

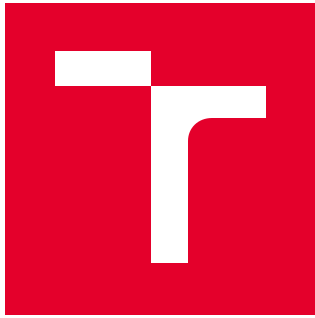
VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2021

Jan Dubina



**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**

PSEUDO-DIFFERENTIAL FREQUENCY FILTERS

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Jan Dubina

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

Ing. Ondřej Sládok

BRNO 2021

# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Audio inženýrství**  
specializace Zvuková produkce a nahrávání  
Ústav telekomunikací

**Student:** Jan Dubina

**ID:** 186604

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2020/21

**NÁZEV TÉMATU:**

## Pseudo-diferenční kmitočtové filtry

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte teorii pseudo-diferenčních kmitočtových filtrů. Navrhněte alespoň jeden nový pseudo-diferenční filtr. Dále obvod prozkoumejte z pohledu neideálních napěťových a proudových zesílení jednotlivých bran aktivních prvků, dále pak z pohledu parazitních impedancí aktivních prvků. Dosažené výsledky prezentujte pomocí programů Matlab, OrCAD, Snap. Navržený optimalizovaný filtr sestrojte v programu Eagle a podrobte experimentálnímu měření. Porovnejte získané výsledky ze simulací a z měření.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] O. Sladok, J. Koton, N. Herencsar. Universal Pseudo-Differential Filter Using DDCC and DVCCs. Elektronika Ir Elektrotechnika, 2017, vol. 23, no. 6, p. 46-52. ISSN: 1392-1215. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.5755/j01.eie.23.6.19694>

[2] J. Koton, N. Herencsar, O. Sladok, J. Horng. Pseudo-differential second order band reject filter using current conveyors. AEU - International Journal of Electronics and Communications, vol. 70, no. 6, pp. 814-821, 2016. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.aeue.2016.03.009>

**Termín zadání:** 1.2.2021

**Termín odevzdání:** 31.5.2021

**Vedoucí práce:** Ing. Ondřej Sládok

**doc. Ing. Jiří Schimmel, 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**

Bakalářská práce pojednává o teorii kmitočtových filtrů s bližším zaměřením na pseudo-diferenční strukturu, návrh a následnou simulaci pseudo-diferenčního filtru. Obsahem práce je porovnání rozdílných vlastností mezi jednotlivými typy struktur a jejich zapojení. V práci je navržena jedna pseudo-diferenční struktura, která využívá dva typy konvejořů a vytváří všechny typy selektivních filtrů, jejich přenosovou funkci a následně simulaci jejich modulové a fázové charakteristiky. Práce dále obsahuje zhotovení přípravku, experimentální měření a porovnání výsledků s teorií a simulací.

## **Klíčová slova**

Pseudo-diferenční filtr, kmitočtový filtr, dolní propust, horní propust, pásmová propust, pásmová zádrž, fázovací článek, konvejoř

## **Abstract**

The bachelor thesis deals with the theory of frequency filters with a closer focus on the pseudo-difference structure, design and simulation of the pseudo-difference filter. The content of the work is a comparison of different properties between different types of structures and their involvement. One pseudo-differential structure is proposed in this work, which uses two types of conveyors and creates all types of selective filters, their transfer function and simulation of their modular and phase characteristics. The work also includes product fabrication, experimental measurements and comparison of results with theory and simulation.

## **Keywords**

Pseudo-differential filter, frequency filter, low pass, high pass, band pass, band stop, all pass, conveyor

## **Bibliografická citace:**

DUBINA, Jan. *Pseudo-diferenční kmitočtové filtry*. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/133475>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce Ing. Ondřej Sládok.

# Prohlášení autora o původnosti díla

**Jméno a příjmení studenta:** *Jan Dubina*

**VUT ID studenta:** *186604*

**Typ práce:** *Bakalářská práce*

**Akademický rok:** *2020/21*

**Téma závěrečné práce:** *Pseudo-diferenční kmitočtové filtry*

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Pseudo-diferenční kmitočtové filtry jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské 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 bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské 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: **31. května 2021**

.....  
podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Ondřeji Sládokovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: **31. května 2021**

.....  
podpis autora

# Obsah

Úvod.....	1
1. Kmitočtové filtry .....	2
1.1 Pasivní a aktivní kmitočtové filtry .....	2
1.1.1 Dolní propust .....	2
1.1.2 Horní propust .....	3
1.1.3 Pásmová propust .....	4
1.1.4 Pásmová zadrž .....	5
1.1.5 Fázovací článek.....	7
2. Pseudo-diferenční kmitočtové filtry .....	8
2.1 Nediferenční filtry .....	9
2.2 Plně diferenční filtry .....	9
2.3 Transformace nediferenčních vstupů na vstupy diferenční .....	10
2.4 Transformace nediferenčních výstupů na výstupy diferenční .....	10
2.5 Potlačení souhlasného signálu – CMRR .....	11
2.6 Celkové harmonické zkreslení – THD .....	11
3. Konvejory.....	13
3.1 Univerzální proudový konvektor (UCC) .....	13
3.2 CCII.....	14
3.3 DVCC.....	14
4. Návrh a simulace filtru.....	16
5. Praktické měření.....	20
5.1 Zapojení přípravku do obvodu .....	20
5.1.1 Měření sestaveného pseudo-diferenčního filtru.....	22
5.1.2 Reakce filtru na změnu napájecího napětí .....	23
5.1.3 Měření potlačení souhlasné složky (CMRR).....	26
5.1.4 Měření celkového harmonického zkreslení (THD) .....	27
6. Závěr .....	29
Literatura.....	31

## Seznam symbolů, veličin a zkratek

DP	...	Dolní propust
HP	...	Horní propust
PP	...	Pásmová propust
PZ	...	Pásmová zadrž
FČ	...	Fázovací článek
$R$	...	Rezistor
$C$	...	Kondenzátor
dB	...	Decibel
$K(p)$	...	Přenosová funkce [-]
$p$	...	Laplaceův operátor
$\omega_p$	...	Úhlová frekvence [ $s^{-1}$ ]
$f_p$	...	Mezní kmitočet [Hz]
$\pi$	...	Ludolfovo číslo = 3,14159265359
$Q$	...	Činitel jakosti [-]
$K_U$	...	Přenosová funkce [-]
$U_2$	...	Výstupní napětí [V]
$U_1$	...	Vstupní napětí [V]
UCC	...	Univerzální proudový konvektor
CCII	...	Konvektor druhé generace
DVCC	...	Diferenční proudový konvektor
$u_{2+}$	...	Kladná svorka výstupního napětí [V]
$u_{2-}$	...	Záporná svorka výstupního napětí [V]
$u_{out}$	...	Diferenční výstupní napětí [V]
$u_{1+}$	...	Kladná svorka vstupního napětí [V]
$u_{1-}$	...	Záporná svorka vstupního napětí [V]
$u_{in}$	...	Diferenční vstupní napětí [V]
UCC-1L	...	Konvektor první generace, odpovídající teorii
UCC-3L	...	Konvektor třetí generace odpovídající reálným prvkům
CMRR	...	Common-mode rejection ration
THD	...	Total harmonic distortion

## Seznam obrázků

<i>Obr. 1: Schéma filtru DP</i> .....	3
<i>Obr. 2: Modulová charakteristika filtru typu DP</i> .....	3
<i>Obr. 3: Schéma filtru typu HP</i> .....	4
<i>Obr. 4: Modulová charakteristika filtru typu HP</i> .....	4
<i>Obr. 5: Schéma filtru PP</i> .....	5
<i>Obr. 6: Modulová charakteristika filtru typu PP</i> .....	5
<i>Obr. 7: Schéma filtru PZ</i> .....	6
<i>Obr. 8: Modulová charakteristika kmitočtového filtru typu PZ</i> .....	6
<i>Obr. 9 - Schéma zapojení pseudo-diferenčního filtru</i> .....	8
<i>Obr. 10: Obecný dvojbran s označením vstupního a výstupního napětí</i> .....	9
<i>Obr. 11: Zobrazení diferenčního napěťového přenosu</i> .....	9
<i>Obr. 14 - Nediferenční vstup s využitím proudového konvejeoru druhé generace CCII</i> .....	10
<i>Obr. 15 - Diferenční vstup s využitím konvejeoru DVCC</i> .....	10
<i>Obr. 16 - Diferenční výstup s využitím konvejeoru CCII</i> .....	11
<i>Obr. 17 - Ukázka diferenčního výstupu s využitím proudového konvejeoru DVCC</i> ... 11	
<i>Obr. 18: Schématická značka UCC</i> .....	13
<i>Obr. 19: Vnitřní struktura prvku UCC-3L využitého pro simulaci v programu OrCad</i> .....	13
<i>Obr. 20 - Schématická značka CCII</i> .....	14
<i>Obr. 21: Vnitřní struktura prvku CCII</i> .....	14
<i>Obr. 22 - Schématická značka DVCC</i> .....	15
<i>Obr. 23: Vnitřní struktura prvku DVCC</i> .....	15
<i>Obr. 24 - Schéma návrhu pseudo-diferenčního filtru 2 řádu</i> .....	16
<i>Obr. 25 - Simulace s ideálními prvky i prvky blížící se reálným vlastnostem</i> .....	18
<i>Obr. 26 - Fázová charakteristika všech filtrů se zapojením UCC-1L i UCC-3L</i> .....	19
<i>Obr. 27 - Blokové schéma zapojení</i> .....	21
<i>Obr. 28 - Laboratorní zapojení</i> .....	21
<i>Obr. 29 - Modulová charakteristika pseudo-diferenčního filtru, teorie (tečkovaně), simulace (čárkovaně), měření (plná čára)</i> .....	22

<i>Obr. 30 - Fázová charakteristika pseudo-diferenčního filtru, teorie (tečkovaně), simulace (čárkovaně), měření (plná čára) .....</i>	23
<i>Obr. 31 - Modulová charakteristika pseudo-diferenčního filtru při poklesu napětí o 9 %, teorie (tečkovaně), simulace (čárkovaně), měření (plná čára) .....</i>	24
<i>Obr. 32 - Modulová charakteristika pseudo-diferenčního filtru při optimálním i sníženém napětí .....</i>	25
<i>Obr. 33 - Fázová charakteristika pseudo-diferenčního filtru při poklesu napětí o 9 %, teorie (tečkovaně), simulace (čárkovaně), měření (plná čára) .....</i>	25
<i>Obr. 34 - Graf potlačení souhlasného signálu (CMRR) u všech typů filtru při napájení <math>\pm 1,65V</math> .....</i>	26
<i>Obr. 35 - Graf potlačení souhlasného signálu (CMRR) u všech typů filtru při napájení sníženém o 9 % .....</i>	27
<i>Obr. 36 - Graf průběhu THD pro všechny typy filtrů .....</i>	28

# ÚVOD

Kmitočtové filtry patří mezi velmi často využívané obvody nejen v oblasti elektrotechniky, ale i v oblasti audiotechniky. Tato práce se zabývá problematikou pseudo-diferenčních filtrů, kde v prvních dvou kapitolách rozebírá základní dělení kmitočtových filtrů dle využitých součástek a jejich vlastností. Dále pak z hlediska vstupního signálu na nediferenční, plně diferenční a pseudo-diferenční. Jejich výhody a nevýhody.

Další kapitola pojednává o aktivních prvcích, které byly v této práci využity k návrhu a následné simulaci. Je zde rozebrán univerzální proudový konvektor, který byl využit při návrhu schématu v programu SNAP a pro vygenerování matematických funkcí. Dále jsou popsány konvektory druhé generace CCII a konvektor DVCC, které budou hlavními aktivními prvky ve schématu a budou využity v realizaci a měření přípravku, což bude předmětem bakalářské práce.

Čtvrtá kapitola obsahuje samotný návrh filtru s využitím transformace nediferenčního filtru na pseudo-diferenční kmitočtový filtr. Schéma, které využívá zapojení pasivních prvků (rezistory a kapacitory) a aktivních prvků, konvektorů CCII a DVCC a následné matematické funkce každého typu filtru, které nám tato struktura umožňuje dosáhnout. Nejprve bylo zapojení analyzováno s použitím ideálních prvků v programu OrCad, poté také proběhla analýza s prvky blízkými se reálným vlastnostem a následné porovnání obou analýz se zhodnocením získaných výsledků.

Pátá kapitola je zaměřena na konstrukci a měření navrženého filtru. Je zde provedeno měření všech pěti možných výstupních filtrů. Jejich moduly, fáze a potlačení souhlasného signálu. To vše pro optimální napětí  $\pm 1,65$  V a následně i pro snížené napětí o 9 % na cca  $\pm 1,5$  V. Dále je zde také změřeno potlačení souhlasného signálu (CMRR) a harmonické zkreslení signálu (THD)

# 1. KMITOČTOVÉ FILTRY

Kmitočtový nebo také frekvenční filtr je elektrický obvod, který mění vlastnosti elektrického signálu s ohledem na frekvenci. Filtry se používají v řadě elektronických a telekomunikačních aplikacích k zdůraznění anebo naopak potlačení signálu v konkrétním kmitočtovém rozsahu. Frekvence oddělující útlumové pásmo a propouštěcí pásmo se nazývá mezní frekvence. Existují dvě kategorie kmitočtových filtrů založené na použití různých komponentů. Tyto kategorie se dělí na pasivní kmitočtové filtry a aktivní kmitočtové filtry. Dále se filtry dají dělit podle řádů, a to na takzvané základní, což je první řád, druhý řád atd. ale také na neceločíselný, což představuje například filtr 1,5 řádu. [1][2]

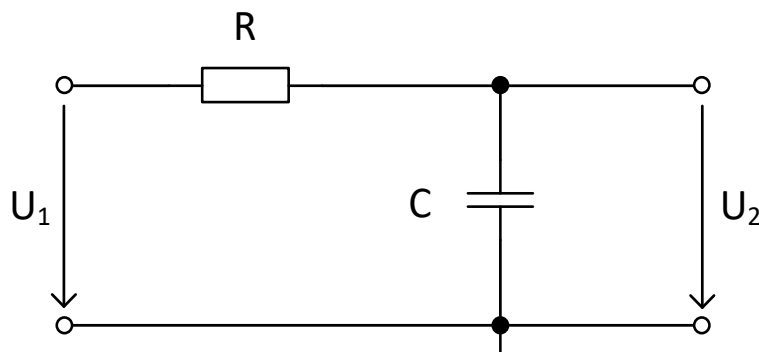
## 1.1 Pasivní a aktivní kmitočtové filtry

Pasivní kmitočtový filtr patří mezi nejzákladnější typy filtrů a skládá se pouze z pasivních prvků jakými jsou rezistory, kondenzátory nebo indukty. Určitou kombinací z těchto prvků tak můžeme dostat všechny typy filtrů (Dolní propust – DP, Horní propust – HP, Pásmová propust – PP, Pásmová zádrž – PZ a Fázovací článek – FČ). Jedním z případů je např.: filtr typu dolní propust, který je realizován pomocí tzv. RC článku. Úpravou hodnot výše zmíněných pasivních prvků lze nastavit např.: mezní kmitočet, činitel jakosti, zesílení atd. Výhodou těchto jednoduchých pasivních filtrů je jednoduchost, dobrá dostupnost a nízká cena. To vše se ovšem odráží na vlastnostech, které nebudou tolik výhodné. Oproti tomu aktivní kmitočtové filtry se skládají z aktivních prvků, které jsou doplněny pasivními prvky. Tímto aktivním prvkem může být např.: operační zesilovač, konvektor atd. Nevýhodou je však napájení aktivních prvků a větší složitost kmitočtového filtru. [1][2][3]

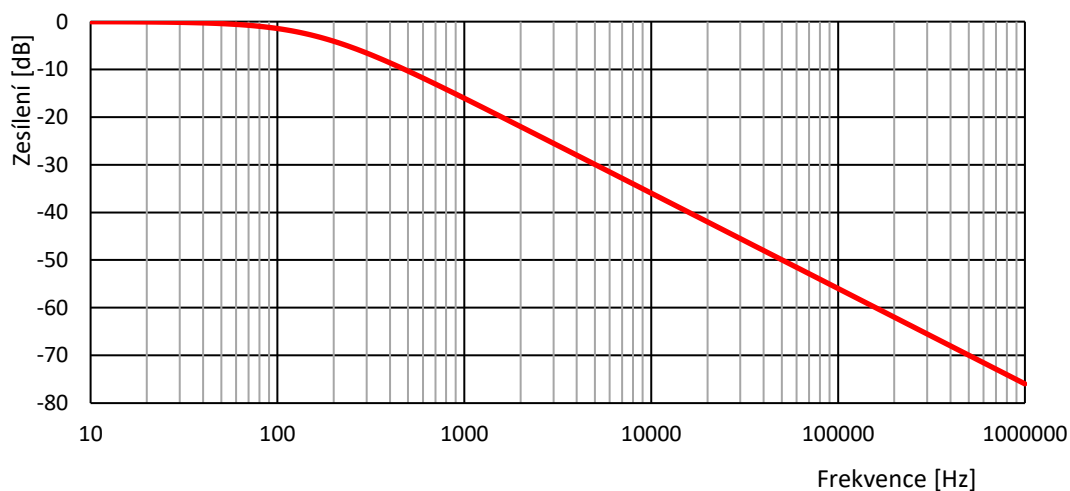
### 1.1.1 Dolní propust

Filtr typu dolní propust, jak je patrné z názvu propouští dolní frekvence, které jsou nižší než mezní frekvence. Mezní frekvence se určí jako pokles o 3 dB v modulové charakteristice filtru. [2] Využití tohoto typu filtru lze najít ve velké míře v audiotechnice,

kde se nám promítají např. na mixážních pultech jako korekce nebo ve výhybkách reproduktorů. [4][5] Na Obr. 1 a Obr. 2 můžeme vidět schéma a modulovou charakteristiku tohoto typu filtru.



Obr. 1: Schéma filtru DP



Obr. 2: Modulová charakteristika filtru typu DP

Přenosová funkce dolní propusti je následující:

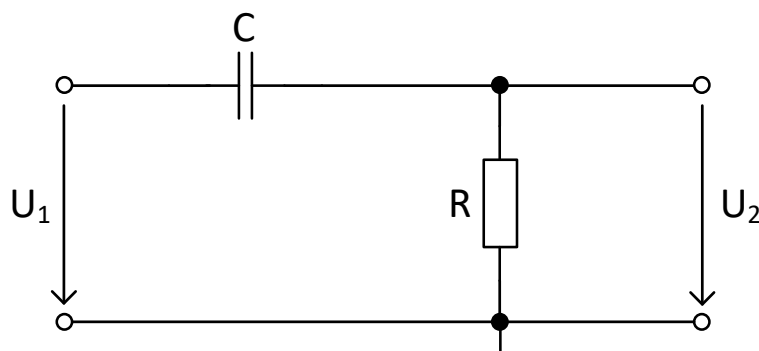
$$K(p) = \frac{\omega_p^2}{p^2 + p \frac{\omega_p}{Q} + \omega_p^2}, \quad (1.1)$$

kde  $\omega_p = 2\pi f_p$  a  $f_p$  je mezní kmitočet.  $K(p)$  je přenosová funkce.  $Q$  je činitel jakosti.

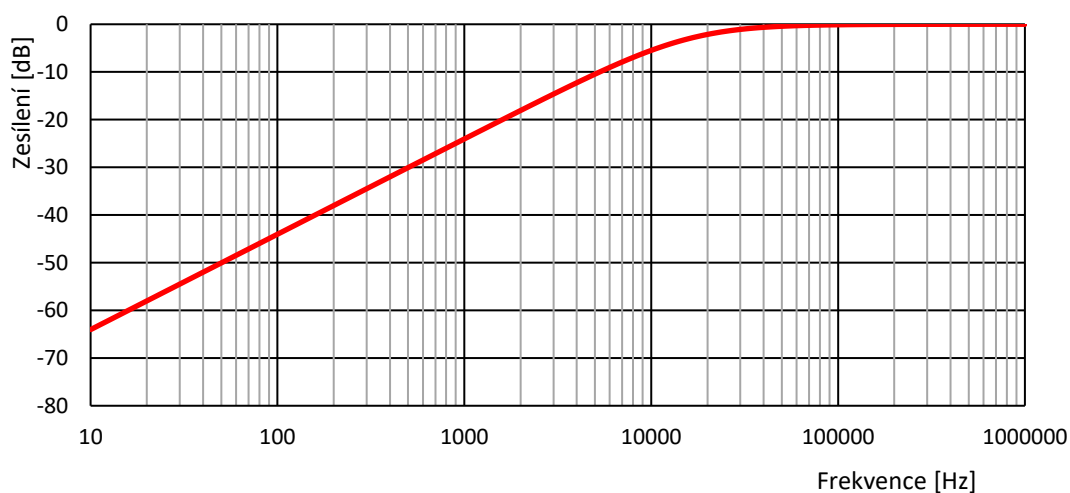
### 1.1.2 Horní propust

Filtr typu horní propust je opačný k předešlému typu. Mezní frekvence se určí jako pokles o 3 dB v modulové charakteristice filtru, ale nyní nám filtr propouští frekvence vyšší, než je mezní kmitočet a zbylé potlačuje. Využití je prakticky stejné jako u přechozího typu. Nalezneme ho opět v mixážních pultech jako korekci nebo v reproduktorech jako

kmitočtovou výhybkou. [6] Obr. 3 a Obr. 4 popisuje schéma a modul kmitočtové charakteristiky filtru typu HP.



Obr. 3: Schéma filtru typu HP



Obr. 4: Modulová charakteristika filtru typu HP

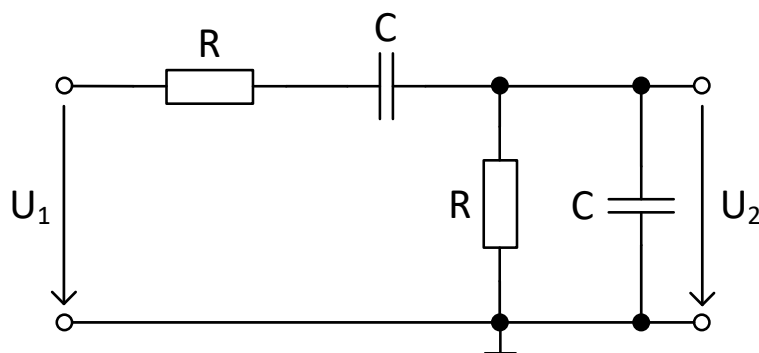
Přenosová funkce pro filtr typu horní propust:

$$K(p) = \frac{p^2}{p^2 + p \frac{\omega_p}{Q} + \omega_p^2}, \quad (1.2)$$

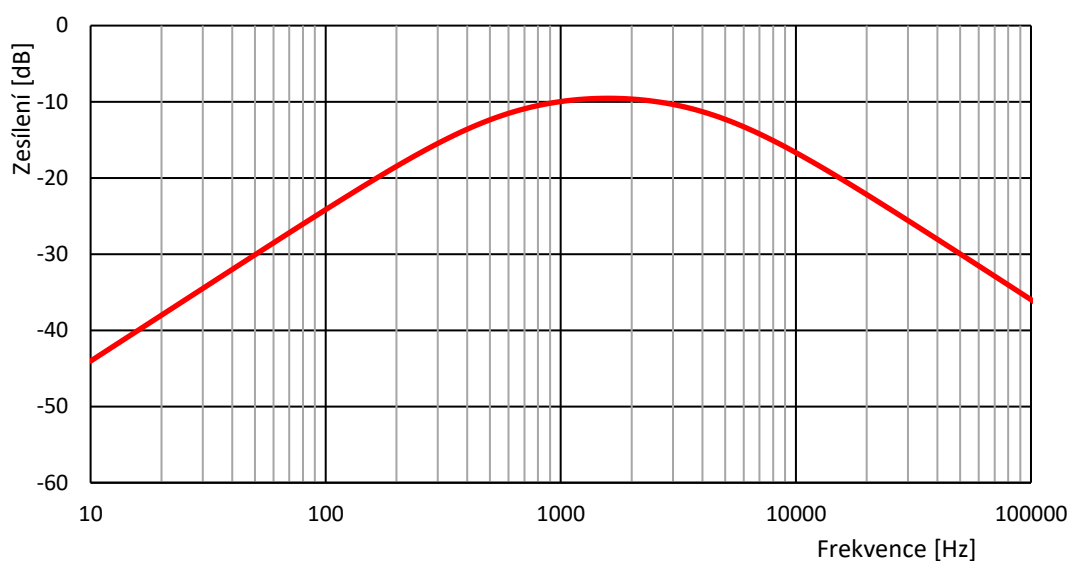
kde  $\omega_p = 2\pi f_p$  a  $f_p$  je mezní kmitočet.  $K(p)$  je přenosová funkce.  $Q$  je činitel jakosti.

### 1.1.3 Pásmová propust

Pásmová propust je typ filtru, který propouští určité kmitočtové pásmo. Toto pásmo je ohraničeno dvěma (horním a dolním) mezními kmitočty. V audiotechnice je můžeme vidět například v ekvalizérech, v elektronice se potom pásmové propusti využívá v generátorech sinusového napětí. [1][7] Schéma a modulovou charakteristiku filtru je možno vidět na Obr. 5 a Obr. 6.



Obr. 5: Schéma filtru PP



Obr. 6: Modulová charakteristika filtru typu PP

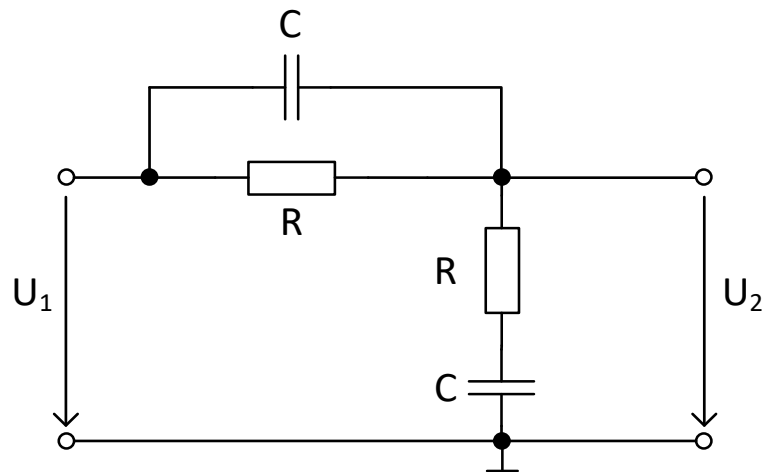
Přenosová funkce pro filtr typu pásmová propust je:

$$K(p) = \frac{p^2 + \omega_p^2}{p^2 + p \frac{\omega_p}{Q} + \omega_p^2}, \quad (1.3)$$

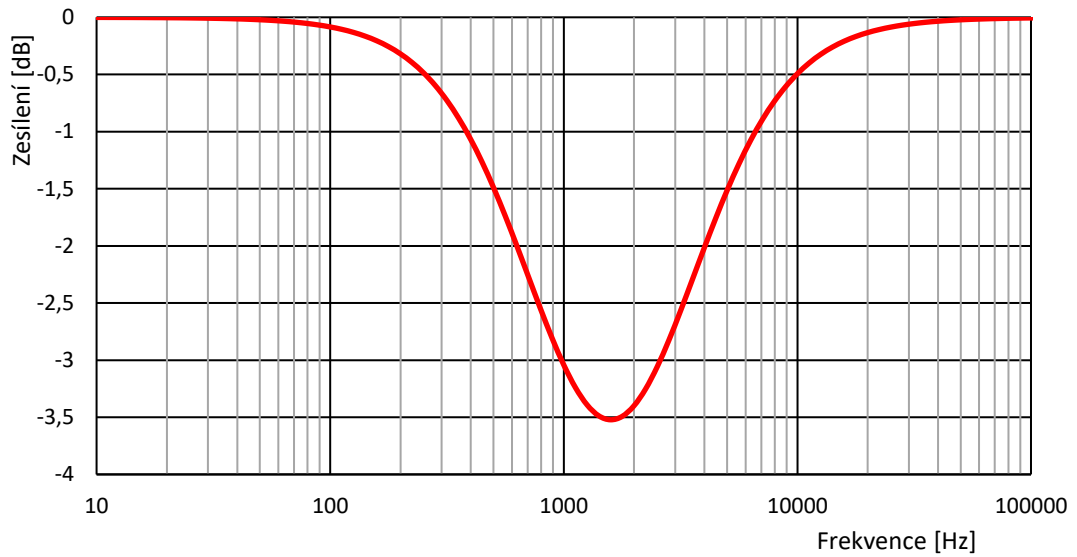
kde  $\omega_p = 2\pi f_p$  a  $f_p$  je mezní kmitočet.  $K(p)$  je přenosová funkce.  $Q$  je činitel jakosti.

### 1.1.4 Pásmová zadrž

Pásmová zadrž je inverzní filtr k předchozímu typu, tedy pásmové propusti. Stejně jako pásmová propust má i pásmová zadrž dva mezní kmitočty, ale v tomto případě pásmo mezi těmito dvěma mezními frekvencemi je potlačováno. V audiotechnice se nachází v ekvalizérech pro odfiltrování určité frekvence. [2][8] Obr. 7 a Obr. 8 popisuje schéma a modulovou frekvenční charakteristiku tohoto typu filtru.



Obr. 7: Schéma filtru PZ



Obr. 8: Modulová charakteristika kmitočtového filtru typu PZ

Přenosová funkce pro filtr typu pásmová zadrž můžeme vypočítat:

$$K(p) = \frac{p \frac{\omega_p}{Q}}{p^2 + p \frac{\omega_p}{Q} + \omega_p^2}, \quad (1.4)$$

kde  $\omega_p = 2\pi f_p$  a  $f_p$  je mezní kmitočet.  $K(p)$  je přenosová funkce.  $Q$  je činitel jakosti.

### 1.1.5 Fázovací článek

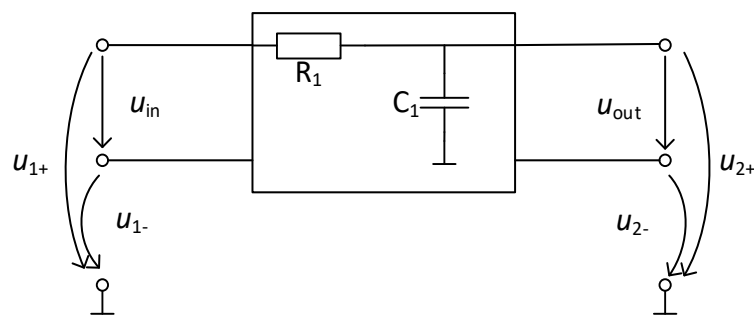
Fázovací článek je typ filtru, který pracuje s fází. Vyznačuje se tím, že v celém kmitočtovém spektru má stejné zesílení a mění nám pouze fázi mezi vstupním a výstupním signálem. Využití má například v reproduktorech, pokud potřebujeme kompenzovat zpoždění signálu. Například rozmístění jednotlivých reproduktorů v ozvučnici atd. [9]

Přenosová funkce je charakteristická změnou znaménka v čitateli a vypadá následovně:

$$K(p) = \frac{p^2 - p \frac{\omega_p}{Q} + \omega_p^2}{p^2 + p \frac{\omega_p}{Q} + \omega_p^2} \quad (1.5)$$

## 2. PSEUDO-DIFERENČNÍ KMITOČTOVÉ FILTRY

Pseudo-diferenční kmitočtové filtry jsou struktury, které spojují kladné vlastnosti nediferenčních a diferenčních filtrů. Tyto struktury mají dva diferenční vstupy a dva diferenční výstupy, přičemž vnitřní struktura na rozdíl od plně diferenciálních obvodů zůstává single-ended. Z pravidla obsahují téměř dvakrát méně prvků než plně diferenční obvody, a proto jsou méně složité. Přesto zajišťují vysoký odstup signálu od šumu, a dokážou snížit zkreslení signálu. V praxi je často můžeme vidat v kombinaci právě s plně diferenčními filtry. [11][12][13][14]



Obr. 9 - Schéma zapojení pseudo-diferenčního filtru

Pseudo-diferenční napěťový přenos je definován obdobně jako u nediferenčního přenosu, a to podílem výstupního pseudo-diferenčního napětí ku vstupnímu pseudo-diferenčnímu napětí.

Rovnice pro napěťový přenos:

$$u_{in} = u_{1+} - u_{1-}, \quad u_{out} = u_{2+} - u_{2-} \quad (2.1)$$

$$K_U = \frac{u_{out}}{u_{in}} \quad (2.2)$$

Budeme-li toto aplikovat na přenos proudový, dostaneme obdobnou definici. Proudový přenos u pseudo-diferenčních filtrů stanovíme jako podíl výstupního pseudo-diferenčního proudu a vstupního pseudo-diferenčního proudu, vynásobený hodnotou (-1).

Rovnice pro proudový přenos:

$$K_I = -\frac{i_{out}}{i_{in}} \quad (2.3)$$

## 2.1 Nediferenční filtry

Nediferenční neboli „Single Ended“ filtry pracují s nesymetrickým signálem vůči zemi. Z toho plyne, že napěťový přenos takového filtru je vyjádřen jako poměr výstupního napětí, ku napětí vstupnímu. Nezbytnou výhodou nediferenčních zapojení je jednoduchost a cena. Nepotřebujeme tolik prvků, máme jeden vstup a jeden výstup. Nevýhodou je šum, který nám může značně ovlivnit kvalitu přenášeného signálu a rapidně snížit dynamický rozsah vstupního signálu. Příklad, jak vypadá obecný dvojbran je na Obr. 10. [11]



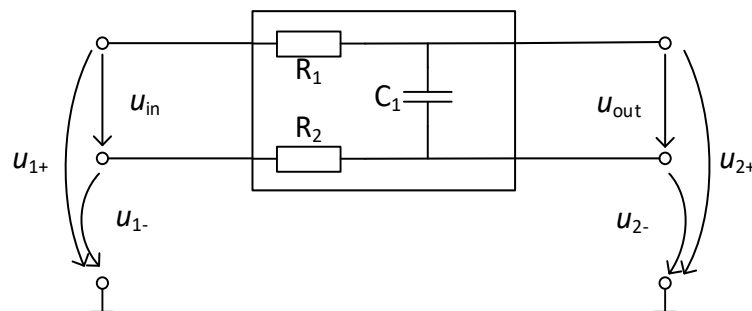
Obr. 10: Obecný dvojbran s označením vstupního a výstupního napětí

Pro přenos platí následující vztah:

$$K_U = \frac{U_2}{U_1} \quad (2.4)$$

## 2.2 Plně diferenční filtry

Oproti nediferenčním filtrům zpracovávají diferenční filtry symetrický signál. Takový filtr má dva vstupy pro kladnou a zápornou složku signálu a stejně tak i dva výstupy. Napěťový přenos se potom rovná rozdílu jednotlivých napětí na výstupních svorkách ku rozdílu napětí na svorkách vstupních. Výhodou je snížení zkreslení signálu a vyšší odstup signálu od šumu. Nevýhodou však větší počet použitých prvků. [2][12]



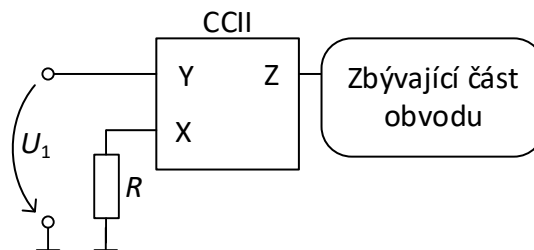
Obr. 11: Zobrazení diferenčního napěťového přenosu

Rovnice pro napěťový přenos:

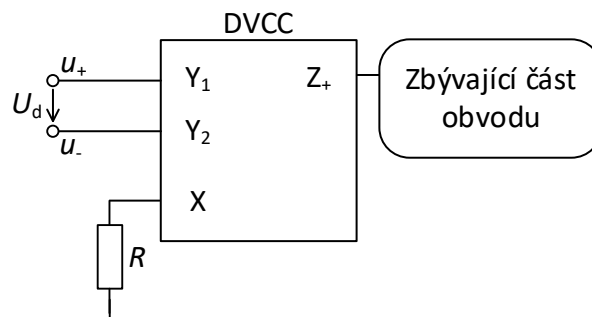
$$K_U = \frac{u_{2+} - u_{2-}}{u_{1+} - u_{1-}} \quad (2.5)$$

## 2.3 Transformace nediferenčních vstupů na vstupy diferenční

Nediferenční struktura je taková struktura, kde je přiváděn vstupní signál přímo na napěťovou svorku aktivního prvku. Pro demonstraci nám poslouží proudový konvektor druhé generace CCII. Abychom docílili diferenčního vstupního signálu, je zapotřební, aby měl aktivní prvek rozdílové svorky. Pro názornost tohoto zapojení nám bude sloužit proudový konvektor DVCC. V tomto případě bude na jeho dvě vstupní brány přiváděn diferenční signál, kdy jeho chováním je dochází k potlačení souhlasného signálu a dále je obvodem zpracován pouze rozdíl (diference) užitečného signálu. Způsob této transformace je na Obr. 12 a Obr. 13. V rámci této transformace se tudíž mění pouze jeden aktivní prvek. Zbývající část obvodu zůstává nepozměněna.



Obr. 12 - Nediferenční vstup s využitím proudového konvektoru druhé generace CCII

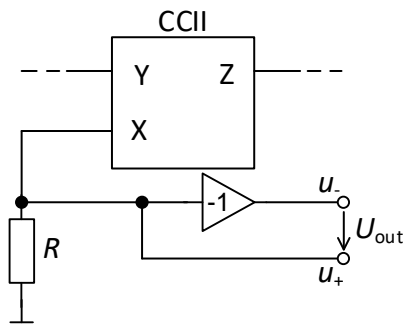


Obr. 13 - Diferenční vstup s využitím konvektoru DVCC

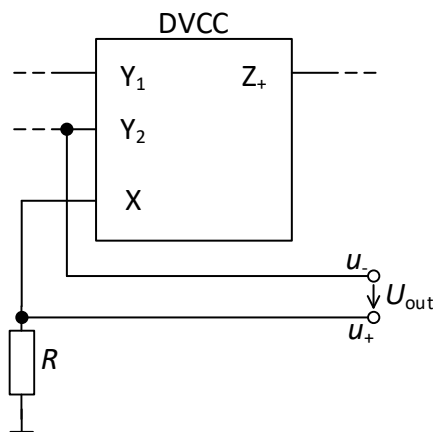
## 2.4 Transformace nediferenčních výstupů na výstupy diferenční

Nejrychlejším způsobem transformace nediferenčního výstupu na výstup diferenční je přidání napěťového invertoru do výstupové svorky. Pro ukázkou byl opět zvolen proudový konvektor druhé generace CCII, kde je zobrazeno diferenční výstupní napětí Obr. 14.

Pokud je třeba opět měřit napětí na bráně X, existuje i efektivnější řešení. Tím je záměna aktivního prvku CCII za proudový konvektor DVCC, který již napěťový invertor obsahuje. Celé zapojení se následně značně zjednoduší, viz Obr. 15.



Obr. 14 - Diferenční výstup s využitím konveje CCII



Obr. 15 - Ukázka diferenčního výstupu s využitím proudového konveje DVCC

## 2.5 Potlačení souhlasného signálu – CMRR

Potlačení souhlasného signálu neboli CMRR (Common-mode rejection ratio) je hodnota, která určuje efektivitu potlačení nežádoucího souhlasného signálu na vstupu, vzhledem k požadovanému diferenčnímu signálu. V ideálním případě by tato hodnota měla dosahovat nekonečna. V praxi však není reálné dosáhnout takových výsledků. Rovnice pro výpočet CMRR je definována vztahem:

$$CMRR = 20 \log \frac{A_{dm}}{A_{cm}} [dB] \quad (2.6)$$

Kde  $A_{dm}$  je diferenční zesílení a  $A_{cm}$  je zesílení souhlasného signálu. Z čehož vyplývá, čím vyšší nás vyjde hodnota CMRR, tím nižší je šumová složka.

## 2.6 Celkové harmonické zkreslení – THD

Celkové harmonické zkreslení neboli THD (Total harmonic distortion) je definováno jako poměr vyšších harmonických složek ku základní (nosné) harmonické složce. THD je definováno vztahem:

$$THD = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}{U_1} [\%]$$

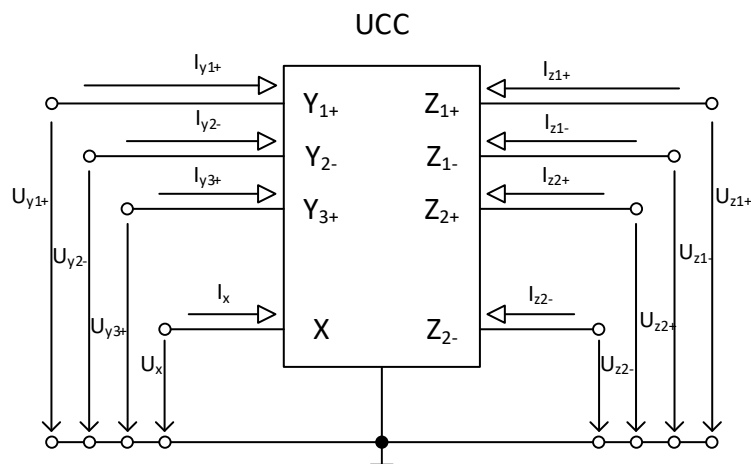
(2.7)

Jednotka THD se uvádí v procentech a obecně tuto hodnotu chceme mít, pokud možno co nejnižší.

### 3. KONVEJORY

#### 3.1 Univerzální proudový konvektor (UCC)

Univerzální proudový konvektor (Universal Current Conveyor) je osmibranný aktivní prvek. UCC má čtyři vstupní svorky ( $Y_{1+}$ ,  $Y_{2-}$ ,  $Y_{3+}$  a  $X$ ) a čtyři proudové výstupy ( $Z_{1+}$ ,  $Z_{1-}$ ,  $Z_{2+}$ ,  $Z_{2-}$ ). Výstupy  $Z_{2+}$ ,  $Z_{2-}$  doplňují výstupy  $Z_{1+}$ ,  $Z_{1-}$ . Všechny existující typy proudových konvektorů mohou být realizovány pomocí UCC. Tohoto cíle lze dosáhnout použitím vhodných vstupních a výstupních svorek. [15] Schématickou značku UCC zobrazuje Obr. 16.



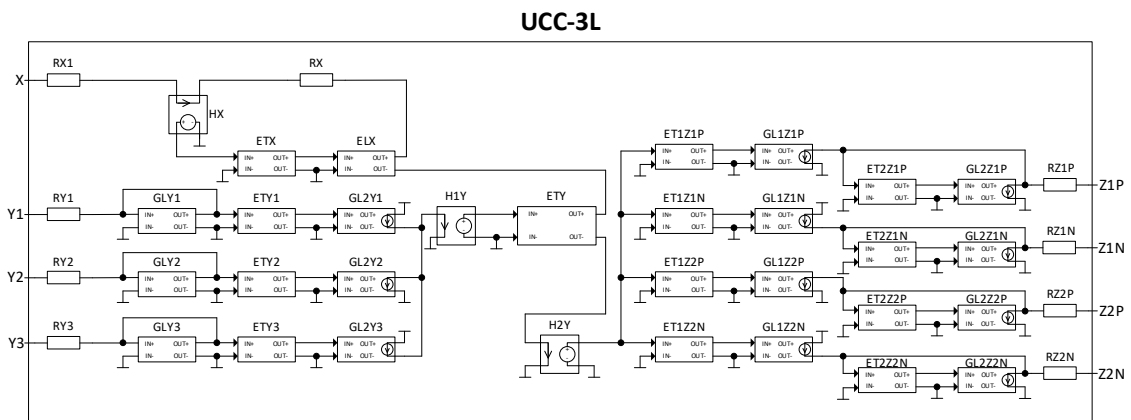
Obr. 16: Schématická značka UCC

Vztahy mezi jednotlivými svorkami konvektoru můžeme popsat rovnicemi:

$$U_X = U_{Y_{1+}} - U_{Y_{2-}} + U_{Y_{3+}} \quad (3.1)$$

$$I_{Z_{1+}} = I_{Z_{2+}} = I_X \quad (3.2)$$

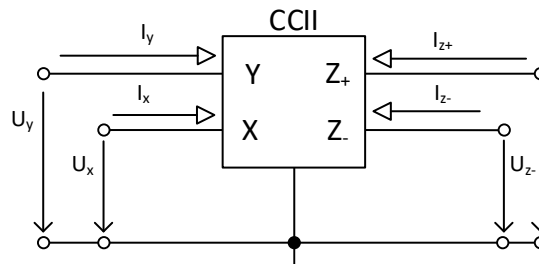
$$I_{Z_{1-}} = I_{Z_{2-}} = -I_X \quad (3.3)$$



Obr. 17: Vnitřní struktura prvku UCC-3L využitého pro simulaci v programu OrCad

### 3.2 CCII

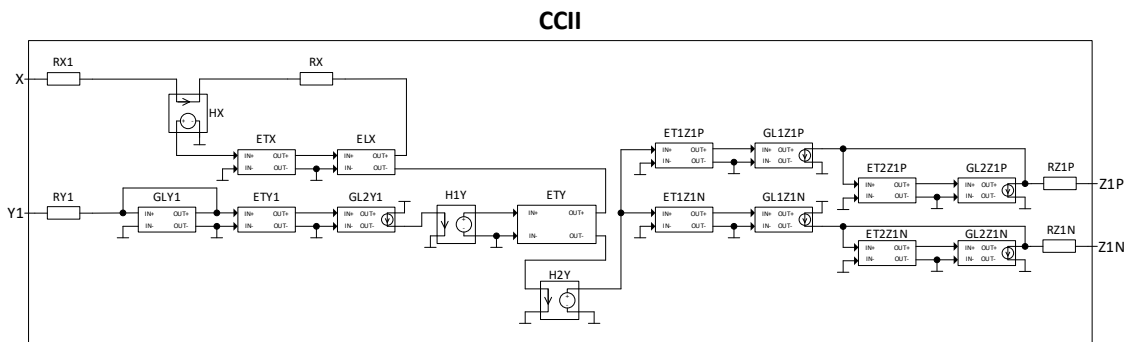
Proudový konvektor druhé generace CCII, jehož schéma můžeme vidět na Obr. 18 je čtyřbran se dvěma vstupními a dvěma výstupními svorkami. Vstupní svorka Y je vysoko impedanční, naproti tomu vstupní svorka X je nízko impedanční. Obě výstupní svorky Z<sub>+</sub> a Z<sub>-</sub> jsou vysoko impedanční. Ze schématu je také vidět, jak jsou jednotlivé výstupní svorky orientované.



Obr. 18 - Schématická značka CCII

Vztah mezi jednotlivými branami je následující:

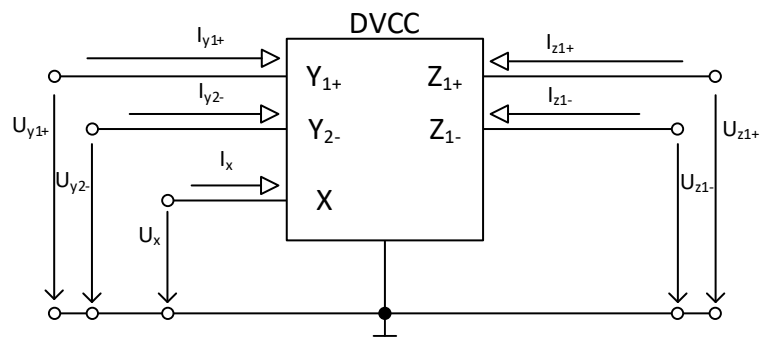
$$U_X = U_Y, I_Y = 0, I_{Z_+} = I_X, I_{Z_-} = -I_X \quad (3.4)$$



Obr. 19: Vnitřní struktura prvku CCII

### 3.3 DVCC

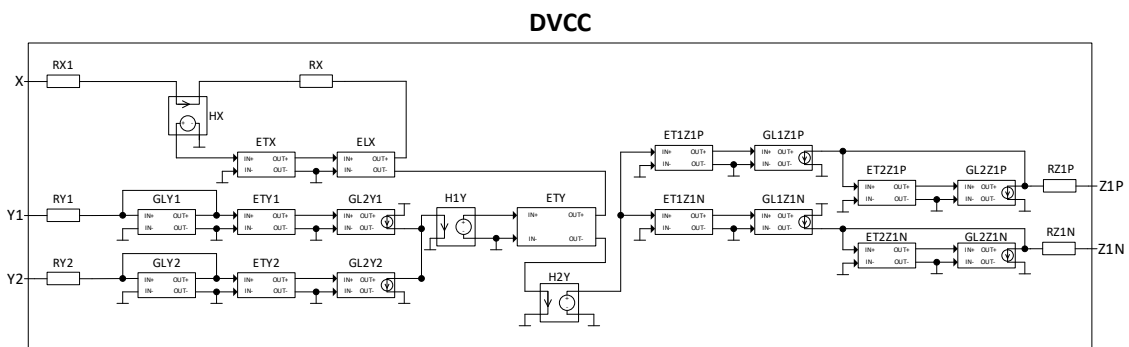
Diferenční proudový konvektor DVCC (Differential Voltage Current Conveyor) je navržen jako pětibran s vysoko impedančními svorkami Y<sub>1+</sub> a Y<sub>2-</sub> a nízko impedanční svorkou X, na které se objevuje diferenční napětí mezi branami Y<sub>1+</sub> a Y<sub>2-</sub>. Dále obsahuje dva vysoko impedanční výstupy Z<sub>1+</sub> a Z<sub>1-</sub>.



Obr. 20 - Schématická značka DVCC

Vztahy mezi jednotlivými branami jsou popsány následující rovnicí:

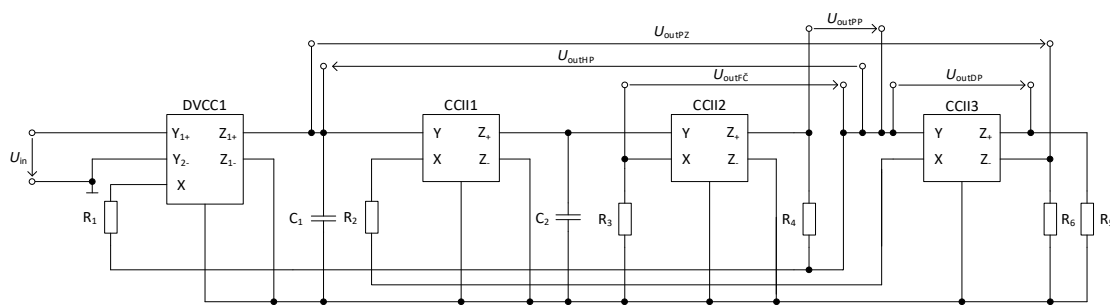
$$U_X = U_{Y1+} - U_{Y2-}, I_{Y1+} = I_{Y2-} = 0, I_{Z-} = -I_X, I_{Z+} = I_X \quad (3.5)$$



Obr. 21: Vnitřní struktura prvku DVCC

## 4. NÁVRH A SIMULACE FILTRU

Návrh byl vytvořen v simulačním programu SNAP, pracuje v napěťovém režimu a využívá čtyři konvejory. Jeden typu DVCC a tři konvejory druhé generace CCII. Dále rezistory  $R_1$  až  $R_6$  z nich jsou  $R_3$ ,  $R_5$  a  $R_6$  uzemněné a dva kapacitory  $C_1$  a  $C_2$ . Jedná se o pseudo-diferenční kmitočtový filtr 2. řádu. Struktura je schopna realizovat na různých výstupech, všechny základní typy kmitočtových filtrů. K docílení tohoto výsledku bylo dosaženo modifikací nediferenčního filtru [16]. Pro filtru typu PZ bylo zapotřebí přidat odpor  $R_6$ , jelikož záporná svorka diferenčního výstupního signálu je přivedena na zápornou svorku konvejevu CCII3, ale v případě výstupu u filtru DP je přivedena záporná svorka diferenčního signálu na kladnou svorku konvejevu CCII3. Např.: Filtr typu HP dostaneme na výstupu u kondenzátoru  $C_1$  a vstupu u konvejevu CCII3. Jednotlivé přenosové funkce filtrů jsou popsány níže.



Obr. 22 - Schéma návrhu pseudo-diferenčního filtru 2 řádu

Přenosová funkce filtru typu FČ:

$$K(p)_{FČ} = \frac{1 - p(R_3C_1) + p^2(R_2R_3C_1C_2)}{p^2(R_2R_3C_1C_2) + p(R_1C_1) + 1} \quad (4.1)$$

Přenosová funkce filtru typu HP:

$$K(p)_{HP} = \frac{p^2(R_2R_3C_1C_2)}{p^2(R_2R_3C_1C_2) + p(R_1C_1) + 1} \quad (4.2)$$

Přenosová funkce filtru typu PP:

$$K(p)_{PP} = \frac{-p(R_4C_1)}{p^2(R_2R_3C_1C_2) + p(R_1C_1) + 1} \quad (4.3)$$

Přenosová funkce filtru typu PZ:

$$K(p)_{PZ} = \frac{1 + p^2(R_3R_6C_1C_2)}{p^2(R_2R_3C_1C_2) + p(R_1C_1) + 1} \quad (4.4)$$

Přenosová funkce filtru typu DP:

$$K(p)_{DP} = \frac{1 - p^2(R_3R_5C_1C_2 - R_2R_3C_1C_2)}{p^2(R_2R_3C_1C_2) + p(R_1C_1) + 1} \quad (4.5)$$

Dle matematického výpočtu této funkce si lze povšimnout, že nám do čitatele vstupuje filtr typu HP a vytváří nám tak parazitní část, která se nám následně projevuje jako překmit v modulové charakteristice tohoto filtru. V ideálním případě, pokud by se odpory  $R_2$ ,  $R_3$  a  $R_5$  rovnaly, tak by se tato parazitní část navzájem odečetla a dostali bychom ideální přenosovou funkci filtru typu dolní propust.

$$K(p)_{DP} = \frac{1}{p^2(R_2R_3C_1C_2) + p(R_2C_1) + 1} \quad (4.6)$$

Z rovnic můžeme vyjádřit úhlový kmitočet  $\omega_0$  a činitel jakosti  $Q$ . Pro všechny typy filtru můžeme počítat  $\omega_0$  a  $Q$  shodně, jelikož matematicky je jmenovatel stejný. Po úpravě dostáváme rovnice:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{R_2R_3C_1C_2}} \quad (4.7)$$

Vyjádřením  $\omega_0$  můžeme dopočítat mezní kmitočet  $f_0$ , který se rovná:

$$f_0 = \frac{\sqrt{\frac{1}{R_2R_3C_1C_2}}}{2\pi} \quad (4.8)$$

Činitel jakosti  $Q$ :

$$Q = \sqrt{\frac{R_2R_3C_2}{C_1}} \cdot R_1 \quad (4.9)$$

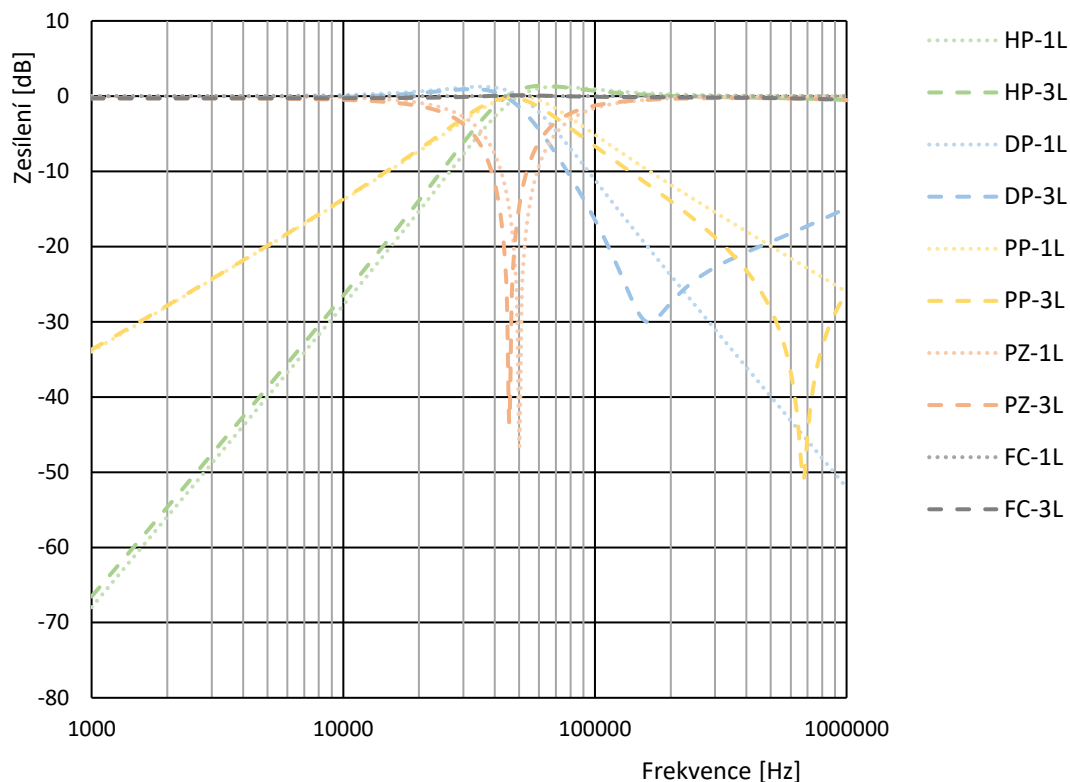
Dále si můžeme vyjádřit hodnotu odporu  $R_1$  a  $R_2$ :

$$R_1 = \frac{1}{Q \cdot 2\pi f_0 \cdot C_1} \quad (4.10)$$

$$R_2 = \frac{1}{C_1C_2R_3(2\pi f_0)^2} \quad (4.11)$$

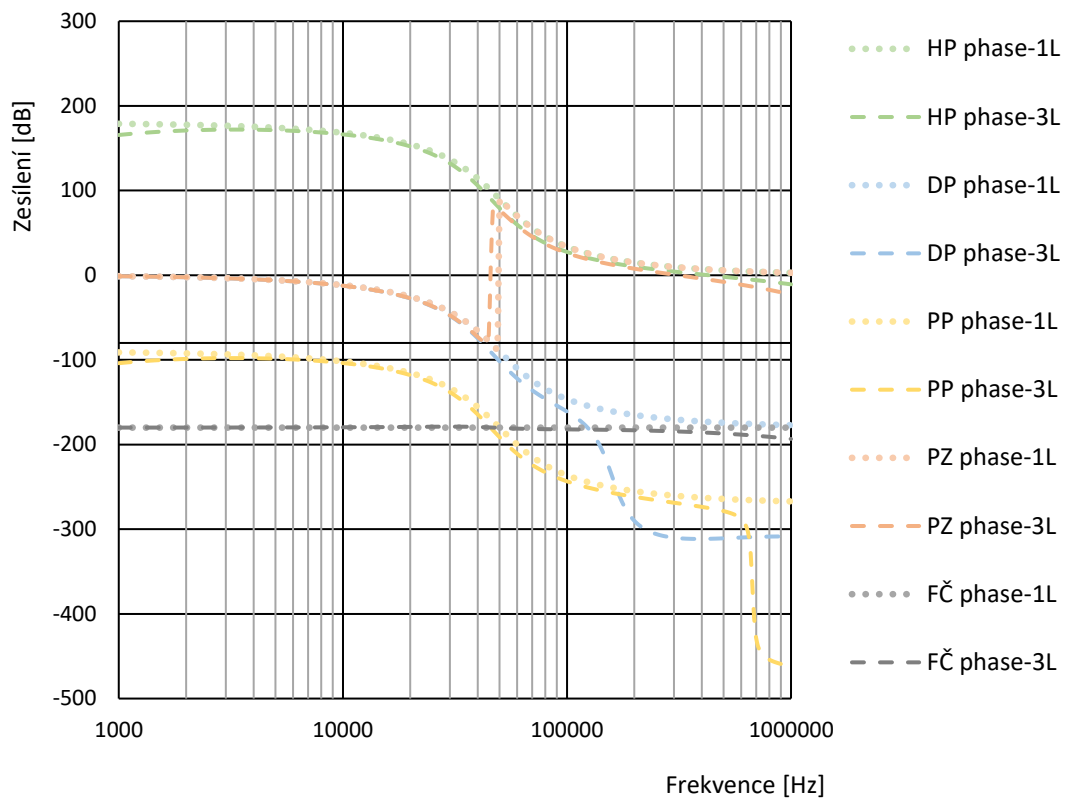
Simulace proběhla v programu OrCAD, kde byl zvolen mezní kmitočet  $f_0 = 50$  kHz, činitel jakosti  $Q = 1$  a hodnoty kondenzátorů  $C_1 = C_2 = 1$  nF. Po dosazení vychází rezistor  $R_1 = 3183 \Omega$ . Rezistory  $R_2$  a  $R_3$  jsou vzájemně závislé, jak je patrné z rovnice (4.11), tudíž byl zvolen  $R_3$  blízký hodnotě rezistoru  $R_1$ , v tomto případě  $R_3 = 3183 \Omega$  a dopočítaný rezistor  $R_2 = 3183 \Omega$ . Bylo zjištěno, že pro optimální výsledky je nutné zbylé rezistory  $R_4$ ,  $R_5$  a  $R_6$  volit stejné jako  $R_3$ . Pro simulaci byli zprvu použity konvejoy první generace UCC-1L, které odpovídají ideálním předpokladům. Následně se ve schématu na místo konvejoy UCC-1L použili konvejoy třetí generace UCC-3L

[17], které odpovídají reálným prvkům. Všechny analýzy pro všechny typy filtrů můžeme vidět na Obr. 23



Obr. 23 - Simulace s ideálními prvky i prvky blíží se reálným vlastnostem

Na všech simulacích modulové charakteristiky je patrný překmit u filtru typu DP a PP, který je způsoben parazitním jevem, kdy nám zde vstupuje do přenosu filtr typu HP viz. rovnice (4.5). Potvrzuje se nám tedy předpoklad z matematického modelu funkce tohoto filtru, jak bylo zmíněno v této kapitole. Filtry typu HP, PZ a FČ vyšly dle teorie. Tečkovaně můžeme pozorovat ideální průběhy, čárkované křivky potom vyznačují průběhy prvků s reálnými vlastnostmi.



Obr. 24 - Fázová charakteristika všech filtrů se zapojením UCC-1L i UCC-3L

U fázové charakteristiky můžeme taktéž pozorovat u křivky pro DP (modrá křivka) neideální charakteristiku, která je zapříčiněna parazitní HP, která vstupuje do tohoto typu filtru stejně jako u modulové charakteristiky. Lehkou odchylku můžeme pozorovat i u filtru typu PP (žlutá křivka) a filtru typu PZ (červená křivka), což může být zapříčiněno parazitními vlastnostmi konvektorů UCC-1L a UCC-3L. Další charakteristiky (HP – zelená křivka a FČ – černá křivka) vyšly téměř totožné v porovnání ideální a reálné simulace.

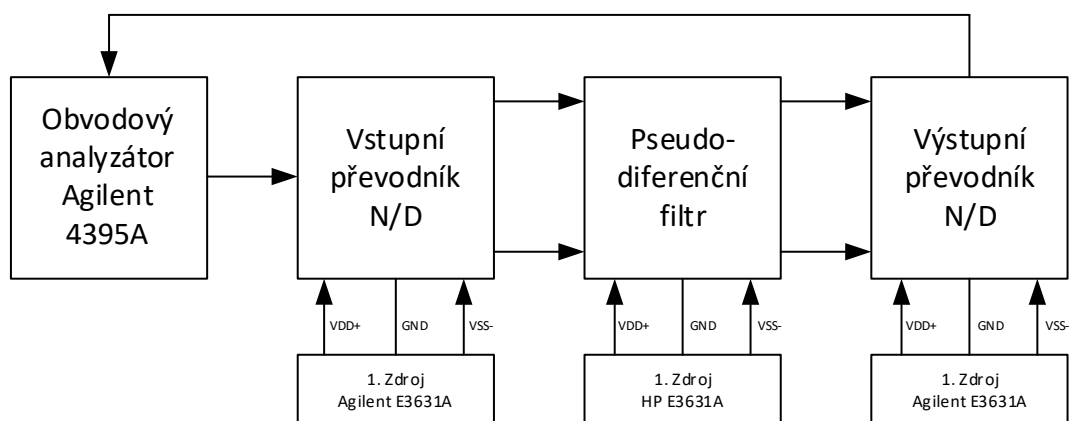
## 5. PRAKTICKÉ MĚŘENÍ

Pro praktickou část měření byl použit pseudo-diferenční filtr popsáný v kapitole 4. Jedná se o univerzální filtr, který obsahuje všech pět základních typů filtrů a využívá dva aktivní prvky, jimiž jsou konvejory typu UCC. Cílem měření bylo ověřit vlastnosti navrženého filtru a jeho chování s použitím reálných součástek za běžných laboratorních podmínek. Následné zpracování dat a porovnání s teoretickými a simulovanými výsledky z programu OrCad. Předmětem měření byly parametry modulů a fáze u všech pěti filtrů, dále modul a fáze při sníženém napětí o 0,15 V, což odpovídá 9 %, CMRR a celkové harmonické zkreslení (THD).

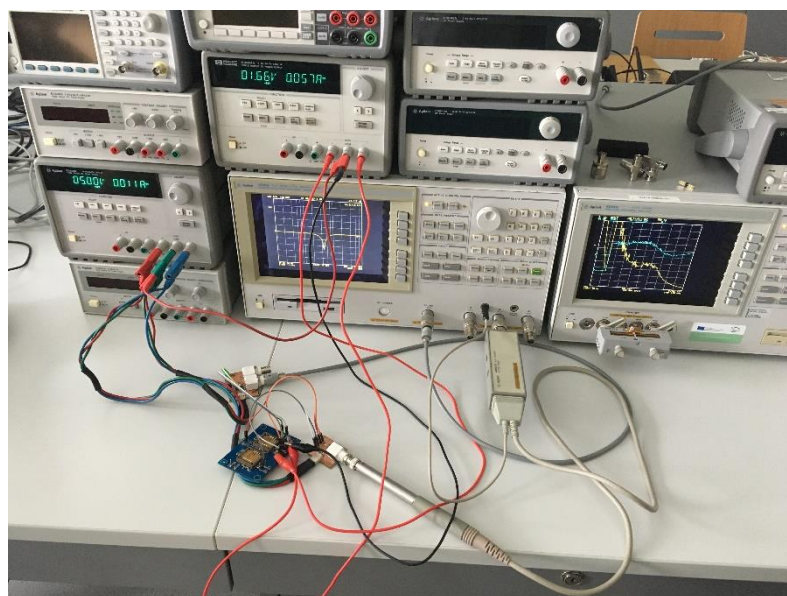
Pro praktické měření byly využity dva univerzální proudové konvejory UCC-N1B. [17] UCC-N1B obsahuje dvě vnitřní struktury. Univerzální proudový konvektor (UCC) a proudový konvektor druhé generace CCII. UCC je osmibran, jehož schématickou značku můžeme vidět na *Obr. 16: Schématická značka UCC* Obr. 16. První čip byl využit jako proudový konvektor DVCC a druhý vnitřní blok byl využit jako konvektor druhé generace CCII. Obě vnitřní struktury druhého konvektoru UCC-N1B byly využity jako konvejory druhé generace CCII.

### 5.1 Zapojení přípravku do obvodu

Nutností je nejprve uzpůsobit vstup a výstup tak, aby bylo možné přípravek připojit pomocí diferenčních vstupů a výstupů. Bylo potřeba převést vstupní napětí na diferenční pomocí převodníku zkonstruovaného integrovaným obvodem AD8476 [18] a obdobně pro výstupní napětí sloužil převodník, zkonstruovaný integrovaným obvodem AD8429. [19] Sumační zesilovač, který byl také přiveden do obvodu slouží k ověření správnosti diferenčního zapojení. Je realizován integrovaným obvodem AD8271 [20] a slouží k přivedení souhlasného napětí  $U_{COM}$ . Blokové schéma zapojení a jeho fotografie je zobrazeno na Obr. 25 a Obr. 26. Deska plošných spojů byla vytvořena v programu Eagle 9.6.2. Seznam použitých prvků společně se schématem z programu Eagle i návrhem desky je přiloženo v příloze této práce.



Obr. 25 - Blokové schéma zapojení



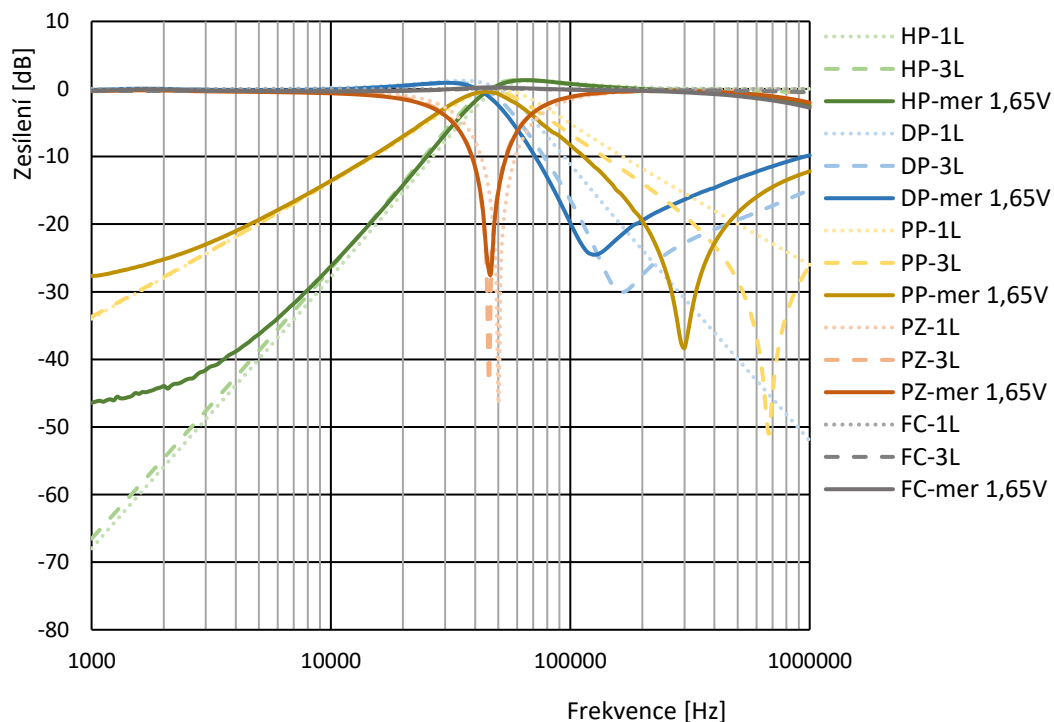
Obr. 26 - Laboratorní zapojení

Měření na analyzátoru Agilent 4395A probíhalo v rozmezí 1 kHz až 1 MHz s šířkou pásma 30 Hz. Vstupní signál měl hodnotu 0 dBm. Převodníky byly napájeny zdrojem Agilent E3631A, který byl nastaven na hodnoty  $\pm 5$  V. Druhý zdroj Agilent E3631A sloužil k napájení desky a zde bylo výstupní napětí nastaveno na  $\pm 1,65$  V. Dále také probíhalo měření, kdy se napájení snížilo o 9 % na  $\pm 1,5$  V, abychom zjistili, jak se chová filtr při sníženém napětí. Pro lepší orientaci v grafech byly jednotlivé křivky popsány legendou a vloženy ke grafu. Tečkované průběhy znázorňují ideální průběhy, čárkované průběhy zobrazují simulované výsledky s použitím konvektorů UCC-3L a plné čáry vyobrazují změřené průběhy sestrojeného pseudo-diferenčního filtru. Následující podkapitoly budou pojednávat o průběhu jednotlivých měření.

## 5.1.1 Měření sestaveného pseudo-diferenčního filtru

Schématické zapojení navrženého pseudo-diferenčního kmitočtového filtru je zobrazeno na Obr. 22 v kapitole 4. Je zrealizován ze dvou univerzálních proudových konvektorů UCC-N1B [17], který byl navržen na Vysokém učení technickém v Brně, společně se společností ON Semiconductor, Ltd. Tyto konvektory byly transformovány, aby sloužily jako aktivní prvky filtru. Přenosové funkce filtru popisují rovnice (4.1) - (4.5).

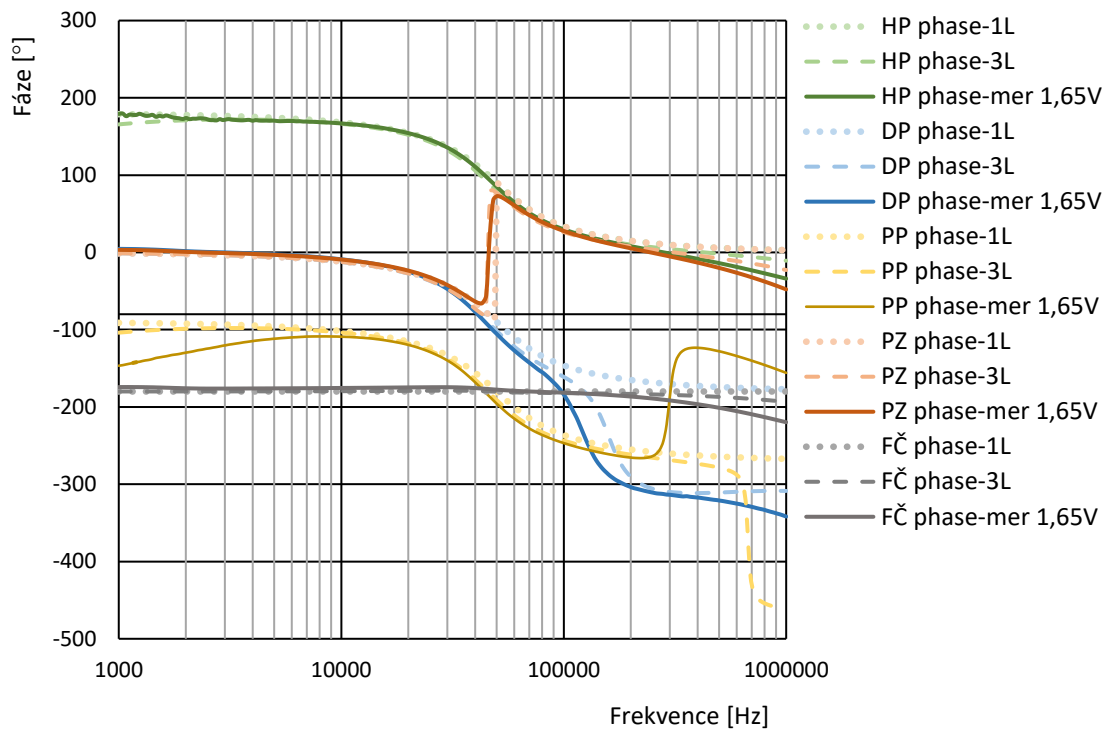
Pro počítačové simulace a praktické měření zkonstruovaného obvodu byl zvolen mezní kmitočtet 50 kHz a činitel jakosti  $Q = 1$ . Hodnoty kondenzátorů byly zvoleny jako  $C_1$  a  $C_2 = 1$  nF. Hodnoty rezistorů byly dopočítány pomocí rovnic (4.10) a (4.11) a dále popsány v kapitole 4. Jelikož se však jedná o hodnoty, které nejsou lehce dostupné a nefigurují v žádné prodejní řadě, tak byly vytvořeny pomocí paralelní kombinace dvou rezistorů s hodnotami  $3300 \Omega$  a  $91k \Omega$ . Výsledky měření, simulací a teoretickou analýzou jsou zobrazeny na Obr. 27.



Obr. 27 - Modulová charakteristika pseudo-diferenčního filtru, teorie (tečkovaně), simulace (čárkovaně), měření (plná čára)

Z grafu lze vyčíst, že výsledky dosažené měřením vykazují lehkou odlišnost oproti teoretickým i simulovaným průběhům. U filtru typu PZ dosahoval útlum hodnot téměř  $-50$  dB v okolí mezní frekvence u teoretické i simulované křivky. U praktického měření se těchto výsledků nepodařilo dosáhnout a útlum filtru se pohyboval lehce pod hodnotou  $-30$  dB. U filtru typu PP a DP si můžeme povšimnout rozdílů už mezi křivkami teorie a

simulace, kde nám do těchto filtrů vstupuje parazitní část, filtr typu HP. Tento problém je blíže popsán v kapitole 4. U praktického měření se nám tento jev ještě více projevuje. Zde bylo vhodné provést neideální analýzu u těchto filtrů, což je však nad rámec této bakalářské práce. Zbylé filtry prokazují velmi dobré výsledky oproti teoretickým i simulovaným průběhům. Lehké odlišnosti se objevují v krajních kmitočtových pásmech, a to z obou stran a jsou způsobené parazitními vlastnostmi aktivních prvků a jejich kmitočtovými limity. To způsobuje nestálost, nedostatečný útlum či rozkmit. Tohoto jevu si lze povšimnout např. u filtru typu HP v kmitočtovém pásmu od 1 kHz do 4 kHz. Dále pak svoji roli sehrála tolerance u pasivních součástek.



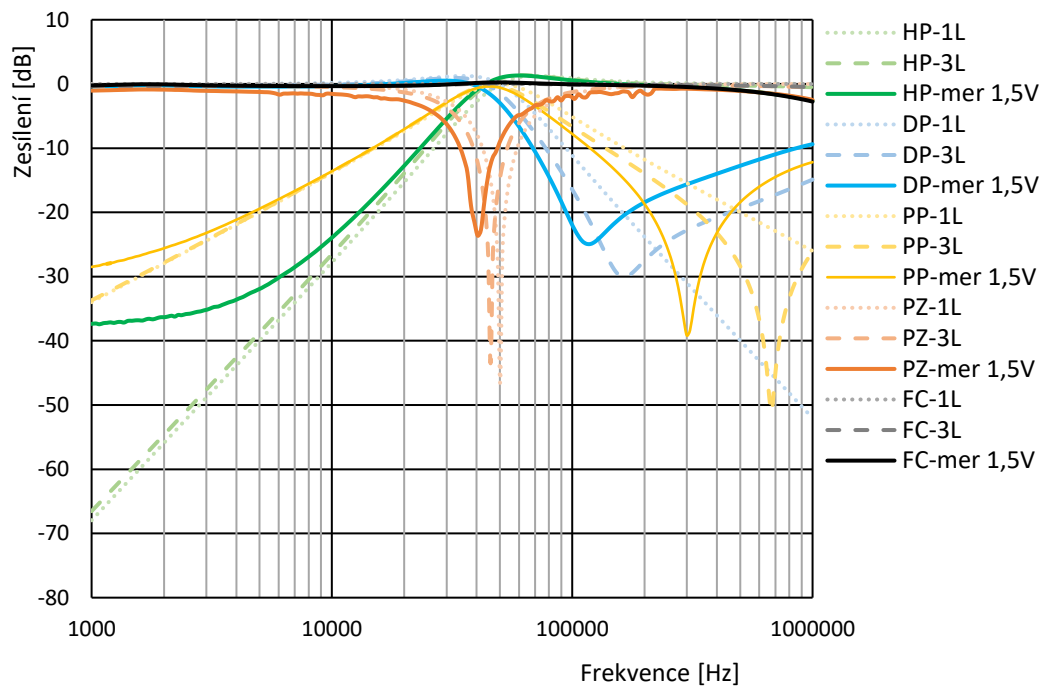
Obr. 28 - Fázová charakteristika pseudo-diferenčního filtru, teorie (tečkovaně), simulace (čárkovaně), měření (plná čára)

U fázové charakteristiky můžeme taktéž pozorovat u filtru DP neideální charakteristiku blížíci se simulované, která je zapříčiněna parazitní HP, která vstupuje do tohoto typu filtru stejně jako u modulové charakteristiky. Odchytku můžeme pozorovat i u filtru typu PP, a to z téhož důvodu. Navíc si lze povšimnout, že fázová charakteristika je v určitých bodech posunuta o  $360^\circ$ . Další charakteristiky (HP, PZ a FČ) vyšly téměř totožné v porovnání s ideálními a simulací.

### 5.1.2 Reakce filtru na změnu napájecího napětí

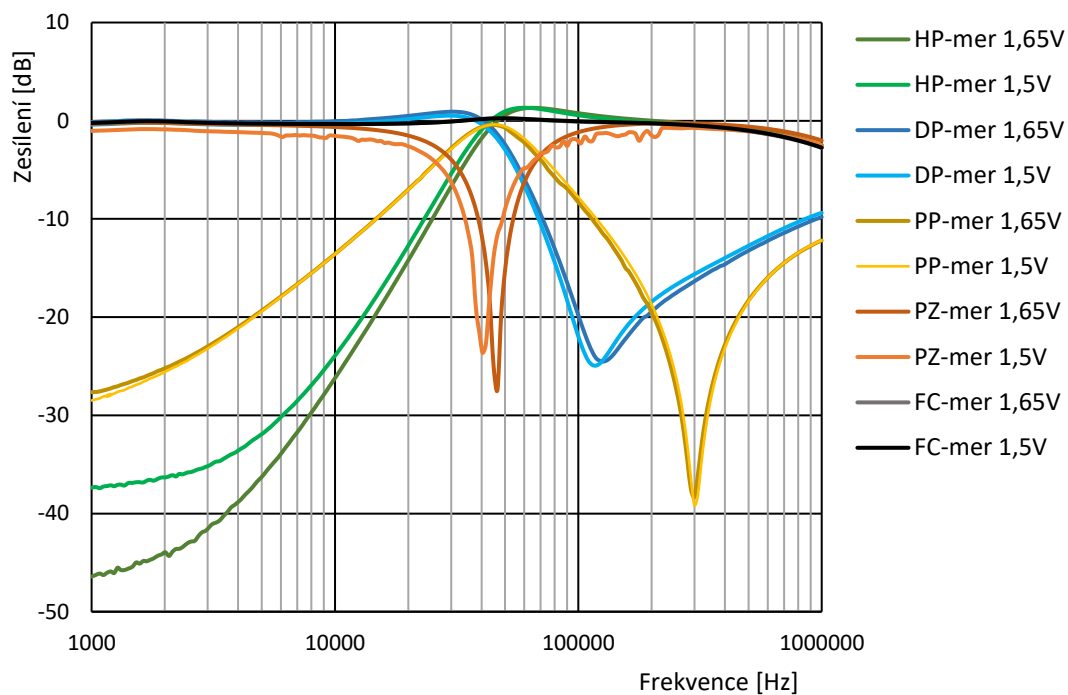
Cílem toho měření bylo zjistit, jak filtr reaguje na snížení napájecího napětí o 0,15 V, což odpovídá cca 9 %. Proudové konvejoy UCC-N1B, které práce využívá mají optimální

napájení  $\pm 1,65$  V a odběr 27 mA. Pro toto měření bylo však napájecí napětí sníženo o 9 % na hodnoty cca  $\pm 1,5$  V. Reakci na tuto změnu vystihuje Obr. 29.

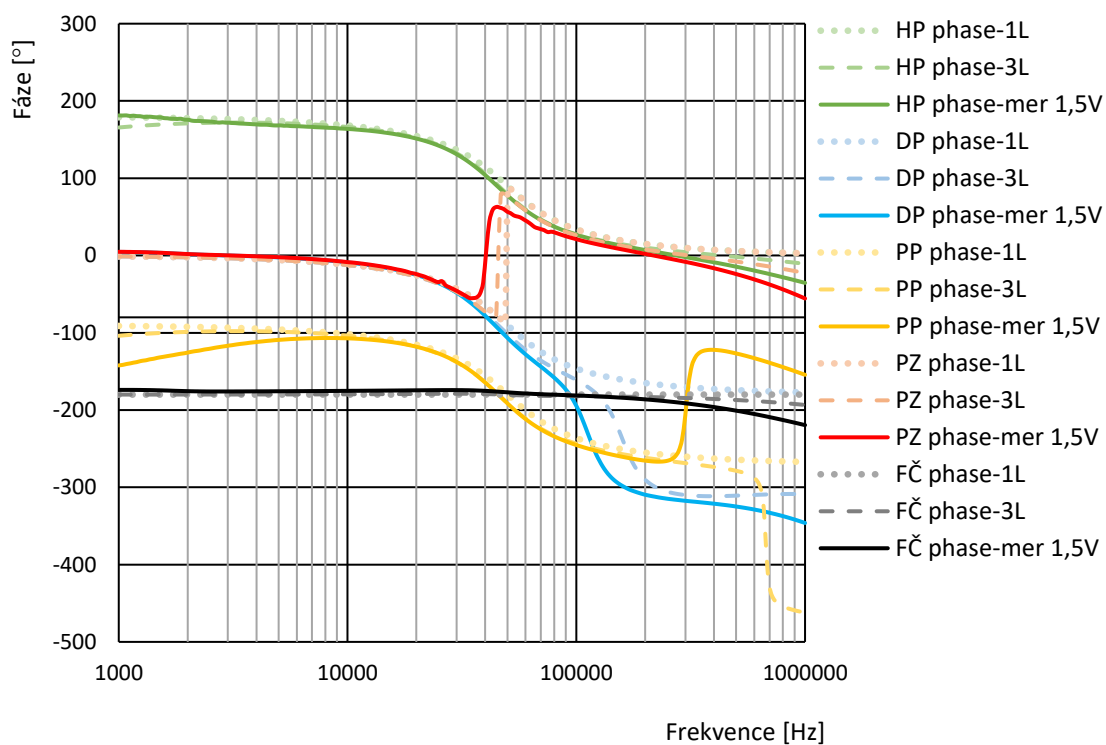


Obr. 29 - Modulová charakteristika pseudo-diferenčního filtru při poklesu napětí o 9 %, teorie (tečkovaně), simulace (čárkovaně), měření (plná čára)

Na výsledném grafu si můžeme povšimnout mírných rozdílů v porovnání s průběhy s optimálním napájením  $\pm 1,65$  V. Nejvíce se tato změna projevila u filtru typu HP, kde se v koncových pásmech útlum zmenšil z původních  $-46$  dB na  $-37$  dB. Dále lze vyčíst mírné zvlnění u filtru typu PZ a také snížení útlumu z původních  $-27$  dB na  $-23$  dB.



Obr. 30 - Modulová charakteristika pseudo-diferenčního filtru při optimálním i sníženém napětí

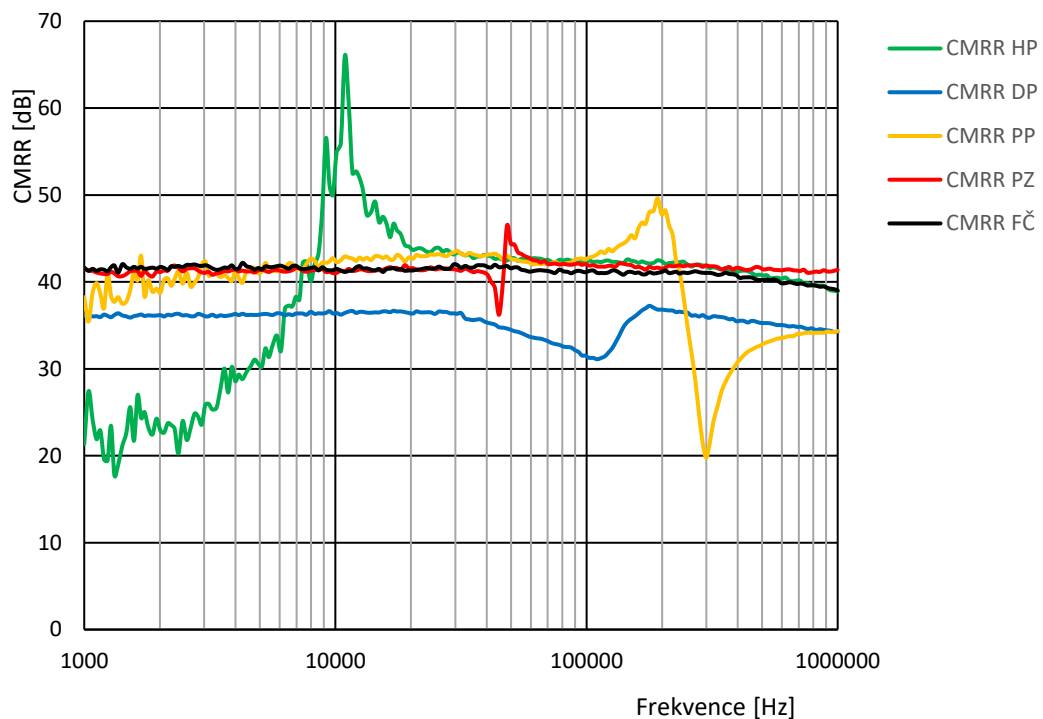


Obr. 31 - Fázová charakteristika pseudo-diferenčního filtru při poklesu napětí o 9 %, teorie (tečkovaně), simulace (čárkovaně), měření (plná čára)

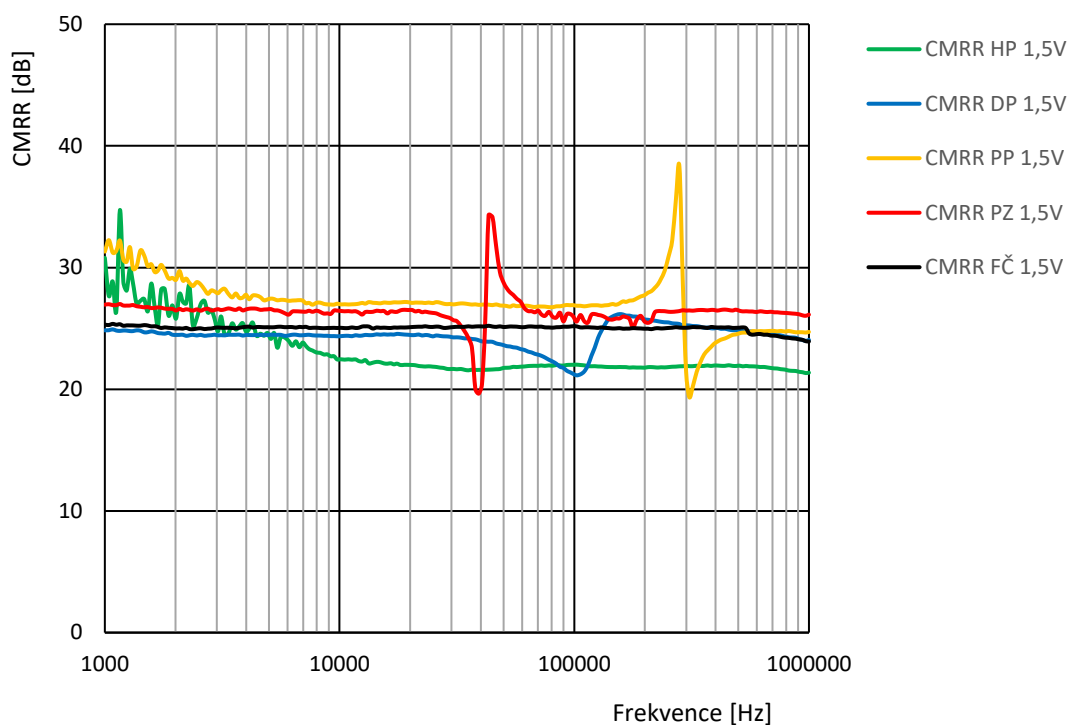
Porovnáme-li fázovou charakteristiku filtru se sníženým napájecím napětím o 0,15 V, což odpovídá 9 % oproti teoretickým a simulovaným křivkám. Lze pozorovat velice podobné výsledky, jakých bylo dosaženo u fázové charakteristiky s optimálním napájením. Největší rozdíl můžeme pozorovat u filtru typu PZ, kde se nám změna fáze ještě více zpomaluje a hodnoty jsou nižší.

### 5.1.3 Měření potlačení souhlasné složky (CMRR)

Tato část měření zjišťuje efektivitu potlačení souhlasné složky (CMRR) při napájení aktivních prvků napětím  $\pm 1,65$  V a poté při poklesu napájení o 0,15 V, což odpovídá 9 % a to u všech typů filtru, které jsou k dispozici. Grafy jednotlivých změřených CMRR jsou na Obr. 32 a Obr. 33



Obr. 32 -Graf potlačení souhlasného signálu (CMRR) u všech typů filtru při napájení  $\pm 1,65$  V

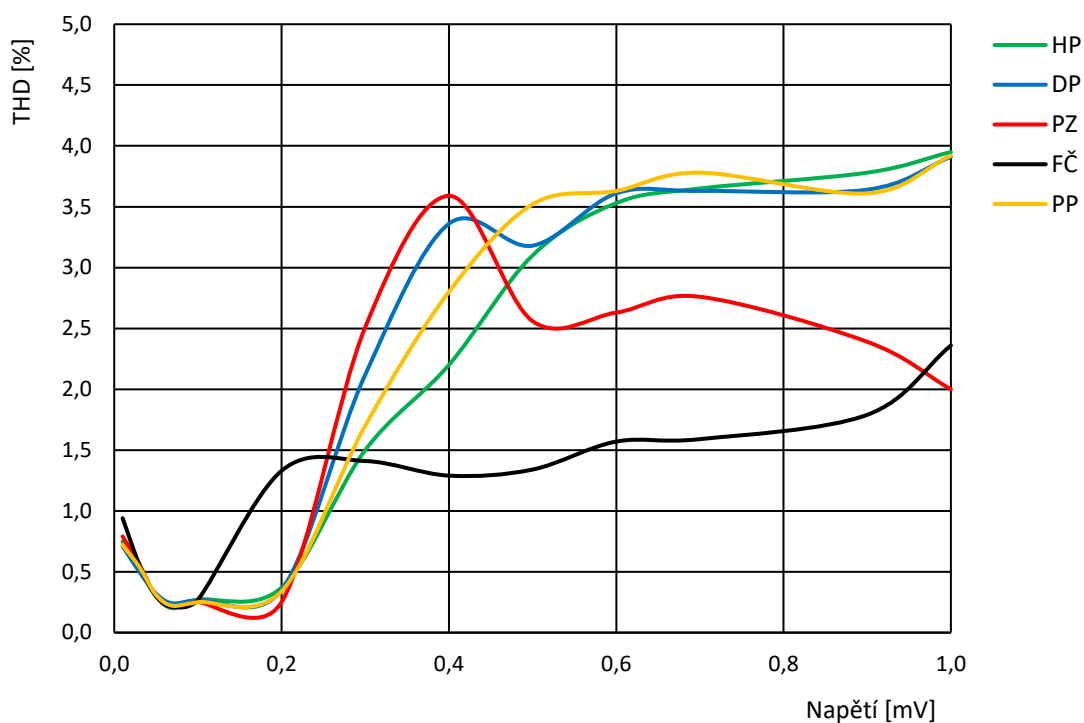


Obr. 33 - Graf potlačení souhlasného signálu (CMRR) u všech typů filtru při napájení sníženém o 9 %

Výsledky grafu ukazují, že CMRR při napájení  $\pm 1,65$  V vykazuje daleko lepší výsledky. Konkrétně všechny typy filtrů, které byly měřeny mají útlum cca 40 dB. Výchylku můžeme pozorovat u filtru typu HP ve frekvenčním intervalu od 1 kHz do 6 kHz, kde má CMRR narůstající tendenci od 25 dB až po výše uvedenou hodnotu cca - 40 dB. K ustálení dochází na frekvenci 20 kHz. Tato chyba byla způsobena nejspíše nepatrnou manipulací s přípravkem. Graf CMRR se sníženým napájecím napětím o 0,15 V, vykazuje výsledky o něco horší, což se očekávalo. Zde se útlum pohybuje okolo 25 dB. Můžeme tak říct, že při sníženém napájecím napětí je potlačení souhlasné složky nižší. Rozdíl mezi optimálním a sníženým napájením je tedy přibližně 15 dB.

#### 5.1.4 Měření celkového harmonického zkreslení (THD)

Měření celkového harmonického zkreslení (THD) bylo provedeno pro všech pět typů filtru s napětím nastaveným na optimální hodnotu  $\pm 1,65$  V. THD je definováno jako poměr vyšších harmonických složek, ku složce základní a uvádí se v procentech. Měření probíhalo na prvních čtyřech harmonických složkách, při frekvenci  $f_0 = 1$  kHz. Pro měření THD u filtrů typu PP a HP bylo potřeba zvolit jinou frekvenci  $f_0$ , jelikož při původním kmitočtu  $f_0 = 1$  kHz nám tyto filtry nepropouští. Proto u HP byl zvolen  $f_0 = 10$  kHz a v případě PP byl zvolen  $f_0 = 50$  kHz.



Obr. 34 - Graf průběhu THD pro všechny typy filtrů

Z grafu THD vyplývá, že pro amplitudy vstupního signálu pod 0,2 V je harmonické zkreslení menší než 1 % s výjimkou FČ. Zde se THD dostává na hodnotu 1,5 %. V intervalu od 0,2 V do 1 V se THD zvyšuje až do maximální hodnoty 4 %. Nejlepší výsledky v tomto ohledu vykazuje FČ, kde se maximální hodnota THD pohybuje kolem 2,5 % při vstupním signálu 1 V.

## 6. ZÁVĚR

Téma bakalářské práce je zaměřeno na prostudování teorie pseudo-diferenčních filtrů, návrhu samotného filtru, následnou simulaci, experimentální měření vyrobeného přípravku a porovnání výsledků teoretických, simulovaných a naměřených.

První kapitoly jsou věnovány rozboru a popisu kmitočtových filtrů, jejich dělení, charakteristiky a přenosové funkce. Dále je součástí této kapitoly rozbor jednotlivých struktur filtrů. Od pseudo-diferenčního kmitočtového filtru, přes nediferenční zapojení až po popsání plně diferenčních struktur. Je zde i rozebráno potlačení souhlasného signálu (CMRR) a celkové harmonické zkreslení (THD). Ve třetí kapitole jsou pak rozebrány jednotlivé aktivní prvky DVCC, CCII, které se budou následně využívat při reálné konstrukci přípravku a dále také aktivní prvek (UCC), který byl použit při simulacích.

Čtvrtá kapitola pak pojednává o přímém návrhu filtru v programu SNAP. Následně byl filtr sestaven v programu OrCAD, a odsimulován nejprve s ideálními prvky (UCC-1L) a následně i s prvky, které se blíží reálným vlastnostem (UCC-3L). Simulaci jsem provedl pro mezní kmitočet  $f_0 = 50$  kHz a  $Q = 1$ . Bylo zjištěno, že odpor  $R_3$  musí být zvolen blízkosti dopočítaného odporu  $R_1$  a odpory  $R_4$ ,  $R_5$  a  $R_6$  se musí rovnat taktéž zvolenému odporu  $R_3$ . V simulaci modulové charakteristiky pak můžeme pozorovat lehký překmit u funkce filtru typu dolní propust, který je právě zapříčiněn touto chybou. Grafické výsledky simulací jsou potom součástí této kapitoly.

Pátá kapitola se zabývá praktickým měřením funkčnosti sestrojeného filtru dle návrhu z předchozí kapitoly a následné porovnání výsledků s teoretickými hodnotami a simulací. Měření probíhalo na obvodovém analyzátoru Agilent 4395A v rozmezí od 1 kHz až po 1 MHz a šířkou pásma 30 Hz. Nejdříve bylo provedeno měření modulů a fází všech pěti základních typů filtrů. Tyto výsledky se následně porovnaly s ideálním průběhem a simulací třetího stupně. Při porovnání bylo zjištěno, že výsledky měření vykazují mírnou odlišnost oproti teoretickým a simulovaným hodnotám. Největší rozdíl zaznamenáváme v útlumu. U filtru typu PZ byl rozdíl téměř 20 dB oproti teorii i simulaci. Dále se nám prohlubuje parazitní část u filtrů PP a DP. Ta je způsobena vstupujícím filtrem typu HP. Dle matematických rovnic jsme však s touto chybou počítali a věděli jsme, že se nám zde projeví. Nedostatečný útlum v mezích frekvenčního rozsahu je potom způsoben parazitními vlastnostmi aktivních prvků a jejich kmitočtovými limity a dále pak tolerancí napájených pasivních součástek. U fázové charakteristiky byly výsledky korespondující s modulovou charakteristikou. U filtrů PP a DP máme parazitní jev HP. Ostatní křivky vyšly dle předpokladů a nelišily se od teoretických hodnot a simulací. V dalším měření jsme zkoumali vlastnosti filtru při potlačeném napájecím napětí o 0,15 V, což odpovídá 9 %. Při sníženém napájecím napětí na  $\pm 1,5$  V se výsledky filtru zhoršily. V modulové charakteristice vnímáme zhoršení útlumu u všech filtrů a projevu se nám zde mírné zvlnění, kterého si lze nejlépe povšimnout na filtru typu PZ.

V porovnání s optimálním napájecím napětím lze říct, že má filtr horší vlastnosti, což se očekávalo. U fázové charakteristiky lze pozorovat zhoršení právě u PZ, korespondující s modulovou charakteristikou. Zbytek fázových charakteristik vyšel dle očekávání.

Následovalo měření potlačení souhlasného signálu (CMRR). Cílem měření bylo zjistit, jak moc dokáže filtr potlačit souhlasný signál. Za efektivní se považuje hodnota potlačení 40 dB. Při optimálním napájení bylo změřeno, že všechny typy měřených filtrů mají útlum kolem 40 dB s výjimkou filtru typu HP v intervalu od 1 kHz až 20 kHz. Zde hodnota narůstá od 25 dB až po 65 dB a následně se ustálí na zmíněných 40 dB. Tato chyba byla nejspíše zapříčiněna lehkou manipulací s přípravkem při snímání vzorků. Toto měření můžeme považovat za úspěšné a filtr tak splňuje vlastnost dostatečného potlačení souhlasného signálu. Dále bylo opět sníženo napájecí napětí o 0,15 V. Zde jsou výsledky dle předpokladů značně zhoršené a dosahují útlumu cca 25 dB.

V posledním kroku jsme měřili celkové harmonické zkreslení (THD). Měření probíhalo za optimálního napětí  $\pm 1,65$  V. U všech filtrů byla změřena hodnota THD pro amplitudy vstupního signálu od 0,01 V až po 1 V. Pro amplitudy vstupního signálu pod 0,2 V je harmonické zkreslení u všech typů filtrů nižší než 1,5 %. Nejlepší výsledky vykazuje filtr typu FČ, kde se nám hodnota pohybuje maximálně do výše 2,5 %. U ostatních filtrů je tato hodnota v úrovni 4 %

Nově navržený a sestrojený filtr funguje dle simulovaných předpokladů. Filtr vykazuje pouze mírné výchylky od simulovaných hodnot, které jsou způsobeny parazitními vlastnostmi aktivních prvků, tolerancí součástek. Originální výsledky dokazující správnou funkčnost filtru jsou v příloze B – Výsledky měření získané z obvodového analyzátoru Agilent 4395A

# LITERATURA

- [1] DAVIS. N, An Introduction to Filters [online], Internetový článek, vydán 31.7.2017 [cit. 9.11.2020]. Dostupné z:  
<https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/an-introduction-to-filters/>
- [2] KOTON, J a VRBA, K. Filtrační analogové obvody pro integrovanou výuku VUT a VŠB-TUO, FEKT VUT v Brně 2014
- [3] ŽATKOVIČ, A.; Alzat SZM: Frekvenční selektory. Dostupné z:  
[http://alzat.szm.com/selektory/frekvenc/frek\\_sel.htm](http://alzat.szm.com/selektory/frekvenc/frek_sel.htm)
- [4] SCHIMMEL, J. Studiová a hudební elektronika, FEKT VUT v Brně 2015
- [5] ALL ABOUT CIRCUITS: Low-pass Filters [online]. Poslední aktualizace 1.5.2019 [cit.9.11.2020]. Dostupné z:  
<https://www.allaboutcircuits.com/textbook/alternating-current/chpt-8/low-pass-filters/>
- [6] ALL ABOUT CIRCUITS: High-pass Filters[online]. Poslední aktualizace 1.5.2019 [cit.9.11.2020]. Dostupné z:  
<https://www.allaboutcircuits.com/textbook/alternating-current/chpt-8/high-pass-filters/>
- [7] ALL ABOUT CIRCUITS: Band-pass Filters [online]. Poslední aktualizace 1.5.2019 [cit.9.11.2020]. Dostupné z:  
<https://www.allaboutcircuits.com/textbook/alternating-current/chpt-8/band-pass-filters/>
- [8] ALL ABOUT CIRCUITS: Band-stop Filters [online]. Poslední aktualizace 1.5.2019 [cit.9.11.2020]. Dostupné z:  
<https://www.allaboutcircuits.com/textbook/alternating-current/chpt-8/band-stop-filters/>
- [9] PETRŽELA, J.; Elektircké filtry[online], Počítačová prezentace. 21.12.2009 [cit.9.11.2020] Dostupná z:  
<http://www.urel.feec.vutbr.cz/MTEO/belf/fazovaci%20clanky.pdf>
- [10] Analogová technika počítačové cvičení úloha 2: Kmitočtový filtr. FEKT VUT v Brně
- [11] Maxim integrated: Understanding Single-Ended, Pseudo-Differential and Fully-Differential ADC Inputs. [online] Poslední aktualizace 14.6.2002 [cit 9.11.2020] Dostupné z:  
<https://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/1108>
- [12] KOTOT, J.; SLÁDOK, O.; HERENCŠÁR, N.; HORNG, J. Pseudo-differential second-order band-reject filter usinf current conveyors. AEU – International Journal of Electronics and Communications, 2016, roč. 70, č. 6, s. 814-821. ISSN:1434-8411
- [13] SUN, Y. Design of High Frequency Integrated Analogue Filters, IET 2002.
- [14] O. Sladok, M. Milota, J. Koton and N. Herencsar, "Systematic Design of Pseudo-Differential Frequency Filter," 2019 11th International Congress on Ultra Modern

- Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), Dublin, Ireland, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICUMT48472.2019.8971000.
- [15] D. Becvar, K. Vrba, V. Zeman and V. Musil, "Novel universal active block: a universal current conveyor," 2000 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), Geneva, Switzerland, 2000, pp. 471-474 vol.3, doi: 10.1109/ISCAS.2000.856099.
- [16] JIUN WEI, Horng a Chiu WEI YUAN. High input impedance voltage-mode biquad with one input and five outputs employing four CCII ICs [online]. [cit. 28.11.2020]. Dostupné z: <http://nopr.niscair.res.in/handle/123456789/35431>
- [17] Datasheet UCC-N1B - Universal Current Conveyor (UCC) and Second-Generation Current Conveyor (CCII+/-), Brno University of Technology, On Semiconductor Ltd., Rev. 1, 2012
- [18] AD 8476, Low Power, Unity Gain Fully Differential Amplifier & ADC Driver. Datasheet, Analog Devices [online]. 2011. Dostupné z URL: [http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/AD8476.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD8476.pdf).
- [19] AD 8429, 1 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$  Low Noise Instrumentation Amplifier. Datasheet, Analog Devices [online] 2011. Dostupné z URL: [http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/AD8429.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD8429.pdf).
- [20] AD 8271, Programmable Gain Precision Difference Amplifier. Datasheet, Analog Devices [online] 2009. Dostupné z URL: [http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/AD8271.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD8271.pdf).

## Seznam příloh

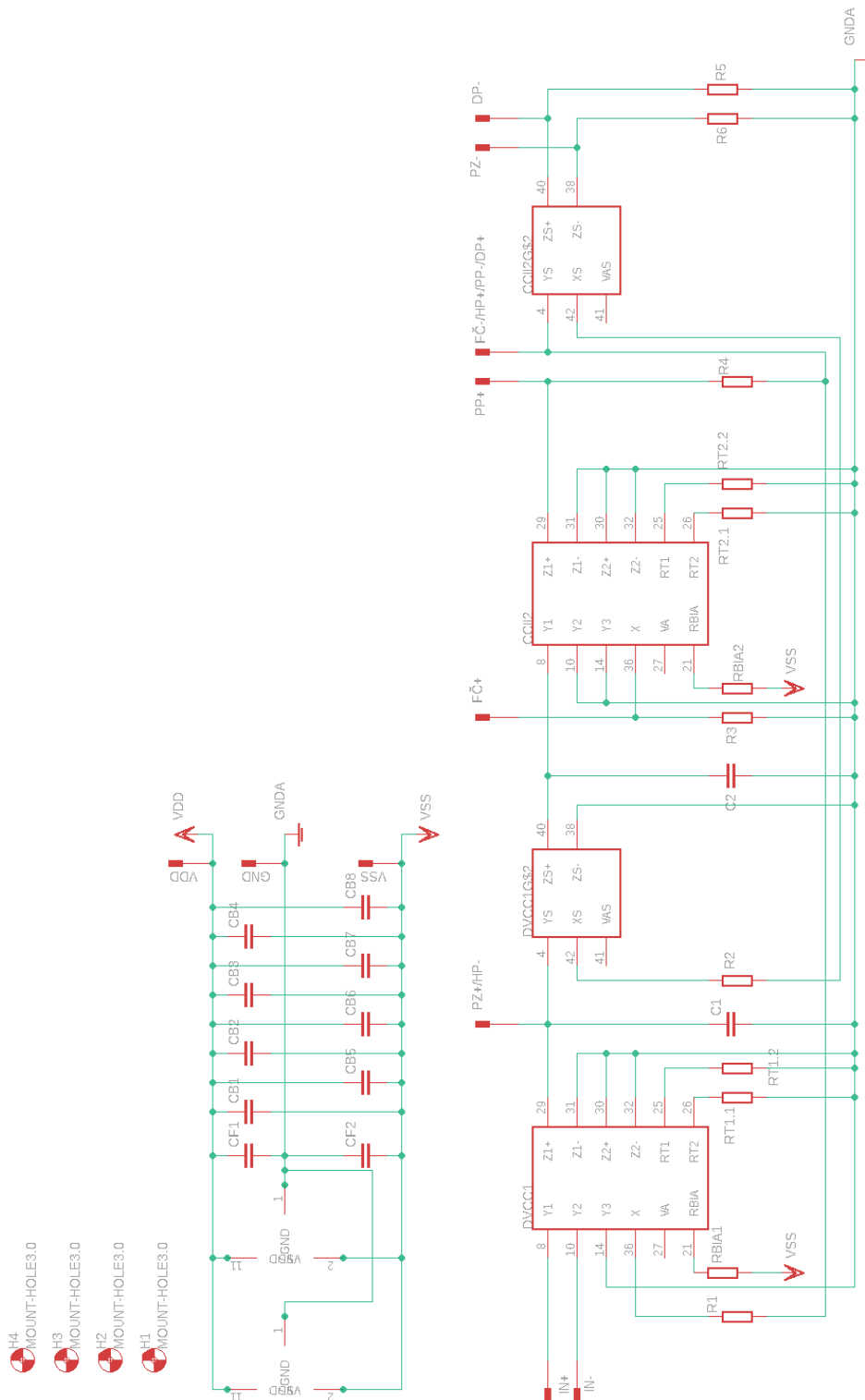
A – Návrh zařízení a tabulka součástek .....	35
A.1 - Deska plošného spoje .....	37
A.2 - Vyrobená deska plošného spoje.....	39
A.3 – Převodníky .....	41
B – Výsledky měření získané z obvodového analyzátoru Agilent 4395A .....	45

## Seznam obrázků příloh

<i>Obr A. 1 - Schéma pseudo-diferenčního filtru .....</i>	<i>35</i>
<i>Obr A. 2 - Deska plošného spoje – top (81,28 x 55,88 mm) .....</i>	<i>37</i>
<i>Obr A. 3 - Deska plošného spoje – bottom (81,28 x 55,88 mm) .....</i>	<i>37</i>
<i>Obr A. 4 - Deska plošného spoje – rozmístění součástek (top) .....</i>	<i>38</i>
<i>Obr A. 5 - Vyrobená deska plošného spoje – neosazená top .....</i>	<i>39</i>
<i>Obr A. 6 - Vyrobená deska plošného spoje – osazená top .....</i>	<i>39</i>
<i>Obr A. 7 - Vyrobená deska plošného spoje – neosazená bottom .....</i>	<i>40</i>
<i>Obr A. 8 - Vyrobená deska plošného spoje – osazená bottom .....</i>	<i>40</i>
<i>Obr A. 9 - Převodník nediferenčního signálu na diferenční (top) .....</i>	<i>41</i>
<i>Obr A. 10 - Převodník nediferenčního signálu na diferenční (bottom) .....</i>	<i>41</i>
<i>Obr A. 11 - Převodník nediferenčního signálu na diferenční (součástky) .....</i>	<i>42</i>
<i>Obr A. 12 - Fotografie převodníku nediferenčního signálu na diferenční .....</i>	<i>42</i>
<i>Obr A. 13 - Převodník diferenčního signálu na nediferenční (top) .....</i>	<i>43</i>
<i>Obr A. 14 - Převodník diferenčního signálu na nediferenční (součástky) .....</i>	<i>43</i>
<i>Obr A. 15 - Fotografie převodníku diferenčního signálu na nediferenční .....</i>	<i>44</i>
<i>Obr. B. 1 – Export modulu PZ z obvodového analyzátoru Agilent 4395A při napájení <math>\pm 1,65V</math> .....</i>	<i>45</i>
<i>Obr. B. 2 - Export fáze PZ z obvodového analyzátoru Agilent 4395A při napájení <math>\pm 1,65V</math> .....</i>	<i>46</i>
<i>Obr. B. 3 - Export modulu PZ z obvodového analyzátoru Agilent 4395A při napájení <math>\pm 1,5V</math> .....</i>	<i>46</i>
<i>Obr. B. 4 - Export fáze PZ z obvodového analyzátoru Agilent 4395A při napájení <math>\pm 1,5V</math> .....</i>	<i>47</i>
<i>Obr. B. 5 - Export THD u FČ při 1000mVpp z obvodového analyzátoru Agilent 4395A při napájení <math>\pm 1,65V</math> .....</i>	<i>47</i>

# A – Návrh zařízení a tabulka součástek

Návrh schématu pseudo-diferenčního filtru v programu EAGLE a seznam použitých součástek.

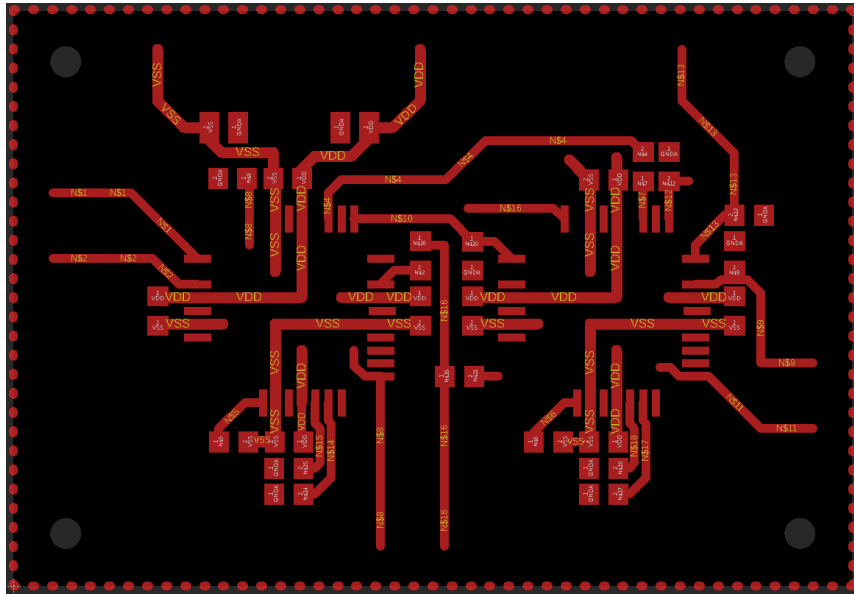


Obr. A. 1 - Schéma pseudo-diferenčního filtru

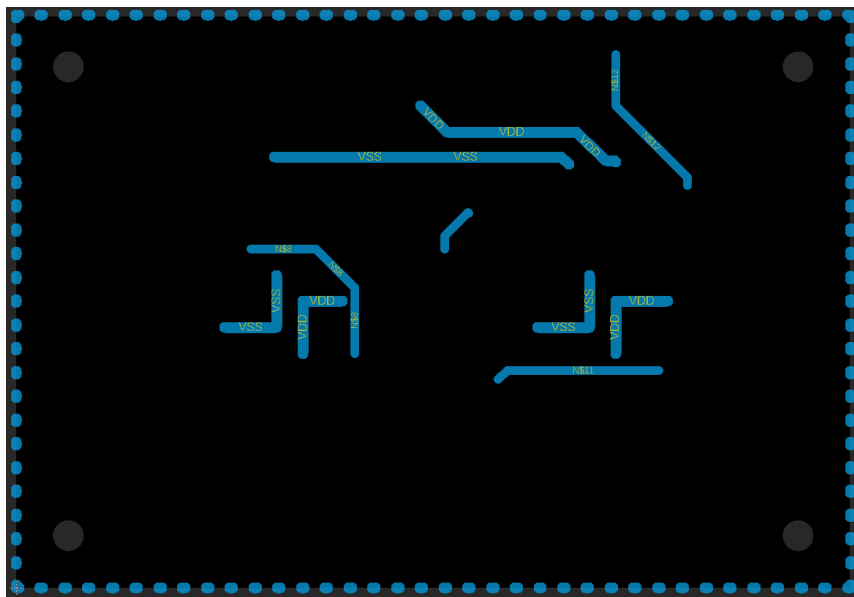
**Seznam součástek:**

C <sub>1</sub>	1nF, CKS0805, 5%
C <sub>2</sub>	1nF, CKS0805, 5%
C <sub>F1</sub>	4,7u, Tantalové CTS0805, 10%
C <sub>F2</sub>	4,7u, Tantalové CTS0805, 10%
C <sub>B1</sub>	68 pF   47 nF, CKS0805, 68pF/50V 5%, 47n/50V 10%
C <sub>B2</sub>	69 pF   47 nF, CKS0805, 68pF/50V 5%, 47n/50V 10%
C <sub>B3</sub>	70 pF   47 nF, CKS0805, 68pF/50V 5%, 47n/50V 10%
C <sub>B4</sub>	71 pF   47 nF, CKS0805, 68pF/50V 5%, 47n/50V 10%
C <sub>B5</sub>	72 pF   47 nF, CKS0805, 68pF/50V 5%, 47n/50V 10%
C <sub>B6</sub>	73 pF   47 nF, CKS0805, 68pF/50V 5%, 47n/50V 10%
C <sub>B7</sub>	74 pF   47 nF, CKS0805, 68pF/50V 5%, 47n/50V 10%
C <sub>B8</sub>	75 pF   47 nF, CKS0805, 68pF/50V 5%, 47n/50V 10%
R <sub>BIA1</sub>	4k7 Ω, R0805, 1%
R <sub>BIA2</sub>	4k7 Ω, R0805, 1%
R <sub>T1.1</sub>	8k2, R0805, 1%
R <sub>T1.2</sub>	8k2, R0805, 1%
R <sub>T2.1</sub>	8k2, R0805, 1%
R <sub>T2.2</sub>	8k2, R0805, 1%
R <sub>1</sub>	3k3   91k, R0805, 1%
R <sub>2</sub>	3k3   91k, R0805, 1%
R <sub>3</sub>	3k3   91k, R0805, 1%
R <sub>4</sub>	3k3   91k, R0805, 1%
R <sub>5</sub>	3k3   91k, R0805, 1%
R <sub>6</sub>	3k3   91k, R0805, 1%
UCC-N1B520	PLCC44 SMD
UCC-N1B521	PLCC44 SMD

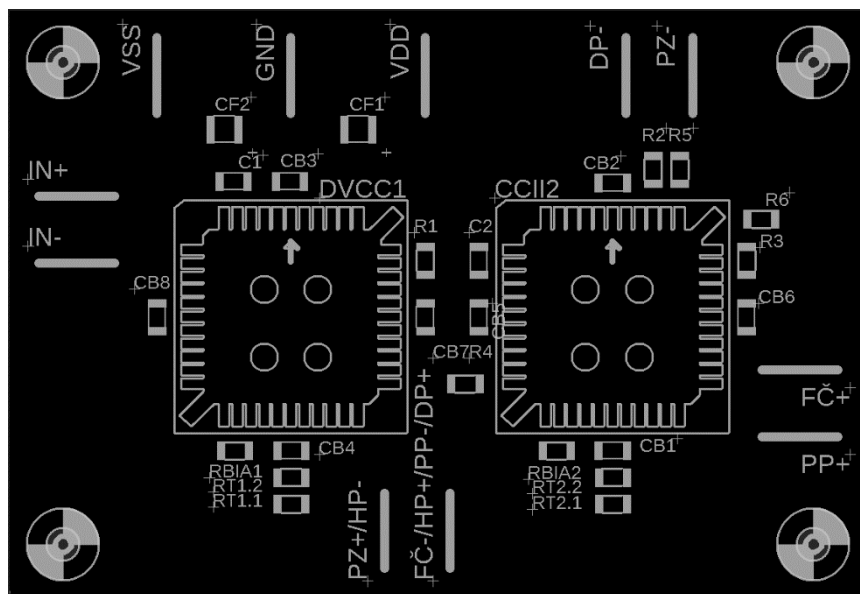
## A.1 - Deska plošného spoje



Obr A. 2 - Deska plošného spoje – top (81,28 x 55,88 mm)

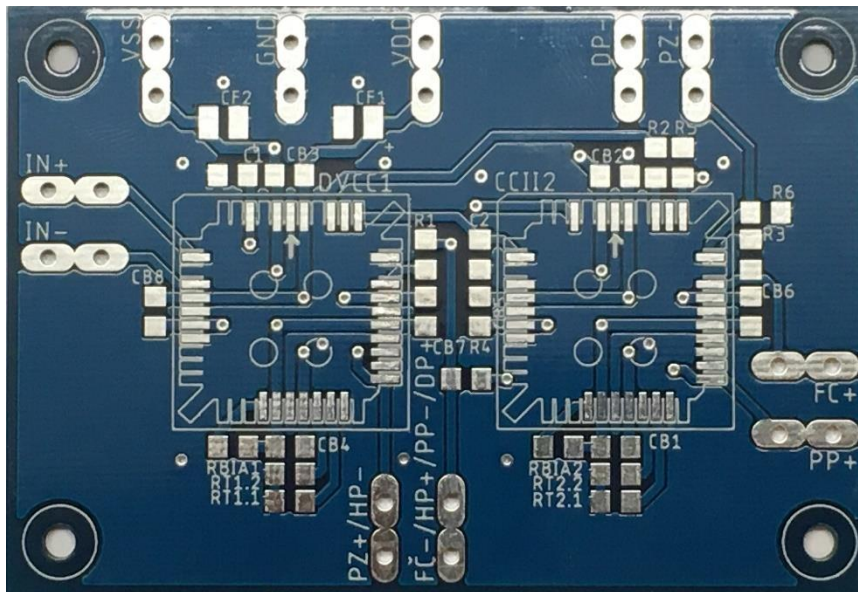


Obr A. 3 - Deska plošného spoje – bottom (81,28 x 55,88 mm)

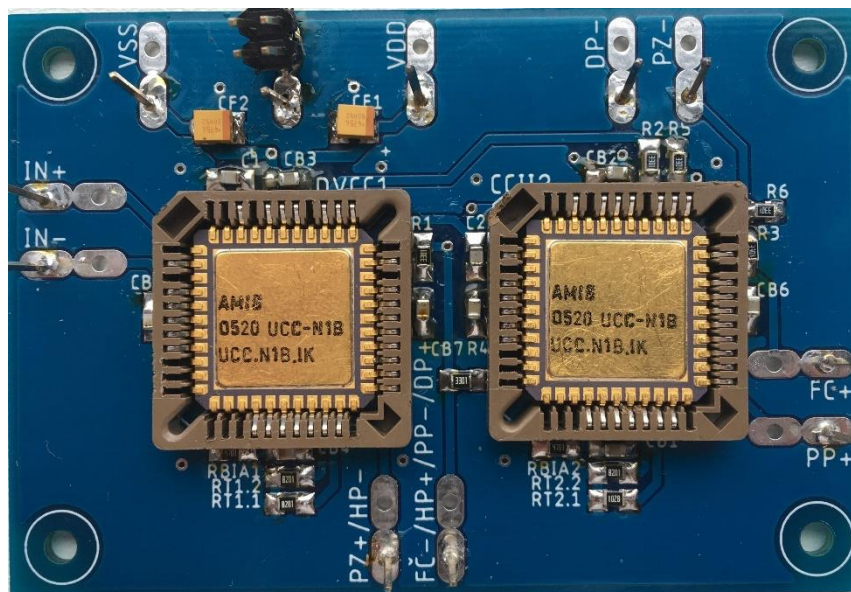


Obr A. 4 - Deska plošného spoje – rozmístění součástek (top)

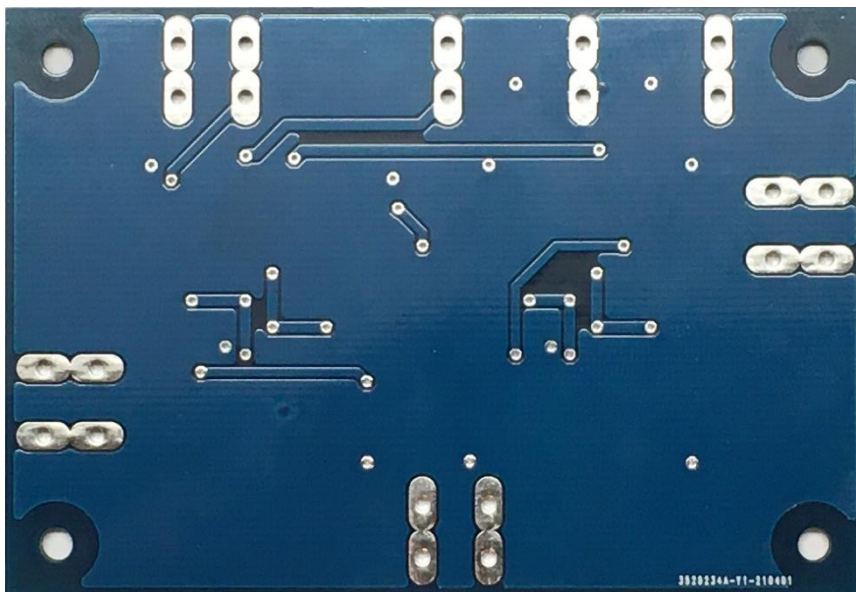
## A.2 - Vyrobená deska plošného spoje



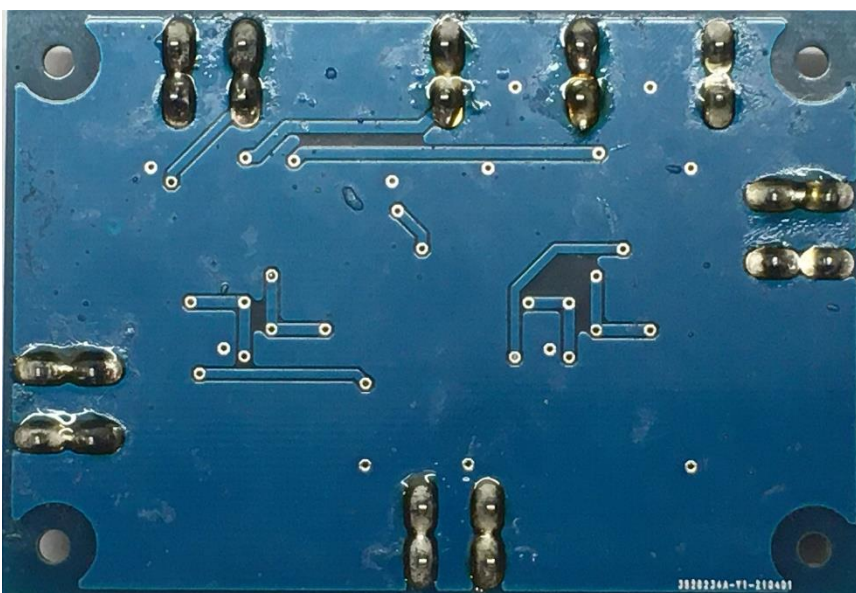
Obr A. 5 - Vyrobená deska plošného spoje – neosazená top



Obr A. 6 - Vyrobená deska plošného spoje – osazená top

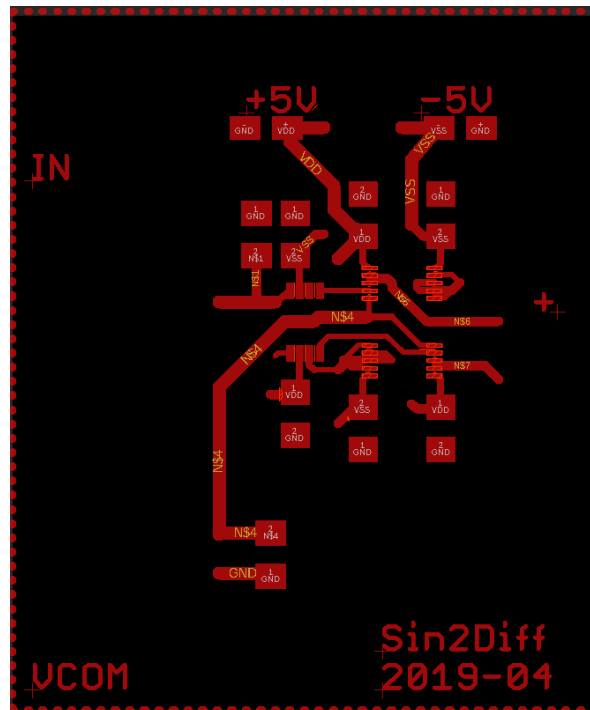


*Obr A. 7 - Vyrobená deska plošného spoje – neosazená bottom*

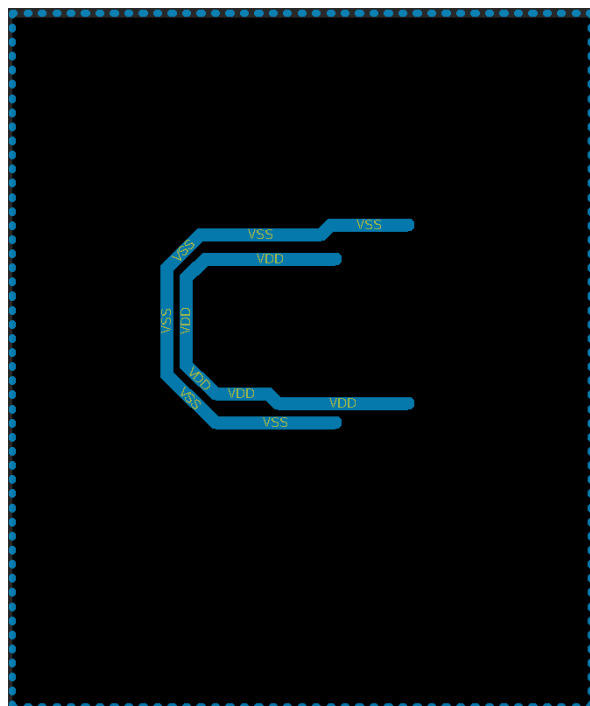


*Obr A. 8 - Vyrobená deska plošného spoje – osazená bottom*

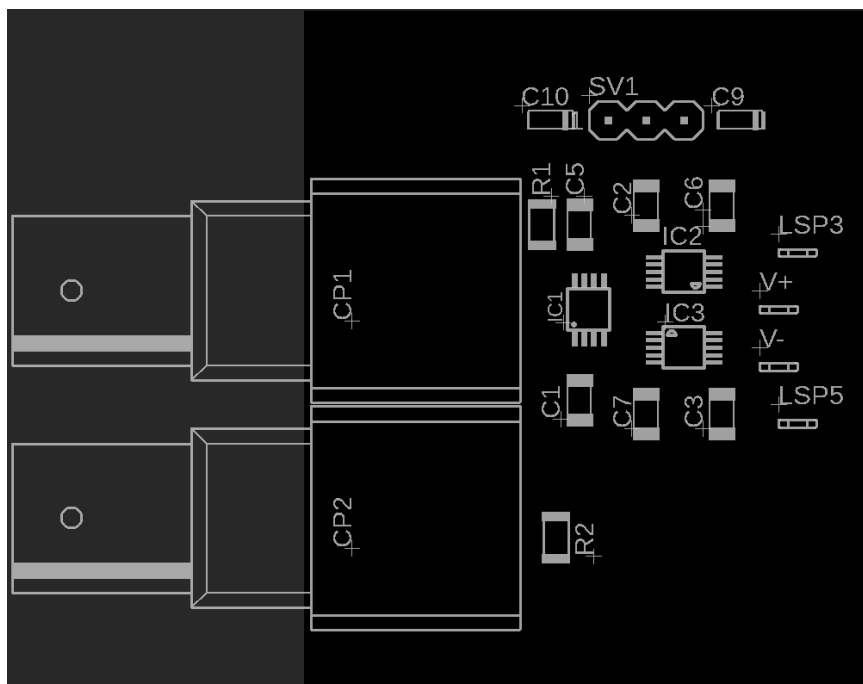
## A.3 – Převodníky



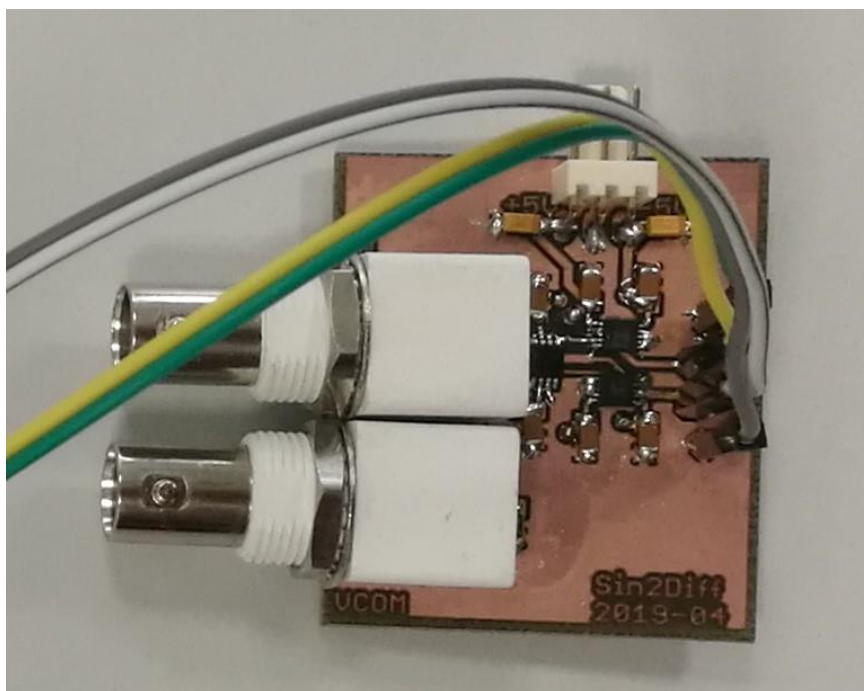
Obr A. 9 - Převodník nediferenčního signálu na diferenční (top)



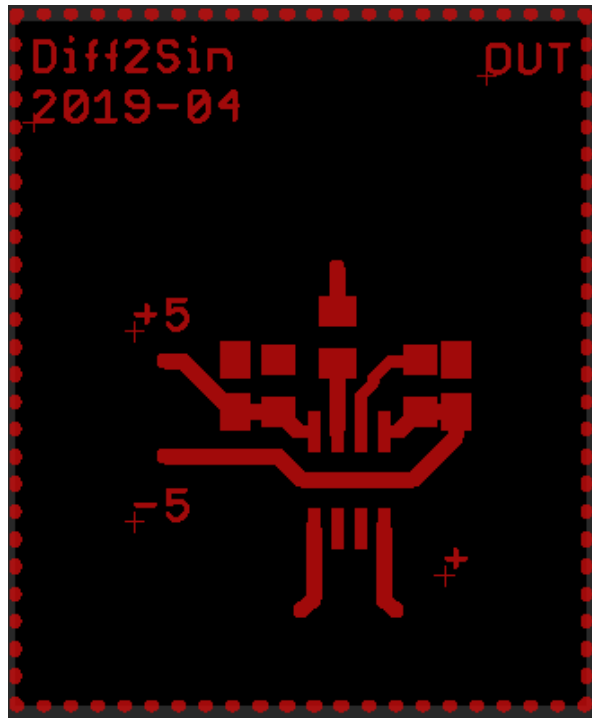
Obr A. 10 - Převodník nediferenčního signálu na diferenční (bottom)



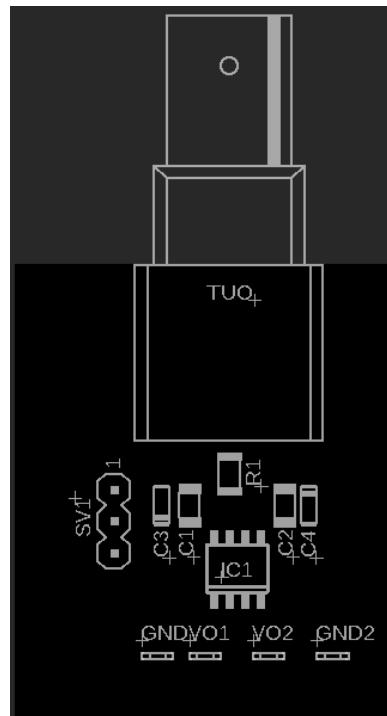
Obr A. 11 - Převodník nediferenčního signálu na diferenční (součástky)



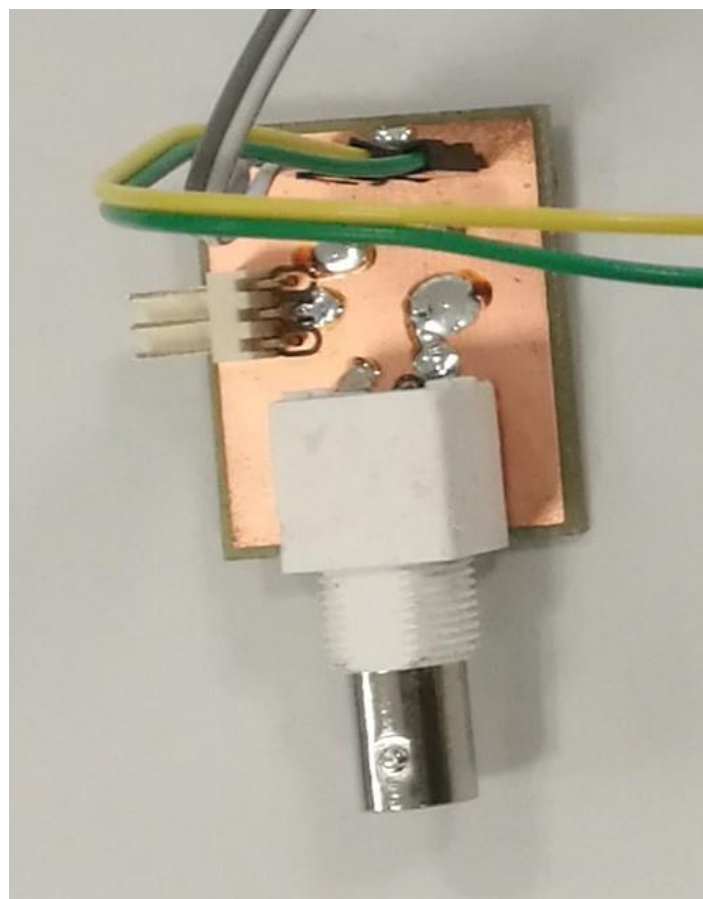
Obr A. 12 - Fotografie převodníku nediferenčního signálu na diferenční



Obr A. 13 - Převodník diferenčního signálu na nediferenční (top)



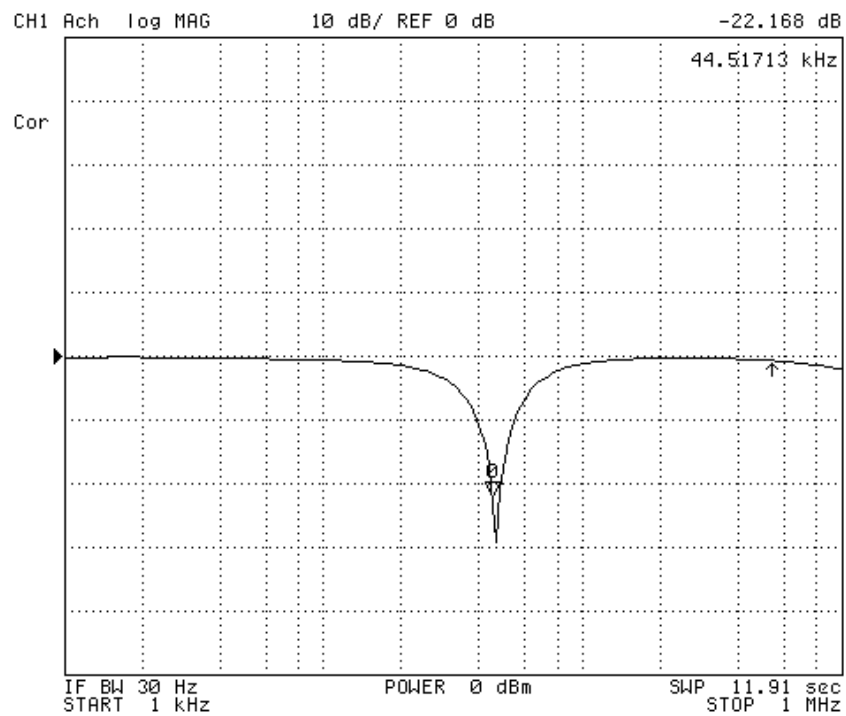
Obr A. 14 - Převodník diferenčního signálu na nediferenční (součástky)



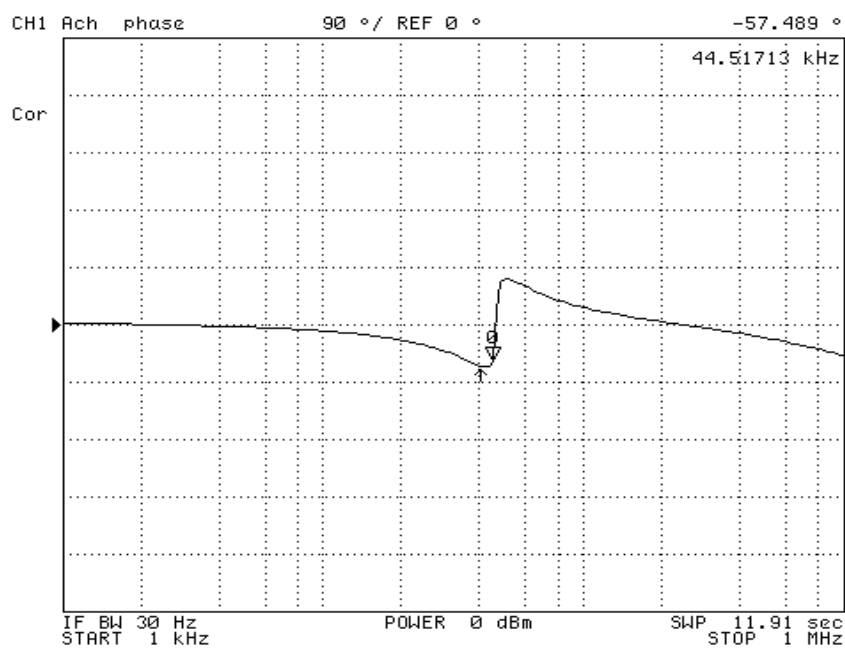
*Obr A. 15 - Fotografie převodníku diferenčního signálu na nediferenční*

## B – Výsledky měření získané z obvodového analyzátoru Agilent 4395A

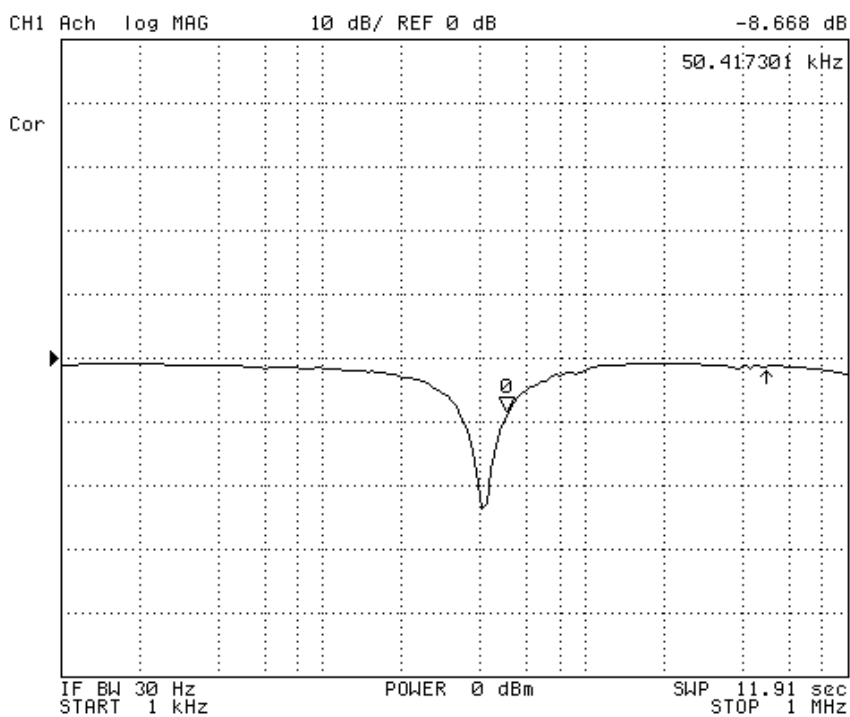
Vyexportované originální grafické zobrazení obvodového analyzátoru Agilent 4395.



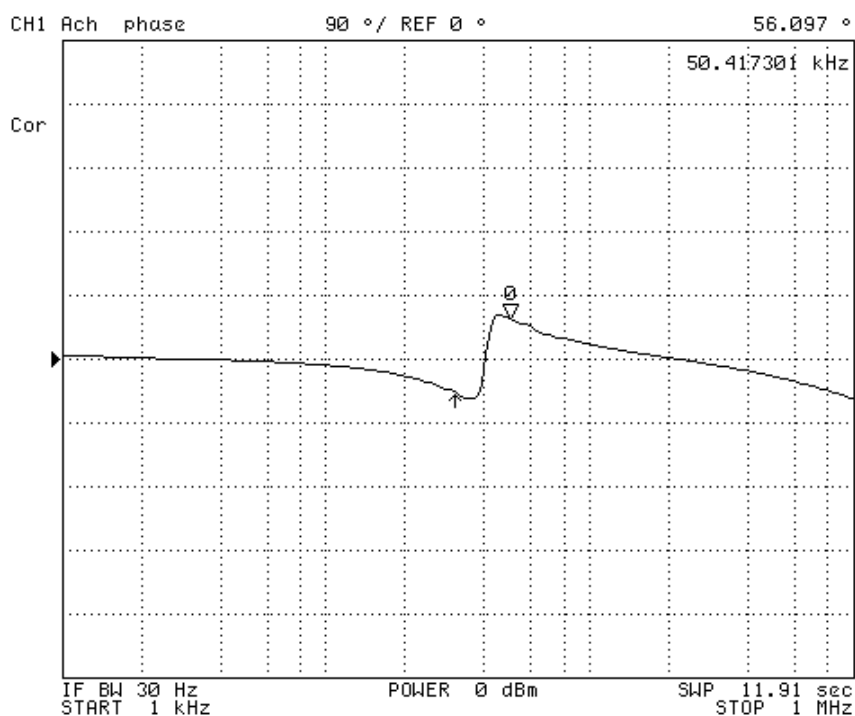
Obr. B. 1 – Export modulu PZ z obvodového analyzátoru Agilent 4395A při napájení  $\pm 1,65V$



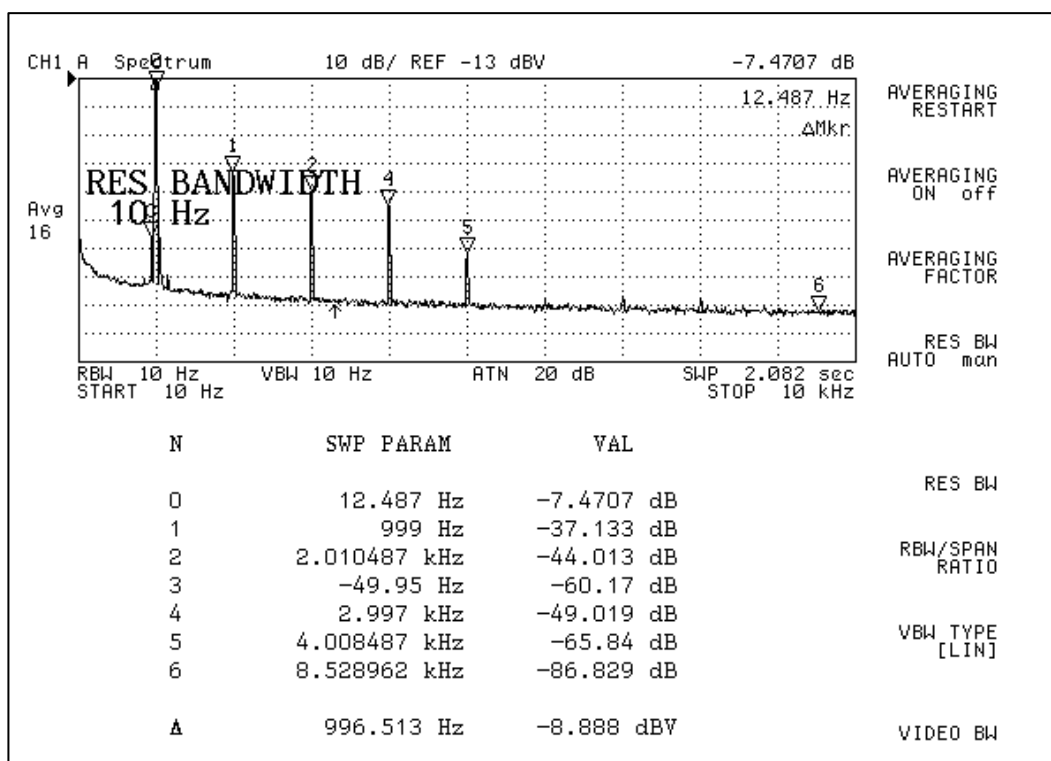
Obr. B. 2 - Export fáze PZ z obvodového analyzátoru Agilent 4395A při napájení  $\pm 1,65V$



Obr. B. 3 - Export modulu PZ z obvodového analyzátoru Agilent 4395A při napájení  $\pm 1,5V$



Obr. B. 4 - Export fáze PZ z obvodového analyzátoru Agilent 4395A při napájení  $\pm 1,5V$



Obr. B. 5 - Export THD u FČ při 1000mVpp z obvodového analyzátoru Agilent 4395A při napájení  $\pm 1,65V$