VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2018 Ladislav Velič

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

PSEUDO-DIFERENČNÍ KMITOČTOVÉ FILTRY PRACUJÍCÍ V PROUDOVÉM REŽIMU
PSEUDO-DIFFERENTIAL FREQUENCY FILTERS OPERATING IN CURRENT MODE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE Ladislav Velič
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Ing. Ondřej Sládok
SUPERVISOR

BRNO 2018

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

Semestrální práce

bakalářský studijní obor **Teleinformatika**
Ústav telekomunikací

Student: Ladislav Velič ***ID:*** 186230
Ročník: 3 ***Akademický rok:*** 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Pseudo-diferenční kmitočtové filtry pracující v proudovém režimu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Analyzujte návrhové metody pseudo-diferenčních kmitočtových filtrů pracujících v napěťovém režimu a na základě těchto poznatků navrhněte funkční pseudo-diferenční struktury pracující v proudovém režimu. Vhodné řešení dále podrobte simulacím a porovnejte s teoretickou analýzou.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] CHAN, K.: Design of Differential Filters for High-Speed Signal Chains, Application repor, Texas Instruments, SLWA053B, 8 pages, 2010.

[2] KOTON, J.; HERENCSÁR, N.; SLÁDOK, O.; HORNG, J. Pseudo-differential second-order band- reject filter using current conveyors. AEU - International Journal of Electronics and Communications, 2016, roč. 70, č. 6, s. 814-821. ISSN: 1434-8411.

Termín zadání: 18.9.2017 ***Termín odevzdání:*** 14.12.2017

Vedoucí práce: Ing. Ondřej Sládok
Konzultant:

prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:
Autor semestrální práce nesmí při vytváření semestrální 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
Táto bakalárska práca sa venuje pseudo-diferenčným kmitočtovým filtrom druhého rádu pracujúcim v prúdovom režime. Práca sa venuje popisom rôznych typov kmitočtovým filtrov a ich charakteristikami. V práci sú tiež popísane rozdiely medzi diferenčnými, nediferenčnými a pseudo-diferenčnými filtrami a ich rôzne zapojenia. V práci sú navrhnuté tri pseudodiferenčné štruktúry pracujúce v prúdovom režime. Pseudo-díferečný filter pásmovej zádrže je v praktickej časti skonštruovaný a jeho praktické vlastnosti sú porovnané s teoretickými.

KĽÚČOVÉ SLOVÁ
CMRR, diferenčný filter, dolná priepusť, fázovací článok, horná priepusť, kmitočtový filter,nediferenčný filter, pásmová priepusť, pásmová zádrž, Pseudo-diferenčný filter, PSRR, selektívne filtre, THD

ABSTRACT
This bachelor thesis deals with pseudo-differential frequency filters working in current mode. This thesis further describes different types of frequency filters and their characteristics. In the thesis there are described differencies between differential, non-differential and pseudo-differential filters and their schemes. The thesis then shows schemes of pseudo-differential filters working in current mode. Pseudo-differential band-pass filter is in practical part of the thesis constructed and its practical features are compared to the theoretical.

KEYWORDS
all pass, band pass, band reject, CMRR, differential filter, frequency filter, high pass, low pass, single-mode filter, pseudo-differential filter, PSRR, THD

VELIČ, Ladislav. *Pseudo-diferenční kmitočtové filtry pracující v proudovém režimu*. Brno, Rok, 58 s. Bakalárska práca. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedúci práce: Ing. Ondřej Sládok

Vysázeno pomocí balíčku `thesis` verze 2.63; `http://latex.feec.vutbr.cz`

VYHLÁSENIE

Vyhlasujem, že som svoju bakalársku prácu na tému „Pseudo-diferenční kmitočtové filtry pracující v proudovém režimu“ vypracoval(a) samostatne pod vedením vedúceho bakalárskej práce, využitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

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

Brno ....

podpis autora(-ky)

POĎAKOVANIE

Rád by som poďakoval vedúcemu semestrálnej práce pánovi Ing.Ondřejovi Sládokovi za odborné vedenie, konzultácie, trpezlivosť a podnetné návrhy k práci.

Brno ....

podpis autora(-ky)

Faculty of Electrical Engineering
and Communication
Brno University of Technology
Purkynova 118, CZ-61200 Brno
Czech Republic
http://www.six.feec.vutbr.cz

POĎAKOVANIE

Výzkum popsaný v tejto bakalárskej práci bol realizovaný v laboratóriách podporených projektom SIX; registračné číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operačný program Výzkum a vývoj pro inovace.

Brno ....

podpis autora(-ky)

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

EVROPSKÁ UNIE
EVROPSKÝ FOND PRO REGIONÁLNÍ ROZVOJ
INVESTICE DO VAŠÍ BUDOUCNOSTI

2007–13
OP Výzkum a vývoj pro inovace

OBSAH

Úvod **12**

1 Kmitočtové filtry **13**

1.1 Delenie filtrov . . . 13

1.1.1 Pasívne a aktívne filtry . . . 14

1.1.2 Selektívne filtry . . . 14

1.1.3 Filter typu horná priepusť . . . 14

1.1.4 Filter typu dolná priepusť . . . 15

1.1.5 Pásmová zádrž . . . 15

1.1.6 Pásmová priepusť . . . 15

1.1.7 Fázovací článok . . . 15

1.2 Prenosová funkcia filtru 2.rádu . . . 15

1.3 Nediferenčné zapojenia . . . 16

1.3.1 Popis nediferenčných prenosov . . . 16

1.4 Plne diferenčné zapojenia . . . 17

1.5 Pseudo-diferenčné zapojenia . . . 20

1.6 Popis diferenčných a pseudo-diferenčných prenosov . . . 20

1.7 Zmena nediferenčného výstupu na diferenčný v prúdovom režime . . . 22

1.8 Potlačenie súhlasnej zložky . . . 23

1.9 Potlačenie nežiadúceho napájacieho signálu . . . 23

2 Aktívne prvky používané vo filtroch **24**

2.1 Prúdové konvejory . . . 24

2.2 Univerzálny prúdový konvejor . . . 25

2.3 Univerzálny napäťový konvejor . . . 27

3 Realizácia a analýza navrhnutých filtrov **29**

3.1 Návrh pseudo-diferenčného filtra dolnej priepusti pracujúceho v prúdovom režime . . . 29

3.1.1 Prenosová funkcia filtru dolnej priepusti . . . 29

3.2 Návrh pseudo-diferenčného fázovacieho článku pracujúceho v prúdovom režime . . . 31

3.2.1 Prenosová funkcia filtru fázovacieho článku . . . 31

3.3 Návrh pseudo-diferenčného filtra pásmovej zádrže pracujúcej v prúdovom režime . . . 34

3.3.1 Prenosová funkcia filtru pásmovej zádrže . . . 34

4 Praktické meranie **36**
4.1 Meranie a simulovanie pseudo-diferenčného filtra pracujúceho v CM . 37
4.2 Chovanie pseudo-diferenčného filtra pri potlačení napájacieho napätia 39
4.3 Meranie celkového harmonického zkreslenia 39

5 Záver **41**

Literatúra **43**

Zoznam symbolov, veličín a skratiek **45**

Zoznam príloh **47**

A Prevodník nediferenčného signálu na diferenčný **48**

B Prevodník diferenčného signálu na nediferenčný **50**

C Zapojenie pseudodiferenčného filtra **52**

D Originálne výsledky merania **56**

E Obsah priloženého CD **58**

ZOZNAM OBRÁZKOV

1.1 Hodnoty koeficientov pre rôzne kmitočtové filtry 2. rádu 16
1.2 Dvojbran so vstupnými a výstupnými smermi napätia a prúdu 17
1.3 Nediferenčné zapojenie 18
1.4 Zmena na diferenčné zapojenie pomocou zrkadlenia 18
1.5 Prevedenie pozdĺžnej vetvy pre rezistory 19
1.6 Prevedenie pozdĺžnej vetvy pre rezistory 19
1.7 Diferenčný napäťový prenos 20
1.8 Diferenčný prúdový prenos 21
1.9 (Nesymetrický vstup v prúdovom režime 22
1.10 Symetrický výstup v prúdovom režime 22
2.1 (a) schématická značka CCI (b) schematická značka CCII 24
2.2 schématická značka DDCC 25
2.3 Schéma zapojenia UCC 25
2.4 Vnútorná štuktúra UCC 26
2.5 Schéma zapojenia univerzálneho napäťového konvejora 27
2.6 Vnútorná štuktúra UVC 28
3.1 Schéma zapojenia pseudo-diferenčného filtra 29
3.2 Graf dolnej priepusti 30
3.3 Pseudo-diferenčného filter využívajúci prúdové konvejory druhej generácie 31
3.4 Charakteristika fázovacieho článku 32
3.5 Charakteristika fáze fázovacieho článku 33
3.6 Schéma zapojenia pseudo-diferenčného filtra 34
3.7 Charakteristika pásmovej zádrže 35
4.1 Blokové schéma experimentálneho merania 36
4.2 Modulová charakteristika pseudo-diferenčného filtru pásmovej zádrže 37
4.3 Potlačenie súhlasného signálu pseudo-diferenčným filtrom pre optimálne a potlačené napájanie 38
4.4 Modulová charakteristika filtru pri optimálnom a potlačenom napajácom napätí 39
4.5 Harmonické zkreslenie filtru pri napájacom napätí $\pm 1,65V$ $a \pm 1,53V$ 40
A.1 Prevodník nediferenčného signálu na diferenčný 48
A.2 Prevodník nediferenčného signálu na diferenčný-pohľad zhora 49
A.3 Prevodník nediferenčného signálu na diferenčný-pohľad zdola 49
B.1 Prevodník nediferenčného signálu na diferenčný 50
B.2 Prevodník diferenčného signálu na nediferenční-pohľad zhora 51
B.3 Prevodník diferenčného signálu na nediferenční-pohľad zdola 51

C.1 Schéma pseudodiferenčného filtru 52
C.2 Návrh dosky plošných spojov (pohľad zhora) 53
C.3 Návrh dosky plošných spojov (pohľad zdola) 54
C.4 Návrh umiestnenia prkov na plošnej doske 54
C.5 Realizovaný pseudo-diferenčný filter-pohľad zhora 55
C.6 Realizovaný pseudo-diferenčný filter-pohľad zdola 55
C.7 Schéma pseudodiferenčného filtru-2.varianta 55
D.1 Meranie pseudo-diferenčného filtra pásmovej zádrže 56
D.2 Meranie PSRR pseudo-diferenčného filtra pásmovej zádrže 57
D.3 Neštandardné správanie sondy 57

ZOZNAM TABULIEK

2.1 Tabuľka zapojenia pre rôzne typy UCC 27

ÚVOD

Táto bakalárska práca sa zameriava na pseudo-diferenčné kmitočtové filtry pracujúce v prúdovom režime. Analógové obvody využívajúce prúdový režim majú svoje zastúpenie pri navrhovaní obvodov vďaka výhodám aké sú šírka pásma, nízky odber výkonu a jednoduchý systém obvodu. V práci popisujem pasívne a aktívne kmitočtové filtre, selektívne filtre HP, DP, PZ, PP a FČ a ich vlastnosti.

V ďalšej časti popisujem teóriu o nediferenčných, plne diferenčných a pseudo-diferenčných obvodoch, ich rozdiely v prenosoch, výhody a nevýhody. Pseudo-diferenčné filtre majú výhodu schopnosti potláčania súhlasnej zložky oproti nediferenčným filtrom. Oproti diferenčným filtrom majú výhodu v menšom počte prvkov, čo súvisí s jednoduchším zapojením, nižšou cenou a náročnosťou obvodu, pričom vykazujú o niečo horšie výsledky CMRR. Každopádne sú ich vlastnosti a kvalita dostačujúca.

V ďalšej kapitole opisujem prúdové konvejory druhej generácie CCII a DVCC a univerzálny napäťový (UVC) a prúdový (UCC) konvejor, ktoré sú využité v návrhu pseudo-diferenčných filtrov. Opisujem ich zapojenia, základné vzťahy medzi svorkami a vlastnosti jednotlivých svoriek. V následujúce kapitole sa venujem navrhnutným zapojeniam pracujúcich v prúdovom režime. Ide o filtre druhého rádu dolnej priepusti, fázovacieho článku a pásmovej zádrže. Pre každý filter je zvolený hraničný kmitočet, činiteľ akosti a hodnoty kondenzátorov, z ktorých sú potom dopočítané hodnoty rezistorov. Výsledné prenosové funkcie sú zobrazené pre ideálne chovanie filtra a taktiež pre prípadné zmeny v reálnych podmienkach.

V praktickej časti práce sa venujem praktickému vyrobeniu pseudo-diferenčného filtra pásmovej zádrže druhého rádu a porovnaniu jeho teoretických a praktických vlastností. Toto riešenie bolo vyhodnotené z pohľadu zkreslenia zpracovávaného signálu, potlačenia súhlasného signálu (CMRR) a potlačenia napájacieho napätia (PSRR).

1 KMITOČTOVÉ FILTRY

S kmitočtovými filtrami sa môžme stretnúť v oblastiach elektrotechniky, elektroniky, ale aj iných rôznych odvetví. Ich hlavnou funkciou je predovšetkým prepúšťanie vopred zvolených kmitočtov v priepustnom pásme a odstránením iných rušivých a nežiadúcich signálov mimo nášho zvoleného neprepustného pásma. Tieto vlastnoti kmitočtov sú popísané pomocou závislosti napäťového, prúdového a výkonového prenosu filtru na kmitočte. Poznáme rôzne druhy kmitočtových filtrov ako sú selektívne filtry, aktívne a pasívne filtry a podobne [1].

Kmitočtové filtry sú lineárne elektrické obvody, najčastejšie vo forme dvojbranu s jednou vstupnou a jednou výstupnou bránou. Obecne rozlišujeme medzi aktívnymi a pasívnymi zapojeniami. Pri realizácií pasívnych filtrov využívame pasívne prvky ako sú rezistory, induktory a kapacitory. Nakoľko je niekedy obtiažne nastaviť obvod tak, aby vyhovoval našim požiadavkam, začali sa nahradzovať pasívne filtry filtrami aktívnymi kvôli ľahšiemu nastaveniu. Aktívne prvky sú napríklad operačné zosilovače, prúdové a napäťové konvejory ako sú UCC a UVC. Kombináciou aktívnych a pasívnych prvkov vznikajú filtry s rôznymi vlastnosťami. Pri každom filtre rozlišujeme tzv. rád filtru. U pasívnych filtrov odpovedá rád filtru počtu akumulačných prvkov použitých v obvode (induktor a kondenzátor), ktoré ovplyvňujú prenosové amplitúdovo-frekvenčné vlastnosti filtra. Obecne platí, že čím vyšší rád filtru, tým je vyššia strmosť prechodu z priepustného do nepriepustného pásma, pochopiteľne je ale filter vyššieho rádu zložitejší pre návrh a jeho realizáciu.

U všetkých filtrov určujeme prenos v priepustnom pásme K_0. Kvalita filtru je určená parametrom činiteľa akosti Q. Čím vyšší činiteľ akosti, tým je strmejší prechod z priepustného do nepriepustného pásma. U filtrov typu dolnej a horniej priepusti rozlišujeme dva dôležité kmitočty, kmitočet pólu f_p a hraničný kmitočet f_0. Hraničný kmitočet je kmitočet, v ktorom je prenos filtru o 3 dB nižší ako v priepustnom pásme.

1.1 Delenie filtrov

Filtre môžme deliť podľa:

1. vlastností elektronických súčiastok z ktorých filter pozostáva na filtre pasívne, alebo filtry aktívne
2. hľadiska zpracovania signálov na nediferenčné alebo diferenčné filtry
3. hľadiska zpracovania signálov a ich priepustnosti na selektívne filtry

1.1.1 Pasívne a aktívne filtry

Filtre realizované zo základných pasívnych obvodových súčiastok (R,L,C) nazývame pasívne filtre. Ich prenos je maximálne rovný 1. Výhoda pasívnych filtrov spočíva v ich jednoduchšom zapojení, nižšej cene a pri vyššom rozsahu frekvencií (100kHz a viac) dosahujú rovnakú kvalitu a vlastností ako filtre aktívne. Druhou skupinou filtrov sú aktívne filtre, ktoré okrem pasívnych súčiastok, frekvenčne závislých súčiastok majú i aktívne súčiastky ako sú operačné zosilovače, tranzistory a konvejory ktoré zabezpečia zosilnenie prenášaného signálu. Ich prenos preto môže byť väčší ako 1. V súvislosti s vývojom nových štruktúr netradičných aktívnych prvko vznikajú nové aplikácie obvodov, ktoré svojimi vlastnosťami umožňujú zpracovanie signálov na vyšších kmitočtových oblastiach pri nižšom napájacom napätí, ako je to pri operačných zosilovačoch.

Ďalšiou výhodou aktívnych filtrov je že oproti pasívnym filtrom neni nutné využívať cievky (najmä na nižších kmitočtoch sú veľké a majú malú kvalitu). V aktívnych filtroch sa výlučne používajú R a C súčiastky zapojené do zápornej alebo kladnej spätnej väzby aktívneho obvodu. Okrem toho majú aktívne filtre dobrú kmitočtovú a amplitúdovú stabilitu, jednoduchú preladiteľnosť, schopnosť zosilniť popr. zoslabiť signál. Aktívne RC filtre pracujú v širokom rozsahu kmitočtov (desiatky Hz až po MHz), preto je možné dosiahnuť nastaviteľnosť amplitúdovo-kmitočtových prenosových vlastností. Tieto vlastnosti závisia od použitého zapojenia filtra [2].

1.1.2 Selektívne filtry

Filtry aktívne či pasívne delíme podľa toho, v akom rozsahu pásma signál prepúšťa a v ktorom pásme naopak signál filtruje. Jednotlivé filtre delíme na:

- horná priepusť (HP)
- dolná priepusť (DP)
- pásmová zádrž (PZ)
- pásmová priepusť (PP)
- fázovací článok (FČ)

1.1.3 Filter typu horná priepusť

Filter typu horná priepusť HP (High-Pass filter) prepúšťa signály od určitej minimálnej frekvencie f_{min} do teoreticky nekonečnej frekvencie s minimálnym útlmom a všetky ostatné signály prenáša s požadovaným útlmom. V praxi sa tento filter využíva v audiotechnike a rádiovo-frekvenčných prístrojoch. [3]

1.1.4 Filter typu dolná priepusť

Filter typu dolná priepusť (LP-Low-Pass filter) prepúšťa signály od najnižších frekvencií po určitú maximálnu frekvenciu f_{max} s minimálnym útlmom a všetky ostatné signály s frekvenciami vyššími ako f_{max} prenáša požadovaným útlmom. V praxi sa využívajú v audiotechnike ako anti-aliasingový filter. [4]

1.1.5 Pásmová zádrž

Filter typu pásmová zádrž (Band-Reject filter) je filter, ktorý prepúšťa všetky frekvencie nad a pod určitou hranicou určenou hodnotami komponentov z ktorých sa skladá a ostatné utlmuje. Skladá sa zo paralelného zapojenia filtru typu dolnej a hornej propusti. V praxi sa využíva na odstránenie špecifickej rušivej frekvencie, napr. pri rádiových príjímačoch ktoré sa nachádzajú v blízkosti vysielačov a rušia tak všetky ostatné signály [5].

1.1.6 Pásmová priepusť

Filter pásmovej priepusti (Band-Pass filter) je filter, ktorý má opačný princíp ako filter pásmovej zádrže. Tento filter prepúšťa len určité rozmedzie frekvencí a ostatné potlačuje. Rozšírené využitie filtra tohto typu je pri bezdrátových vysielačoch a prijímačoch. Hlavnou funkciou je limitovať šírku pásma vysielaného signálu, čím sa zabráni rušenia signálu s ostatnými bezdrátovými stanicami [6].

1.1.7 Fázovací článok

Fázovací článok (All-Pass filter) je vhodný pre manipulovanie s fázou. Selektívne môžme prispôsobiť fázu signálu prechádzajúcu cez filter bez zmeny amplitúdy. Využíva sa napr. pri zvukových signáloch, kde potrebujeme, aby kmitočtové komponenty odpovedajúce rôznym výškam prišli na reproduktor v rovnaký čas, čo zaistíme nastavením určitého oneskorenia [7].

1.2 Prenosová funkcia filtru 2.rádu

Obecná prenosová funkcia filtru 2.rádu v tvare polynómu je [8]

$$K(p) = \frac{a_2p^2 + a_1p + a_0}{b_2p^2 + b_1p + b_0}. \tag{1.1}$$

V obrázku 1.1 sú uvedené koeficienty a_2, a_1, a_0 pre realizáciu kmitočtového filtru 2.rádu, pričom pre koeficienty b_i platí:

Typ filtru	a_2	a_1	a_0
Dolná priepusť	0	0	$K_0\omega_0^2$
Horná priepusť	K_0	0	0
Pásmová priepusť	0	$K_0\omega_0/Q$	0
Fázovací článok	K_0	$-K_0\omega_0/Q$	$K_0\omega_0^2$
Pásmová zádrž	K_0	0	$-K_0\omega_0^2$

Obr. 1.1: Hodnoty koeficientov pre rôzne kmitočtové filtry 2. rádu

$$b_2 = 1, b_1 = \frac{w_0}{Q}, b_0 = w_0^2 \tag{1.2}$$

kde w_0 je charakteristický úhlový kmitočet, Q je činiteľ akosti filtru a a K_0 je zosilenie v pásme priepustnosti.

1.3 Nediferenčné zapojenia

Nediferenčné zapojenia sú jednoduchšie pre navrhnutie, lacnejšie na vytvorenie a väčšinou sú dostačujúce pre väčšinu aplikácií. Tieto zapojenia majú jeden vstup a jeden výstup. V týchto zapojeniach sú všetky signály referenciou pre spoločnú zem. Na vstup je privedené kladné alebo záporné napätie a druhá noha je uzemnená. Tieto zapojenia sú ideálne, ak je prijímač a vysielač blízko pri sebe, pretože väčšou vzdialenosťou strácajú tieto zapojenia funkčnosť. Nevýhodou týchto zapojení je náchylnosť na offset a šum, ktorý je spôsobený elektromagnetickými a radiofrekvenčnými interferenciami. Ďalšou nevýhodou je náchylnosť týchto zapojení na súhlasnú zložku, ktorá vzniká na vstupe obvodu. [9]

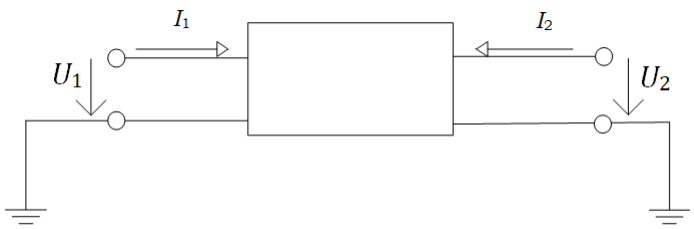
1.3.1 Popis nediferenčných prenosov

Napäťový prenos je vyjadrený ako pomer výstupného napätia U_2 k napätiu vstupnému U_1, vyjadreného rovnicou 1.3.

Prúdový prenos je taktiež pomer výstupného prúdu I_2 k prúdu vstupnému I_1. Pokiaľ sú smery vstupného a výstupného prúdu rovnaké ako na obr. 1.2, je prúdový prenos popísaný rovnicou 1.4.

$$K_u = \frac{U_2}{U_1} \tag{1.3}$$

$$K_u = -\frac{I_2}{I_1} \tag{1.4}$$



Obr. 1.2: Dvojbran so vstupnými a výstupnými smermi napätia a prúdu

1.4 Plne diferenčné zapojenia

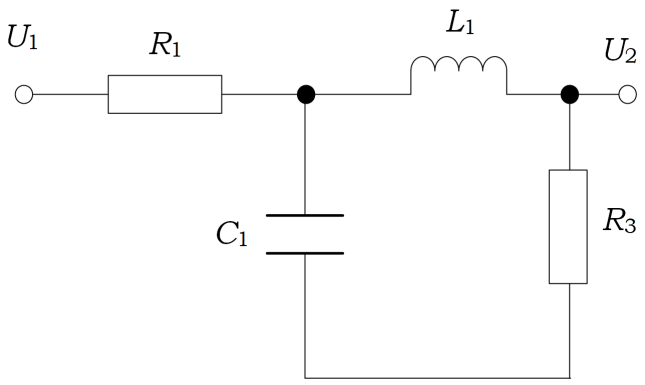
Na rozdiel od nediferenčných zapojení majú plne diferenčné zapojenia dva vstupy a dva výstupy s opačnou polaritou. Diferenčné zapojenia sú zložitejšie zapojenia, ktoré potrebujú väčšie množstvo prvkov ako nediferenčné zapojenia, ich výhodou je poskytutie kvalitnejších výsledkov oproti nediferenčným zapojeniam. Plne diferenčné zapojenia sú schopné potláčať súhlasnú zložku Common-mode, pozitívne ovplyvňujú kvalitu signálu, majú dvojnásobný dynamický rozsah, znižujú harmonické zkreslenie signálu, majú lepšiu linearitu a poskytujú maximálne odstránenie šumu a rušenia.

Pre vytvorenie plno diferenčného zapojenia z nediferenčného zapojenia sa najčestejšia využíva zrkadlenie nediferenčného obvodu voči zemi [10]. Takýto spôsob návrhovej techniky vytvára symetriu pasívnych prvkov v obvode. Takýto obvod je charakterisický výsokým potlačením CMRR (Common-mode rejection ratio) zložky, ale zrkadlenie obvodu znamená dvojnásobok prvkov v obvode, čím sa obvod stáva zložitým. Proces zmeny nediferenčného zapojenia na diferenčné pomocou zrkadlenia je znázornený na obrázkoch 1.3 a 1.4,

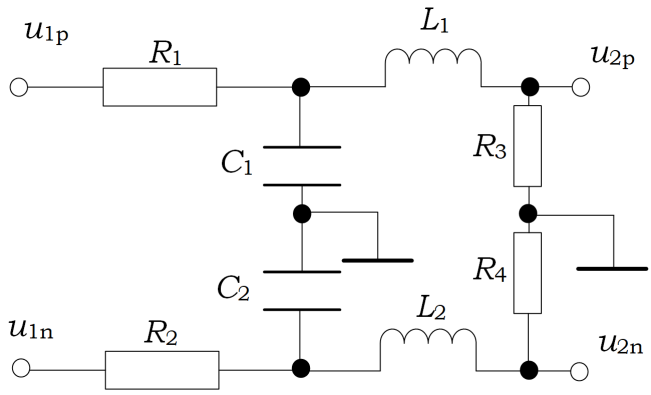
Aby boli prenosové funkcie novovytvorených diferenčných štruktúr rovnaké s pôvodným nediferenčným zapojením, je nutné zmeniť hodnoty zrkadlených pasívnych prvkov. Hodnoty pasívnych prvkov určujeme podľa transformácie, ktorú sme si zvolili [11]. Poznáme transformácie:

- pozdĺžne
- priečne

Pri pozdĺžnych transformáciach meníme iba parametry prvkov v pozdĺžnej vetve. Hodnota rezistorov sa oproti pôvodnej zmenší na polovicu a z jedného rezistoru sa stanú dva. Pri kapacitoroch sa naopak hodnota oproti pôvodnej zdvojnásobí a taktiež sa z jedného stanú dva. Názorna ukázka prevedenia vetvy je zobrazená na obr. 1.5

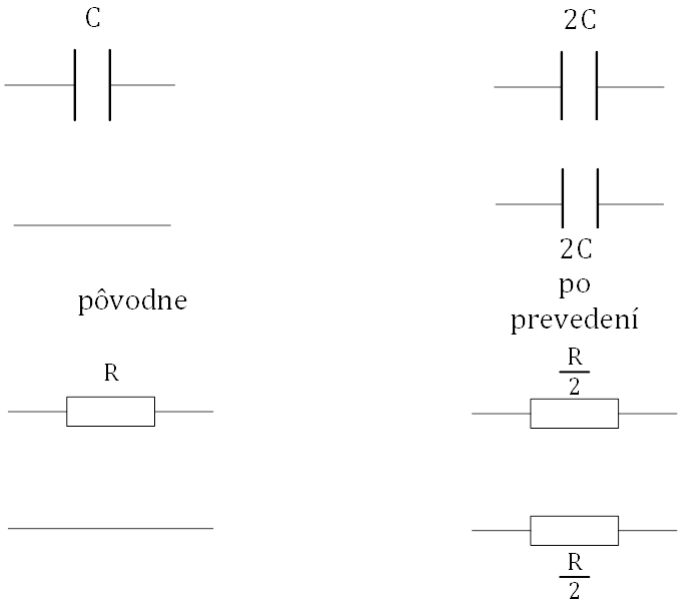


Obr. 1.3: Nediferenčné zapojenie

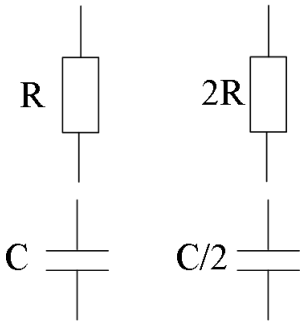


Obr. 1.4: Zmena na diferenčné zapojenie pomocou zrkadlenia

Pri priečnych transformáciach meníme iba parametry prvkov v priečnej vetve. Pri priečnych štruktúrach sa poloha ani parametry nemenia. Každý rezistor v priečnej vetve bude mať po prevedení oproti originálnej hodnote dvojnásobnú hodnotu. Pri kapacitoroch sa pôvodná hodnota zmení na polovičnú. Názorná ukážka je na obr. 1.6.



Obr. 1.5: Prevedenie pozdĺžnej vetvy pre rezistory



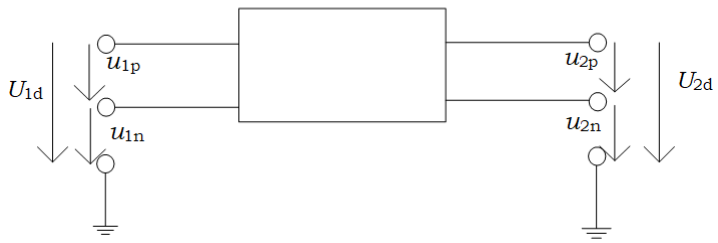
Obr. 1.6: Prevedenie pozdĺžnej vetvy pre rezistory

1.5 Pseudo-diferenčné zapojenia

Pseudo-diferenčné zapojenia obsahujú obidve diferenčné vstupy aj výstupy, ale neobsahujú plne diferenčnú vnútornú štruktúru ako je to u diferenčných zapojení. Vnútorná štruktúra zapojenia zostáva nediferenčná. Takýto spôsob zapojení má stále dostačujúce potlačenie CMRR zložky, pričom celkové zapojenie je menej komplexné ako pri plne diferenčných obvodoch.

1.6 Popis diferenčných a pseudo-diferenčných prenosov

Ako pri nediferenčných prenosoch, aj pri diferenčných je napäťový prenos definovaný ako pomer výstupného diferenčného napätia ku vstupnému diferenčnému napätiu. Obr. 1.7 zobrazuje diferenčný napäťový prenos. Rovnaké pravidlo platí aj pri prúdovom prenose, avšak pri smere prúdových prenosov ako na obr. 1.8 pre prúdový prenos platí, že má opačné znamienko výsledku (výsledok je vynásobený -1).



Obr. 1.7: Diferenčný napäťový prenos

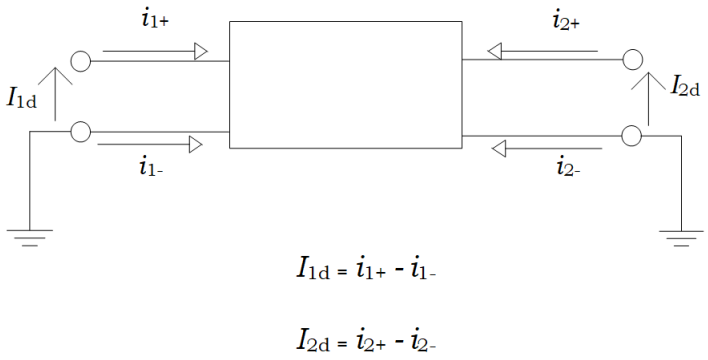
Pre vstupný a výstupný diferenčný prenos prúdu a napätie platí

$$K_u = \frac{U_{2d}}{U_{1d}} = \frac{u_{2p} - u_{2n}}{u_{1p} - u_{1n}} \tag{1.5}$$

$$K_i = -\frac{I_{2d}}{I_{1d}} = -\frac{i_{2p} - i_{2n}}{i_{1p} - i_{1n}}. \tag{1.6}$$

Pri analyzovaní chovania diferenčných obvodov v prúdovom režime používame tieto rovnice:

$$I_{1d} = i_{1+} - i_{1-}, \tag{1.7}$$



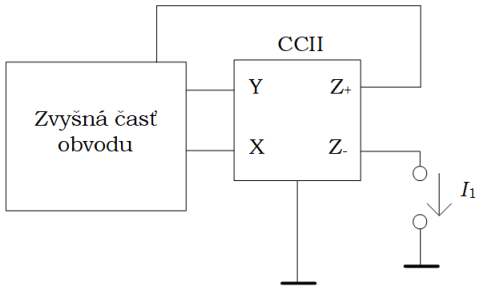
Obr. 1.8: Diferenčný prúdový prenos

$$I_{2d} = i_{2+} - i_{2-}, \tag{1.8}$$

kde je I_{1d} diferenčný vstupný prúd a I_{2d} diferenčný výstupný prúd. Pre diferenčné a pseudo-diferenčné obvody platia rovnaké prenosy.

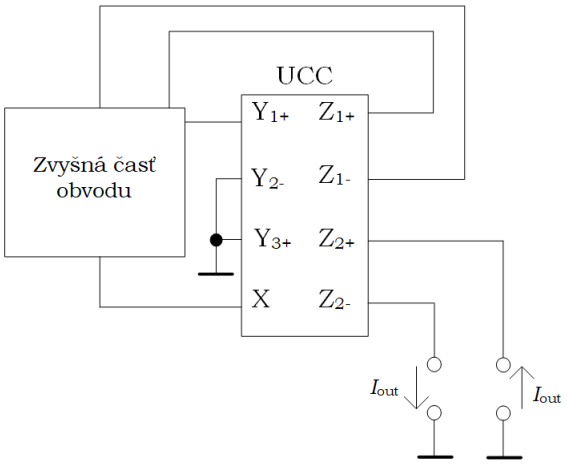
1.7 Zmena nediferenčného výstupu na diferenčný v prúdovom režime

Spôsob zmeny nesymetrického výstupu na symetrický je zobrazený pomocou prúdového konvejora druhej generácie CCII. Nesymetrický výstupný prúd vychádza z brány $Z-$. Názorná ukážka je zobrazená na obr. 1.9.



Obr. 1.9: (Nesymetrický vstup v prúdovom režime

Symetrický vstup dosiahneme nahradením súčasného jednoduchšieho aktívneho prvku prvkom ktorý má dva vysoko impedančné výstupy opačnej polarity ($Z+$ a $Z-$). Podmienka pre získanie diferenčného výstupu pozostáva v odbere dvoch výstupných prúdov so vzájomným posunom 180°. Názorný príklad pomocou prvku UCC je zobrazený na obr. 1.10 [11].



Obr. 1.10: Symetrický výstup v prúdovom režime

1.8 Potlačenie súhlasnej zložky

CMRR(Common-mode rejection ratio) je parameter, ktorý merá schopnosť štruktúry potlačiť signál súhlasnej zložky, ktorá sa objavuje zároveň na oboch vstupoch štruktúry. Ideálne by mal byť parameter CMRR nekonečný, avšak toto nie je v praxi možné dosiahnuť. CMRR je definovaný ako pomer diferenčného zosilenia k zosileniu súhlasneho signálu, meraná v kladnej jednotke dB(s použitím 20log pravidla):

$$\text{CMRR[dB]} = 20\log\frac{A_d}{A_{cm}}, \tag{1.9}$$

kde A_d je diferenčné zosilenie a A_{cm} je zosilenie súhlasného signálu. CMRR je veľmi dôležitá špecifikácia, nakoľko určuje množstvo súhlasneho signálu, ktorý sa objaví v meraní. Čím je potlačenie súhlasného signálu väčšie, tým vzniká menší šum [12].

1.9 Potlačenie nežiadúceho napájacieho signálu

PSRR(Power supply rejection ratio) je pojem, ktorý opisuje množstvo nežiaduceho šumu od zdroja napájania, ktorý dokáže jednotlivá štruktúra potlačiť. PSSR je definovaný ako pomer zmeny napájacieho napätia a zmeny výstupneho napätia. PSSR sa dá vyjadriť následujúcou rovnicou:

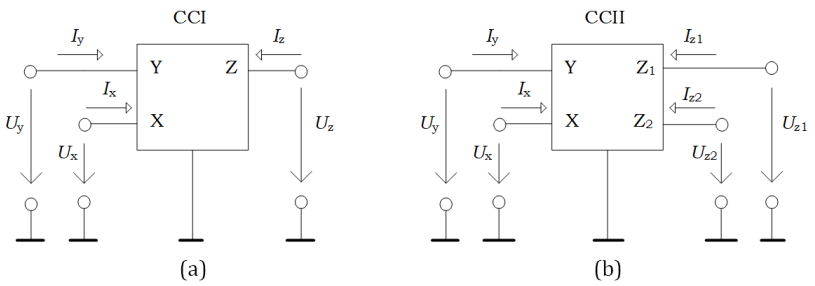
$$\text{PSSR[dB]} = 20\log\frac{\Delta V_{zdroj}}{\Delta V_{out}}, \tag{1.10}$$

kde ΔV_{zdroj} je zmena napájacieho napätia a ΔV_{out} je zmena výstupného napätia. V ideálnom prípade by mala hodnota PSRR dosahovať nekonečna [13].

2 AKTÍVNE PRVKY POUŽÍVANÉ VO FILTROCH

2.1 Prúdové konvejory

Prúdové konvejory prvej generácie a druhej generácie (CCII) sú zobrazené na obr. 2.1. Z týchto základných konvejorov vzniklo veľké množstvo jednotlivých poddruhov generácií, ktoré sa líšia v orientácií a počte výstupných svoriek, počtu a typu vstupných svoriek apod. V mojej práci využívam CCI+(výstupná kladná svorka Z), CCII+/- (jedna kladná a jedna záporná výstupná svorka), CCII+/+ (obe kladné výstupné svorky) a CCII -/- (obe záporné výstupné svorky) [15].



Obr. 2.1: (a) schématická značka CCI (b) schematická značka CCII

Prúdový konvejor prvej generácie **CCI** má 3 brány a každá má odlišné vlastnosti a funkciu. Brána X je prúdova brána, brána Y je napäťová brána a brána Z je výstupná brána. Na jednotlivých bránach sú napätia U_x, U_y U_z súhlasne orientované k spoločnému uzlu a uzlové prúdy I_x, I_y I_z tečúce smerom do bloku. Vzťahy medzi jednotlivými bránami by sme mohli popísať rovnicami:

$$U_x = U_y, I_y = I_x = I_z. \tag{2.1}$$

Prúdový konvejor druhej generácie **CCII** obsahuje 4 brány: nízko impedančný vstup X, vysoko impedančný napäťový vstup Y a dva vysoko impedančné výstupy Z_1 a Z_2. Vzťahy medzi jednotlivými bránami sú:

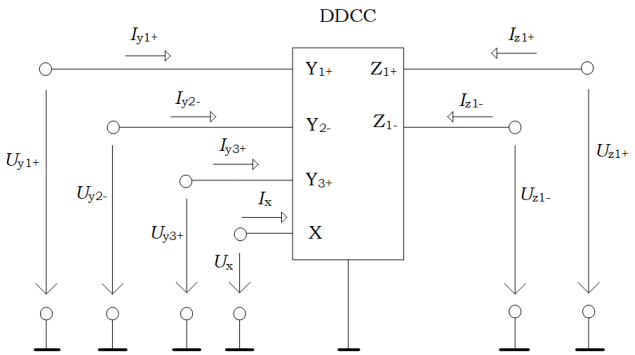
$$U_x = U_y, I_y = 0 \tag{2.2}$$

$$I_{z1} = I_x, I_{z2} = -Ix \tag{2.3}$$

Diferenčný rozdielový prúdový konvejor (**DDCC**) (obr. 2.2) sa skladá zo 6 brán: jeden nízko impedančný prúdový vstup X, tri vysoko impedančné napäťové vstupy Y_{1+}, Y_{2-} a Y_{3+} a dva vysoko impedančné prúdové výstupy Z_{1+} a Z_{1-}. Vzťahy medzi svorkami môžme vyjadriť ako

$$U_x = U_{y1+} - U_{y2-} + U_{y3+} \tag{2.4}$$

$$I_{y1+} = I_{y2-} = I_{y3+} = 0, I_{z1+} = I_x, I_{z-} = -I_x \tag{2.5}$$

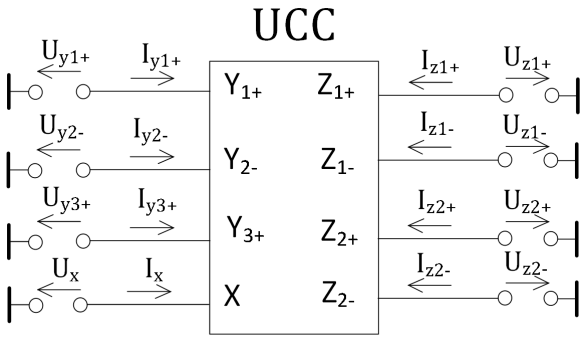


Obr. 2.2: schématická značka DDCC

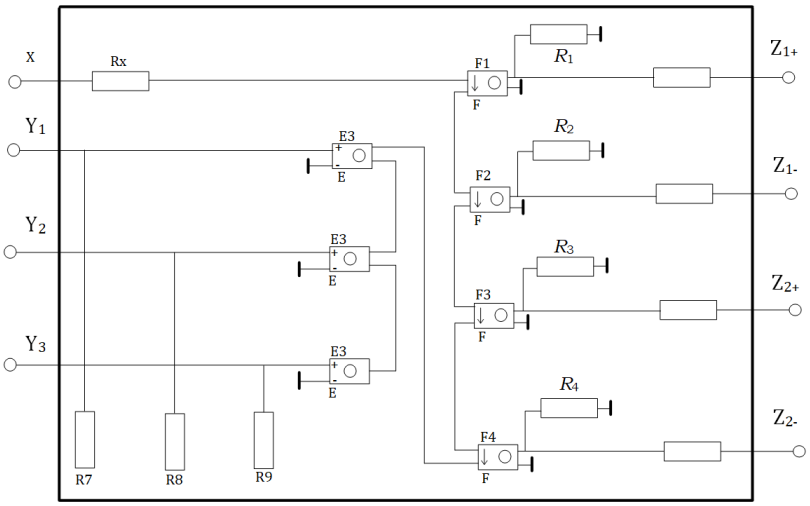
2.2 Univerzálny prúdový konvejor

Univerzálny prúdový konvejor (UCC-Universal Current Conveyor) bol vytvorený pre experimentálne overenie funkčnosti rôznych aplikácií využívajúce všetky druhy známych konvejorov. Jeho schematická značka je znázornená na obr. 2.3. [16]

UCC je definovaný ako osembran s jednou prúdovou svorkou X, tromi vstupnými diferenčnými napäťovými svorkami Y_{1+}, Y_{2-} a Y_{3+}, kde vstupy Y_1 a Y_3 sú kladné a Y_2 záporný. Ďalej sa tu nachádzajú štyri výstupné prúdové svorky Z_{1+}, Z_{1-}, Z_{2+} a Z_{2-}. Výstupy Z_{1+} a Z_{1-} a Z_{2+} a Z_{2-} majú navzájom inverzné hodnoty.



Obr. 2.3: Schéma zapojenia UCC



Obr. 2.4: Vnútorná štuktúra UCC

Základné prenosové vlastnosti UCC vyjadríme pomocou týchto vzťahov:

$$I_x = I_{z1+} = I_{z2+} \tag{2.6}$$

$$-I_x = I_{z1-} = I_{z2-} \tag{2.7}$$

$$U_x = U_{y1+} - U_{y2-} + U_{y3+} \tag{2.8}$$

Matica pre vyjadrenie vzťahov medzi svorkami prvku UCC:

$$\begin{bmatrix} I_{y1+} \\ I_{y2-} \\ I_{y3+} \\ Ux \\ I_{z1+} \\ U_{z1-} \\ I_{z2+} \\ I_{z2-} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} U_{y1+} \\ U_{y2-} \\ U_{y3+} \\ I_x \\ U_{z1+} \\ U_{z1-} \\ U_{z2+} \\ U_{z2-} \end{bmatrix} \tag{2.9}$$

.

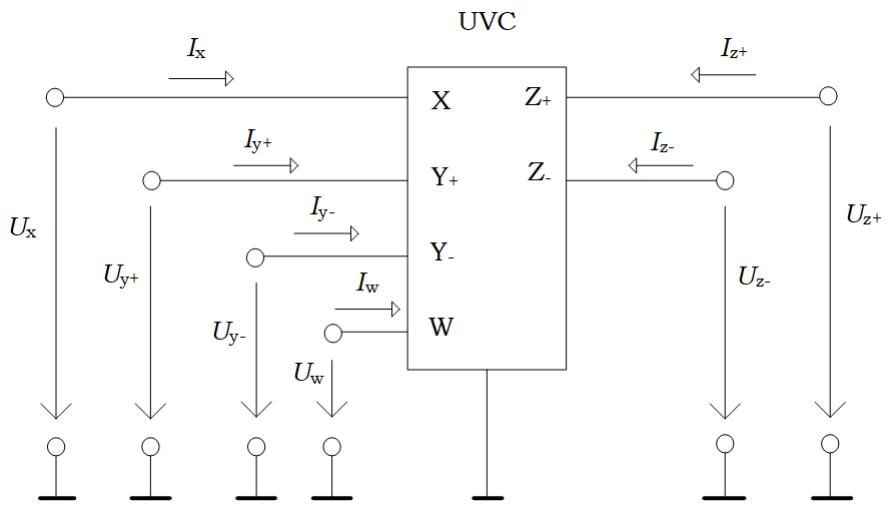
Obrovskou výhodou UCC je variabilita jeho zapojenia pre získanie iných známych konvejorov. V tab. 2.2 sú zobrazené riešenia pre rôzne druhy konvejorov, vstupy a výstupy, prepojenia a uzemnenia jednotlivých svoriek pre získanie nami potrebného konvejora. Pre simulácie navrhnutých kmitočtových filtrov bol využitý UCC-N1B, pomocou ktorého boli nahradené práve prvky CCII a DDCC.

Konvejor	*Vstup*	*Výstup*	*Spojiť*	*GND*
$CCI-$	Y_{1+}	Z_{1-}	Y_{1+}, Z_{1+}	$Y_{2-}, Y_{3+}, Z_{2+}, Z_{2-}$
$CCI+$	Y_{1+}	Z_{2+}	Y_{1+}, Z_{1+}	$Y_{2-}, Y_{3+}, Z_{1-}, Z_{2-}$
$ICCI-$	Y_{1+}	Z_{1-}	Y_{2-}, Z_{1+}	$Y_{1+}, Y_{3+}, Z_{2+}, Z_{2-}$
$ICCI+$	Y_{2-}	Z_{2+}	Y_{2-}, Z_{1+}	$Y_{1+}, Y_{3+}, Z_{1-}, Z_{2-}$
$CCII-$	Y_{1+}	Z_{1-}		$Y_{2-}, Y_{3+}, Z_{1+}, Z_{2+}, Z_{2-}$
$CCII+$	Y_{1+}	Z_{1+}		$Y_{2-}, Y_{3+}, Z_{1-}, Z_{2+}, Z_{2-}$
$ICCII-$	Y_{2-}	Z_{1-}		$Y_{1+}, Y_{3+}, Z_{1+}, Z_{2+}, Z_{2-}$
$ICCII+$	Y_{2-}	Z_{1+}		$Y_{1+}, Y_{3+}, Z_{1-}, Z_{2+}, Z_{2-}$
$CCIII-$	Y_{1+}	Z_{2-}	Y_{1+}, Z_{1-}	$Y_{2-}, Y_{3+}, Z_{2+}, Z_{1+}$
$CCIII+$	Y_{1+}	Z_{1+}	Y_{1+}, Z_{1-}	$Y_{2-}, Y_{3+}, Z_{2+}, Z_{2-}$
$ICCIII-$	Y_{2-}	Z_{2-}	Y_{2-}, Z_{1-}	$Y_{1+}, Y_{3+}, Z_{2+}, Z_{1-}$
$ICCIII+$	Y_{2-}	Z_{1+}	Y_{2-}, Z_{1-}	$Y_{1+}, Y_{3+}, Z_{2+}, Z_{2-}$

Tab. 2.1: Tabuľka zapojenia pre rôzne typy UCC

2.3 Univerzálny napäťový konvejor

Univerzálny napäťový konvejor (Universal Voltage Conveyor - UVC)bol navrhnutý, aby bolo možné teoreticky otestovať správnu funkciu rôznych zapojení napäťových konvejorov. Prepojením a uzemneným správnych vstupov môžme získať rôzne zapojenia napäťových konvejorov. Schéma zapojenia UVC je zobrazená na obr. 2.5. [17]



Obr. 2.5: Schéma zapojenia univerzálneho napäťového konvejora

UVC je definovaný ako šesťbranný aktívny imitačný konvertor s jedným napäťovým vstupom X, dvomi vzájomne inverznými napäťovými výstupmi Z_+ a Z_-,

dvomi diferenčnými prúdovými vstupmi Y_+ a Y_- a pomocnou svorkou W. Napätie zo vstupnej svorky X je privedené na výstupnú svorku Z_+ s kladnou hodnotou a na svorku Z_- so zápornou hodnotou. Rozdiel prúdu tečúci do vstupov Y_+ a Y_- je prenášaný do vstupnej svorky X. Výstupné napätie je buď invertujúce alebo neinvertujúce. Pre určitú realizáciu rôznych typov zapojení napäťových konvejorov pomocou UVC je nutné, aby sa na nízkoimpedančných vstupoch Y_+ a Y_- objavilo napätie

$$U_{Y+} = U_{Y-}\beta U_X \tag{2.10}$$

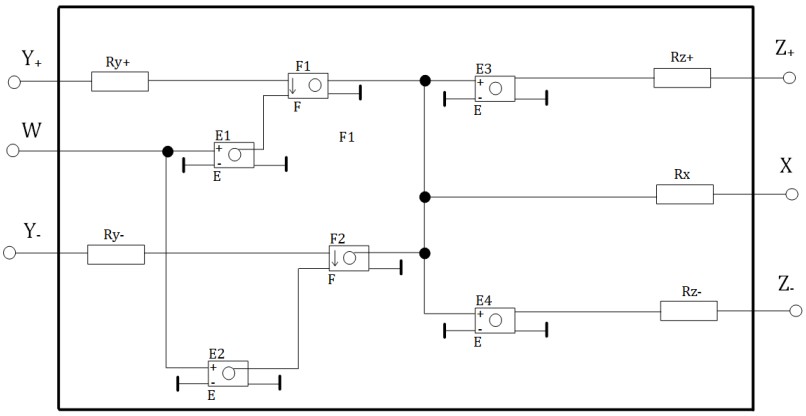
kde β nadobúda hodnôt (-1,0,1)

Vzťahy medzi svorkami sú popísané týmito rovnicami

$$I_x = I_{y+} - I_{y-} \tag{2.11}$$

$$U_{y+} = Uy- = Uw \tag{2.12}$$

$$U_{z+} = Ux, U_{z-} = -U_x \tag{2.13}$$



Obr. 2.6: Vnútorná štuktúra UVC

Matica pre vyjadrenie vzťahov medzi svorkami prvku UVC je

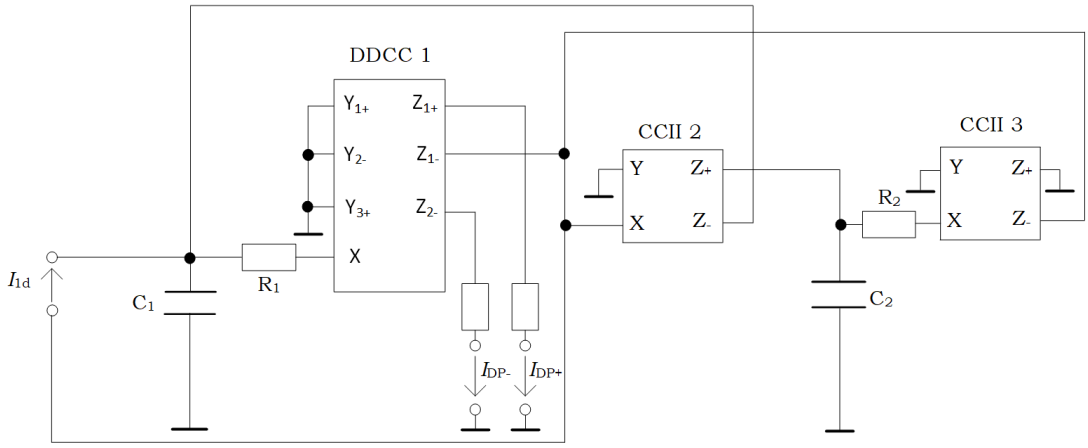
$$\begin{bmatrix} I_x \\ I_w \\ U_{y+} \\ Uy- \\ U_{z+} \\ U_{z-} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} U_x \\ U_w \\ I_{y+} \\ I_{y-} \\ I_{z+} \\ I_{z-} \end{bmatrix} \tag{2.14}$$

.

3 REALIZÁCIA A ANALÝZA NAVRHNUTÝCH FILTROV

3.1 Návrh pseudo-diferenčného filtra dolnej priepusti pracujúceho v prúdovom režime

Návrh prvého zapojenia pseudo-diferenčného filtra pracujúceho v prúdovom režime je zobrazený na obr. 3.1. V schéme sa nachádzajú dva neuzemnené rezistory R_1 a R_2 a dva uzemnené pasívne prvky, kondenzátory C_1 a C_2. Tieto prvky sú pripojené do svoriek X. Filter taktiež využíva prvky DDCC, CCII 2 a CCI 3, ktoré majú uzemnené vysoko impedančné vstupy Y_{1+}, Y_{2-} a Y_{3+}. Vstupný diferenčný signál je privedený do nízko impedančných uzlov svorky X.



Obr. 3.1: Schéma zapojenia pseudo-diferenčného filtra

3.1.1 Prenosová funkcia filtru dolnej priepusti

Pre ideálne vlastnosti použitých prvkov môžme diferenčný výstupný prúd I_{DP+} popísať nasledujúcou rovnicou

$$I_{DP+} = \frac{1}{p^2 R_1 R_2 C_1 C2 + 2pR_1C_1 + 1}, \tag{3.1}$$

a prúd I_{DP-} môžme vyjadriť rovnicou

$$I_{DP-} = \frac{-1}{p^2 R_1 R_2 C_1 C + 2pR_1C_1 + 1}. \tag{3.2}$$

Podľa vzťahov 1.7 a 1.8 je výsledný diferenčný prúd I_{2d}

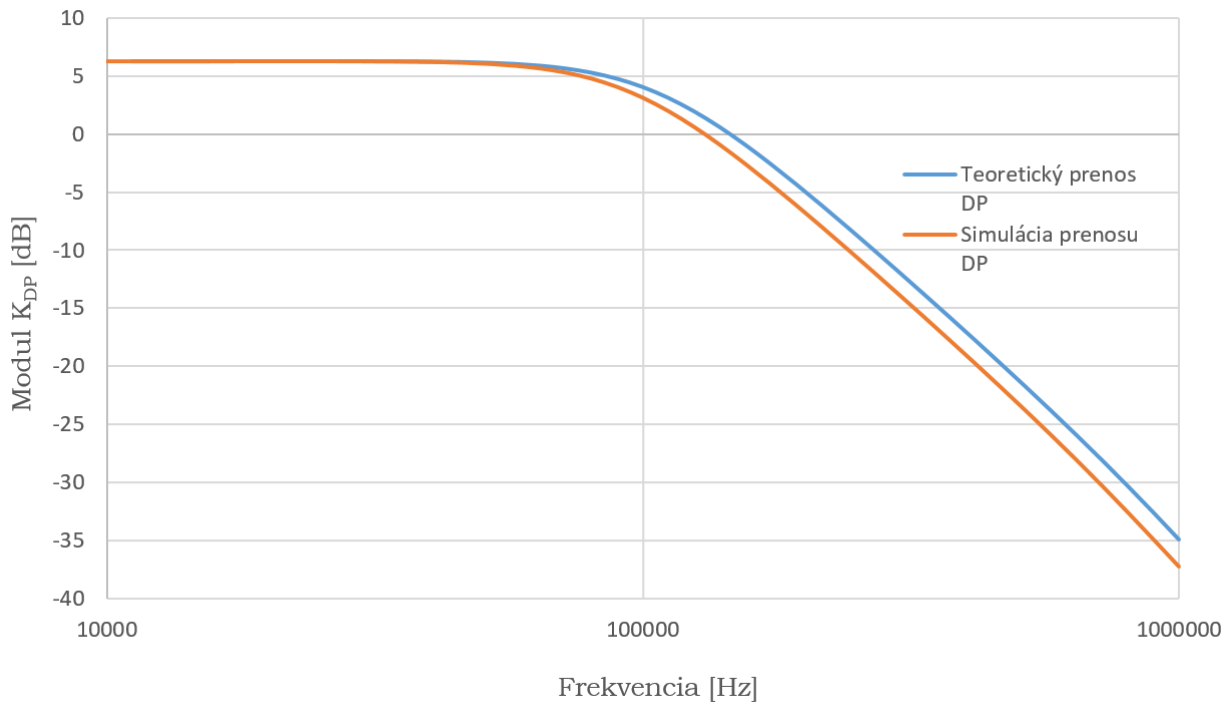
$$I_{2d} = \frac{2}{p^2 R_1 R_2 C_1 C_2 + 2pR_1 C_1 + 1}, \tag{3.3}$$

Činiteľ akosti Q a uhlový kmitočet ω_0 môžme z rovnice 1.2 odvodiť následovne.

$$Q = \sqrt{\frac{R_2 C_2}{4R_1 C_1}}, \tag{3.4}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}. \tag{3.5}$$

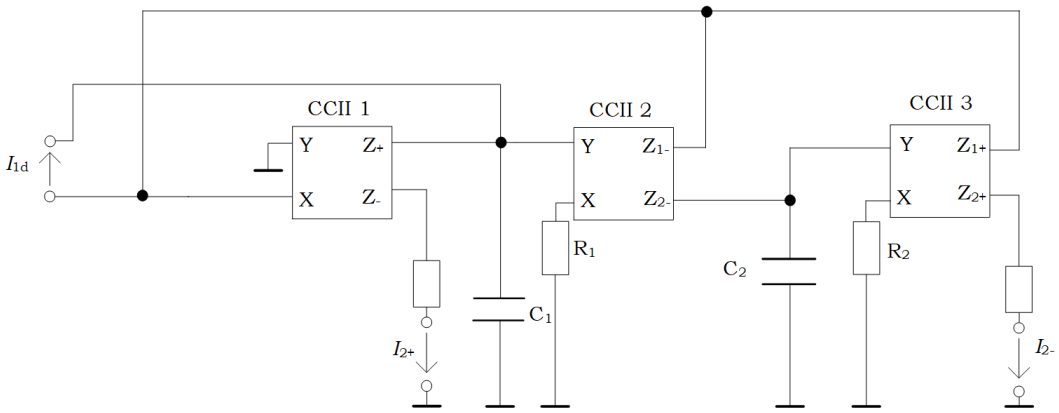
Pre simuláciu v programe OrCAD bol zvolený hraničný kmitočet $f_0 = 100\text{kHz}$, činiteľ akosti $Q = 0,707$ (Butterworthova aproximácia), hodnoty kondenzátorov pre $C_1 = C_2 = 1nF$. Hodnoty rezistorov po výpočte sú $R_1 = 1125\,\Omega$ a $R_2 = 2250\,\Omega$. Grafické výsledky a simulácia navrhnutého filtru v ideálnom prípade sú zobrazené na obr. 3.2



Obr. 3.2: Graf dolnej priepusti

3.2 Návrh pseudo-diferenčného fázovacieho článku pracujúceho v prúdovom režime

Návrh prvého zapojenia pseudo-diferenčného filtra pracujúceho v prúdovom režime je zobrazený na obr. 3.1. V schéme sa nachádzajú dva neuzemnené rezistory R_1 a R_2 pripojené do svoriek X, a dva uzemnené kondenzátory C_1 a C_2 pripojené do záporných výstupných svoriek. Filter taktiež využíva tri aktívne prúdové konvejory druhej generácie , CCII 1 a CCII 2 a CCII 3.



Obr. 3.3: Pseudo-diferenčného filter využívajúci prúdové konvejory druhej generácie

3.2.1 Prenosová funkcia filtru fázovacieho článku

Pre ideálne vlastnosti použitých prvkov môžme diferenčný výstupný prúd I_{2d} popísať nasledujúcou rovnicou

$$I_{2+} = \frac{p^2 R_1 R_2 C_1 C2 - pR_1 C_1 - 1}{p^2 R_1 R_2 C_1 C2 + pR_1 C_1 + 1}, \tag{3.6}$$

a prúd I_{2-} môžme vyjadriť rovnicou

$$I_{2+} = \frac{-2}{p^2 R_1 R_2 C_1 C + pR_1 C_1 + 1}. \tag{3.7}$$

Podľa vzťahov 1.7 a 1.8 je výsledný diferenčný prúd I_{2d}

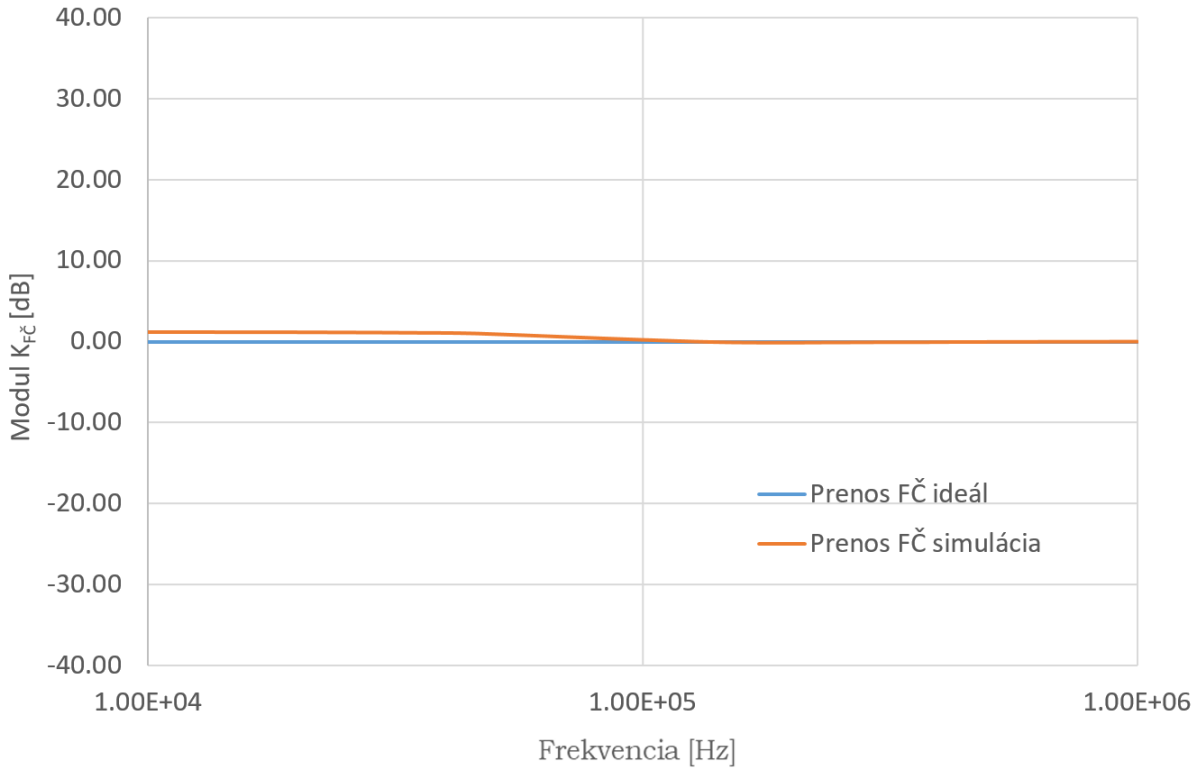
$$I_{2d} = \frac{p^2 R_1 R_2 C_1 C2 - pR_1 C_1 + 1}{p^2 R_1 R_2 C_1 C_2 + pR_1 C_1 + 1}, \tag{3.8}$$

Činiteľ akosti Q a uhlový kmitočet ω_0 môžme odvodiť následovne.

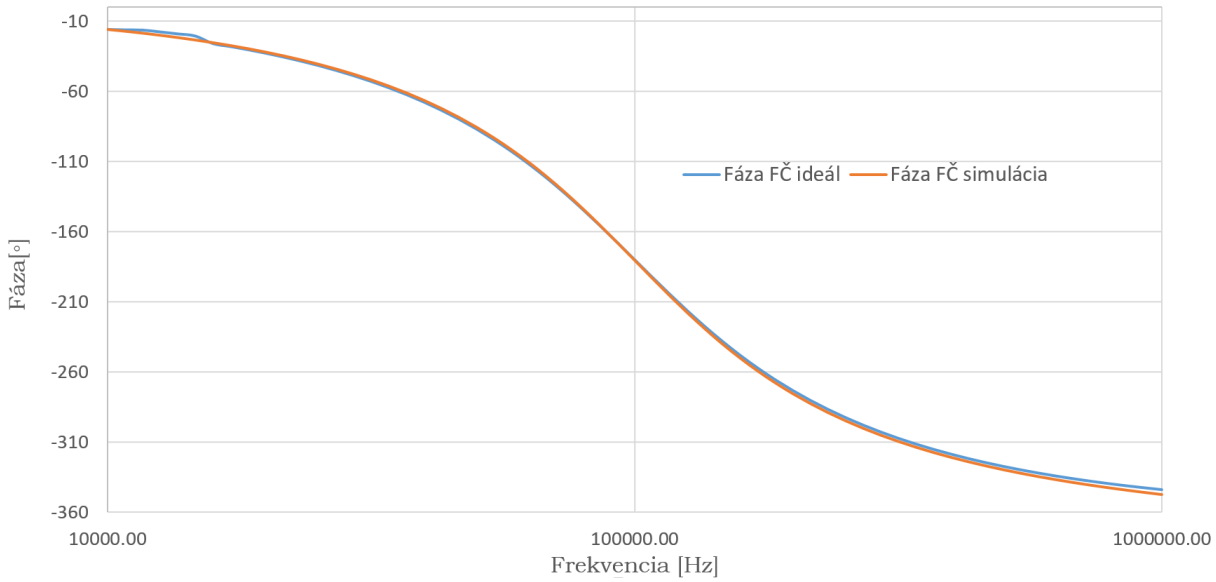
$$Q = \sqrt{\frac{R_2 C_2}{4 R_1 C_1}}, \tag{3.9}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}. \tag{3.10}$$

Pre simuláciu v programe OrCAD bol zvolený hraničný kmitočet $f_0 = 100\text{kHz}$, činiteľ akosti $Q = 0,707$ (Butterworthova aproximácia), hodnoty kondenzátorov pre $C_1 = C_2 = 1nF$. Hodnoty rezistorov po výpočte sú $R_1 = 1125\,\Omega$ a $R_2 = 2250\,\Omega$. Grafické výsledky a simulácia navrhnutého filtru v ideálnom prípade sú zobrazené na obr. 3.4 a 3.5



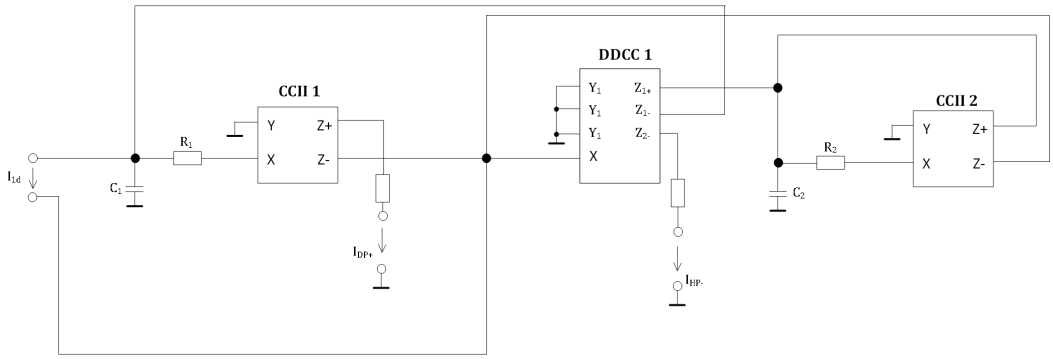
Obr. 3.4: Charakteristika fázovacieho článku



Obr. 3.5: Charakteristika fáze fázovacieho článku

3.3 Návrh pseudo-diferenčného filtra pásmovej zádrže pracujúcej v prúdovom režime

Návrh druhého zapojenia pseudo-diferenčného filtra pracujúceho v prúdovom režime je zobrazený na obr. 3.6. V schéme sa nachádzajú dva uzemnené rezistory R_1 a R_2 pripojené do prúdových svoriek X. Tiež sa tu nachádzajú uzemnené pasívne prvky, kondenzátory C_1 a C_2, pripojené do výstupných prúdových svoriek Z_{2-} a Z_+. Filter taktiež využíva prvky DDCC 1, DDCC 2 a CCI 3.



Obr. 3.6: Schéma zapojenia pseudo-diferenčného filtra

3.3.1 Prenosová funkcia filtru pásmovej zádrže

Prúd I_{2d} sa pri ideálnych podmienkach rovná

$$I_{DP+} = \frac{1}{p^2 R_1 R_2 C_1 C_2 + p R_1 C_1 + 1}, \tag{3.11}$$

$$I_{HP-} = \frac{-p^2 R_1 R_2 C_1 C_2}{p^2 R_1 R_2 C_1 C_2 + p R_1 C_1 + 1}. \tag{3.12}$$

Podľa vzťahov 1.7 a 1.8 je výsledný diferenčný prúd I_{2d}

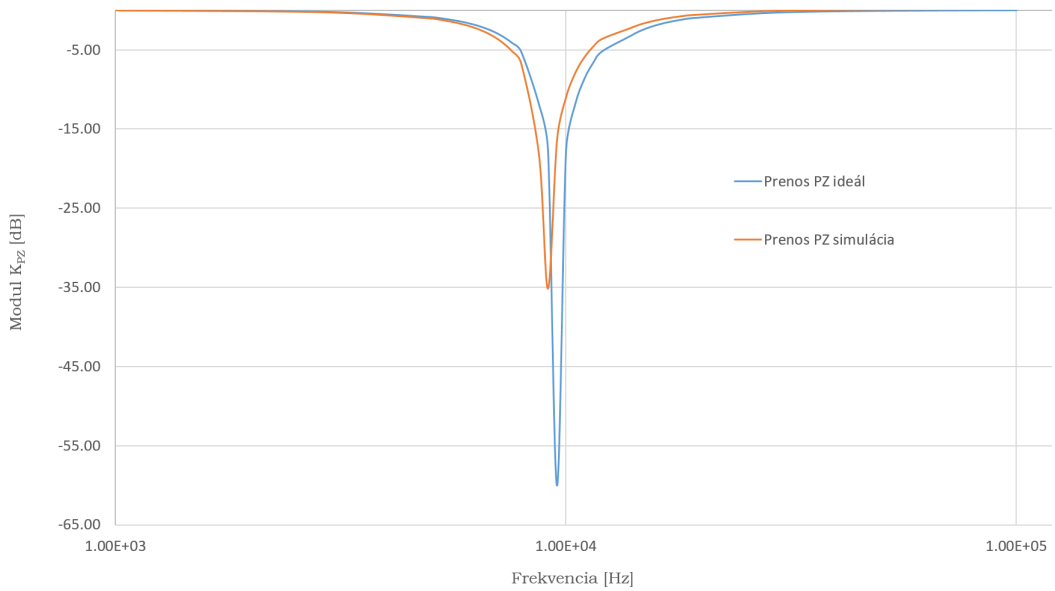
$$I_{2d} = \frac{p^2 R_1 R_2 C_1 C_2 + 1}{p^2 R_1 R_2 C_1 C_2 + p R_1 C_1 + 1}. \tag{3.13}$$

Činiteľ akosti Q a uhlový kmitočet ω_0 môžme odvodiť následovne

$$Q = \sqrt{\frac{R_2 C_2}{R_1 C_1}}, \tag{3.14}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}. \tag{3.15}$$

Pre simuláciu v programe OrCAD bol zvolený hraničný kmitočet $f_0 = 10kHz$, činiteľ akosti $Q = 0,707$ (Butterworthova aproximácia), hodnoty kondenzátorov pre $C_1 = C_2 = 1nF$. Hodnoty rezistorov po výpočte sú $R_1 = 22500\,\Omega$ a $R_2 = 11500\,\Omega$. Grafické výsledky a simulácia navrhnutého filtru v ideálnom prípade sú zobrazené na obr. 3.7

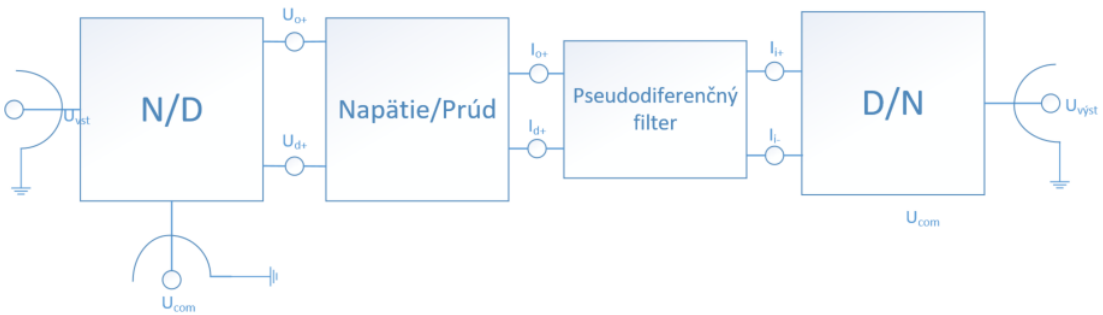


Obr. 3.7: Charakteristika pásmovej zádrže

4 PRAKTICKÉ MERANIE

Pre praktickú časť bakalárskej práce bol na meranie a simuláciu zvolený pseudo-diferenčný filter popísaný v kapitole 3.3. Navrhnutý pseudo-diferenčný filter druhého rádu využíva tri aktívne prvky, dva prúdové konvejory druhej generácie CCII a jeden rozdielový prúdový konvejor DDCC. Teoretické simulácie boli simulované v programu OrCAD s využitím univerzálneho prúdového konvejora tretej generácie (UCC-3L), ktorého teoretické výsledky sú zobrazené na obr. 3.7. Cieľom praktického merania bolo overenie chovania filtru s využitím reálnych súčiastiek a porovnanie výsledkov s tými teoretickými. Ďalej je nameraný parameter parameter CMMR a PSSR a celkové harmonické zkreslenie.

Nakoľko sa jedná o pseudo-diferenčný filter, musel byť pre experimentálne meranie vymyslený spôsob ako premeniť pripojené nediferenčné napätie na diferenčné. K tomuto účelu bola použitá súčiastka AD 8476 [19]. Nakoľko ide o konvejory pracujúce v prúdovom režime, pomocou vnútorného čipu prvku $UCCX-0349SMD$ bolo prevedené diferenčné napätie na diferenčný prúd. Ako posledné bolo nutné premeniť diferenčný prúd späť na nediferenčný, k čomu bola vybraná súčiastka AD 8429 [20]. Prevodníky a ich štruktúra je zobrazená v prílohách A a B. Bloková schéma experimentálneho merania je zobrazená na obr. 4.1.



Obr. 4.1: Blokové schéma experimentálneho merania

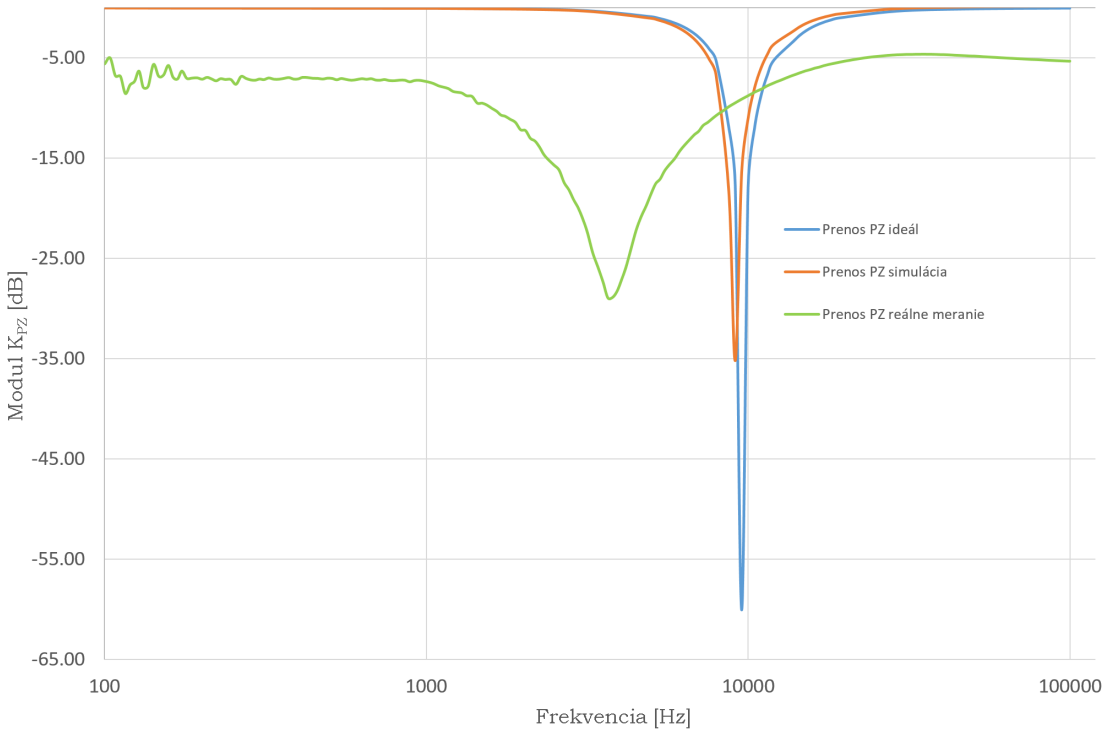
Filter je navrhnutý pre charakteristický kmitočet f_0 $10kHz$, hodnoty kondenzátorov C_1=C_2=1 nF a rezistorov R_1=22500Ω, R_2=11500Ω. Na navrhnutie dosky plošných spojov zvoleného filtru bol použitý freeware Cadsoft program Eagle 6.5.0. Meranie na analyzátore bolo nastavené v rozmedzí od 100 Hz do 1 MHz, vstupný signál mal hodnotu 0 dBm a šírka pásma bola 30 Hz. Schéma zapojenia, použité prvky a dokumentáciu k tomuto materiálu je priložená v prílohe C. Všetky namerané hodnoty a grafy sú uskutočnené pomocou obvodového analyzátoru 4395 A.

4.1 Meranie a simulovanie pseudo-diferenčného filtra pracujúceho v CM

Pre experimentálne meranie boli využité tri univerzálne prúdové konvejory UCC-N1B, pomocou ktorých boli realizované jednotlivé aktívne prvky[18]. Nevyužité brány konvejora boli uzemnené spolu s vnútornými blokmi. Okrem aktívnych prvkov obsahuje filter 4 pasívne prvky a to 2 rezistory a dva kondenzátory. Schéma filtru je zobrazená na obr. 3.6. Filter je možné využiť pre realizáciu pásmovej zádrže.

Kmitočtový filter bol navrhnutý pre charakteristický kmitočet f_0 10 kHz a činiteľ akosti Q = 0,707. Hodnoty kondenzátorov boli zvolené pre $C_1 = C_2 = 1nF$. Jednotlivé pasívne prvky boli vypočítané pomocou vzorcov 3.14 a 3.15, tj. hodnoty rezistorov po výpočte sú $R_1 = 22500\,\Omega$ a $R_2 = 11500\,\Omega$. Prakticky použité hodnoty všetkých súčiastiek a vyrobené dosky sú priložené v prílohách.

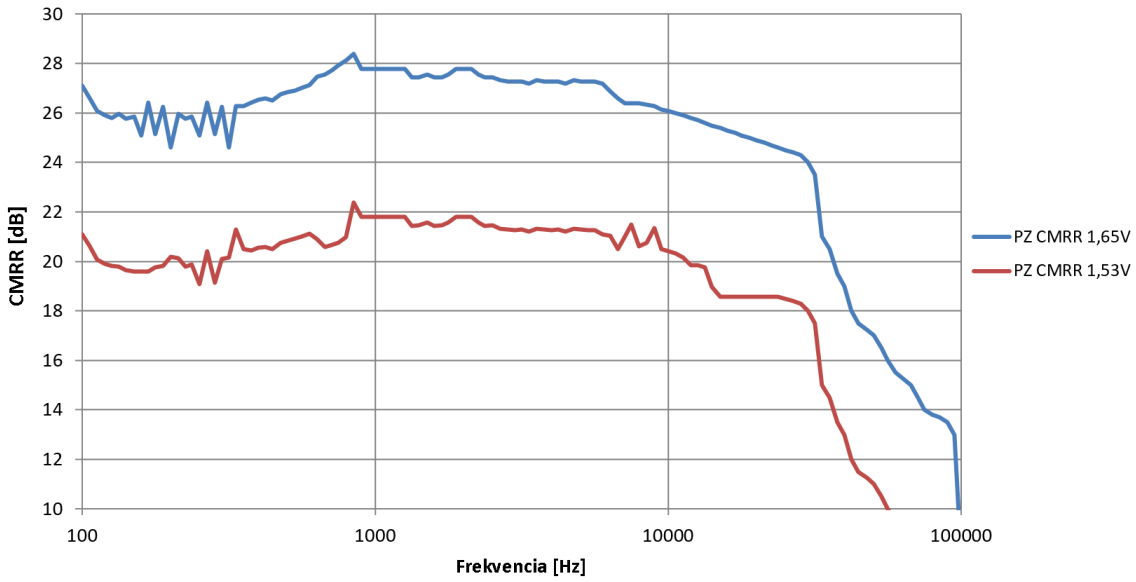
Pre porovnanie teoretických a praktických meraní boli simulácie znázornené na Obr. 4.2. Obr. 4.3 popisuje schopnosť potlačenia CMRR.



Obr. 4.2: Modulová charakteristika pseudo-diferenčného filtru pásmovej zádrže

Na základe porovnania teoretických a praktických meraní sme došli k následujúcim výsledkom. V porovnaní s teoretickými hodnotami sa praktický priebeh pásmovej zádrže líší. Priebeh je utlmený utlmený o 5dB, hraničný kmitočet f_0 je posunutý

z teoretickej hodnoty 10 kHz na $3,8$ kHz. Taktiež nesedí činiteľ akosti $Q = 0,707$. Filter má v hraničnom kmitočte útlm -28dB, čo je oproti simulácii o 7dB menší útlum. Celkovo sa filter nechová podľa očakávaní. Nezrovnalosti môžu byť spôsobené viacero faktormi, či už ide o parazitné vlastnosti aktívnych prvkov, neideálne parametry vstupných i výstupných svoriek, použitie prevodníkov, z rozdielu pracujúcej sondy alebo zlým napájkovaním dosky.

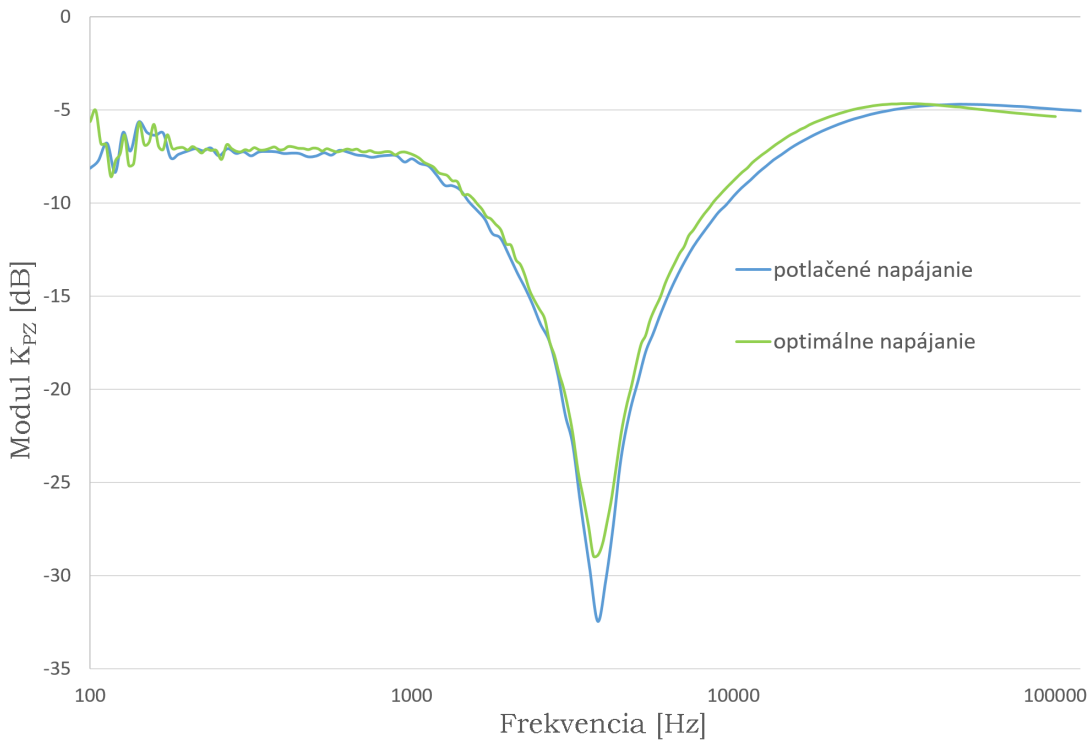


Obr. 4.3: Potlačenie súhlasného signálu pseudo-diferenčným filtrom pre optimálne a potlačené napájanie

Na Obr. 4.3 je zobrazený parameter potlačenia súhlasnej zložky CMRR, ktorý pri optimálnom napájaní dosahuje 26dB, čo sa dá pokladať za dostatočné potlačenie súhlasnej zložky. Pri potlačenom napájaní sú už výsledky horšie, CMRR nadobúda hodnoty 21dB, čo je potlačenie menšie o 5dB oproti optimálnému napájaniu.

4.2 Chovanie pseudo-diferenčného filtra pri potlačení napájacieho napätia

Úlohou tohto merania bolo zistiť správanie pseudo-diferenčného filtra pri poklese napájacieho napätia. Pre využívaný konvejor $UCC - N1B$ je optimálné napájanie $\pm 1,65$ V a odber konvejoru 27 mA. V tomto prípade bolo zmenené napájanie na $\pm 1,53$ V, čo odpovedá približne siedmym percentám poklesu. Porovnanie správania filtra pri optimálnom napájacom napätí a pri jeho poklese je zobrazený na obr. 4.4



Obr. 4.4: Modulová charakteristika filtru pri optimálnom a potlačenom napajácom napätí

Z grafu môžme vidieť, že priebehy optimálneho a potlačeného napájania sú takmer identické. Jedinou zmenou je útlum pri hraničnom kmitočte f_0, kde sa z hodnoty približne -29dB zmenšil pri potlačení napájania na -33dB. V prípade potlačeného napájania dosahuje filter lepších výsledkov.

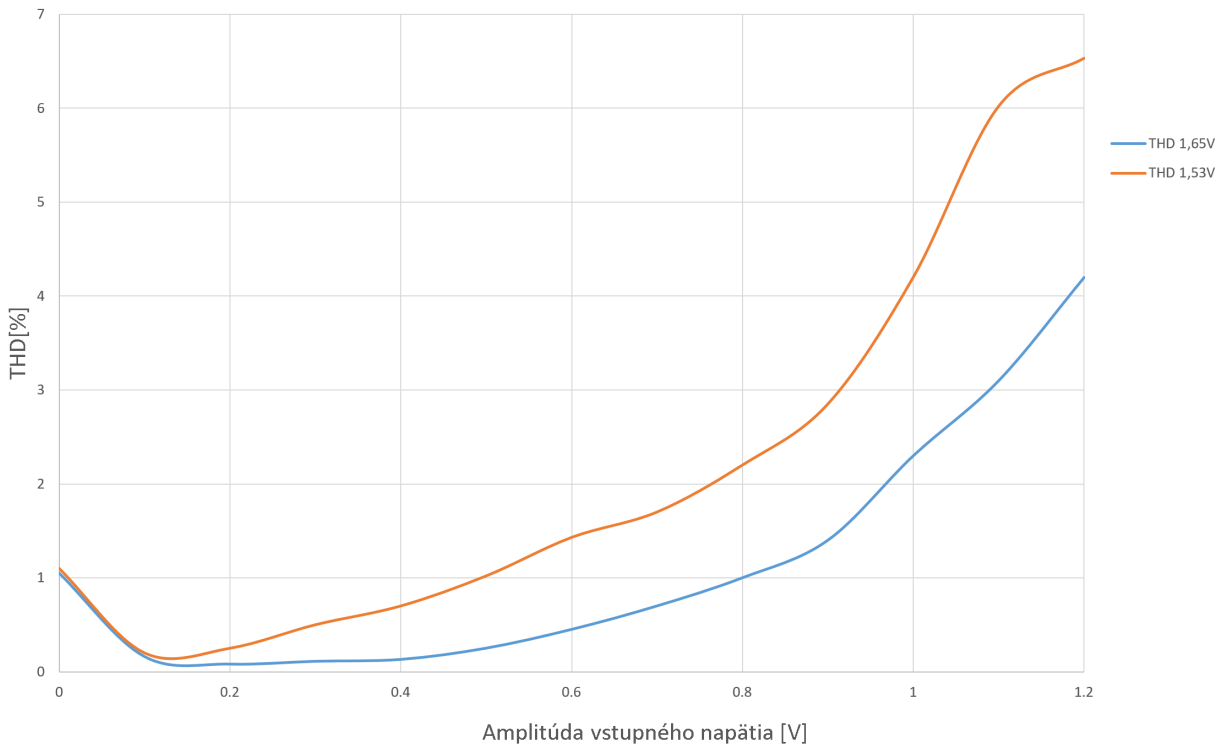
4.3 Meranie celkového harmonického zkreslenia

Meranie celkového harmonického zkreslenia THD (Total harmonic distortion) bolo uskutočnené pre optimálne i znížené napájacie napätie. Pri meraní sa bralo ohľad na

prvých päť harmonických zložiek ($U_1 - U_5$). THD je definované ako pomer vyšších harmonických zložiek k zložke základnej, popísané rovnicou:

$$\mathrm{THD} = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \ldots + U_n^2}}{U_1} \tag{4.1}$$

Namerané a vypočítané hodnoty sú zobrazené na obr. 4.5. Frekvencia vstupného signálu bola 1 kHz.



Obr. 4.5: Harmonické zkreslenie filtru pri napájacom napätí $\pm 1,65V$ $a \pm 1,53V$

Z obr. 4.5 môžme vidieť, že pre amplitúdy vstupného signálu pod $0,8$V je THD pod jedno percento pre optimálne napájanie. Pri potlačenom napájaní bolo pre amplitúdy vstupného signálu pod $0,7$V celkové harmonické zkreslenie pod dve percentá. Rastúce priebehy THD sú v oboch prípadoch zapríčenené saturáciou aktívnych prvkov, pričom pri znízenom napájacom napätí sa aktívne prvky dostávajú do saturácie skôršie oproti optimálnemu napájaniu.

5 ZÁVER

Táto bakalárska práca bola zameraná na návrh funkčnej pseudo-diferenčnej štruktúry pracujúcej v prúdovom režime na základe poznatkov kmitočtových filtrov pracujúcich v napäťovom režime. Hlavným cieľom práce bolo navrhnutie pseudo-diferenčného kmitočtového filtra, overenie jeho funkčnosti pomocou simulácie a následné prezentovanie návrhu. Nové vzniknuté zapojenie bolo taktiež vyhodnotené z pohľadu zkreslenia zpracovania signálu, potlačenia súhlasného signálu (CMRR) a potlačenia napájacieho napätia (PSRR).

V úvodnej časti práce sa venujem obecným popisom kmitočtových filtrov, ich funkciu, ich rôzne využitia a druhy filtrov. Popisujem filtry dolnej priepusti, hornej priepusti, pásmovej priepusti, pásmovej zádrže a fázovací článok, ich prenosové funkcie, základné vlastnosti a využitie v praxi. V ďalšej časti popisujem základne vlastnosti, prenosy signálu, výhody a nevýhody nediferenčných, diferenčných a pseudodiferenčných filtrov. V texte sa objavujú návrhy prevodu medzi nediferenčnými a diferenčnými zapojeniami pomocou pozdĺžnej a priečnej transformácie. Taktiež je tam zobrazený spôsob premeny nediferenčného zapojenia na pseudodiferenčné.

V ďalšej kapitole popisujem aktívne prvky využité v návrhu zapojenia, ich vlastnosti, vzťahy a schémy zapojenia. Pri univerzálnom prvku UCC tiež popisujem jeho najväčšiu výhodu a to je realizácia rôznych druhov zapojení na základe využitia, prepojenia a uzemnenia rôznych svoriek. Následujúca kapitola sa venuje trom navrhnutým schémam. Ide o schémy pseudodiferečných filtrov dolnej priepusti, fázovacieho článku a pásmovej zádrže. Popisujem prenosové funkcie, výpočty jednotlivých rezistorov na základe určených hodnôt činiteľa akosti, hraničného kmitočtu a kondenzátorov.

Ako praktickú časť bakalárskej práce bol navrhnutý pseudo-diferenčný filter pásmovej zádrže druhého rádu vyrobený a následne prakticky odmeraný. V praktickej časti sa venujem porovnávaniu teoretických hodnôt z praktickými. V praktickej časti som sa tiež venoval celkovému harmonickému zkresleniu filtra, jeho parametrami potlačenia súhlasnej zložky a chovanie pri potlačení napájacieho napätia. Všetky výsledky sú zobrazené v grafoch.

Na základe výsledkov sme si všimli rozdiely správania filtra a jeho značné rozdiely oproti teoretickým hodnotám. Pseudo-diferenčný filter sa nechová ako bolo očakávané, čo môže byť spôsobené faktormi ako sú parazitné vlastnosti aktívnych prvkov, neideálne parametry vstupných i výstupných svoriek, nepresné napájkovanie dosky a skreslené chovanie sondy na analyzátore, ktoré je priložené v prílohách. V praktickej časti bolo taktiež zostrojené obdobé zapojenie pseudo-diferenčného filtra pásmovej zádrže, ktoré nepotrebovala vstupný prevodník nediferenčného signálu na diferenčný. Funkčnosť tohto filtra sa však neoverila, výsledky neboli vyhovujúce,

preto sa ani neobjavili v tejto práci. Schéma tohto filtra je zobrazená v prílohe C(2.varianta). Dodatočné podklady, ako sú zostrojené dosky a použité prevodníky sú priložené v prílohách.

LITERATÚRA

[1] Analogová technika počítačová cvičení úloha 2: Kmitočtový filtr. FEKT VUT v Brně

[2] Alzat SZM: *Frekvenčné selektory.* Dostupné z:<http://alzat.szm.com/selektory/frekvenc/frek_sel.htm>.

[3] Electronics tutorials: *Passive High Pass Filter* [online]. Poslední aktualizace 4. 10. 2017 [cit. 21. 11. 2017]. Dostupné z:<http://www.electronics-tutorials.ws/filter/filter_3.html>.

[4] Electronics tutorials: *Passive Low Pass Filter* [online]. Poslední aktualizace 4. 10. 2017 [cit. 21. 11. 2017]. Dostupné z:<http://www.electronics-tutorials.ws/filter/filter_2.html>.

[5] Wikipedia a přispěvatelé: *Band-stop filter* [online]. Poslední aktualizace 28. 5. 2017 [cit. 21. 11. 2017]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Band-stop_filter>.

[6] Wikipedia a přispěvatelé: *Band-pass filter* [online]. Poslední aktualizace 17. 10. 2017 [cit. 21. 11. 2017]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Band-pass_filter>.

[7] All about circuits: *Focusing on Phase: The All-Pass Filter* Dostupné z: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/focusing-on-phase-the-all-pass-filter/>.

[8] Powerpoint prezentácia: *Analógová technika, Počítačové cvičení 2.Kmitočtový filter.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 10 s.

[9] Maxim integrated: *Understanding Single-Ended, Pseudo-Differential and Fully-Differential ADC Inputs.* Poslední aktualizace 14. 6. 2002 [cit. 21. 11. 2017]. Dostupné z:<https://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/1108>.

[10] CHAN, K.: Design of Differential Filters for High-Speed Signal Chains, Application repor, Texas Instruments, SLWA053B, 8 pages, 2010.

[11] Bc. Ondřej Sládok *Diferenční a pseudodiferenční kmitočtové filtry.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 100 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jaroslav Koton, Ph.D.

[12] *Common-mode rejection ratio.* Elektronický časopis. Dostupné z:<https://encyclopedia.thefreedictionary.com/Common-mode+rejection+ratio>.

[13] *Power supply rejection ratio.* Elektronický časopis. Dostupné z:<http://encyclopedia.thefreedictionary.com/Power+Supply+Rejection+Ratio>.

[14] KOTON, J.; HERENCSÁR, N.; SLÁDOK, O.; HORNG, J. *Pseudo-differential second-order band- reject filter using current conveyors.* AEU - International Journal of Electronics and Communications, 2016, roč. 70, č. 6, s. 814-821. ISSN: 1434-8411

[15] ČAJKA, J.; DOSTÁL, T.; VRBA, K. *Nové názvosloví a sjednocující pohled na proudové konvejory.* Electrorevue, 2001. Dostupné z:<http://www.elektrorevue.cz/clanky/01024/index.html>.

[16] JEŘÁBEK, J a VRBA, K. *Vybrané vlastnosti univerzálního proudového konvejoru, ukázka návrhu aplikace.* 2006, roč. 2006, č. 41, s. 9. [online]. Elektronický časopis. Dostupné z:<http://www.elektrorevue.cz/cz/clanky/analogovatechnika--vzajemny-a-d-prevod/0/vybrane-vlastnosti-univerzalnihoproudoveho-konvejoru--ukazka-navrhu-aplikace/

[17] Jarník, L. *Návrh kmitočtových filtru s netradičnými aktívnimi prvky.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2007. 56 s. Vedoucí diplomové práce Ing. JAN JEŘÁBEK, Ph.D.

[18] UCC-N1B: *Universal current conveyor(UCC) and Second-Generation current conveyor(CCII+/-).*

[19] AD 8476: *Low Power, Unity Gain Fully Differential Amplifier and ADC Driver.*Datasheet, Analog Devices [online], 2011. Dostupné z:<http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8476.pdf>.

[20] AD 8429: *1 nV/Hz Low Noise Instrumentation Amplifier.* Datasheet, Analog Devices [online], 2011. Dostupné z:<http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8429.pdf>.

ZOZNAM SYMBOLOV, VELIČÍN A SKRATIEK

C	kapacitor [F]
CCI	Prúdový konvejor prvej generácie
CCII	Prúdový konvejor druhej generácie
CMRR	Common-more rejection ratio
DDCC	Diferenčný rozdielový prúdový konvejor (differential difference current conveyor)
DP	Dolná priepusť (Low-pass)
f_p	kmitočet pólu [Hz]
Hz	Hertz [Hz]
f_0	hraničný kmitočet [Hz]
f_{min}	minimálny kmitočet [Hz]
f_{max}	maximálny kmitočet [Hz]
FČ	Fázovací článok (All-pass)
HP	Horná priepusť (High-pass)
K_0	priepustné pásmo
K(p)	prenosová funkcia
L	induktor [H]
PP	Pásmová priepusť (Band-pass)
PSRR	Power supply rejection ratio
PZ	Pásmová zádrž (Band-reject)
Q	činiteľ akosti [-]
R	rezistor [Ω]
U_1	Vstupné napatie [V]
U_2	Výstupné napatie [V]
I_1	Vstupný prúd [A]
I_2	Výstupný prúd [A]
U_{1d}	Diferenčné vstupné napatie [V]
U_{2d}	Diferenčné výstupné napatie [V]
I_{1d}	Diferenčný vstupný prúd [V]
I_{2d}	Diferenčný výstupný prúd [V]
X	Vstupná svorka konvejora
Y	Vstupná svorka konvejora
Z	Výstupná svorka konvejora
U_x	Napetie na uzle X [V]
U_y	Napetie na uzle Y [V]
U_z	Napetie na uzle Z [V]
U_w	Napetie na uzle W [V]

U_w	Napetie na uzle W [V]
I_y	Prúd na uzle Y [A]
I_z	Prúd na uzle Z[A]
I_x	Prúd na uzle X[A]
UCC	Univerzálny prúdový konvejor (Universal Current Conveyor)
UVC	Univerzálny napeťový konvejor (Universal Voltage Conveyor)
ω_0	uhľový kmitočet [s^{-1}]

ZOZNAM PRÍLOH

A Prevodník nediferenčného signálu na diferenčný **48**

B Prevodník diferenčného signálu na nediferenčný **50**

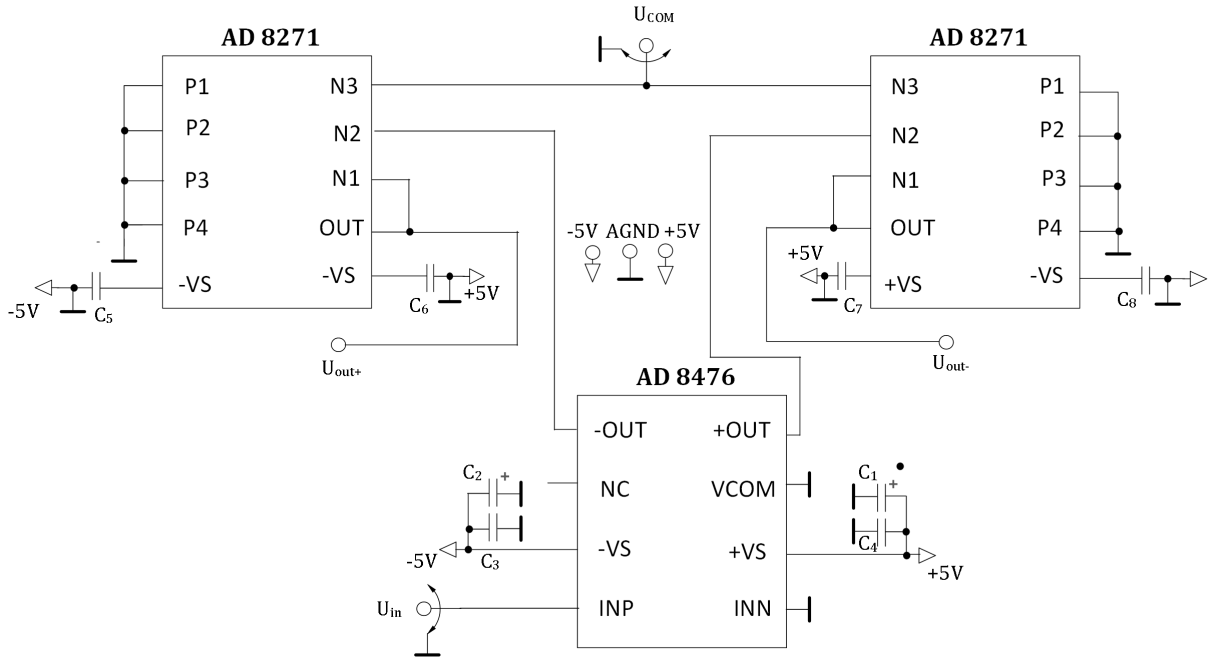
C Zapojenie pseudodiferenčného filtra **52**

D Originálne výsledky merania **56**

E Obsah priloženého CD **58**

A PREVODNÍK NEDIFERENČNÉHO SIGNÁLU NA DIFERENČNÝ

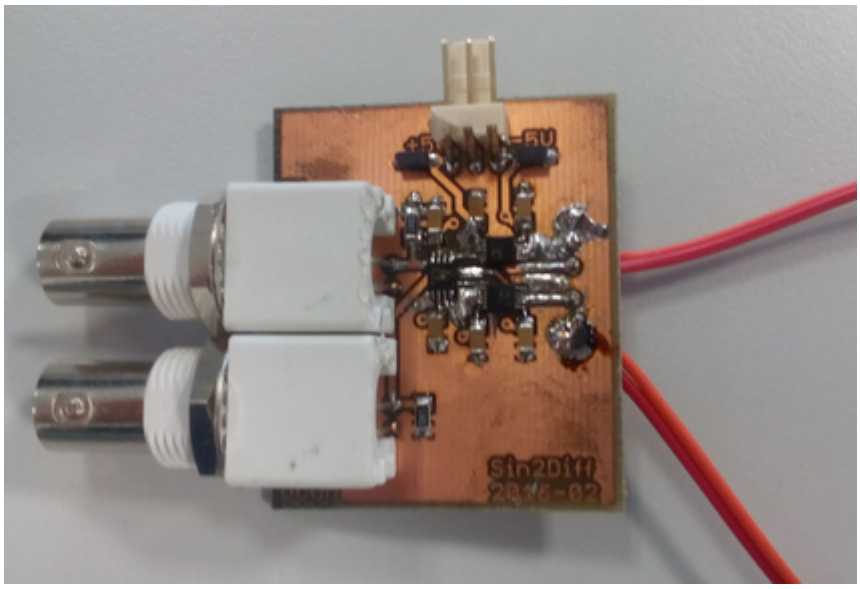
Návrh prevodníku nediferenčného signálu na diferenčný spolu so zozamom použitých súčiastiek.



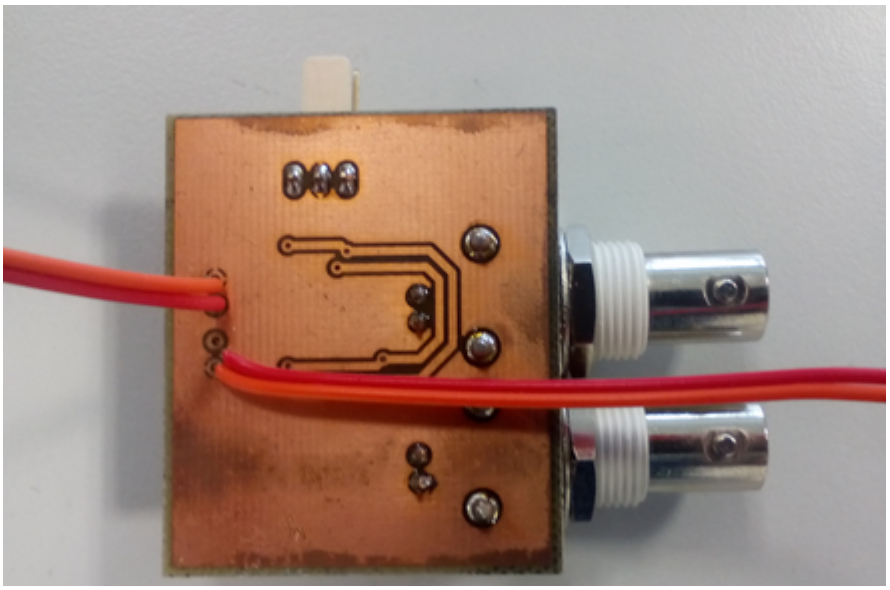
Obr. A.1: Prevodník nediferenčného signálu na diferenčný

Zoznam súčastiek:

C_1 = 10uF, A/3216-18R
C_2 = 10uF, A/3216-18R
$C_3 = 0,1$uF, M0805
$C_4 = 0,1$uF , M0805
$C_5 = 0,1$uF , M0805
$C_6 = 0,1$uF, M0805
$C_7 = 0,1$uF, M0805
$C_8 = 0,1$uF, M0805
AD8476 , MSOP8
AD8271 , MSOP10/2X



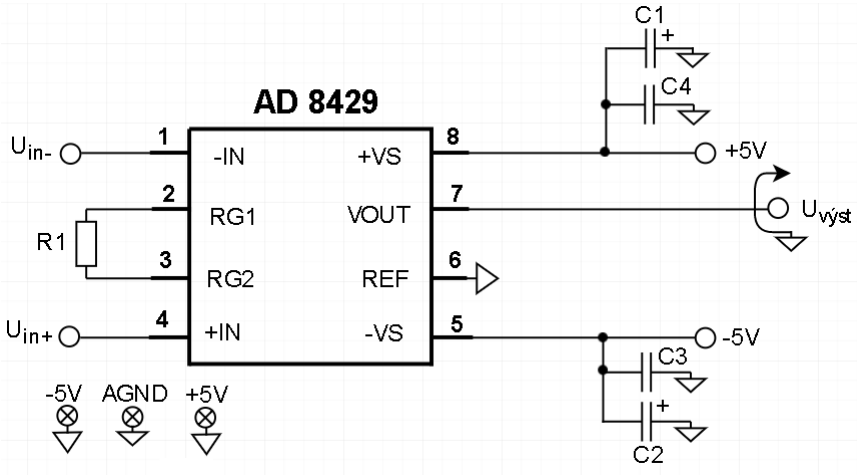
Obr. A.2: Prevodník nediferenčného signálu na diferenčný-pohľad zhora



Obr. A.3: Prevodník nediferenčného signálu na diferenčný-pohľad zdola

B PREVODNÍK DIFERENČNÉHO SIGNÁLU NA NEDIFERENČNÝ

Návrh prevodníku diferenčného signálu na nediferenčný spolu so zozamom použitých súčiastiek.



Obr. B.1: Prevodník nediferenčného signálu na diferenčný

Zoznam súčastiek:

$R_1 = 0\Omega$, M0805

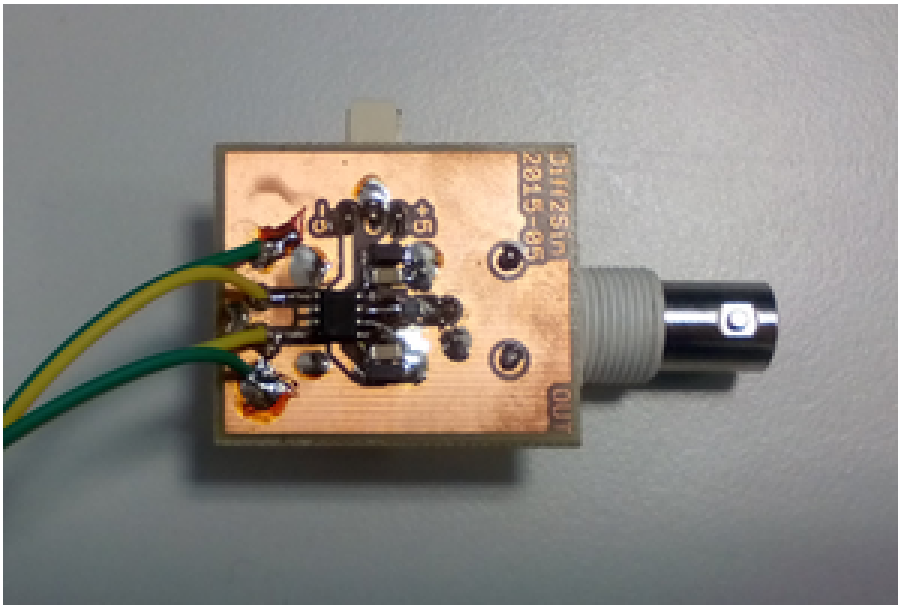
$C_1 = 10$uF, A/3216-18R

$C_2 = 10$uF, A/3216-18R

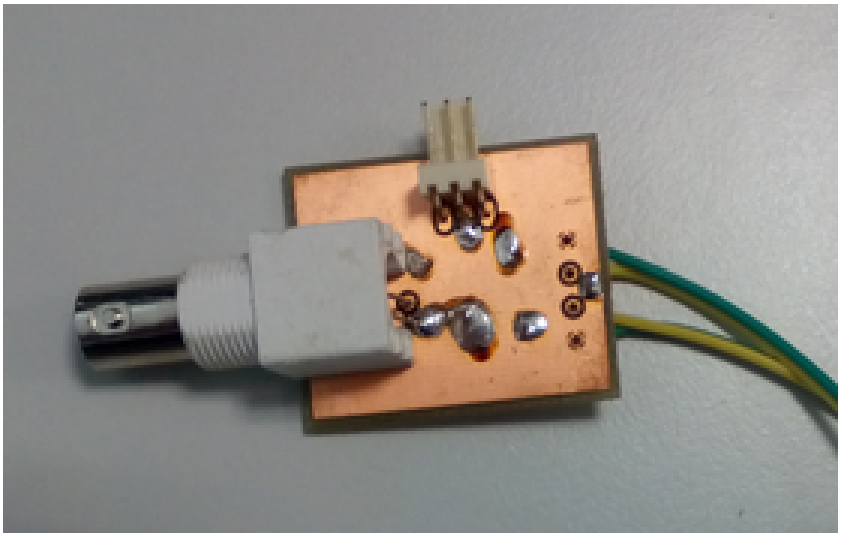
$C_3 = 0,1$uF , M0805

$C_4 = 0,1$uF , M0805

$AD8429$, SOIC8



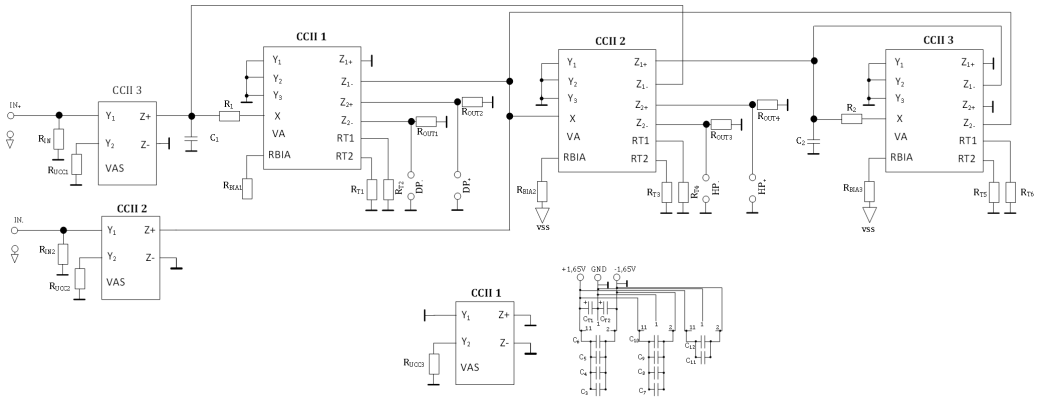
Obr. B.2: Prevodník diferenčného signálu na nediferenční-pohľad zhora



Obr. B.3: Prevodník diferenčného signálu na nediferenční-pohľad zdola

C ZAPOJENIE PSEUDODIFERENČNÉHO FILTRA

Návrh dosky plošných spojov pseudodiferenčného filtru a zoznam použitých súčastiok.



Obr. C.1: Schéma pseudodiferenčného filtru

Zoznam súčastiek:

$R_1 = 22k\Omega$, M0805

$R_2 = 12k\Omega$, M0805

$R_{IN} = 50\Omega$, M0805

$R_{IN2} = 50\Omega$, M0805

$R_{UCC1} = 1k\Omega$, M0805

$R_{UCC2} = 1k\Omega$, M0805

$R_{UCC3} = 1k\Omega$, M0805

$R_{BIA1} = 4,7k\Omega$, M0805

$R_{BIA2} = 4,7k\Omega$, M0805

$R_{BIA3} = 4,7k\Omega$, M0805

$R_{T1} = 8,2k\Omega$, M0805

$R_{T2} = 8,2k\Omega$, M0805

$R_{T3} = 8,2k\Omega$, M0805

$R_{T4} = 8,2k\Omega$, M0805

$R_{T5} = 8,2k\Omega$, M0805

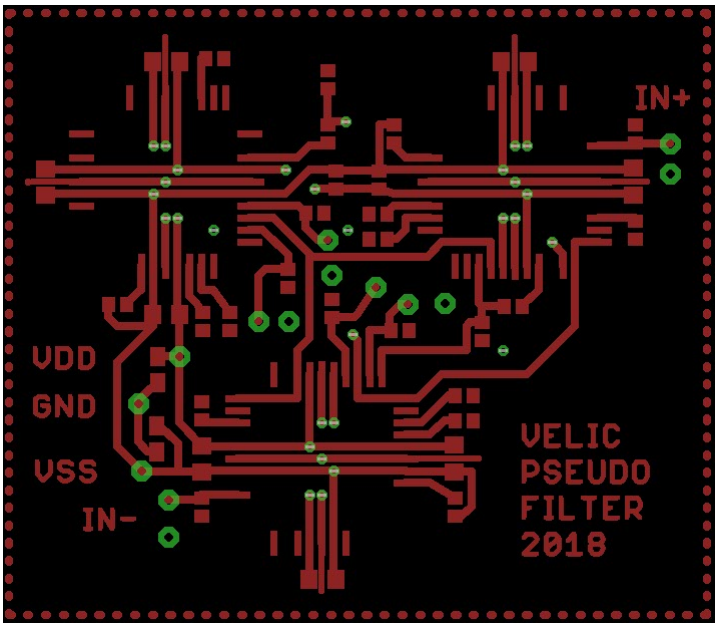
$R_{T6} = 8,2k\Omega$, M0805

$R_{OUT1} = 1k\Omega$, M0805

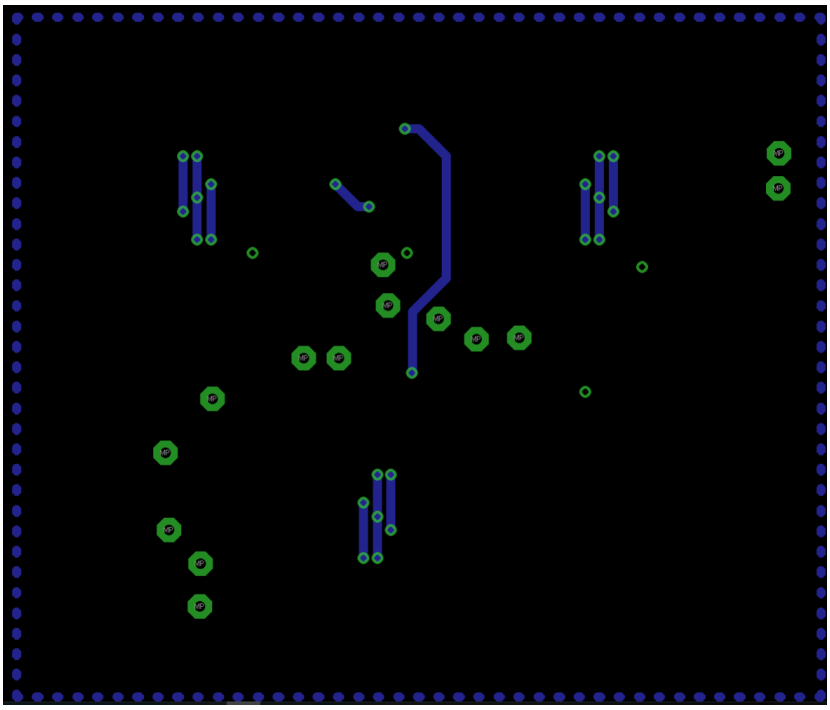
$R_{OUT2} = 1k\Omega$, M0805

$R_{OUT3} = 1k\Omega$, M0805

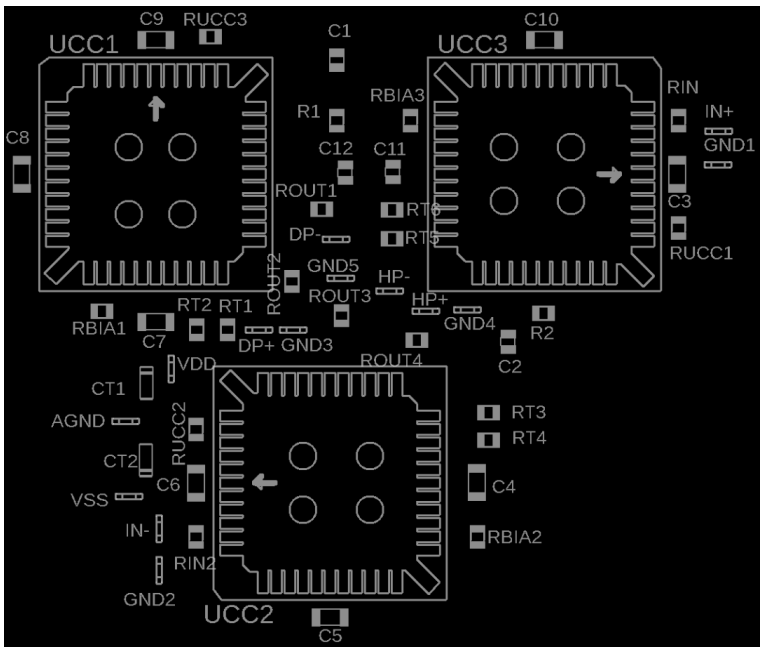
$R_{OUT4} = 1k\Omega$, M0805
$C_1 = 1$nF, M0805
$C_2 = 1$nF, M0805
$C_3 = 100$pF || 47nF, M1206
$C_4 = 100$pF || 47nF, M1206
$C_5 = 100$pF || 47nF, M1206
$C_6 = 100$pF || 47nF, M1206
$C_7 = 100$pF || 47nF, M1206
$C_8 = 100$pF || 47nF, M1206
$C_9 = 100$pF || 47nF, M1206
$C_{10} = 100$pF || 47nF, M1206
$C_{11} = 68$pF || 47nF, M0805
$C_{12} = 68$pF || 47nF, M0805
$C_{T1} = 4,7$nF, A/3216-18R
$C_{T2} = 4,7$nF, A/3216-18R
$UCC - N1B520$, PLCCSM44/ 3ks



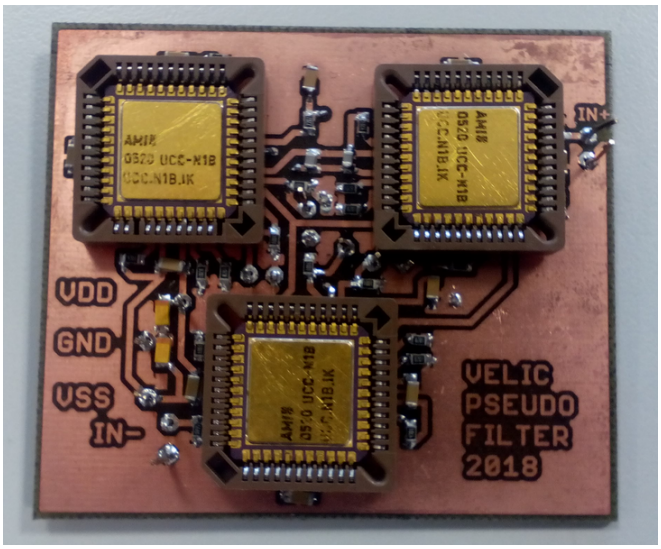
Obr. C.2: Návrh dosky plošných spojov (pohľad zhora)



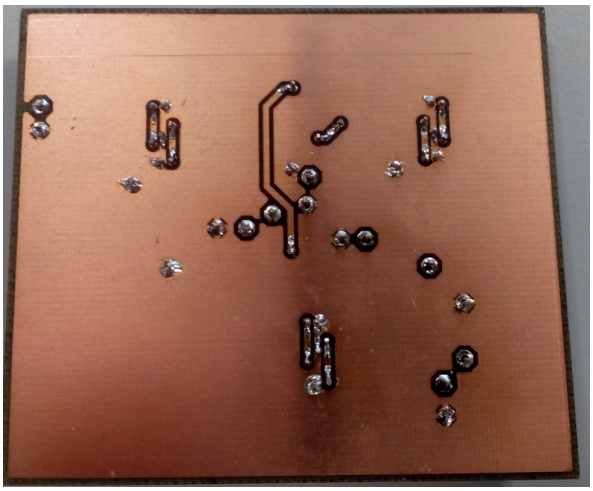
Obr. C.3: Návrh dosky plošných spojov (pohľad zdola)



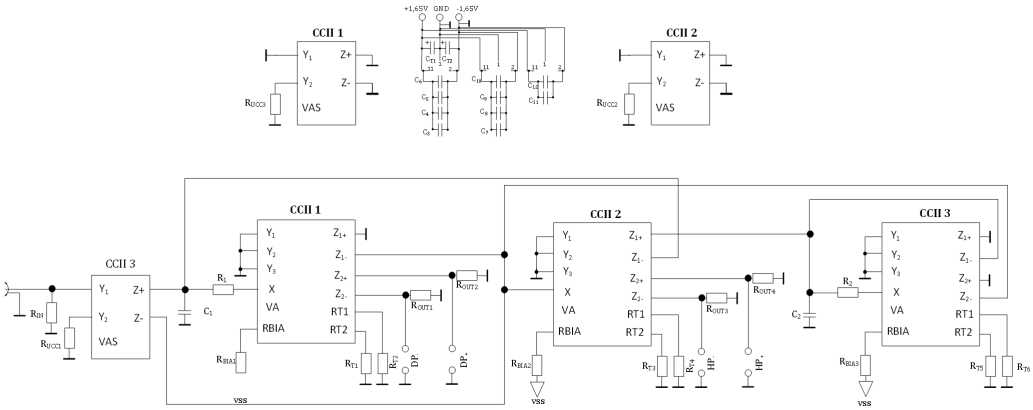
Obr. C.4: Návrh umiestnenia prkov na plošnej doske



Obr. C.5: Realizovaný pseudo-diferenčný filter-pohľad zhora



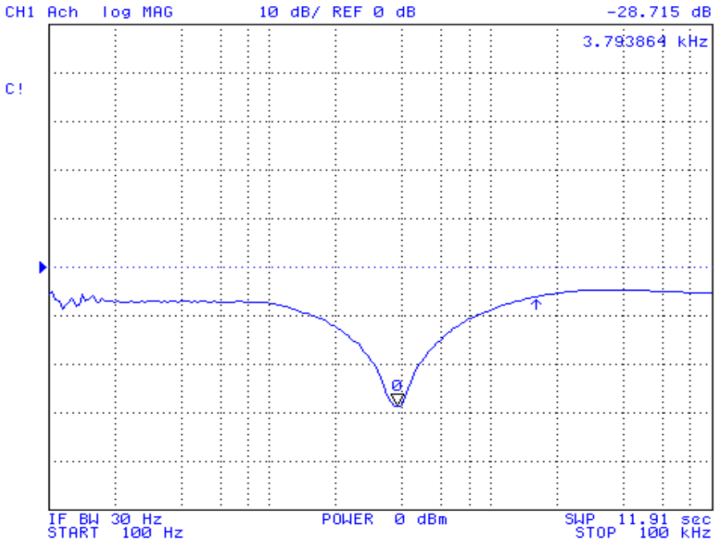
Obr. C.6: Realizovaný pseudo-diferenčný filter-pohľad zdola



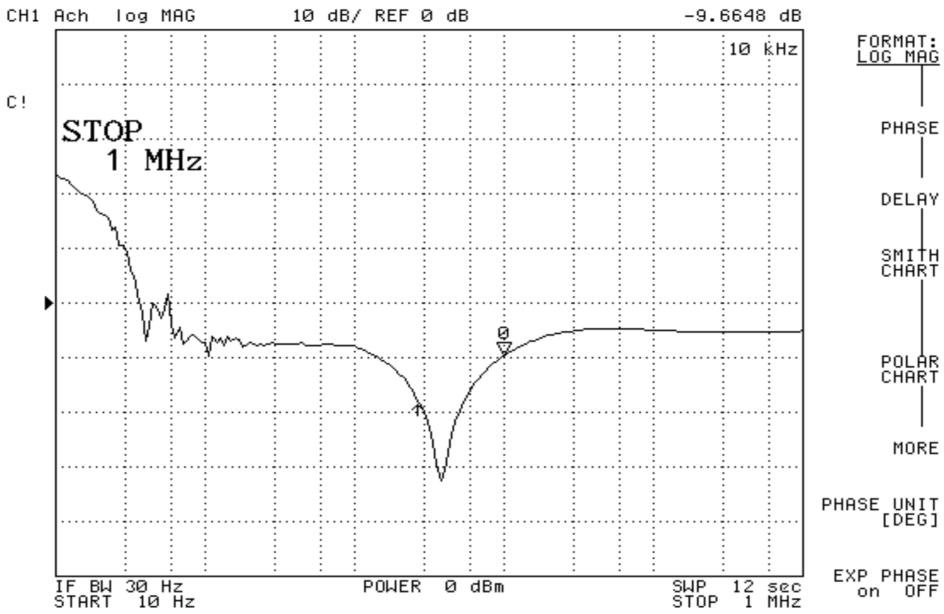
Obr. C.7: Schéma pseudodiferenčného filtru-2.varianta

D ORIGINÁLNE VÝSLEDKY MERANIA

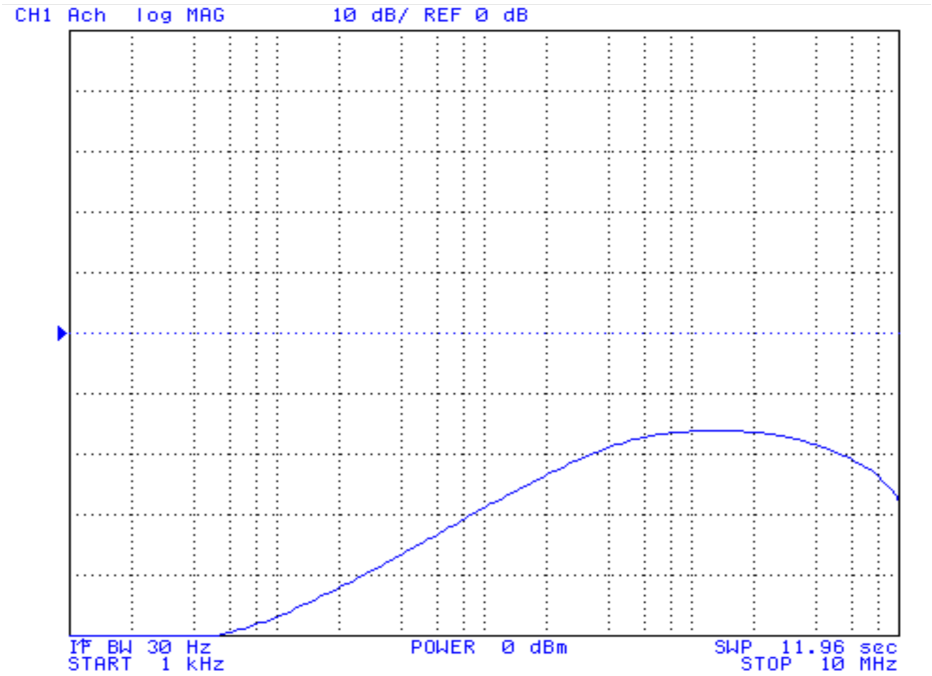
Originálny výsledok merania pomocou analyzátoru 4395A.



Obr. D.1: Meranie pseudo-diferenčného filtra pásmovej zádrže



Obr. D.2: Meranie PSRR pseudo-diferenčného filtra pásmovej zádrže



Obr. D.3: Neštandardné správanie sondy

E OBSAH PRILOŽENÉHO CD

Na priloženom CD sa nachádza bakalárska práca vo formáte PDF. Ďalej sú na CD priložené obrázky prevodníkov, dosky, schém zapojení. Ako posledné sú priložené súbory v programe Eagle.

```
/ ..................................... kořenový adresář přiloženého CD
├── Bakalárska práca.pdf ..... hlavný súbor bakalárskej práce
├── obrazky
│   ├── prevodniknedif.png
│   ├── prevodniknedif-pohľad zhora.png
│   ├── prevodniknedif-pohľad zdola.png
│   ├── prevodnikdif.png
│   ├── prevodnikdif-pohľad zhora.png
│   ├── prevodnikdif-pohľad zdola.png
│   ├── schéma zapojenia pseudodiferenčného filtra.png
│   ├── schéma zapojenia pseudodiferenčného filtra(2.varianta).png
│   ├── návrhdoskyhornychciest.png
│   ├── návrhdoskydolnychciest.png
│   ├── suciastky.png
│   ├── filterzhora.png
│   ├── filterzdola.png
│   ├── originalnevysledky.png
│   └── agilentsonda.png ..... neštandardné chovanie sondy
└── Eagle súbory ..... navrhnutie dosky v programe Eagle
    ├── bakalarka.brd
    ├── dolnecesty.brd
    ├── hornecesty.brd
    └── bakalarkabenzak.brd ..... 2.varianta zapojenia
```