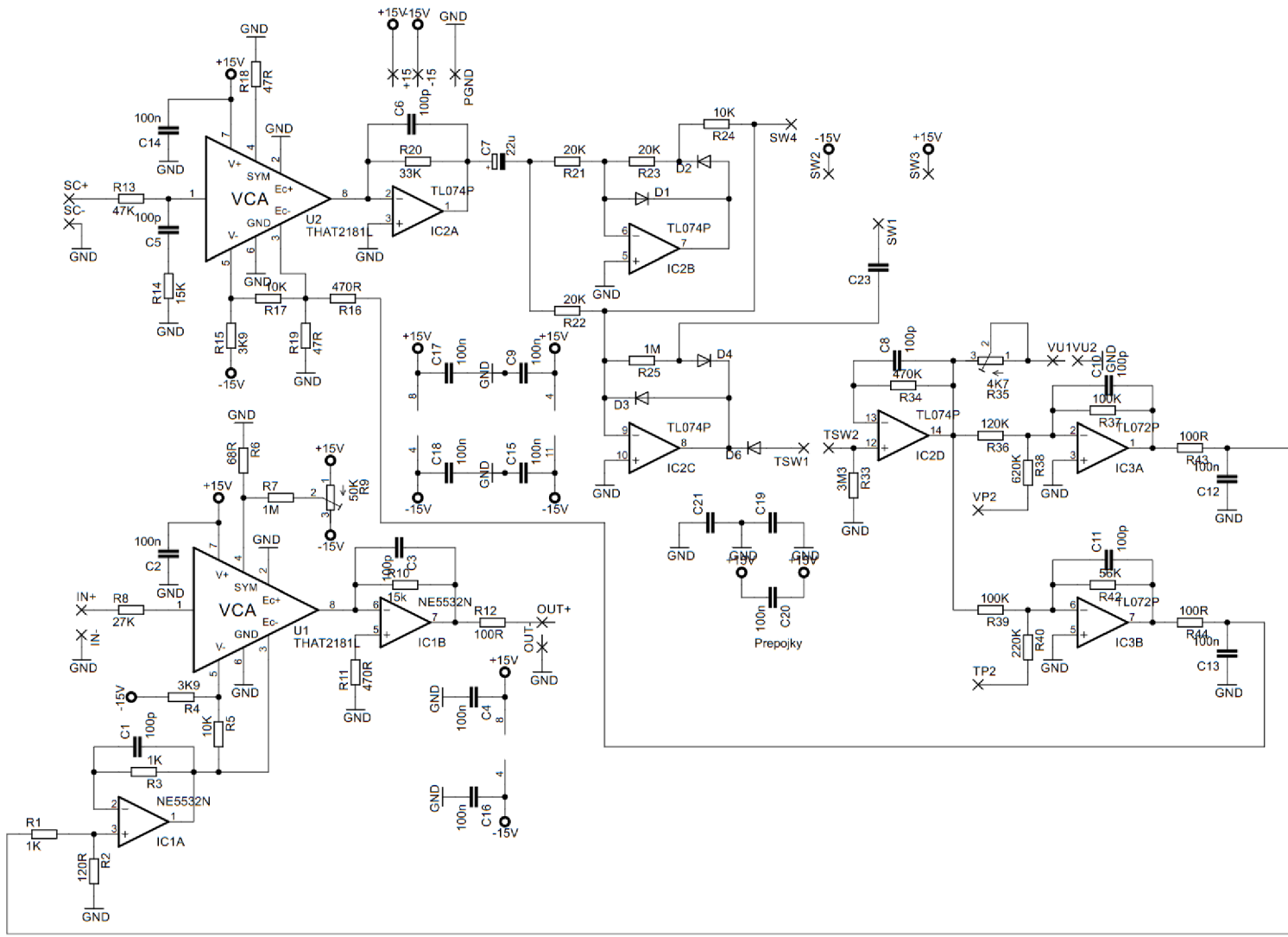
Príloha A.2 Schéma dosky napájacieho zdroja



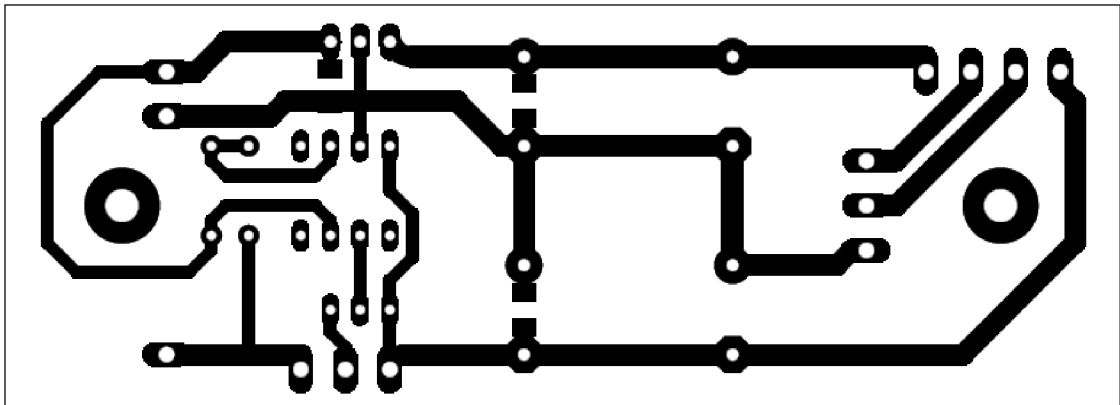
Príloha A.3 Schéma dosky filtrov



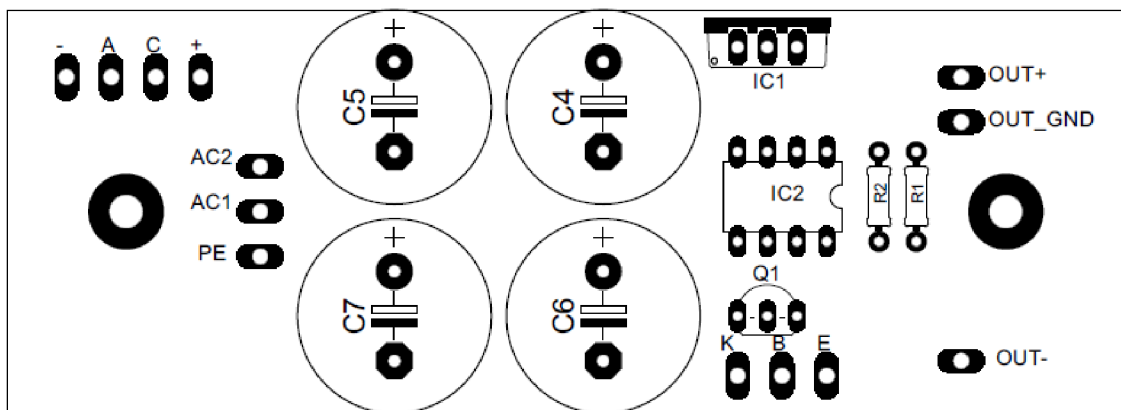
Príloha A.4 Schéma dosky kompresoru



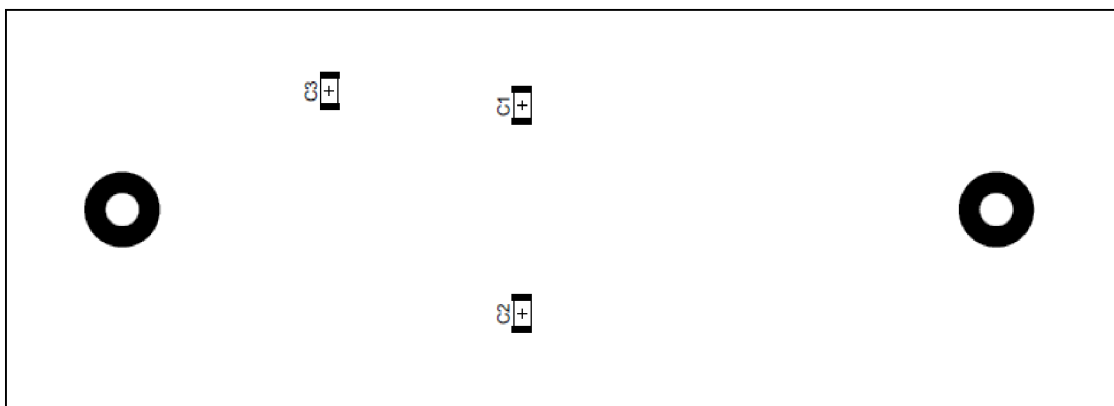
Príloha B – DPS zdroja



Doska plošných spojov, spodná strana

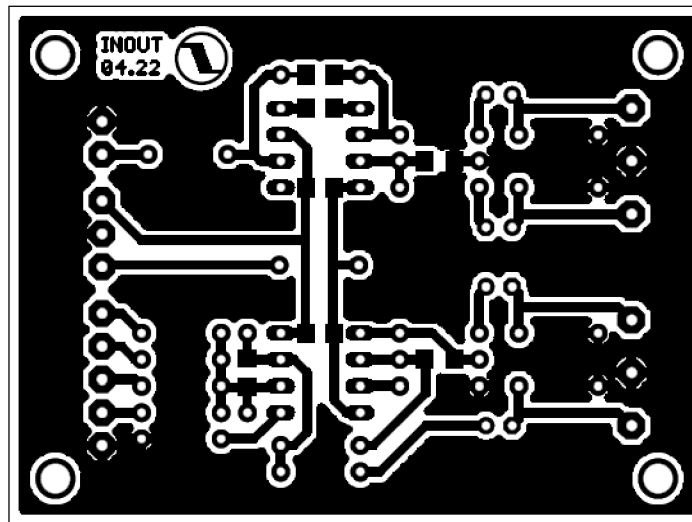


Osadzovací plán, horná strana

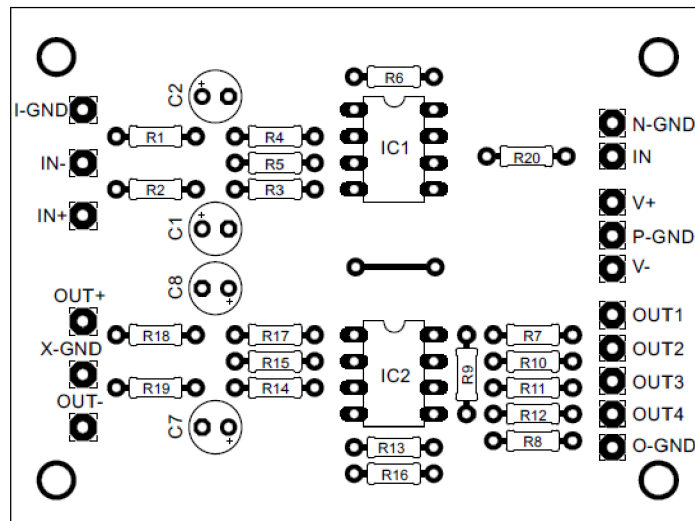


Osadzovací plán, dolná strana

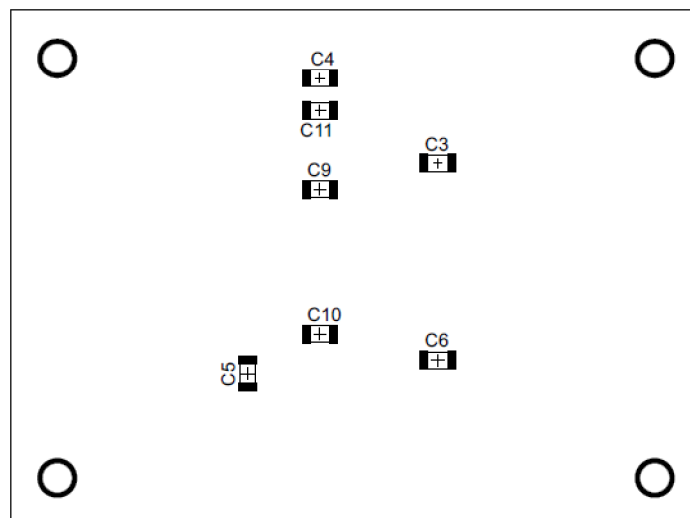
Príloha C – DPS vstupného a výstupného obvodu



Doska plošných spojov, spodná strana

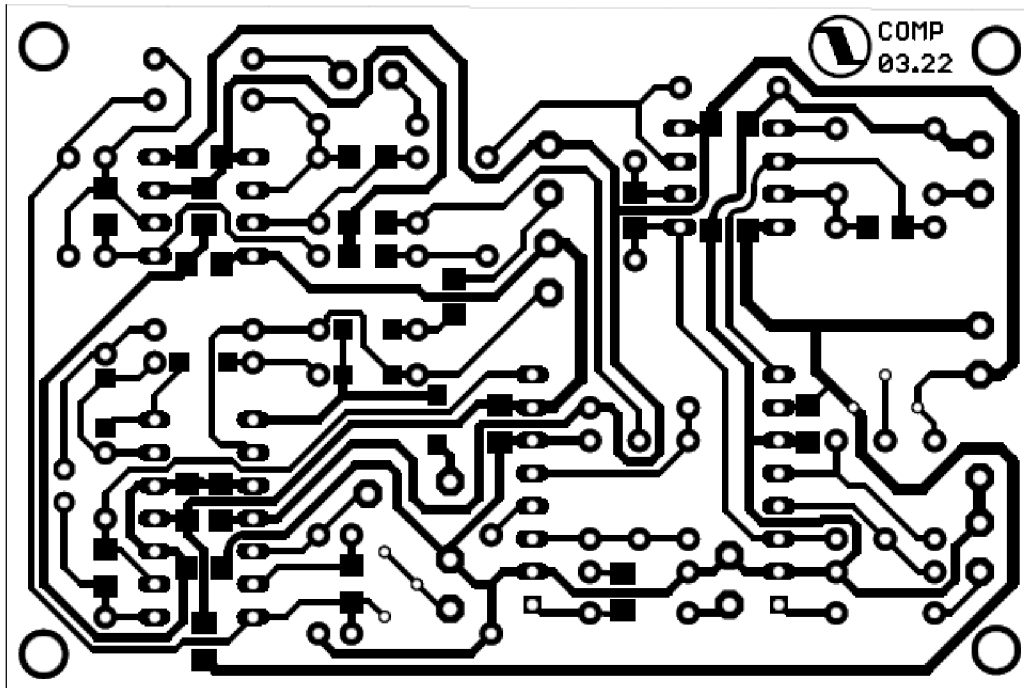


Osadzovací plán, horná strana

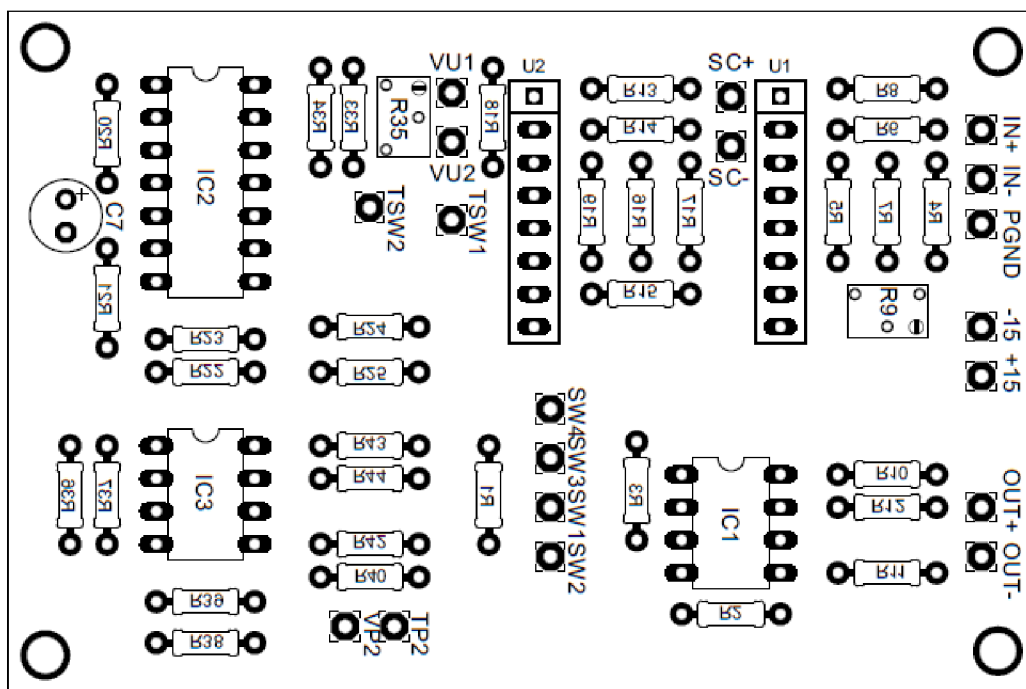


Osadzovací plán, dolná strana

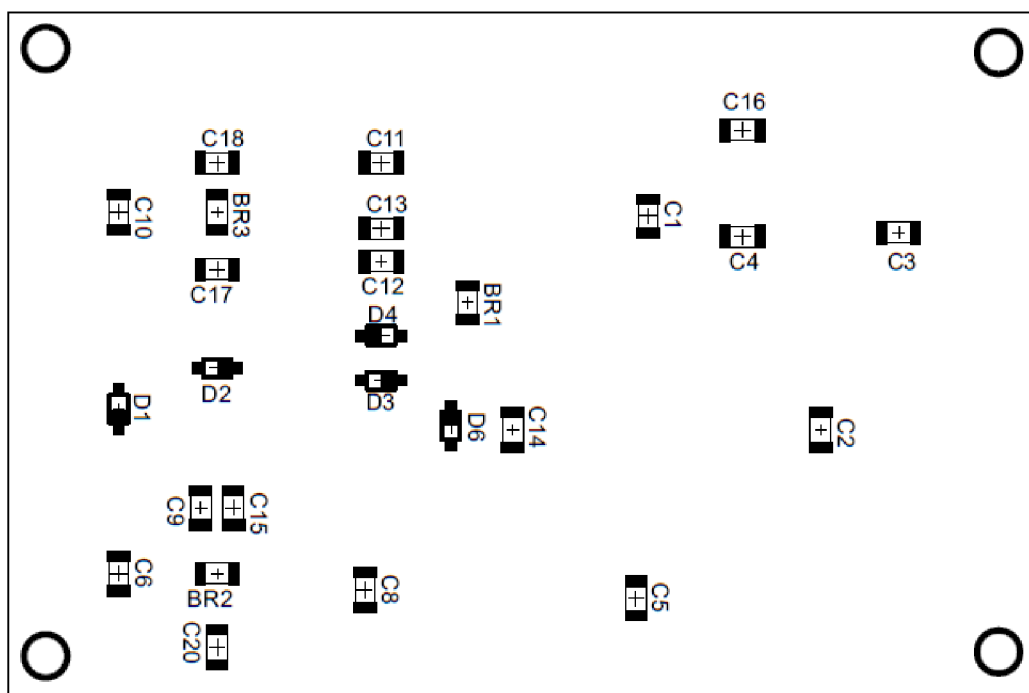
Príloha D – DPS kompresoru



Doska plošných spojov, spodná strana

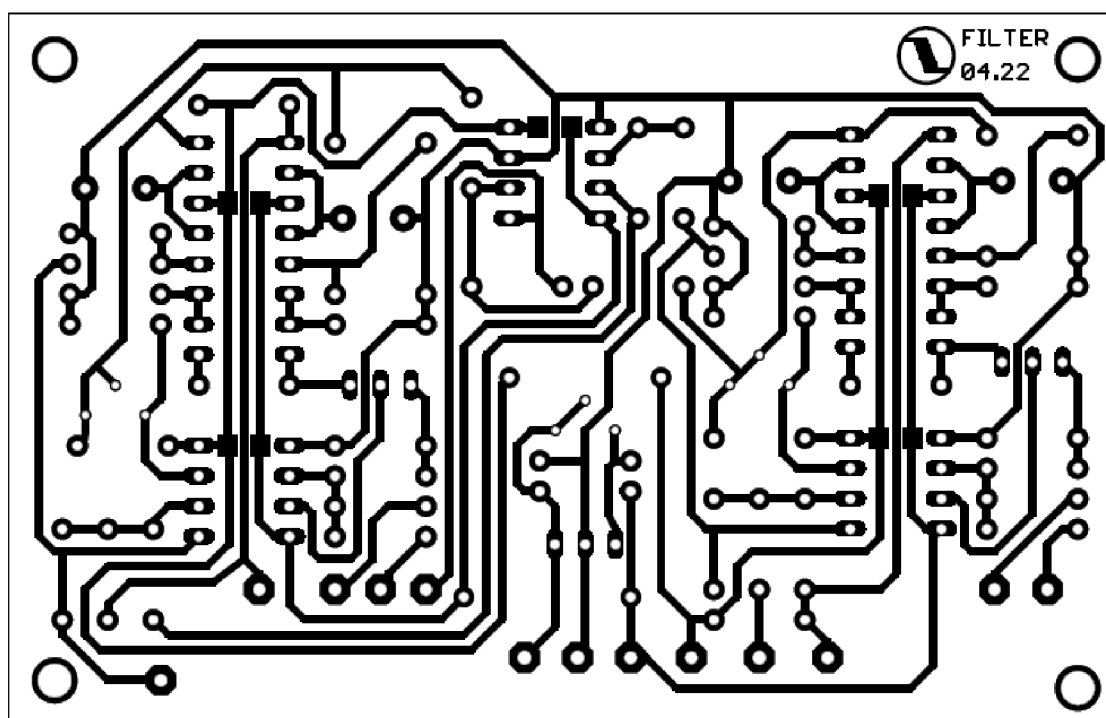


Osadzovací plán, horná strana

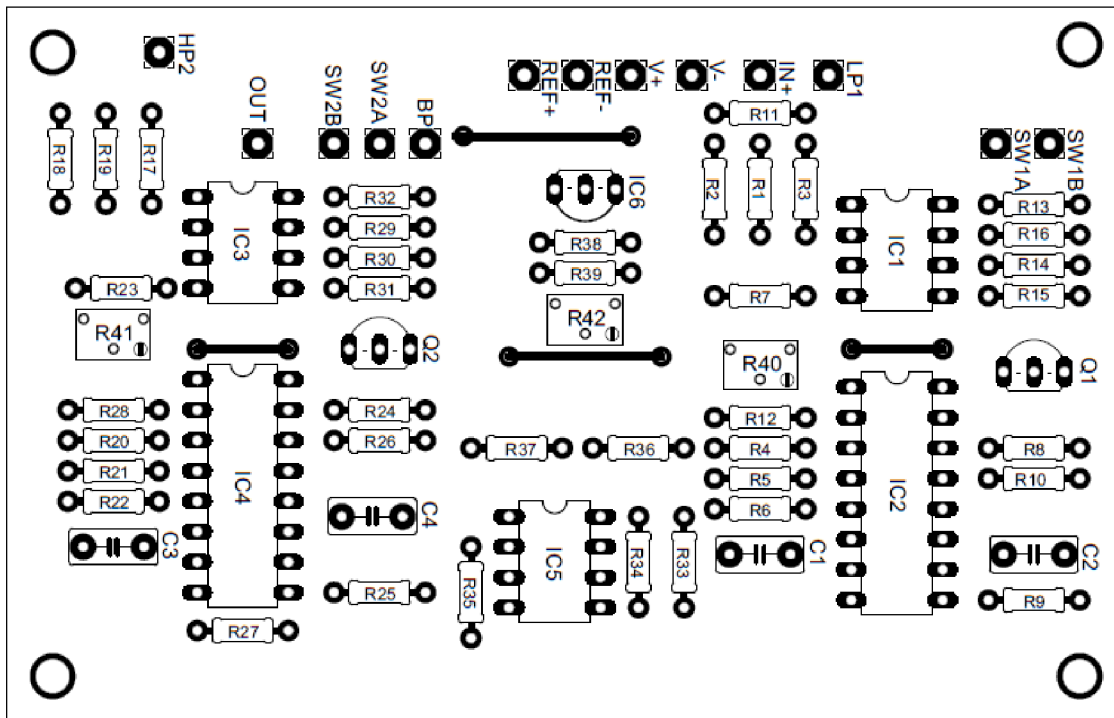


Osadzovací plán, dolná strana

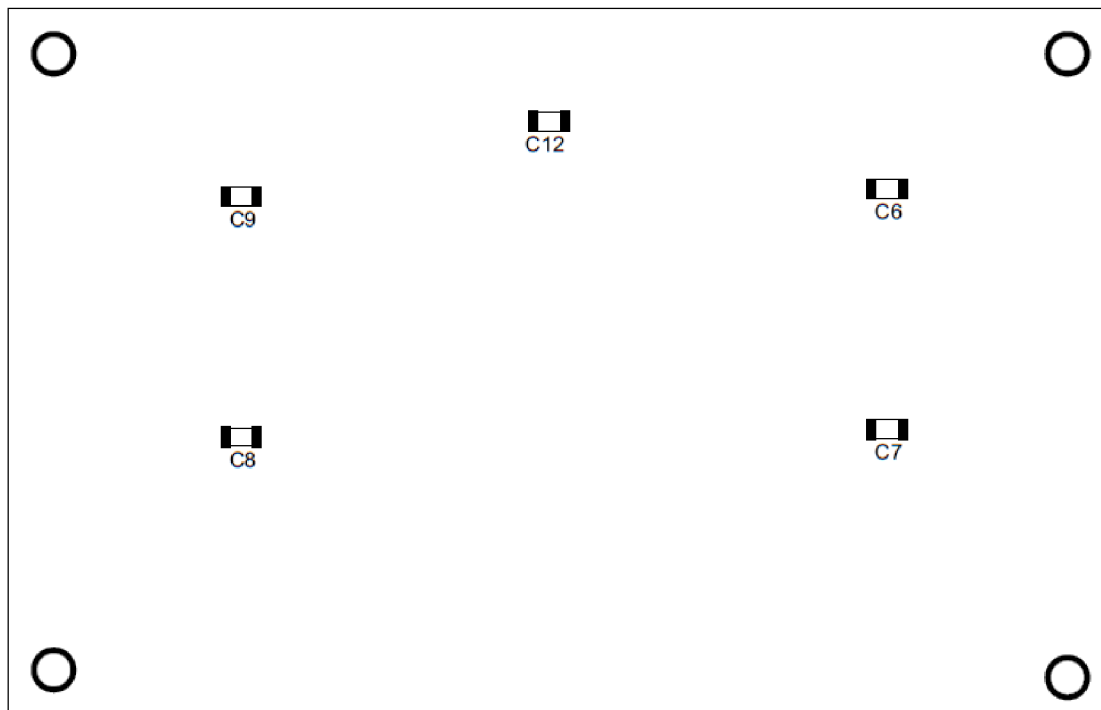
Príloha E – DPS filtra



Doska plošných spojov, spodná strana



Osadzovací plán, horná strana



Osadzovací plán, dolná strana

Príloha F – Zoznam súčiastok

Príloha F.1 – Zoznam súčiastok vstupného a výstupného obvodu

| Názov | Hodnota | Puzdro | Názov | Hodnota | Puzdro |
|-------|----------|--------|-------|---------|--------|
| C1 | 22u | E2,5-5 | R5 | 22k | 0204/7 |
| C2 | 22u | E2,5-5 | R6 | 22k | 0204/7 |
| C3 | 33p | C1206 | R7 | 10k | 0204/7 |
| C4 | 33p | C1206 | R8 | 220R | 0204/7 |
| C5 | 100p | C1206 | R9 | 10k | 0204/7 |
| C6 | 100p | C1206 | R10 | 10k | 0204/7 |
| C7 | 22u | E2,5-5 | R11 | 10k | 0204/7 |
| C8 | 22u | E2,5-5 | R12 | 10k | 0204/7 |
| C9 | 100n | C1206 | R13 | 10k | 0204/7 |
| C10 | 100n | C1206 | R14 | 10k | 0204/7 |
| C11 | 22p | C1206 | R15 | 10k | 0204/7 |
| IC1 | NE5534AN | DIL08 | R16 | 100R | 0204/7 |
| IC2 | NE5532N | DIL08 | R17 | 100R | 0204/7 |
| R1 | 100k | 0204/7 | R18 | 47k | 0204/7 |
| R2 | 100k | 0204/7 | R19 | 47k | 0204/7 |
| R3 | 22k | 0204/7 | R20 | 100R | 0204/7 |
| R4 | 22k | 0204/7 | R21 | prepoj | 0204/7 |

Príloha F.2 – Zoznam súčiastok zdroja

| Názov | Hodnota | Puzdro | Názov | Hodnota | Puzdro |
|-------|---------|---------|-------|---------|----------|
| C1 | 100n | C1206K | IC1 | 7805TV | TO220V |
| C2 | 100n | C1206K | IC2 | UA741P | DIL08 |
| C3 | 100n | C1206K | Q1 | BC327 | TO92-EBC |
| C4 | 1m5 | E7,5-16 | Q2 | KD617 | TO3 |
| C5 | 1m5 | E7,5-16 | R1 | 5k6 | 0204/7 |
| C6 | 1m5 | E7,5-16 | R2 | 5k6 | 0204/7 |
| C7 | 1m5 | E7,5-16 | | | |

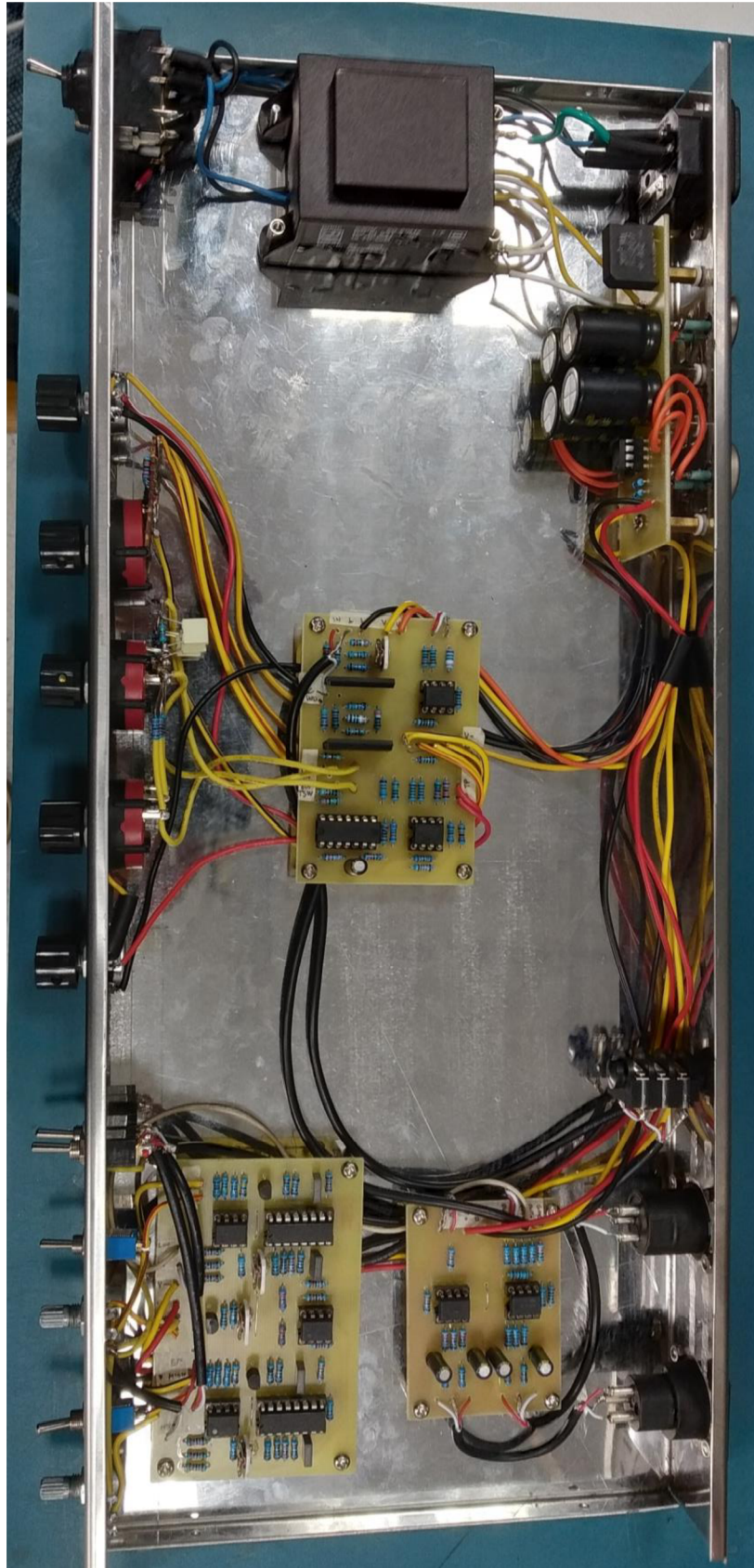
Príloha F.2 – Zoznam súčiastok filtra

| Názov | Hodnota | Puzdro | Názov | Hodnota | Puzdro |
|-------|----------|--------------|-------|---------|----------|
| C1 | 3n3 | C050-030X075 | R14 | 100k | 0204/7 |
| C2 | 3n3 | C050-030X075 | R15 | 24k | 0204/7 |
| C3 | 3n3 | C050-030X075 | R16 | 100k | 0204/7 |
| C4 | 3n3 | C050-030X075 | R17 | 22k | 0204/7 |
| C6 | 100n | C1206 | R18 | 22k | 0204/7 |
| C7 | 100n | C1206 | R19 | 22k | 0204/7 |
| C8 | 100n | C1206 | R20 | 1k | 0204/7 |
| C9 | 100n | C1206 | R21 | 22k | 0204/7 |
| C12 | 100n | C1206 | R22 | 1k | 0204/7 |
| IC1 | NE5532N | DIL08 | R23 | 10k | 0204/7 |
| IC2 | LM13700N | DIP16 | R24 | 1k | 0204/7 |
| IC3 | NE5532N | DIL08 | R25 | 22k | 0204/7 |
| IC4 | LM13700N | DIP16 | R26 | 1k | 0204/7 |
| IC5 | NE5532N | DIL08 | R27 | 10k | 0204/7 |
| IC6 | TL431LP | TO92 | R28 | 10k | 0204/7 |
| Q1 | BC559A | TO92-EBC | R29 | 1M | 0204/7 |
| Q2 | BC559A | TO92-EBC | R30 | 100k | 0204/7 |
| R1 | 22k | 0204/7 | R31 | 24k | 0204/7 |
| R2 | 22k | 0204/7 | R32 | 100k | 0204/7 |
| R3 | 22k | 0204/7 | R33 | 22k | 0204/7 |
| R4 | 1k | 0204/7 | R34 | 22k | 0204/7 |
| R5 | 22k | 0204/7 | R35 | 22k | 0204/7 |
| R6 | 1k | 0204/7 | R36 | 22k | 0204/7 |
| R7 | 10k | 0204/7 | R37 | 22k | 0204/7 |
| R8 | 1k | 0204/7 | R38 | 1k | 0204/7 |
| R9 | 22k | 0204/7 | R39 | 10k | 0204/7 |
| R10 | 1k | 0204/7 | R40 | 50k | RTRIM74W |
| R11 | 10k | 0204/7 | R41 | 50k | RTRIM74W |
| R12 | 10k | 0204/7 | R42 | 50k | RTRIM74W |
| R13 | 1M | 0204/7 | | | |

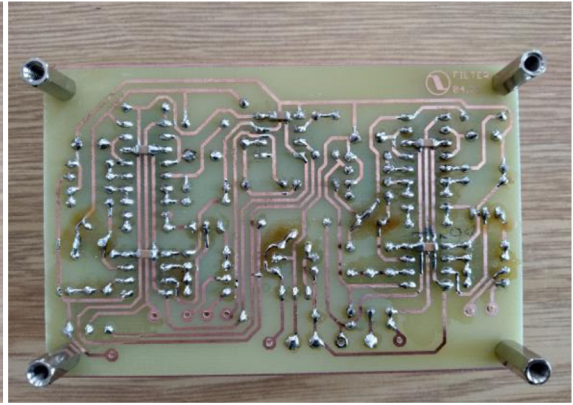
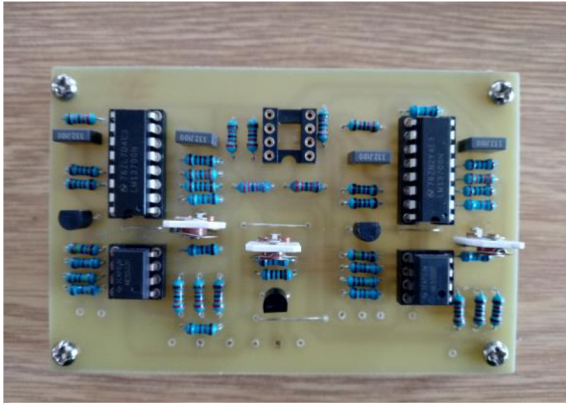
Príloha F.3 – Zoznam súčiastok kompresoru

| Názov | Hodnota | Puzdro | Názov | Hodnota | Puzdro |
|-------|---------|---------|-------|-----------|---------|
| C1 | 100p | C1206 | R5 | 10K | 0204/7 |
| C2 | 100n | C1206 | R6 | 68R | 0204/7 |
| C3 | 100p | C1206 | R7 | 1M | 0204/7 |
| C4 | 100n | C1206 | R8 | 27K | 0204/7 |
| C5 | 100p | C1206 | R9 | 50K | RTRIM74 |
| C6 | 100p | C1206 | R10 | 15k | 0204/7 |
| C7 | 22u | 6E2,5-6 | R11 | 470R | 0204/7 |
| C8 | 100p | C1206 | R12 | 100R | 0204/7 |
| C9 | 100n | C1206 | R13 | 47K | 0204/7 |
| C10 | 100p | C1206 | R14 | 15K | 0204/7 |
| C11 | 100p | C1206 | R15 | 3K9 | 0204/7 |
| C12 | 100n | C1206 | R16 | 470R | 0204/7 |
| C13 | 100n | C1206 | R17 | 10K | 0204/7 |
| C14 | 100n | C1206 | R18 | 47R | 0204/7 |
| C15 | 100n | C1206 | R19 | 47R | 0204/7 |
| C16 | 100n | C1206 | R20 | 33K | 0204/7 |
| C17 | 100n | C1206 | R21 | 20K | 0204/7 |
| C18 | 100n | C1206 | R22 | 20K | 0204/7 |
| C19 | prepoj | C1206 | R23 | 20K | 0204/7 |
| C20 | prepoj | C1206 | R24 | 10K | 0204/7 |
| C21 | prepoj | C1206 | R25 | 1M | 0204/7 |
| C23 | prepoj | C1206 | R33 | 3M3 | 0204/7 |
| D1 | 1N4148 | MELF | R34 | 470K | 0204/7 |
| D2 | 1N4148 | MELF | R35 | 4K7 | RTRIM74 |
| D3 | 1N4148 | MELF | R36 | 120K | 0204/7 |
| D4 | 1N4148 | MELF | R37 | 100K | 0204/7 |
| D6 | 1N4148 | MELF | R38 | 620K | 0204/7 |
| IC1 | NE5532N | DIL08 | R39 | 100K | 0204/7 |
| IC2 | TL074P | DIL14 | R40 | 220K | 0204/7 |
| IC3 | TL072P | DIL08 | R42 | 56K | 0204/7 |
| R1 | 1K | 0204/7 | R43 | 100R | 0204/7 |
| R2 | 120R | 0204/7 | R44 | 100R | 0204/7 |
| R3 | 1K | 0204/7 | U1 | THAT2181L | SIP8 |
| R4 | 3K9 | 0204/7 | U2 | THAT2181L | SIP8 |

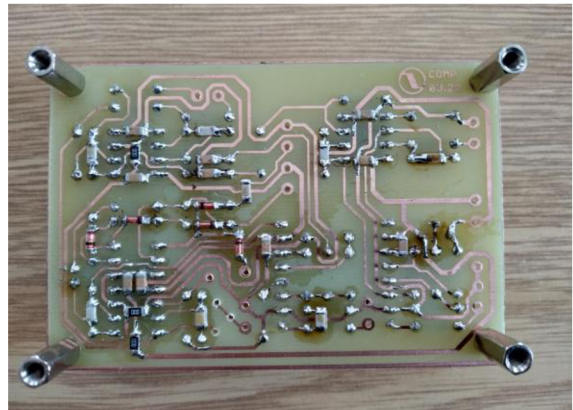
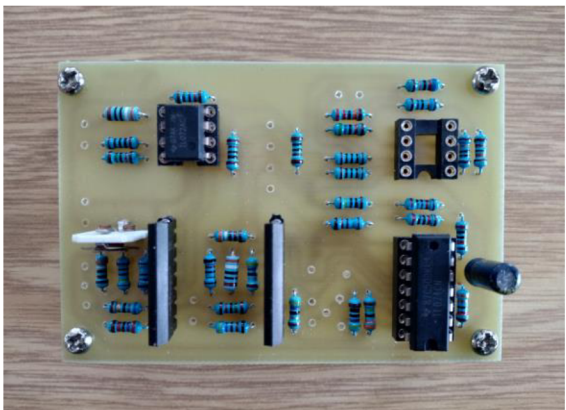
Príloha G – fotografie z výroby práce



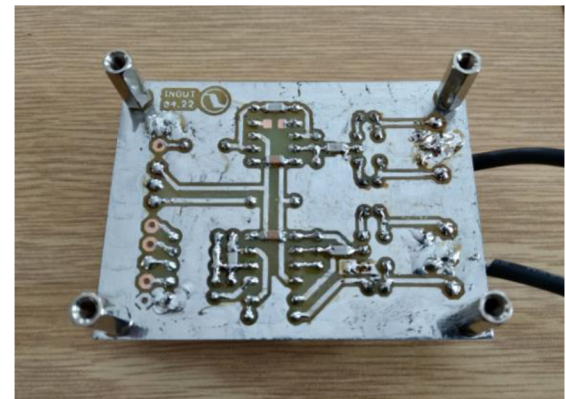
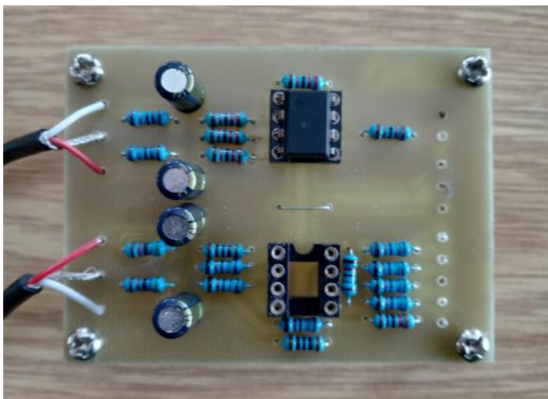
Fotografia zapojeného zariadenia v krabici



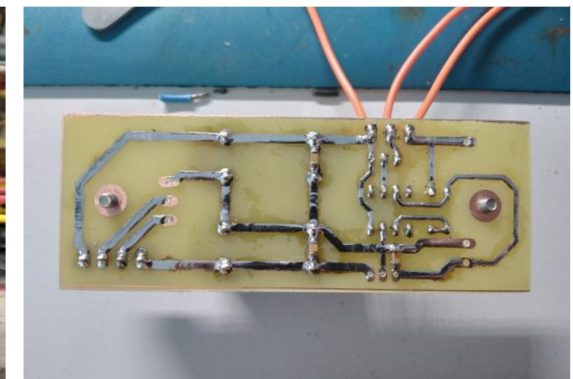
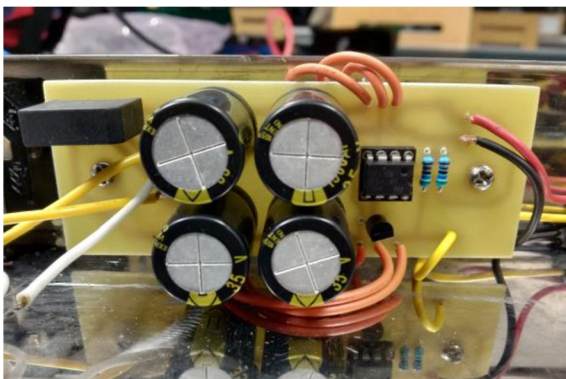
Fotografia DPS filtra



Fotografia DPS kompresoru



Fotografia DPS vstupu a výstupu



Fotografia DPS zdroja