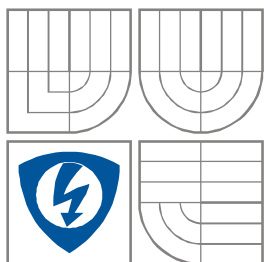


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATION

# ANALÝZA FILTRAČNÍCH STRUKTUR S ŘIDITELNÝMI ZESILOVAČI

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR THESIS

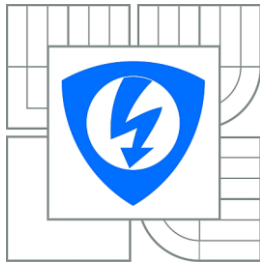
AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

DAVID PÁNEK

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. JOSEF POLÁK

BRNO, 2015



**VYSOKÉ UCENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií**

**Ústav telekomunikací**

## **Bakalářská práce**

bakalářský studijní obor  
**Teleinformatika**

**Student:** David Pánek

**ID:** 134580

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2014/2015

### **NÁZEV TÉMATU:**

**Analýza filtračních struktur s říditelnými zesilovači**

### **POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

Seznamte se s problematikou kmitočtových filtrů pracujících v proudovém a napěťovém módu. V literatuře vytipujte jednoduchá i složitější zapojení říditelných kmitočtových filtrů. Provéřte a rovnajte jejich vlastnosti použitím vhodných simulačních programů. Každé zapojení musí obsahovat digitálně řízený proudový zesilovač DACA. Z analyzovaných zapojení vyberte minimálně čtyři zapojení a realizujte do podoby DPS. Ověřte výsledky simulací praktickým měřením vybraných vlastností realizovaných filtrů a následně porovnejte.

### **DOPORUČENÁ LITERATURA:**

- [1] SEDLÁČEK, J.; HÁJEK, K. Kmitočtové filtry. 1. vyd. Praha: BEN, 2002. 535 s. ISBN 80-7300-023-7.
- [2] BIOLEK, D.; SENANI, R.; BIOLKOVA, V.; KOLKA, Z. Active Elements for Analog Signal Processing: Classification, Review and New Proposals. Radioengineering. 2008, vol. 17, no. 4. ISSN 1210-2512.
- [3] KOTON, J.; HERENCŠÁR, N.; VRBA, K.; JERÁBEK, J. Digitally Adjustable Current Amplifier and its Application in Fully Differential Current-Mode Band-Pass Filter Design. Elektrotechnika – Internetový časopis (<http://www.elektrotechnika.cz>), 2010, roc. 2010, c. 90, s. 1-6. ISSN: 1213- 1539.

**Termín zadání:** 9.2.2015

**Termín odevzdání:** 2.6.2015

**Vedoucí práce:** Ing. Josef Polák

**Konzultanti semestrální práce:**

**doc. Ing. Jirí Mišurec, CSc.**  
*Předseda oborové rady*

### **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 následku 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.

Výzkum popsáný v této bakalářské práci byl realizováný v laboratořích podpořených projektem Centrum senzorických, informačních a komunikačních systémů (SIX); registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace.

## **ABSTRAKT**

Bakalářská práce je zaměřena na simulace a praktickou realizaci již existujících zapojení kmitočtových filtrů s moderními aktivními prvky v proudovém módu. V simulacích byl použit nově ABM model (Analog Behavioral Model) prvku DACA (Digital Adjustable Current Amplifier). První část práce pojednává o problematice analogových kmitočtových filtrů. Druhá část se zabývá seznámením s použitými aktivními prvky - digitálně říditelný proudový zesilovač DACA, vícevýstupový proudový sledovač MO-CF (Multiple Output Current Follower), transkonduktanční zesilovač BOTA (Balanced transconductance amplifier) a universální proudový konvektor UCC (universal current conveyor). Na základě provedených simulací byla vybrána čtyři filtrační zapojení a ta byla realizována do podoby desek plošných spojů (DPS). První zapojení umožňuje měnit pomocí prvku DACA činitel jakosti. Druhé zapojení umožňuje měnit pomocí prvků DACA činitel jakosti i charakteristický kmitočet. Třetí a čtvrtý filtr jsou simulovány a realizovány v diferenční i nediferenční verzi. U třetího a čtvrtého zapojení je možné pomocí stejné změny proudového zesílení u prvků DACA měnit charakteristický kmitočet. Poslední část se zabývá vyhodnocením výsledků provedených simulací a praktického měření.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

kmitočtový filtr, proudový zesilovač, proudový sledovač, proudový konvektor, transkonduktanční zesilovač, proudový mód, plně diferenční filtr, univerzální filtr, DACA, MOCF, UCC, BOTA

## **ABSTRACT**

This bachelor thesis is focused on simulations and practical realizations of already existing frequency filters with modern active components in current mode. New simulation ABM model (Analog Behavioral Model) of DACA (Digital Adjustable Current Amplifier) element was used in the simulations. The first part informs about problems concerning analogue frequency filters. The second part deals with used active components - DACA (Digital Adjustable Current Amplifier), MO-CF (Multiple Output Current Follower), BOTA (Balanced transconductance amplifier) and UCC (universal current conveyor). Four circuits have been chosen and implemented into PCB (printed circuit board) on the basis of simulation results. The first circuit tunes the quality factor with help of DACA component. The second circuit tunes the natural frequency and quality factor with help of DACA components. The third and the fourth circuits are simulated and implemented in differential and also in single ended forms. These circuits tune the natural frequency with help of the same set of current amplification by DACA components. The last part is summary of simulation's and practical measurement's result of this project.

## **KEYWORDS**

frequency filter, current amplifier, current follower, current conveyor, transconductance amplifier, current mode, fullydifferential filter, universal filter, DACA, MOCF, UCC, BOTA

PÁNEK, D. *Analýza filtračních struktur s říditelnými zesilovači*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 70 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Josef Polák.

# PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma *Analýza filtračních struktur s říditelnými zesilovači* 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 práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. Díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

# PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Josefu Polákovi za velmi užitečnou odbornou pomoc a cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

Speciální dík patří Ing. Vilému Kledrowtzovi, Ph.D. za pomoc se základními funkcemi simulačního programu OrCad.

# OBSAH

<b>Úvod</b>	<b>16</b>
<b>1 Základní typy filtrů</b>	<b>17</b>
1.1 Pasivní filtry.....	17
1.2 Aktivní filtry .....	18
1.3 Nediferenční filtry.....	18
1.4 Diferenční filtry .....	19
1.5 Základní parametry kmitočtových filtrů.....	20
1.5.1 Charakteristický kmitočet .....	21
1.5.2 Činitel jakosti.....	22
1.5.3 Řád filtru.....	22
<b>2 Vybrané aktivní prvky a jejich vlastnosti</b>	<b>24</b>
2.1 Univerzální proudový konvektor .....	24
2.2 Digitálně říditelný proudový zesilovač DACA .....	25
2.3 Transkonduktanční zesilovač OTA .....	27
2.3.1 BOTA.....	27
2.4 Proudový sledovač MO-CF .....	28
<b>3 Návrh Desek plošných spojů použitím návrhového prostředí eagle</b>	<b>30</b>
3.1 Zásady dodržované při návrhu desek plošných spojů (DPS) .....	30
3.2 Použitá pouzdra součástek při návrhu DPS a její realizaci.....	30
<b>4 Výsledky simulací a praktického měření</b>	<b>32</b>
4.1 Schématické znázornění zapojení měřícího pracoviště .....	32
4.2 Nediferenční multifunkční kmitočtový filtr s prvky BOTA a DACA....	33
4.2.1 Numerické hodnoty jednotlivých prvků zapojení.....	33
4.2.2 Výsledky praktického měření a provedených simulací .....	34
4.3 Nediferenční multifunkční filtr s možností řízení změny činitele jakosti a charakteristického kmitočtu pomocí třech prvků DACA a dvou proudových konvektorů druhé generace .....	37
4.3.1 Numerické hodnoty jednotlivých prvků zapojení.....	38
4.3.2 Výsledky praktického měření a provedených simulací .....	39

4.4	Diferenční multifunkční filtr s použitím dvou prvků DACA a šesti proudových sledovačů.....	42
4.4.1	Schematické zapojení diferenční a nediferenční verze filtru.....	42
4.4.2	Numerické hodnoty jednotlivých prvků zapojení.....	43
4.4.3	Výsledky praktického měření a provedených simulací .....	44
4.5	Diferenční filtr DP a PP s použitím dvou prvků DACA a čtyř proudových sledovačů.....	47
4.5.1	Schematické zapojení diferenční a nediferenční verze filtru.....	47
4.5.2	Numerické hodnoty jednotlivých prvků zapojení.....	48
4.5.3	Výsledky praktického měření a provedených simulací .....	49
<b>5</b>	<b>Závěr</b>	<b>53</b>
	<b>Literatura</b>	<b>55</b>
	<b>Seznam použitých zkratek</b>	<b>56</b>
	<b>Seznam příloh</b>	<b>57</b>

# SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Ideální výstupní modulové charakteristiky a) DP, b) HP, c) PP d) PZ .....	17
Obr. 2 Znázornění proudů pro vyjádření nediferenčního proudového přenosu .....	19
Obr. 3 Znázornění proudů pro vyjádření diferenčního proudového přenosu .....	20
Obr. 4 Neideální výstupní modulové charakteristiky s vyznačeným charakteristickým kmitočtem a) DP, b) HP, c) PP d) PZ .....	21
Obr. 5 Vliv změny činitele jakosti na a) DP a b) PP .....	22
Obr. 6 Vliv řádu filtru na DP .....	23
Obr. 7 Schematická značka univerzálního konvejeoru UCC .....	24
Obr. 8 Schematická značka UCC N1B .....	25
Obr. 9 Schematická značka proudového zesilovače DACA.....	26
Obr. 10 Použitý simulační ABM model (Analog Behavioral Model) třetí úrovně prvku DACA .....	26
Obr. 11 Schematická značka prvku BOTA .....	27
Obr. 12 Realizace prvku BOTA pomocí univerzálního proudového konvejeoru UCC... ..	28
Obr. 13 Schematická značka prvku MO-CF.....	28
Obr. 14 Realizace proudového sledovače pomocí univerzálního proudového konvejeoru .....	29
Obr. 15 Realizace proudového sledovače se dvěma výstupy pomocí proudového konvejeoru CCII +/-.....	29
Obr. 16 Schematické znázornění poloviny čipu DACA a příslušných pasivních součástí v návrhovém prostředí EAGLE.....	31
Obr. 17 Schematické znázornění čipu UCC a příslušných pasivních součástí v návrhovém prostředí EAGLE .....	31
Obr. 18 Schematické znázornění měřicího pracoviště pro měření diferenčních filtrů ...	32
Obr. 19 Schematické znázornění měřicího pracoviště pro měření nediferenčních filtrů	32
Obr. 20 Schematické zapojení univerzálního kmitočtového filtru s nastavitelnou změnou činitele jakosti .....	33
Obr. 21 Výsledky praktického měření (plná čára) a simulací (přerušovaná čára) - Modulová kmitočtová charakteristika filtračních funkcí typu DP, HP, PP a PZ ( $A_Q=3$ , $R_g = 2k4$ ) .....	34
Obr. 22 Výsledky praktického měření (plná čára) a simulací (přerušovaná čára) - Modulová kmitočtová charakteristika filtrační funkce typu DP pro různé velikosti rezistorů $R_g$ .....	35

Obr. 23 Výsledky praktického měření (plná čára) a simulací (přerušovaná čára) - Modulová kmitočtová charakteristika se změnou $Q$ filtrační funkce PP v závislosti na změně $A_Q$ .....	35
Obr. 24 Schematické zapojení filtru .....	37
Obr. 25 Výsledky praktického měření (plná čára) a simulací (přerušovaná čára) - Modulová kmitočtová charakteristika filtračních funkcí typu DP, HP, PP a PZ ( $A_{1,2} = 1, A_Q = 2$ ).....	39
Obr. 26 Výsledky praktického měření (plná čára) a simulací (přerušovaná čára) - Modulová kmitočtová charakteristika pro filtrační funkci PP se změnou $A_Q$ .....	39
Obr. 27 Výsledky praktického měření (plná čára) a simulací (přerušovaná čára) – Modulová kmitočtová charakteristika pro filtrační funkci DP a vliv změny $A_{1,2}$ na charakteristický kmitočet (Zesílení $A_{1,2}$ nastaveno na 1,3 a 6) .....	40
Obr. 28 Schéma zapojení nediferenční verze filtru .....	42
Obr. 29 Schéma zapojení diferenční verze filtru .....	43
Obr. 30 Výsledky praktického měření F-D filtru (plná čára) a S-E filtru (přerušovaná čára) - Modulová kmitočtová charakteristika filtračních funkcí typu DP, HP, PP a PZ ( $A_{1,2} = 2$ ) .....	44
Obr. 31 Výsledky praktického měření F-D filtru (plná čára) a simulací (přerušovaná čára) - Modulová kmitočtová charakteristika filtračních funkcí typu DP, HP, PP a PZ (Reálné $A_{1,2} = 2$ a simulované $A_{1,2} = 1$ ) .....	44
Obr. 32 Výsledky praktického měření S-E filtru (plná čára) a simulací (přerušovaná čára) - Modulová kmitočtová charakteristika filtračních funkcí typu DP, HP, PP a PZ ( $A_{1,2} = 2$ ) .....	45
Obr. 33 Výsledky praktického měření F-D filtru (plná čára) a S-E filtru (přerušovaná čára) – Modulová kmitočtová charakteristika pro filtrační funkci DP a vliv změny $A_{1,2}$ na charakteristický kmitočet (Zesílení $A$ nastaveno na 1,2,3 a 4) .....	45
Obr. 34 Schéma zapojení nediferenční verze filtru .....	47
Obr. 35 Schéma zapojení diferenční verze filtru .....	48
Obr. 36 Výsledky praktického měření F-D filtru (plná čára) a S-E filtru (přerušovaná čára) - Modulová kmitočtová charakteristika filtračních funkcí typu DP, HP, PP a PZ ( $A_{1,2} = 2$ ) .....	49
Obr. 37 Výsledky praktického měření F-D filtru (plná čára) a simulací (přerušovaná čára) - Modulová kmitočtová charakteristika filtračních funkcí typu DP a PP (Reálné $A_{1,2} = 2$ a simulované $A_{1,2} = 1$ ).....	49
Obr. 38 Výsledky praktického měření S-E filtru (plná čára) a simulací (přerušovaná čára) - Modulová kmitočtová charakteristika filtračních funkcí typu DP, HP, PP a PZ ( $A_{1,2} = 2$ ) .....	50
Obr. 39 Výsledky praktického měření F-D filtru (plná čára) a S-E filtru (přerušovaná	

čára) – Modulová kmitočtová charakteristika pro filtrační funkci DP a vliv změny $A_{1,2}$ na charakteristický kmitočet (Zesílení A nastaveno na 2,3 a 4) .....	50
Obr. 40 DPS - Nediferenční multifunkční kmitočtový filtr s prvky BOTA a DACA – strana TOP .....	58
Obr. 41 DPS - Nediferenční multifunkční kmitočtový filtr s prvky BOTA a DACA – strana BOTTOM .....	58
Obr. 42 DPS - Nediferenční filtr s možností řízení změny činitele jakosti a charakteristického kmitočtu pomocí třech prvků DACA – strana TOP .	59
Obr. 43 DPS - Nediferenční filtr s možností řízení změny činitele jakosti a charakteristického kmitočtu pomocí třech prvků DACA – strana TOP BOTTOM.....	59
Obr. 44 DPS - Nediferenční univerzální filtr s použitím dvou prvků DACA a tří proudových sledovačů – strana TOP .....	60
Obr. 45 DPS - Nediferenční univerzální filtr s použitím dvou prvků DACA a tří proudových sledovačů – strana BOTTOM.....	60
Obr. 46 DPS - Diferenční univerzální filtr s použitím dvou prvků DACA a šesti proudových sledovačů – strana TOP .....	61
Obr. 47 DPS - Diferenční univerzální filtr s použitím dvou prvků DACA a šesti proudových sledovačů – strana BOTTOM.....	62
Obr. 48 DPS - Nediferenční univerzální filtr s použitím dvou prvků DACA a dvou proudových sledovačů – strana TOP .....	63
Obr. 49 DPS - Nediferenční univerzální filtr s použitím dvou prvků DACA a dvou proudových sledovačů – strana BOTTOM.....	63
Obr. 50 DPS - Diferenční univerzální filtr s použitím dvou prvků DACA a čtyř proudových sledovačů – strana TOP .....	64
Obr. 51 DPS - Diferenční univerzální filtr s použitím dvou prvků DACA a čtyř proudových sledovačů – strana BOTTOM.....	65
Obr. 52 Fázové charakteristiky a) DP, b) HP, c) PP, d) PZ - Nediferenční multifunkční kmitočtový filtr s prvky BOTA a DACA .....	66
Obr. 53 Fázové charakteristiky a) DP, b) HP, c) PP, d) PZ - Nediferenční filtr s možností řízení změny činitele jakosti a charakteristického kmitočtu pomocí třech prvků DACA .....	67
Obr. 54 Fázové charakteristiky a) DP, b) HP, c) PP, d) PZ, e)DP dif, f) HP dif, g) PP dif, h) PZ dif - Diferenční univerzální filtr s použitím dvou prvků DACA a šesti proudových sledovačů .....	68
Obr. 55 Fázové charakteristiky a) DP, b) HP, c) PP, d) PZ, e)DP dif, f) PP dif - Diferenční univerzální filtr s použitím dvou prvků DACA a čtyř proudových sledovačů .....	69

## SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Nastavení zesílení aktivního prvku DACA pomocí bitového slova .....	26
Tabulka 2 Hodnoty transkonduktance odpovídající hodnotám zvolených rezistorů $R_g$ .	34
Tabulka 3 Porovnání hodnot charakteristického kmitočtu .....	36
Tabulka 4 Porovnání hodnot činitele jakosti .....	36
Tabulka 5 Porovnání hodnot pro pokles přenosu na dekádu (DP, HP, PP) a pokles při charakteristickém kmitočtu (PZ) pro hodnotu $A_Q = 3$ .....	36
Tabulka 6 Porovnání hodnot charakteristického kmitočtu .....	40
Tabulka 7 Porovnání hodnot činitele jakosti .....	41
Tabulka 8 Porovnání hodnot pro pokles přenosu na dekádu (DP, HP, PP) a pokles při charakteristickém kmitočtu (PZ) .....	41
Tabulka 9 Porovnání hodnot charakteristického kmitočtu .....	46
Tabulka 10 Porovnání hodnot činitele jakosti .....	46
Tabulka 11 Porovnání hodnot pro pokles přenosu na dekádu (DP, HP, PP) a pokles při charakteristickém kmitočtu (PZ) .....	46
Tabulka 12 Porovnání hodnot charakteristického kmitočtu .....	51
Tabulka 13 Porovnání hodnot činitele jakosti .....	51
Tabulka 14 Porovnání hodnot pro pokles přenosu na dekádu (DP, HP, PP) a pokles při charakteristickém kmitočtu (PZ) .....	51

# ÚVOD

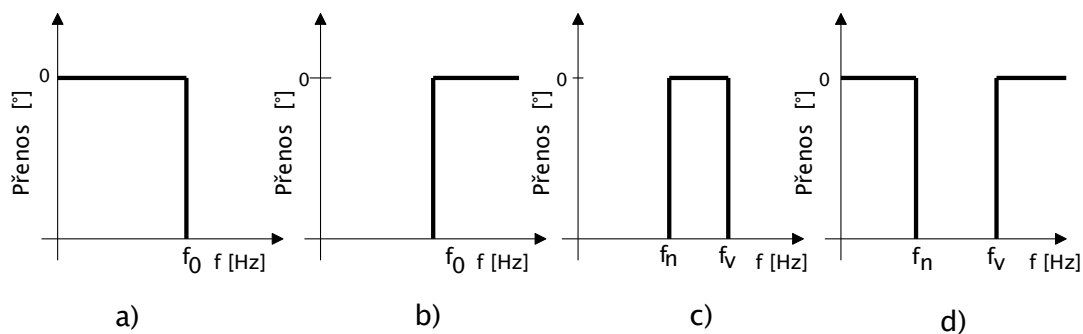
I přes to, že v dnešní době dominuje digitální technika, stále se nelze obejít bez analogového zpracování signálu. Stále nacházíme situace, kdy je výhodnější použít analogovou techniku z důvodu menší složitosti systému a menší pořizovací ceně. Tato práce se zabývá kmitočtovými filtry pracující v proudovém módu s aktivními prvky, které jsou navrženy pro použití v proudovém módu, který se v poslední době stává populárním zejména kvůli rostoucímu nároku na snížení napájecího napětí aktivních prvků a vyššímu nároku pracovat na značně vyšších kmitočtových pásmech. Filtrační struktury pracující v proudovém módu s sebou přináší také menší vliv parazitních kapacit. Kmitočtové filtry jsou charakterizovány několika základními parametry a vlastnostmi. Zejména pak můžeme zmínit charakteristický kmitočet a činitel jakosti filtru. Současné návrhy analogových kmitočtových filtrů se často zabývají možností elektronického nastavení charakteristického kmitočtu či činitele jakosti. To sebou přináší výhodu převážně v tom, že při nutnosti změny těchto parametrů není třeba měnit žádné součástky a zasahovat tak do již hotového zapojení. V této práci jsou zkoumány kmitočtové filtry obsahující proudový zesilovač DACA (Digital Adjustable Current Amplifier), jehož zajímavou vlastností je především možnost digitálního řízení (pomocí tříbitové sběrnice), které umožňuje binárně měnit zesílení aktivního prvku od 1 do 8. Správně navržený kmitočtový filtr obsahující zesilovač DACA, případně několik těchto zesilovačů, je schopný měnit pomocí této tříbitové sběrnice některé základní parametry filtru.

# 1 ZÁKLADNÍ TYPY FILTRŮ

Kmitočtové filtry můžeme dělit podle různých hledisek a vlastností. Podle funkce filtru a odpovídajícího tvaru kmitočtové charakteristiky je dělíme do tří základních skupin – selektivní filtry, korekční filtry a fázovací obvody. Dále můžeme filtry dělit na pasivní a aktivní či diferenční a nediferenční.

Tato práce se bude zabývat pouze selektivními aktivními filtry pracující v proudovém módu, které mají za úkol potlačit přenos kmitočtových složek signálu v nepropustném pásmu. Podle potlačovaného pásma je dělíme do několika skupin[1]:

- Dolní propust (DP), propouští složky signálu menší než charakteristický kmitočet  $f_0$ .
- Horní propust (HP), propouští složky signálu o kmitočtech vyšších než charakteristický kmitočet  $f_0$ .
- Pásmová propust (PP), propouští složky signálu mezi charakteristickým dolním kmitočtem  $f_n$  a horním charakteristickým kmitočtem  $f_v$ .
- Pásmová zadrž (PZ), nepropouští složky signálu mezi charakteristickým dolním kmitočtem  $f_n$  a horním charakteristickým kmitočtem  $f_v$ .



Obr. 1 Ideální výstupní modulové charakteristiky a) DP, b) HP, c) PP d) PZ

## 1.1 Pasivní filtry

Podle použitých součástek při návrhu se kmitočtové filtry dělí na pasivní a aktivní. Pasivní filtry jsou obecně tvořeny pouze prvky R, L, a C (rezistor, induktor, kapacitor). Jejich kombinacemi vytváříme výsledné obvody LC, RC, RLC.

Za hlavní výhody pasivních filtrů považujeme především velmi příznivou cenu a

nepotřebnost externího zdroje napájení. Pasivní filtry samostatně vykazují jen slabé selektivní vlastnosti. Můžeme z nich sestavit jen nekvalitní filtry a to všech dříve uvedených typů DP, PP, HP a PZ. U RLC filtrů je největší slabinou rozměrnost cívek pro nízké kmitočty a proto jsou cívky nahrazovány aktivními prvky. RC i RLC filtry dosahují malého činitele jakosti ( $Q < 0,5$ ) a používají se pouze v prvním a druhém řádu. Obecně platí, že vyšším řádem filtru se dosáhne vyšší strmosti a tím důraznějšího oddělení propustného a nepropustného pásma. Pasivní filtry vyšších řádů se používají pouze výjimečně.[1][2]

## 1.2 Aktivní filtry

V dnešní době se převážně používají aktivní filtry místo pasivních. Aktivní prvek v kombinaci s pasivními prvky vytváří výslednou filtrační strukturu. Výhody aktivních filtrů spočívají v tom, že umožňují pracovat s kmitočty a signály, které by samotné pasivní filtry nebyly schopné realizovat.

Pomocí aktivních prvků jsme schopni měnit základní parametry kmitočtových filtrů jako je možnost nezávisle nastavovat činitel jakosti a charakteristický kmitočet. Dále dosahují mnohem vyšších hodnot činitele jakosti než pasivní filtry. Pro vytváření požadovaného řádu používáme pasivní akumulární prvky (většinou kondenzátor).

Nejznámějším aktivním prvkem, který se používá, je operační zesilovač. Díky operačnímu zesilovači je možné výborně filtrovat signály o nízkých frekvencích a díky vysokému vstupnímu odporu téměř nezatěžovat samotný filtr. V dnešní době se vyvíjejí různé druhy aktivních prvků, jako jsou různé zesilovače proudu (DACA), napěťové a proudové konvejory různých generací (CCx, ICCx), transkonduktanční zesilovače (OTA, BOTA) a mnohé další. Nevýhodou oproti pasivním filtrům je nutnost napájení, ale díky moderním postupům výroby těchto prvků se jejich nároky na napájecí napětí zmenšují. Jejich kmitočtový rozsah použití je ale omezen šířkou pásma daného operačního zesilovače.[1] [3] [4]

## 1.3 Nediferenční filtry

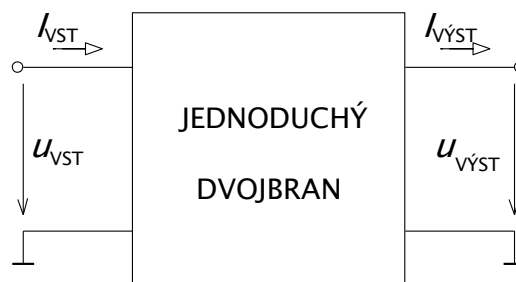
Dále se kmitočtové filtry rozlišují podle struktury zapojení a způsobu zpracování signálu na nediferenční a diferenční. Prvním z nich jsou nediferenční filtry, které se

anglicky nazývají single ended (S-E), což lze chápat jako jednoduše zakončené. Za nediferenční filtry tedy považujeme takové, které používají jednoduchý nerozdílový vstup a jeden (SISO – single input single output) případně více na sobě nezávislých jednoduchých výstupů (SIMO – single input multiple output). Nediferenční proudový přenos je definován jako poměr výstupního a vstupního proudu

(násobený -1), za předpokladu, že výstupní proudy jsou dle konvence značeny dovnitř. Vzhledem ke znaménku mínus výstupní proud ale teče vlastně ven. Budeme li uvažovat orientaci proudů podle obr. 2, přenos je potom kladně vzatý podíl proudů[9], tj.:

$$K_I = \frac{I_{VYST}}{I_{VST}}, \quad (1.1)$$

kde  $K_I$  je proudový přenos filtru,  $I_{VYST}$  je výstupní nediferenční proud a  $I_{VST}$  vstupní nediferenční proud.



Obr. 2 Znázornění proudů pro vyjádření nediferenčního proudového přenosu

## 1.4 Diferenční filtry

Diferenční filtry (Fully differential, zk. F-D) jsou takové, které mají jeden pár (diferenčních) vstupů a alespoň jeden pár (diferenčních) výstupů, které nesou stejnou informaci lišící se v opačné fázi a výsledný nosný signál je daný rozdílem dvou vstupních, respektive výstupních signálů. Své uplatnění nacházejí např. v mobilních a telefonních zařízeních. Nezastupitelné jsou při filtrování signálu na symetrickém vedení. Diferenční filtry sebou přinášejí řadu výhod, ale také nevýhod.[3]

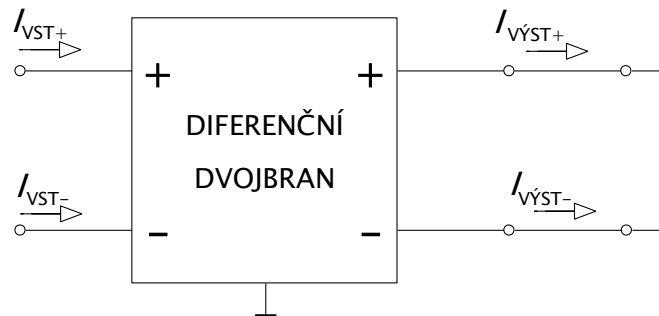
Výhody:

- zvyšují procento potlačení soufázového signálu
- vyšší dynamický rozsah
- odstranění harmonického zkreslení signálu

- omezení efektu výkonového zesílení.

Nevýhody:

- k realizaci je potřeba zhruba dvojnásobek pasivních a aktivních prvků oproti nediferenční struktuře
- výsledné zapojení zabírá větší čipovou oblast
- vyšší spotřeba elektrické energie
- složitější zapojení.



**Obr. 3** Znárodnění proudů pro vyjádření diferenčního proudového přenosu

Diferenční proudový přenos je definován jako poměr diferenčního výstupního a diferenčního vstupního proudu (násobený -1), za předpokladu, že výstupní proudy jsou dle konvence značeny dovnitř. Vzhledem ke znaménku mínus výstupní proud ale teče vlastně ven. Budeme-li uvažovat orientaci proudů podle obr. 3, přenos je potom kladně vzatý podíl rozdílových proudů[9], tj.:

$$K_I = \frac{I_{VYST+} - I_{VYST-}}{I_{VST+} - I_{VST-}} = \frac{I_{VYST(DIF)}}{I_{VST(DIF)}} \quad (1.2)$$

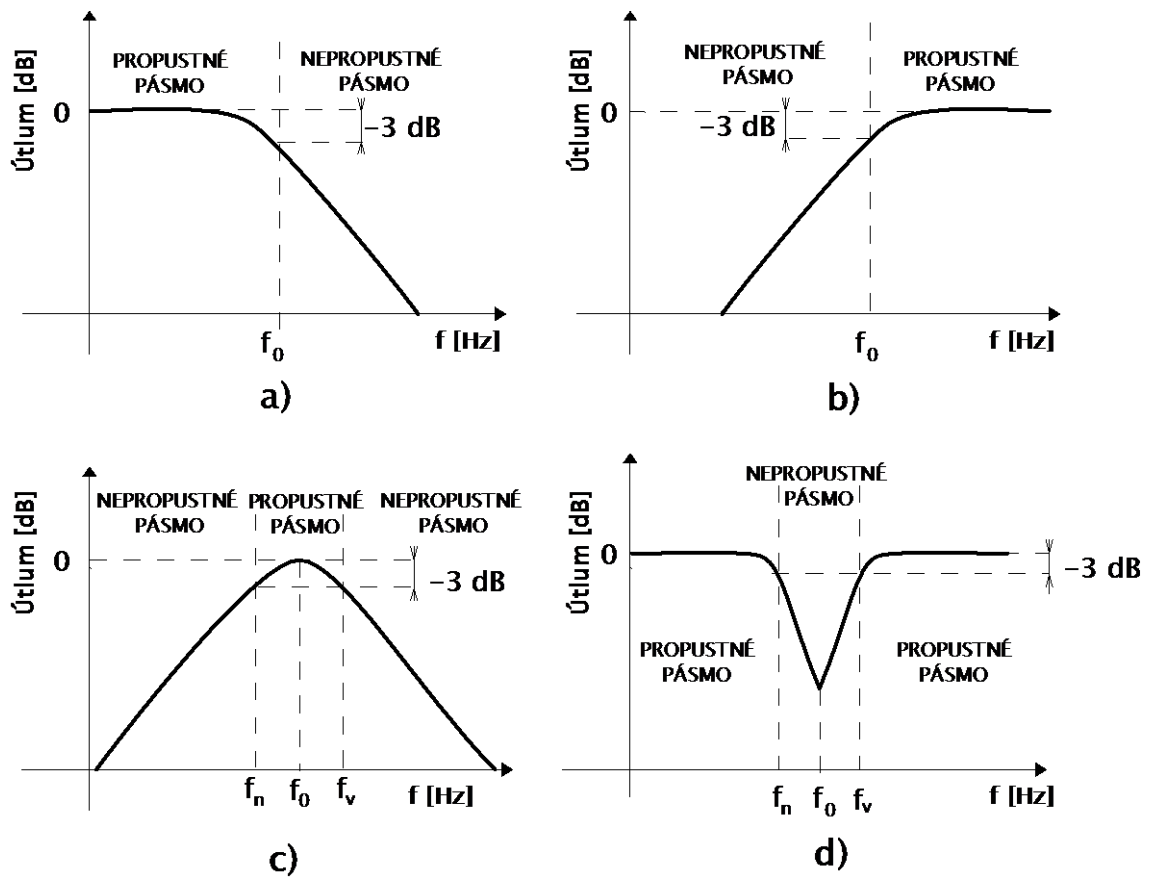
Kde  $K_I$  je proudový přenos filtru,  $I_{VYST(DIF)}$  je výstupní diferenční proud daný rozdílem výstupních proudů  $I_{VYST+}$  a  $I_{VYST-}$  a  $I_{VST(DIF)}$  je vstupní diferenční proud daný rozdílem vstupních proudů  $I_{VST+}$  a  $I_{VST-}$ .

## 1.5 Základní parametry kmitočtových filtrů

Všechny filtry bez ohledu na jejich typ se navrhují pomocí několika základních parametrů. K těmto parametrům patří řád filtru, činitel jakosti  $Q$  a charakteristický kmitočet  $f_0$ . K dalším parametrům patří například typ aproximace.[1]

### 1.5.1 Charakteristický kmitočet

Charakteristický kmitočet rozděljuje kmitočtové pásmo na propustné a nepropustné a je označován jako  $f_0$ . U přenosových funkcí typu DP a HP je to takový kmitočet, který naměříme při poklesu modulové charakteristiky o 3 dB. Naopak u přenosových funkcí typu PP a PZ je to takový kmitočet, kde dosahuje útlum nejnižší (PP) a nejvyšší (PZ) hodnoty útlumu. Při poklesu o 3 dB od  $f_0$  na obě strany od  $f_0$  lze zjistit šířku propustného pásma u PP. Nepropustné pásmo je ohraničeno kmitočty naměřenými při poklesu úrovně signálu o 3 dB (viz. Obr. 4). Šířka kmitočtového pásma je ohraničena dolní hranicí kmitočtového pásma ( $f_n$ ) a horní hranicí kmitočtového pásma ( $f_v$ ).



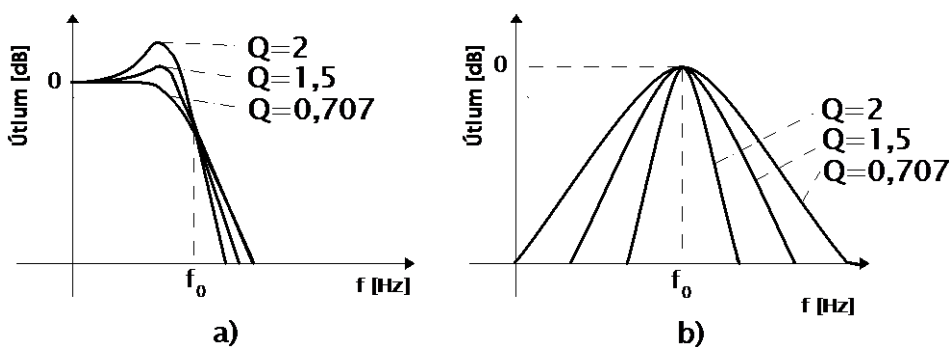
Obr. 4 Neideální výstupní modulové charakteristiky s vyznačeným charakteristickým kmitočtem a) DP, b) HP, c) PP d) PZ

## 1.5.2 Činitel jakosti

Činitel jakosti nebo také činitel kvality je označován jako Q (Quality factor) a určuje kvalitu přechodu mezi propustným a nepropustným pásmem. U přenosových funkcí typu DP a HP s rostoucím Q sice roste strmost charakteristiky přechodu mezi pásmy, zároveň ale dochází ke vzniku překmitů v přechodovém pásmu a tím dochází k poklesu kvality přenášeného signálu, což může vést k deformaci užitečného signálu. Je tedy nutné stanovit určité kompromisy mezi přesností přechodu z propustného pásma do nepropustného a kvalitou přenášeného signálu na frekvenci blízké  $f_0$ . U filtračních funkcí typu PP a PZ dochází změnou Q k regulaci šířky propustného či nepropustného pásma (viz. Obr. 5). Činitel jakosti lze vypočítat například z modulové kmitočtové charakteristiky pro funkci PP pomocí následujícího vzorce:

$$Q = \frac{f_0}{(f_v - f_n)}, \quad (1.3)$$

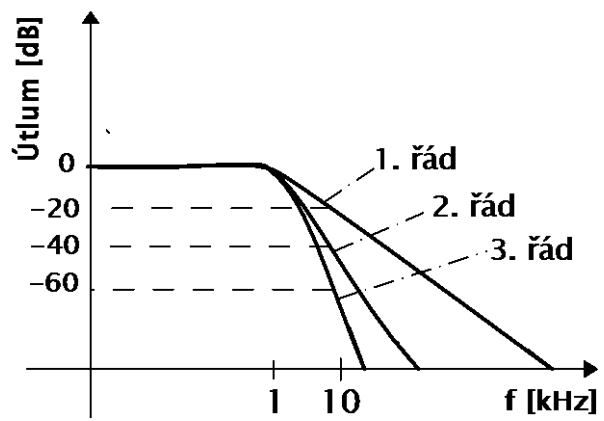
kde  $f_0$  je charakteristický kmitočet a  $f_v$  a  $f_n$  jsou kmitočty při poklesu o 3 dB (viz. Obr. 4 c).



Obr. 5 Vliv změny činitele jakosti na a) DP a b) PP

## 1.5.3 Řád filtru

Řád filtrů je určen počtem pasivních filtračních článků a má vliv především na strmost přechodu mezi propustným a nepropustným pásmem, kdy s každým vyšším řádem roste útlum strmosti na dekádu o 20 dB. Zároveň však s každým vyšším řádem roste složitost zapojení filtrů. Je tedy potřeba zvážit kompromis mezi jednoduchostí zapojení a strmostí.



Obr. 6 Vliv řádu filtru na DP

## 2 VYBRANÉ AKTIVNÍ PRVKY A JEJICH VLASTNOSTI

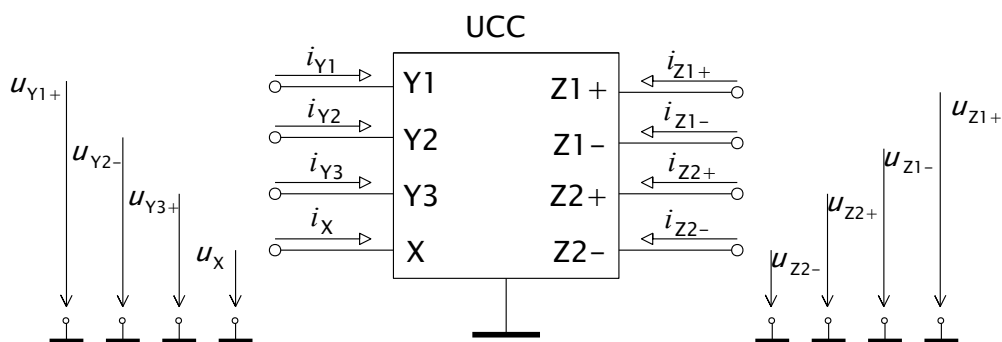
Tato kapitola se zabývá popisem aktivních prvků použitých v realizovaných zapojeních kmitočtových filtrů, jejichž vlastnosti jsou podrobně zkoumány v kapitole č. 4.

### 2.1 Univerzální proudový konvektor

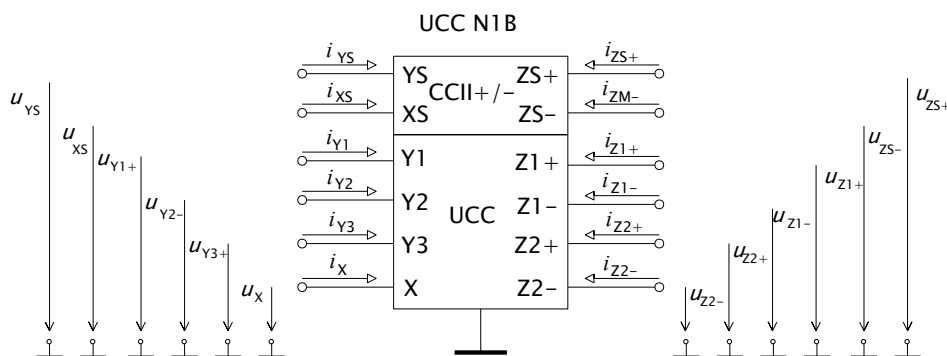
Univerzální proudový konvektor, označovaný UCC, je definován jako obecný osmibrán. UCC je charakterizován třemi vysokoimpedančními napěťovými vstupy (Y1, Y2 a Y3) a jedním nízkoimpedančním vstupem (X), přičemž dva jsou rozdílové (Y1, Y2) a dva součtové (Y1, Y3). Dále je UCC charakterizováno čtyřmi proudovými výstupy (Z1+, Z1-, Z2+, Z2-) [7]. V praktickém měření byl použit čip s označením UCC-N1B jenž obsahuje univerzální proudový konvektor UCC společně s proudovým konvejorem druhé generace CCII+/- (Obr. 8). Toho můžeme využít například i pro realizaci jednoduchého proudového sledovače se dvěma výstupy bez nutné přítomnosti další součástky na desce plošných spojů (DPS). UCC je obecně popsán pomocí rovnic[9]:

$$u_X = u_{Y1+} - u_{Y2-} + u_{Y3+}, \quad (2.1)$$

$$i_{Z1+} = i_{Z2+} = -i_{Z1-} = -i_{Z2-} = i_X. \quad (2.2)$$



Obr. 7 Schematická značka univerzálního konvektoru UCC



Obr. 8 Schematická značka UCC N1B

Hlavní výhodou UCC je jeho univerzálnost. Prakticky všechny doposud existující typy proudových konvektorů mohou být realizovány pomocí UCC vhodným zapojením jednotlivých svorek.

## 2.2 Digitálně říditelný proudový zesilovač DACA

Digitálně říditelný proudový zesilovač DACA (Digital Adjustable Current Amplifier) se vyznačuje zejména proměnným zesílením proudu ( $A$ ) a také diferenčním charakterem vstupu i výstupu.[3][8]

Zesilovač DACA dále obsahuje tříbitovou sběrnici, pomocí které lze měnit binárně proudové zesílení  $A$  ideálně od 1 do 8. Prakticky jsou však hodnoty zesílení menší, srovnání ideálních a neideálních hodnot zesílení  $A$  lze vidět v tab. 1. Každý zesilovač DACA má však své specifické vlastnosti a neideální hodnoty v tab. 1 jsou tedy pouze orientační. Hodnoty neideálního zesílení byly získány z ABM modelu v programu OrCad. U kmitočtových filtrů můžeme této dálkově ovládané sběrnice využít k nastavování činitele jakosti  $Q$  a změně charakteristického kmitočtu  $f_0$ .

Prvek DACA je popsán rovnicemi[9] :

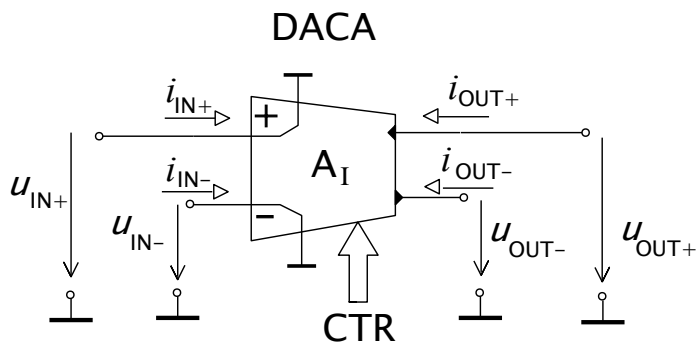
$$i_{ID} = i_{IN+} - i_{IN-}, \quad i_{OD} = i_{OUT+} - i_{OUT-}, \quad (2.3,2.4)$$

$$i_{OD} = 2Ai_{ID}, \quad i_{OUT+} = A(i_{IN+} - i_{IN-}), \quad (2.5,2.6)$$

$$i_{OUT-} = -A(i_{IN+} - i_{IN-}), \quad (2.7)$$

kde  $i_{ID}$  v rovnici 2.3 a 2.5 představuje diferenční vstupní proud,  $i_{OD}$  v rovnici 2.4 a 2.5 představuje diferenční výstupní proud a  $A$  v rovnicích 2.5 až 2.7 představuje proudové zesílení prvku DACA. Vstupní proud je označen  $i_{IN}$  a výstupní proud  $i_{OUT}$ . Z rovnic je zřejmé, že diferenční zesílení proudu je dvojnásobné oproti nediferenčnímu

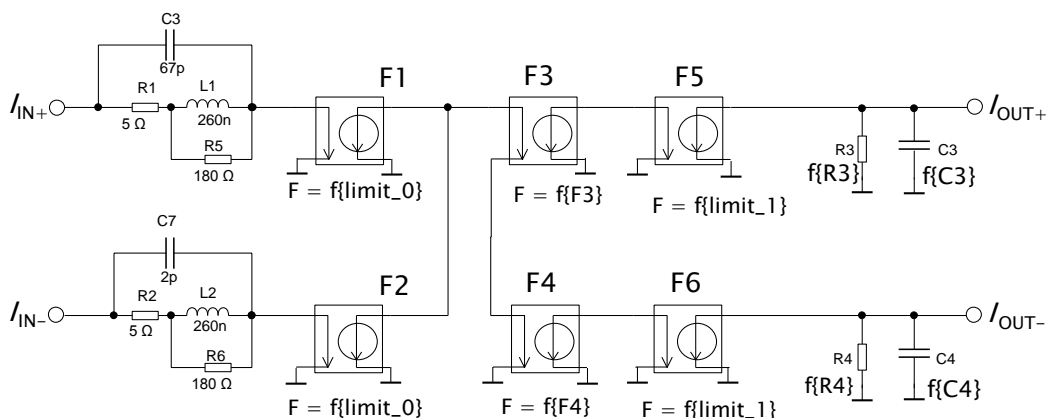
proudovému zesílení.



Obr. 9 Schematická značka proudového zesilovače DACA

Tab. 1: Nastavení zesílení aktivního prvku DACA pomocí bitového slova

Ideální	A			
	Neideální (OrCad)	3. bit	2. bit	1. bit
1	0,779	0	0	0
2	1,594	0	0	1
3	2,489	0	1	0
4	3,299	0	1	1
5	4,133	1	0	0
6	4,936	1	0	1
7	5,814	1	1	0
8	6,609	1	1	1



Obr. 10 Použitý simulační ABM model (Analog Behavioral Model) třetí úrovně prvku DACA

## 2.3 Transkonduktanční zesilovač OTA

Ideální prvek OTA (operational transconductance amplifier) je zdroj proudu řízený rozdílovým napětím, charakterizovaný kmitočtově nezávislou transkonduktancí  $g_m$  a jeho vstupní i výstupní impedance jsou teoreticky nekonečné. Obvykle má diferenční napěťový vstup a proudový výstup (OTA-DISO). Lze se setkat s typy, které disponují pouze jediným (nediferenčním) vstupem (OTA-SISO). Také jsou známy typy s více než jedním výstupem, ty mají velmi výhodné postavení v aplikacích především v proudovém módu a označují se například BOTA.[10]

### 2.3.1 BOTA

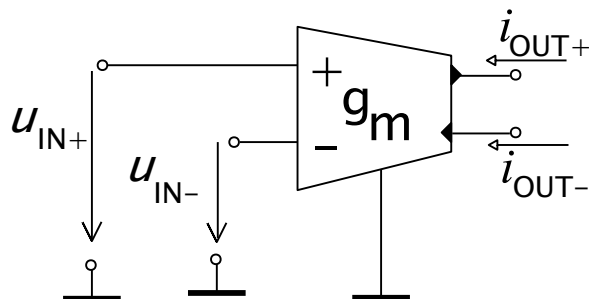
BOTA (balanced output OTA - transkonduktanční zesilovač s plovoucím výstupem). Jedná se zdroj proudu řízený napětím a jeho základním parametrem je transkonduktance  $g_m$ . Od zesilovače OTA se liší především dvěma výstupy.[10]

Prvek BOTA lze popsat rovnicemi:

$$i_{OUT+} = g_m(u_{IN+} - u_{IN-}), \quad (2.8)$$

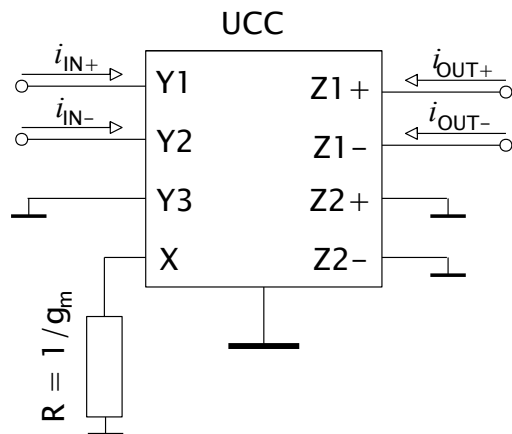
$$i_{OUT-} = -g_m(u_{IN+} - u_{IN-}) = -i_{OUT+}, \quad (2.9)$$

kde  $i_{OUT+}$  a  $i_{OUT-}$  jsou výstupní proudy,  $g_m$  je transkonduktance zesilovače BOTA a  $(u_{IN+} - u_{IN-})$  je rozdíl vstupních napětí.



Obr. 11 Schematická značka prvku BOTA

Transkonduktančního zesilovače BOTA můžeme dosáhnout několika způsoby. Například použitím dvou jednoduchých OTA nebo více OTA s více výstupy. Další způsob je použitím jednoho univerzálního proudového konveje UCC a jednoho rezistoru (viz. Obr. 12). Druhý jmenovaný způsob byl použit v následujícím zapojení univerzálního kmitočtového filtru.[4][11]



Obr. 12 Realizace prvku BOTA pomocí univerzálního proudového konvejeoru UCC

## 2.4 Proudový sledovač MO-CF

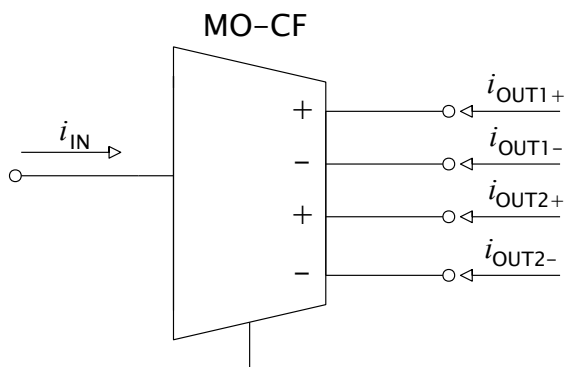
S proudovými sledovači se setkáváme u kmitočtových filtrů pracujícím v proudovém módu velmi často. Tyto aktivní prvky jsou označovány jako MO-CF (Multiple-Output Current Follower). Prvek je charakteristicky jedním proudovým vstupem a čtyřmi proudovými výstupy. Výhodou tohoto prvku je přítomnost pouze proudových výstupů s vysokou impedancí. Tuto vlastnost lze ocenit zejména v obvodech pracujících jako univerzální filtry (výstupem může být HP, DP, PP i PZ). [4][8][9]

Prvek MOCF je popsán rovnicemi:

$$i_{OUT1+} = i_{OUT2+} = i_{IN}, \quad (2.10)$$

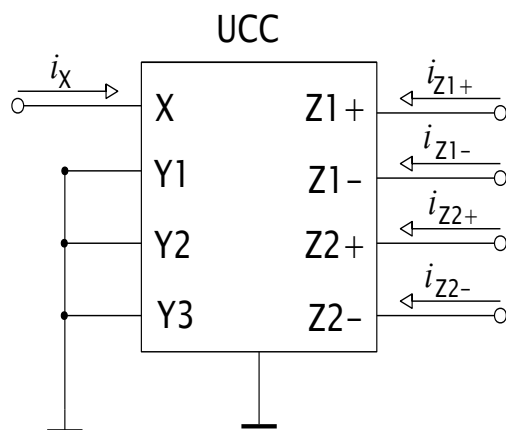
$$i_{OUT2-} = i_{OUT1-} = -i_{IN}, \quad (2.11)$$

kde  $i_{IN}$  je vstupní proud a  $i_{OUT}$  jsou výstupní proudy z proudového sledovače.

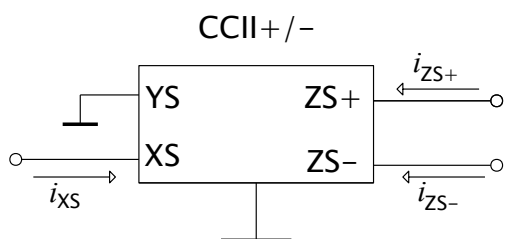


Obr. 13 Schematická značka prvku MO-CF

Prvek MO-CF je v této práci realizován s využitím prvku UCC popsaného výše a pomocí jednoduchého proudového konvejeoru druhé generace CCII. Pokud jsou uzemněny vstupy Y a pro vstupní signál použijeme vstupní svorku X (viz. obr. 14, 15) u proudového konvejeoru UCC nebo CCII+/-, bude chování prvku totožné s proudovým sledovačem MO-CF.



**Obr. 14** Realizace proudového sledovače pomocí univerzálního proudového konvejeoru



**Obr. 15** Realizace proudového sledovače se dvěma výstupy pomocí proudového konvejeoru CCII +/-

## **3 NÁVRH DESEK PLOŠNÝCH SPOJŮ POUŽITÍM NÁVRHOVÉHO PROSTŘEDÍ EAGLE**

V této kapitole se pojednává o nejdůležitějších zásadách dodržovaných při návrhu desek plošných spojů. Dále se v této kapitole nachází shrnutí použitých pouzder jednotlivých součástek. Samotné návrhy DPS provedené v návrhovém prostředí Eagle se pak nachází v příloze č. 1.

### **3.1 Zásady dodržované při návrhu desek plošných spojů (DPS)**

Při návrhu desek plošných spojů byly dodržovány určité zásady, která vedla ke zjednodušení návrhů, praktičnosti při měření a zejména k vyšší pravděpodobnosti správné funkčnosti realizovaných kmitočtových filtrů.

Mezi hlavní zásady platí zejména:

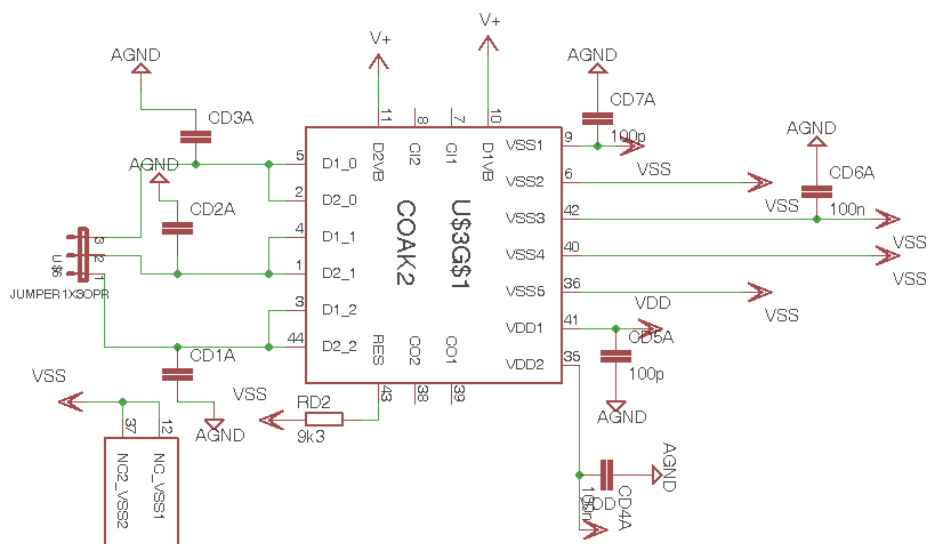
- Přívod napájení k čipu a následně jeho větvení k příslušným pinům
- Umístění filtračních kondenzátorů co nejbližší čipu
- Umístění blokačních kondenzátorů co nejbližší napájení
- Šířka vodivých cest minimálně stejná, jako je šířka pinů u čipů
- Pod čipy nerozlévat rozprostřenou zem – možnost výskytu nežádaných zkratů

Dále je vhodné zmínit, že nepoužité vstupy u prvků DACA jsou při návrhu DPS neuzemněny, na rozdíl od simulačních programů, kde je uzemnění vstupů a výstupů aktivních prvků vyžadováno. Nepoužité výstupy a vstupy prvků UCC jsou naopak při návrhu DPS uzemněny.

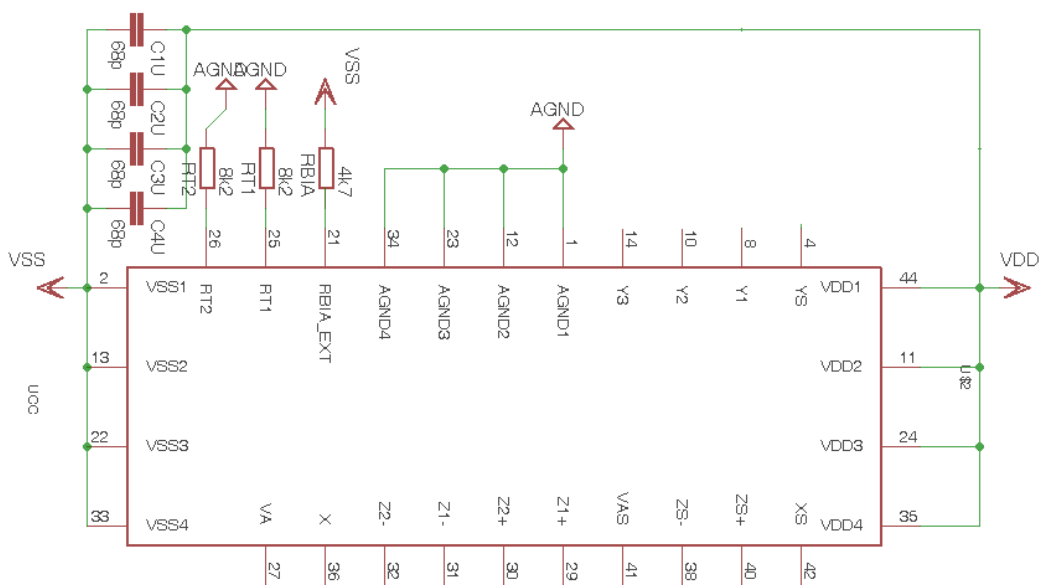
### **3.2 Použitá pouzdra součástek při návrhu DPS a její realizaci**

Jako vstupy a výstupy těchto desek byly použity konektory BNC. Pouzdro pasivních součástek bylo zvoleno o velikosti R1206 pro rezistory a C0805 pro nepolarizované

kondenzátory. Pro polarizované kondenzátory bylo použito pouzdro s označením CPOL-EUB/3528-21R (CPOL-EU). Pro konektory pro přívod napájení bylo použito pouzdro s označením JUMPER1X3OPR. Pro aktivní prvky DACA a UCC-N1B je použita patice s označením PLCC44S.



**Obr. 16** Schematické znázornění poloviny čipu DACA a příslušných pasivních součástek v návrhovém prostředí EAGLE



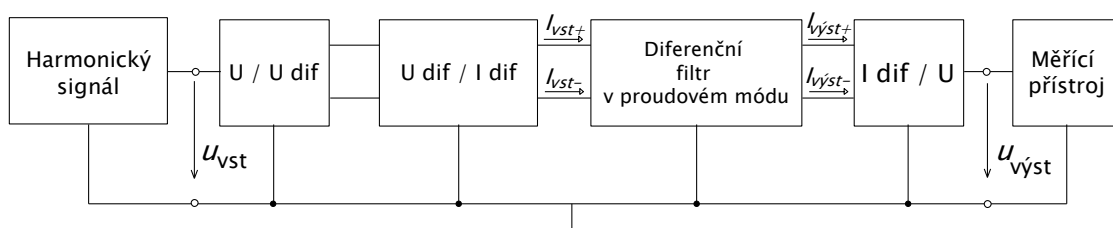
**Obr. 17** Schematické znázornění čipu UCC a příslušných pasivních součástek v návrhovém prostředí EAGLE

## 4 VÝSLEDKY SIMULACÍ A PRAKTICKÉHO MĚŘENÍ

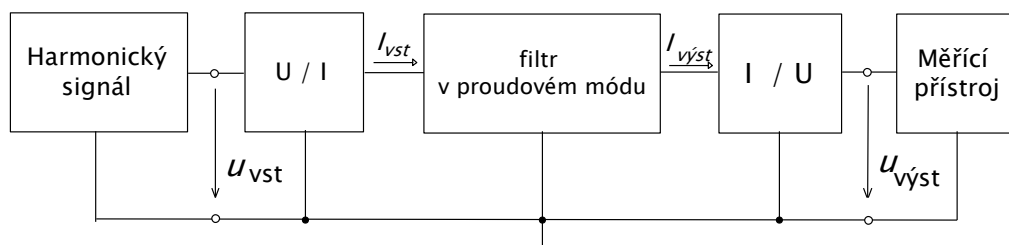
V této kapitole jsou především prezentovány výsledky praktického měření a provedených simulací zkoumaných filtrů. Dále tato kapitola obsahuje všechna schematická zapojení a numerické hodnoty parametrů všech použitých pasivních i aktivních prvků. Při simulacích byly použité nejnovější simulační ABM modely aktivních prvků třetí úrovně. Dále jsou v této kapitole ověřovány teoretické výhody a nevýhody diferenčních filtrů oproti nediferenčním.

### 4.1 Schematické znázornění zapojení měřícího pracoviště

K praktickému měření byl použit obvodový analyzátor Agilent 4395A, který obstarával jak zdroj harmonického signálu na vstupu, tak zároveň samotný měřící přístroj na výstupu. Měření bylo provedeno na frekvencích v rozsahu od hodnoty 1 kHz do 100 MHz. Do této měřící soustavy bylo nutné přidat převodníky napětí na proud, či diferenční proud a zpětně pak proud, či diferenčního proudu na napětí. Názorné zobrazení zapojení pracoviště pro měření diferenčních a nediferenčních filtrů pracujících v proudovém módu jsou vyobrazeny na Obr. 18 a Obr. 19.



Obr. 18 Schematické znázornění měřícího pracoviště pro měření diferenčních filtrů

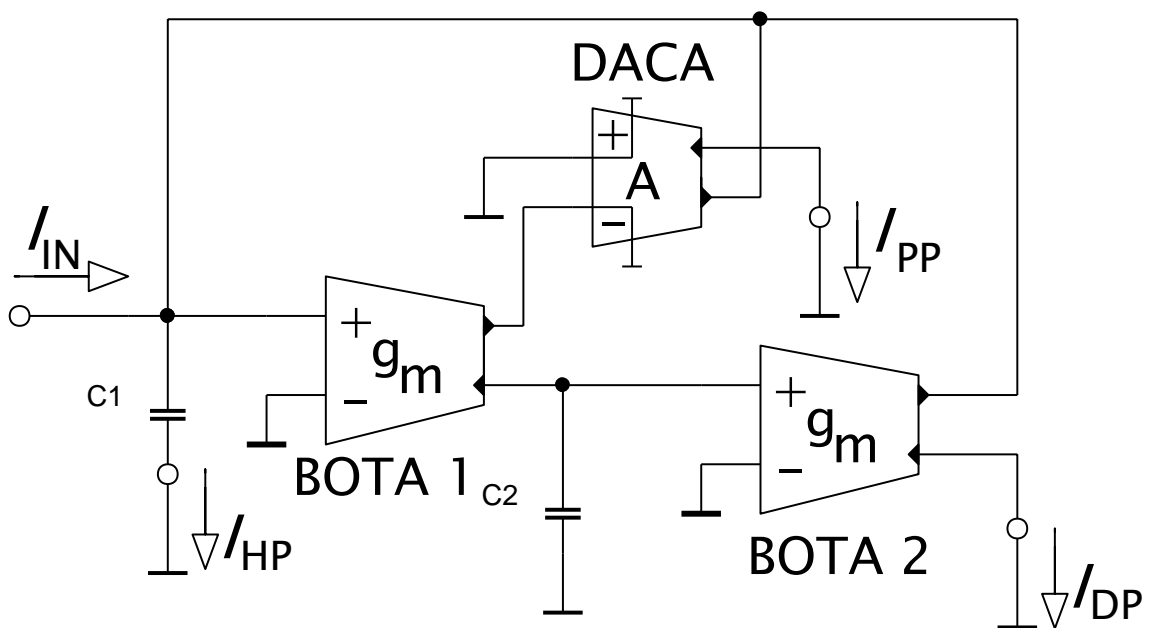


Obr. 19 Schematické znázornění měřícího pracoviště pro měření nediferenčních filtrů

## 4.2 Nediferenční multifunkční kmitočtový filtr s prvky BOTA a DACA

Jedná se o nediferenční filtr, který je schopný realizovat filtrační funkce DP, HP, PP a PZ a pomocí zesilovače DACA je možné měnit činitel jakosti Q.

Schematické zapojení a veškeré numerické hodnoty použitých prvků byly převzaty z článku[11]. Výstup pro filtrační funkci HP je získán z pasivní součástky a to z kondenzátoru  $C_1$  (Obr. 20). Pokud není měřena funkce HP nebo PZ, je nutné, aby kondenzátor  $C_1$  byl uzemněn.



Obr. 20 Schematické zapojení multifunkčního kmitočtového filtru s nastavitelnou změnou činitele jakosti

Výsledná charakteristická rovnice získaná pomocí programu SNAP je:

$$CE = s^2 C_1 C_2 + s C_2 g_{m1} A + g_{m1} g_{m2}. \quad (4.1)$$

### 4.2.1 Numerické hodnoty jednotlivých prvků zapojení

Hodnoty rezistorů  $R_g$  byly zvoleny 2,4 k $\Omega$ , 1,2 k $\Omega$  a 820  $\Omega$ . Velikosti kondenzátorů byly zvoleny  $C_1 = 780$  pF a  $C_2 = 120$  pF. Nastavení požadovaného charakteristického kmitočtu je závislé pouze na velikosti rezistorů zapojených do univerzálních proudových konvektorů, které jsou zapojeny jako transkonduktanční zesilovače BOTA. Velikost transkonduktance  $g_m$  lze jednoduše vypočítat pomocí vzorce 4.4 a odpovídající

hodnoty nalezneme v tab. 2. Použitím vzorců 4.2 a 4.3 byly vypočítány odpovídající teoretické charakteristické kmitočty (viz. Tab. 3) a činitel jakosti při změně zesílení  $A_Q$  (viz. Tab. 4).

$$f_0 = \frac{\sqrt{\frac{g_{m1}g_{m2}}{C_1C_2}}}{2\pi}, \quad (4.2)$$

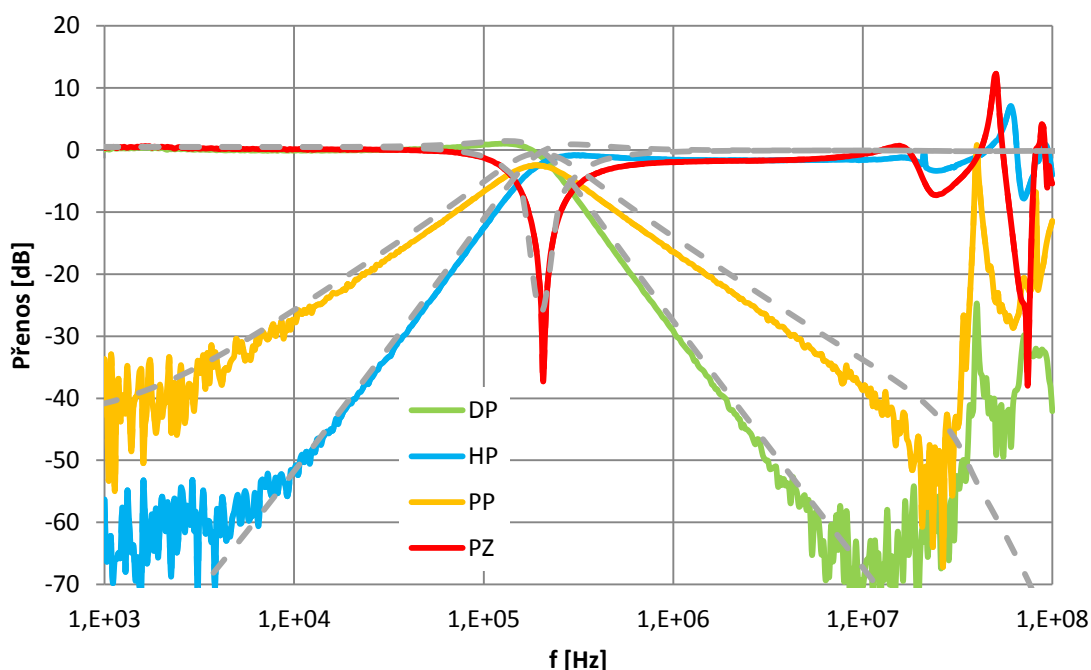
$$Q = \frac{1}{A_Q} \cdot \sqrt{\frac{C_1g_{m2}}{C_2g_{m1}}}, \quad (4.3)$$

$$g_m = \frac{1}{R_g}. \quad (4.4)$$

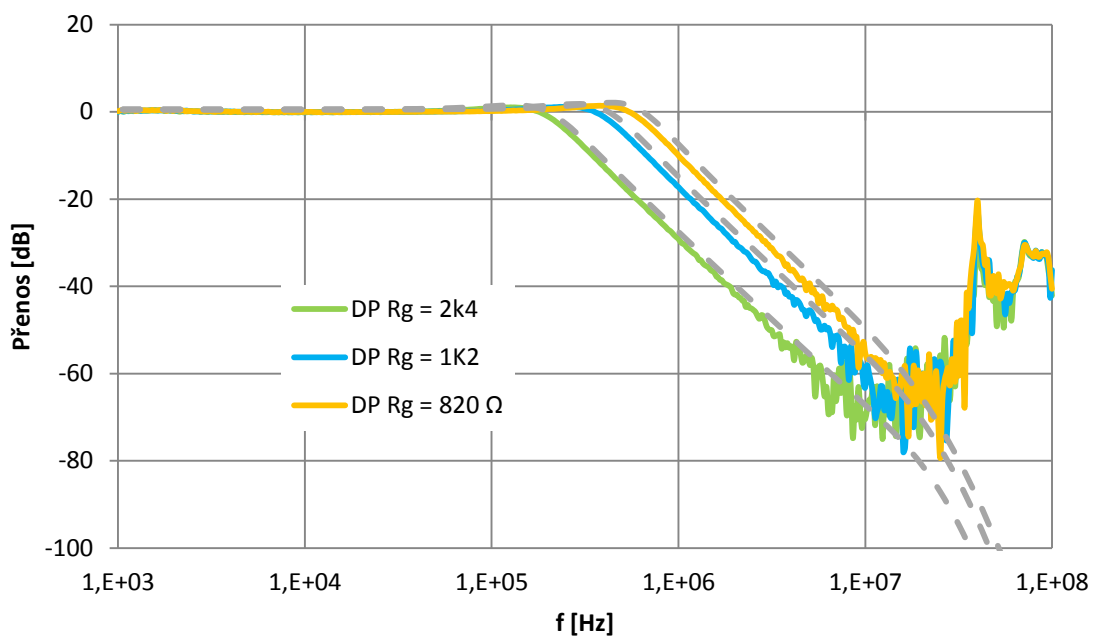
**Tab. 2: Hodnoty transkonduktance odpovídající hodnotám zvolených rezistorů  $R_g$**

$R_g$ [ $\Omega$ ]	2400	1200	820
$g_m$ [mS]	0,417	0,833	1,220

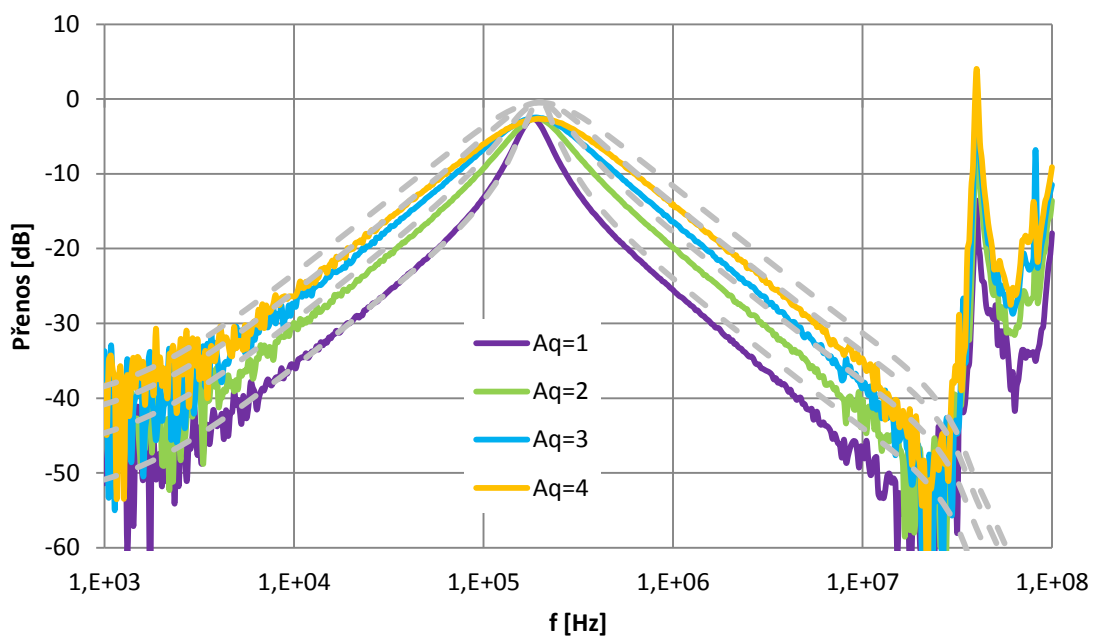
#### 4.2.2 Výsledky praktického měření a provedených simulací



**Obr. 21 Výsledky praktického měření (plná čára) a simulací (přerušovaná čára) - Modulová kmitočtová charakteristika filtračních funkcí typu DP, HP, PP a PZ ( $A_Q=3$ ,  $R_g = 2k\Omega$ )**



Obr. 22 Výsledky praktického měření (plná čára) a simulací (přerušovaná čára) - Modulová kmitočtová charakteristika filtrační funkce typu DP pro různé velikosti rezistorů  $R_g$



Obr. 23 Výsledky praktického měření (plná čára) a simulací (přerušovaná čára) - Modulová kmitočtová charakteristika se změnou Q filtrační funkce PP v závislosti na změně  $A_Q$

**Tab. 3: Porovnání hodnot charakteristického kmitočtu**

Rg [ $\Omega$ ]	Charakteristický kmitočet [Hz]		
	Teoretické	Simulované	Změřené
2k4	2,17E+05	2,00E+05	2,29E+05
1k2	4,34E+05	5,01E+05	4,61E+05
820 $\Omega$	6,34E+05	7,80E+05	6,81E+05

**Tab. 4: Porovnání hodnot činitele jakosti**

Činitel jakosti Q [-]							
Teoretické				Simulované		Změřené	
A	Q Ideální	A (OrCad)	Q Neideální	A	Q	A	Q
1	2,550	0,779	3,273	1	4,385	1	3,229
2	1,128	1,594	1,599	2	2,297	2	1,637
3	0,850	2,489	1,024	3	1,369	3	1,088
4	0,637	3,299	0,773	4	0,548	4	0,850

**Tab. 5: Porovnání hodnot pro strmost (DP, HP, PP) a útlum při charakteristickém kmitočtu (PZ) pro hodnotu  $A_Q = 3$** 

přenosová funkce	Strmost [dB/dek] (DP, HP, PP) a útlum [dB] při $f_0$ (PZ)		
	Teoretické	Simulace	Změřené
DP	40	37,43	41,08
HP	40	38,28	39,11
PP	20	19,60	19,79
PZ	-40	-23,28	-37,25

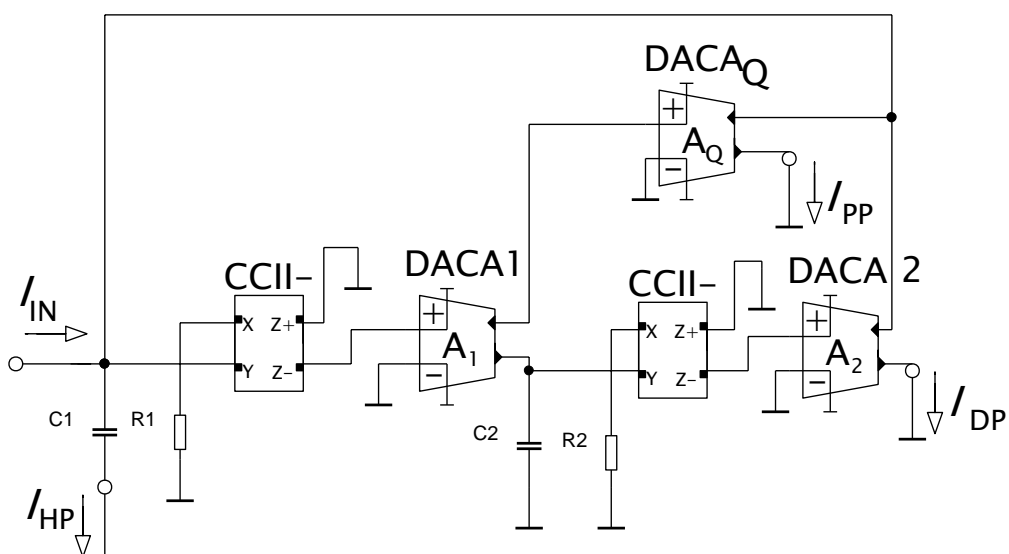
Z obr. 21 je patrné, že realizovaný filtr dokáže realizovat všechny očekávané filtrační funkce, které byly simulovány pomocí vhodných simulačních programů. Všechny výsledky praktického měření, provedených simulací a teoretické výpočty nalezneme v tabulkách 3,4 a 5. Z tab. 3 lze vypořádat, že naměřené charakteristické kmitočty, jsou blíže teoretickým předpokladům než hodnoty simulované, avšak se zvyšujícím kmitočtem se odchylka naměřeného a vypočteného charakteristického kmitočtu zvyšuje. Naměřené hodnoty činitele jakosti Q jsou velmi blízké hodnotám získaných teoretickým výpočtem při uvažování neideálního zesílení prvku DACA. Simulované hodnoty činitele jakosti naopak dosahují značného odchýlení od teoretického předpokladu. Změřením strmosti u jednotlivých filtračních funkcí bylo ověřeno, že realizovaný filtr

splňuje vlastnosti filtru 2. řádu. Při zvyšování zesílení A prvku DACA bylo dosaženo reálných použitelných výsledků pouze do zesílení  $A = 4$ . Při vyšších hodnotách zesílení nastává značné zkreslení kmitočtové charakteristiky.

### 4.3 Nediferenční multifunkční filtr s možností řízení změny činitele jakosti a charakteristického kmitočtu pomocí třech prvků DACA a dvou proudových konvektorů druhé generace

Jedná se o filtr, který je schopný realizovat filtrační funkce typu DP, HP, PP a PZ a pomocí třech zesilovačů DACA je možné měnit činitel jakosti  $Q$  i charakteristický kmitočet filtru a to vzájemně nezávisle.

Schéma zapojení a veškeré numerické hodnoty použitých prvků byly převzaty z diplomové práce[12]. Oproti původnímu zapojení bylo zapojení v této práci upraveno a to tak, že výstupní svorky pro filtrační funkce typu PP a DP získáme z výstupů aktivních prvků (viz. Obr. 24) namísto z pasivních součástek  $C_2$  a  $R_2$ , jak tomu bylo v původním návrhu. Touto modifikací je možno dosáhnout mnohem lepších výsledků jak v simulacích, tak v reálném měření tohoto filtru. Jedinou filtrační funkcí, která je získána z pasivní součástky tak zůstává HP, která je získána z kondenzátoru  $C_1$ . Pokud je při praktickém měření měřena jiná přenosová funkce než HP nebo PZ, je nutné, aby kondenzátor  $C_1$  byl uzemněn.



Obr. 24 Schematické zapojení filtru

Výsledná charakteristická rovnice získaná pomocí programu SNAP je:

$$CE = s^2 C_1 C_2 + s C_2 G_1 A_1 A_Q + G_1 G_2 A_1 A_2. \quad (4.5)$$

Za předpokladu, že  $A_1 = A_2 = A$ , lze nastavovat charakteristický kmitočet. Dále platí mezi  $Q$  a  $A_Q$  nepřímá úměra, lze tedy nastavovat parametr  $Q$ . Charakteristický kmitočet a činitel jakosti lze měnit nezávisle.[12]

### 4.3.1 Numerické hodnoty jednotlivých prvků zapojení

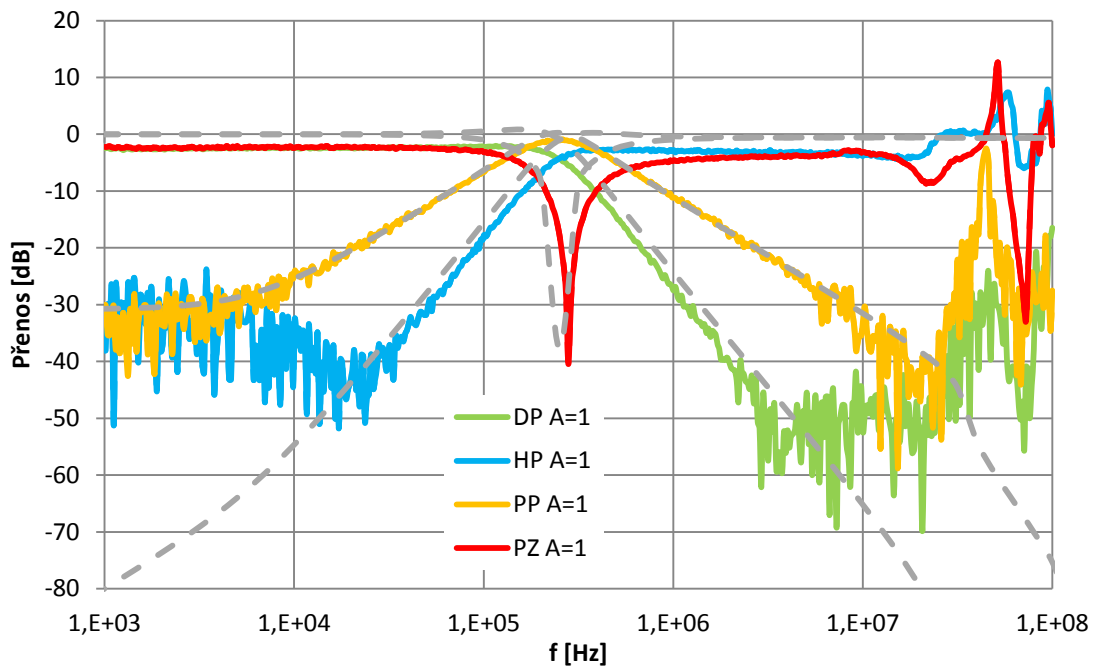
Hodnoty kondenzátorů byly zvoleny  $C_1 = C_2 = 330\text{p}$  a hodnoty rezistorů  $R_1 = 2,2\text{ k}\Omega$  a  $R_2 = 1,1\text{ k}\Omega$ .

Podle vztahů 4.6 a 4.7 jsou vypočteny teoretické hodnoty činitele jakosti (viz. Tab. 7) a charakteristického kmitočtu (viz. Tab. 6) závislé na změně zesílení proudových zesilovačů DACA.

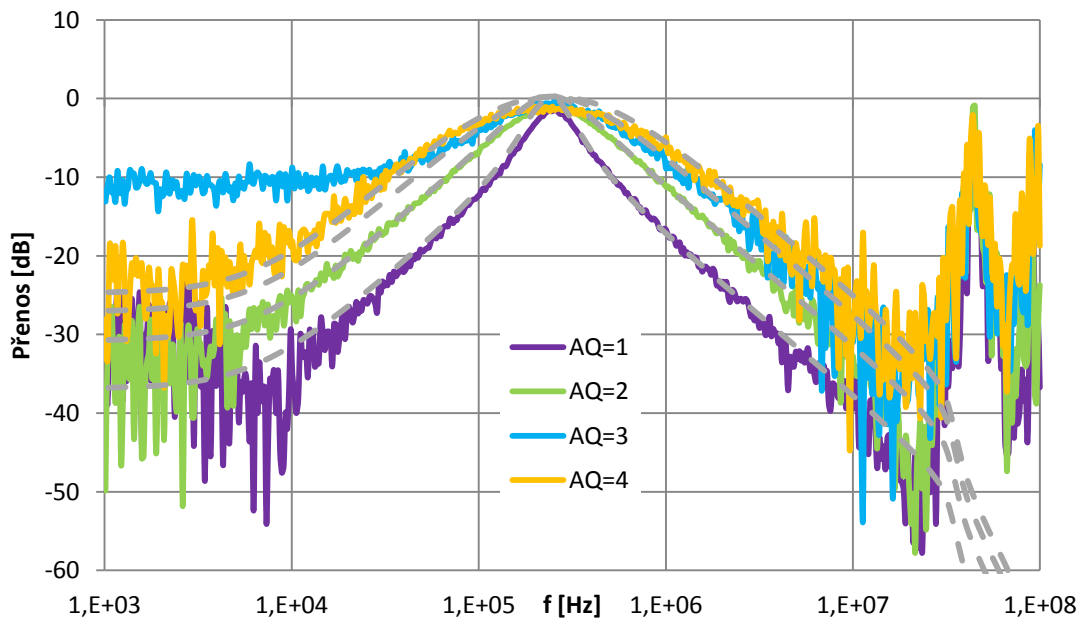
$$Q = \frac{1}{A_Q} \sqrt{\frac{C_1 \cdot G_2}{G_1 \cdot C_2}}, \quad (4.6)$$

$$f_0 = \frac{A}{2 \cdot \pi} \sqrt{\frac{G_1 \cdot G_2}{C_1 \cdot C_2}}, \quad (4.7)$$

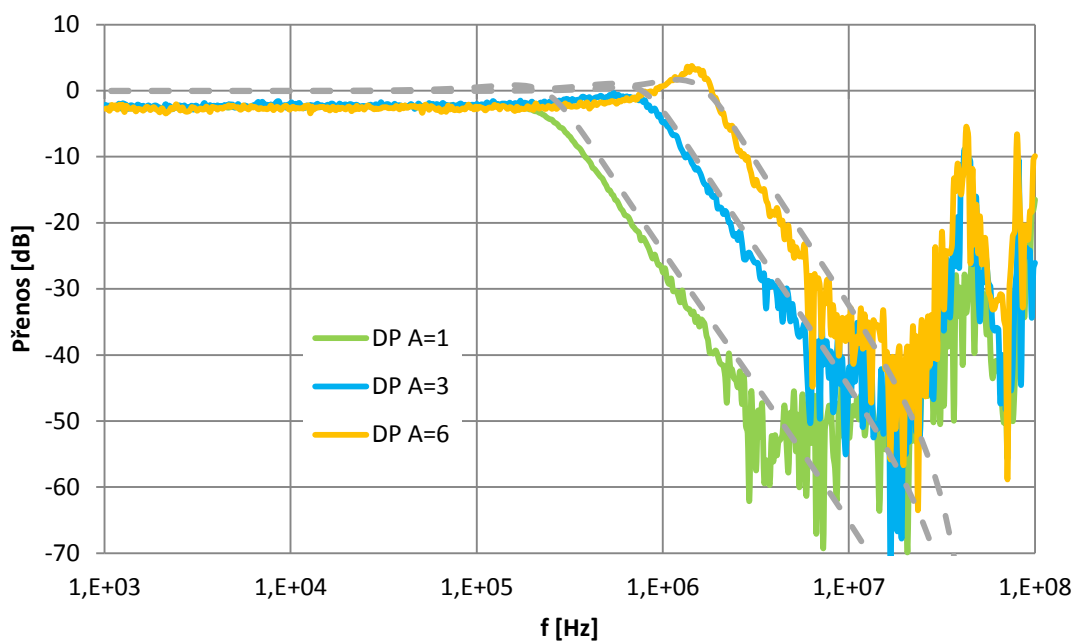
### 4.3.2 Výsledky praktického měření a provedených simulací



Obr. 25 Výsledky praktického měření (plná čára) a simulací (přerušovaná čára) - Modulová kmitočtová charakteristika filtračních funkcí typu DP, HP, PP a PZ ( $A_{1,2} = 1$ ,  $A_Q = 2$ )



Obr. 26 Výsledky praktického měření (plná čára) a simulací (přerušovaná čára) - Modulová kmitočtová charakteristika pro filtrační funkci PP se změnou  $A_Q$



Obr. 27 Výsledky praktického měření (plná čára) a simulací (přerušovaná čára) – Modulová kmitočtová charakteristika pro filtrační funkci DP a vliv změny  $A_{1,2}$  na charakteristický kmitočet (Zesílení  $A_{1,2}$  nastaveno na 1,3 a 6)

Tab. 6: Porovnání hodnot charakteristického kmitočtu

Charakteristický kmitočet [Hz]							
Teoretické				Simulace		Změřené	
A	$f_0$ Ideální	A (OrCad)	$f_0$ Neideální	A	$f_0$	A	$f_0$
1	3,10E+05	0,779	2,42E+05	1	2,51E+05	1	2,79E+05
2	6,20E+05	1,594	4,94E+05	2	5,01E+05	2	5,42E+05
3	9,30E+05	2,489	7,72E+05	3	7,94E+05	3	1,03E+06
4	1,24E+06	3,299	1,02E+06	4	1,00E+06	4	1,27E+06
5	1,55E+06	4,133	1,28E+06	5	1,26E+06	5	1,71E+06
6	1,86E+06	4,936	1,53E+06	6	1,58E+06	6	2,26E+06
7	2,17E+06	5,814	1,80E+06	7	2,00E+06	7	2,73E+06
8	2,48E+06	6,609	2,05E+06	8	2,21E+06	8	3,17E+06

**Tab. 7: Porovnání hodnot činitele jakosti**

Činitel jakosti Q [-]							
Teoretické				Simulované		Změřené	
$A_Q$	Q Ideální	$A_Q$ (OrCad)	Q Neideální	$A_Q$	Q	$A_Q$	Q
1	1,414	0,779	1,815	1	1,933	1	1,754
2	0,707	1,594	0,887	2	0,959	2	0,846
3	0,471	2,489	0,658	3	0,613	3	0,776
4	0,354	3,299	0,429	4	0,456	4	0,499
5	0,283	4,133	0,342	5	0,34	5	0,368

**Tab. 8: Porovnání hodnot pro strmost (DP, HP, PP) a útlum při charakteristickém kmitočtu (PZ)**

Přenosová funkce	Strmost [dB/dek] (DP, HP, PP) a útlum [dB] při $f_0$ (PZ)		
	Teoretické	Simulované	Změřené
DP	40	43,77	46,32
HP	40	40,08	33,70
PP	20	20,67	20,88
PZ	-40	-37,79	-40,41

Z obr. 25 je patrné, že realizovaný filtr dokáže realizovat všechny očekávané filtrační funkce, které byly simulovány pomocí vhodných simulačních programů. Útlum signálu, který činí přibližně 2 dB, může být způsoben různými vlivy jako jsou například přechodové odpory mezi kontakty čipů a paticemi, nebo také vlastnostmi použitých aktivních součástek. S rostoucím zesílením  $A_{1,2}$  vznikal a rostl nežádoucí překmit v přechodovém pásmu. Všechny výsledky praktického měření, provedených simulací a teoretických výpočtů nalezneme v tabulkách 6,7 a 8. Z tab. 6 lze vyzorovat, že simulované charakteristické kmitočty jsou blíže teoretickým neideálním předpokladům než hodnoty naměřené praktickým měřením. Se zvyšujícím kmitočtem se zvyšují odchylky naměřených a simulovaných hodnot od teoretických předpokladů. Pro zesílení  $A_Q = 1$  a  $A_Q = 2$  odpovídají naměřené hodnoty teoretickým předpokladům více, než hodnoty simulované. Avšak s rostoucím  $A_Q$  se naměřené hodnoty začínají odchýlovat, na rozdíl od hodnot simulovaných. Změřením poklesu strmosti u jednotlivých filtračních funkcí bylo ověřeno, zda realizovaný filtr splňuje vlastnosti filtru 2. řádu (Tab. 8). Nejhorší výsledek se dostavil u filtrační funkce typu HP, kde reálný pokles útlumu na dekádu dosahuje pouze hodnot 33,70 dB/dek místo očekávaných 40 dB/dek.

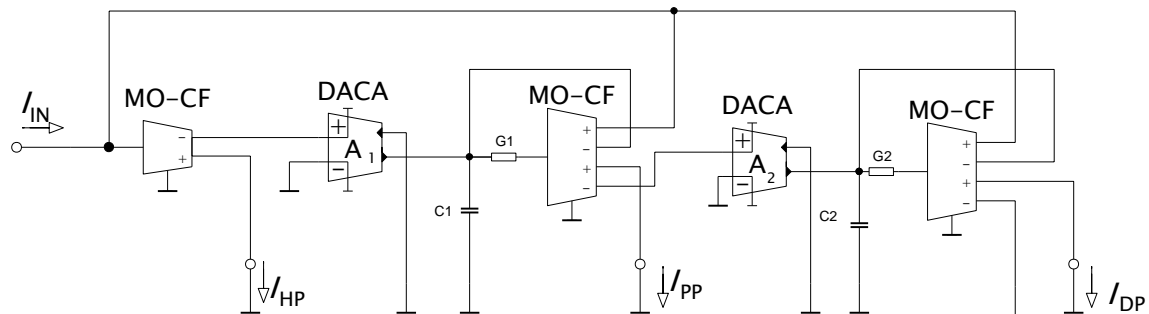
## 4.4 Diferenční multifunkční filtr s použitím dvou prvků DACA a šesti proudových sledovačů

Jedná se o filtr, který je schopný realizovat filtrační funkce typu DP, HP, PP a PZ. Pomocí dvou zesilovačů DACA je možné nastavovat charakteristický kmitočet filtru.

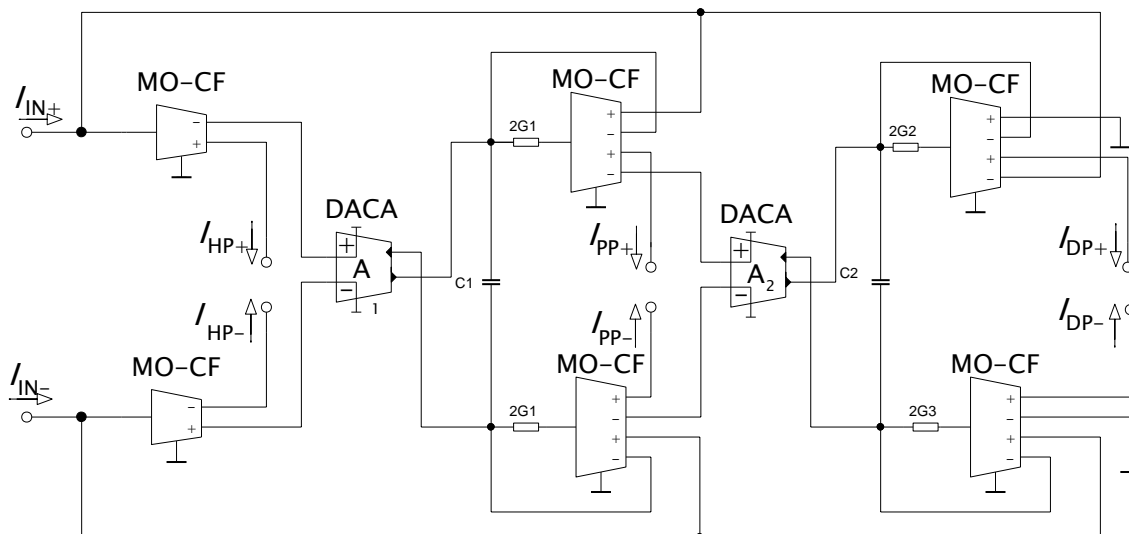
Kmitočtový filtr je realizován v diferenční i nediferenční podobě a tyto varianty jsou následně porovnány mezi sebou.

Schéma zapojení a veškeré numerické hodnoty použitých prvků byly převzaty z článku[13]. Oproti původnímu návrhu publikovaném v [13] bylo toto zapojení upraveno z důvodu nevyhovujícího chování obvodu v simulačních programech Orcad a Snap. Změna se týkala proudového sledovače MO-CF, ze kterého je získána DP a proudového zesilovače DACA se zesílením  $A_2$ . Tyto dva prvky byly vzájemně prohozeny. Dále byl ze zapojení odebrán jeden prvek DACA (původně 3 prvky DACA) z důvodu nemožnosti praktické realizace zapojení. Po provedených úpravách byl obvod opět analyzován simulačními programy.

### 4.4.1 Schematické zapojení diferenční a nediferenční verze filtru



Obr. 28 Schéma zapojení nediferenční verze filtru



Obr. 29 Schéma zapojení diferenční verze filtru

Výsledná charakteristická rovnice získaná pomocí programu SNAP je:

$$CE = s^2 C_1 C_2 + s C_2 G_1 A_1 + G_1 G_2 A_1 A_2. \quad (4.8)$$

#### 4.4.2 Numerické hodnoty jednotlivých prvků zapojení

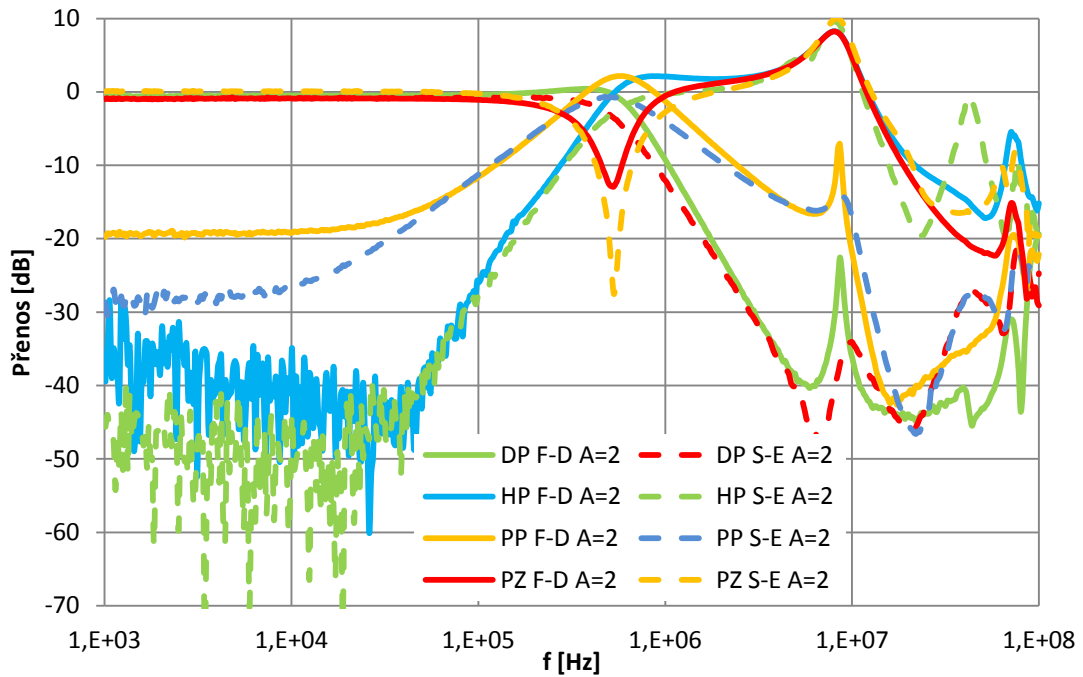
Kondenzátory byly zvoleny  $C_1 = C_2 = 330\text{p}$  a rezistory  $R_1 = 2200\ \Omega$  a  $R_2 = 1100\ \Omega$  pro nediferenční zapojení a poloviční hodnoty rezistorů pro diferenční zapojení  $R_{1DIF} = 1100\ \Omega$  a  $R_{2DIF} = 560\ \Omega$ .

Podle vztahů 4.9 a 4.10 jsou vypočteny teoretické hodnoty charakteristického kmitočtu (viz. Tab. 9) závislé na změně zesílení proudových zesilovačů DACA a činitel jakosti (viz. Tab. 10).

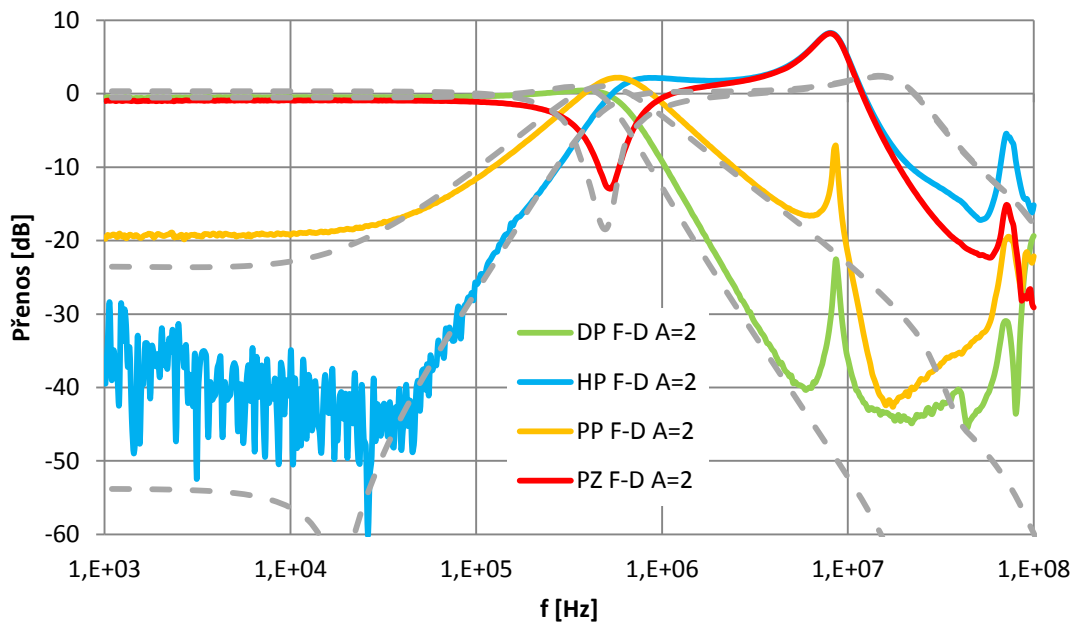
$$f_0 = \frac{A}{2\pi} \sqrt{\frac{G_1 \cdot G_2}{C_1 \cdot C_2}}, \quad (4.9)$$

$$Q = \sqrt{\frac{G_2 \cdot C_1}{G_1 \cdot C_2}}, \quad (4.10)$$

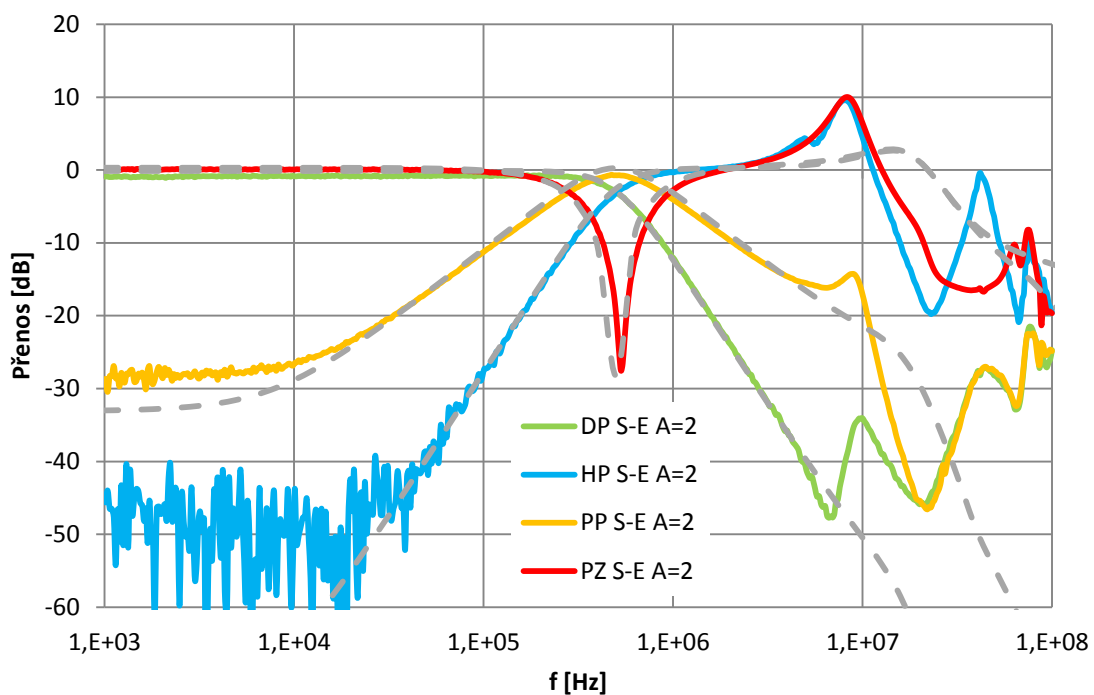
### 4.4.3 Výsledky praktického měření a provedených simulací



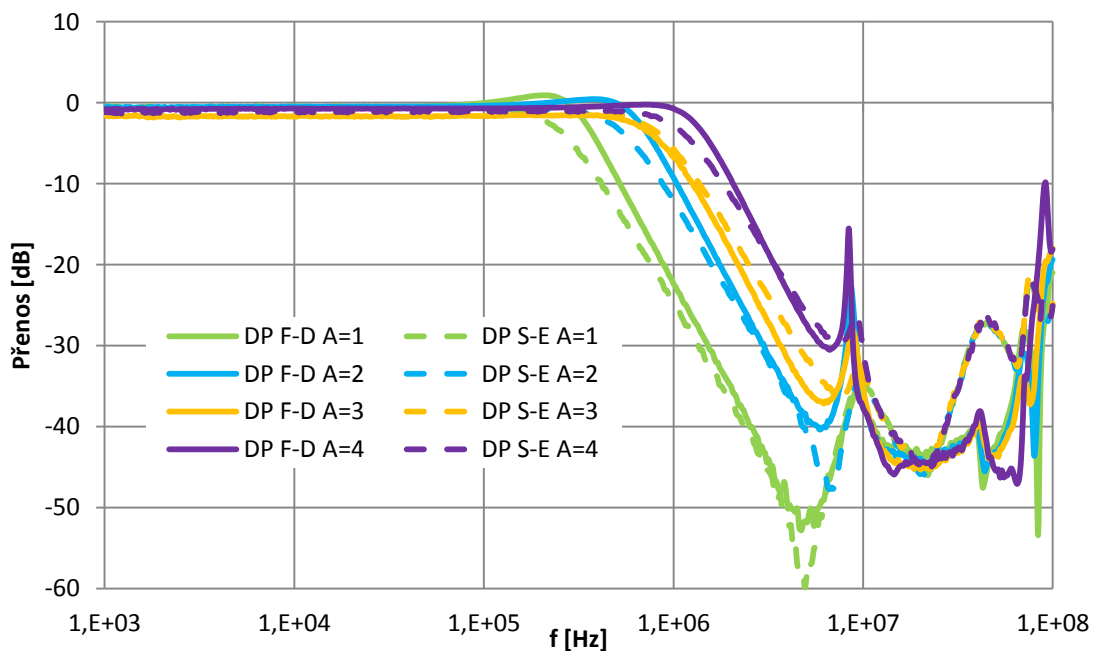
Obr. 30 Výsledky praktického měření F-D filtru (plná čára) a S-E filtru (přerušovaná čára) - Modulová kmitočtová charakteristika filtračních funkcí typu DP, HP, PP a PZ ( $A_{1,2} = 2$ )



Obr. 31 Výsledky praktického měření F-D filtru (plná čára) a simulací (přerušovaná čára) - Modulová kmitočtová charakteristika filtračních funkcí typu DP, HP, PP a PZ (Reálné  $A_{1,2} = 2$  a simulované  $A_{1,2} = 1$ )



Obr. 32 Výsledky praktického měření S-E filtru (plná čára) a simulací (přerušovaná čára) - Modulová kmitočtová charakteristika filtračních funkcí typu DP, HP, PP a PZ (Reálné  $A_{1,2} = 2$  a simulované  $A_{1,2} = 2$ )



Obr. 33 Výsledky praktického měření F-D filtru (plná čára) a S-E filtru (přerušovaná čára) – Modulová kmitočtová charakteristika pro filtrační funkci DP a vliv změny  $A_{1,2}$  na charakteristický kmitočet (Zesílení A nastaveno na 1,2,3 a 4)

**Tab. 9: Porovnání hodnot charakteristického kmitočtu**

Charakteristický kmitočet [Hz]											
Teoretické				Simulované				Změřené			
A	Ideální	A (OrCad)	Neideální	A	F-D	A	S-E	A	F-D	A	S-E
1	3,10E+05	0,779	2,42E+05	0,5	2,40E+05	1	2,31E+05	1	2,78E+05	1	2,15E+05
2	6,20E+05	1,594	4,94E+05	1	5,10E+05	2	5,01E+05	2	5,91E+05	2	4,94E+05
3	9,30E+05	2,489	7,72E+05	1,5	6,60E+05	3	7,98E+05	3	7,78E+05	3	8,99E+05
4	1,24E+06	3,299	1,02E+06	2	9,00E+05	4	1,10E+06	4	1,21E+06	4	1,13E+06

**Tab. 10: Porovnání hodnot činitele jakosti**

	Činitel jakosti [-]		
	Teoretické	Simulované	Změřené
F-D	0,707	0,818	1,393
S-E	0,707	0,711	0,726

**Tab. 11: Porovnání hodnot pro pokles přenosu na dekádu (DP, HP, PP) a pokles při charakteristickém kmitočtu (PZ)**

Přenosová funkce	Strmost [dB/dek] (DP, HP, PP) a útlum [dB] při $f_0$ (PZ)				
	Teoretické	Simulované		Změřené	
		F-D	S-E	F-D	S-E
DP	40	38,6	36,9	44,14	39,67
HP	40	38,5	37,6	42,28	37,28
PP	20	17,5	19	22,32	18,19
PZ	-40	-18	-22	-14,90	-27,54

U diferenčního i nediferenčního zapojení bylo dosaženo všech očekávaných filtračních funkcí (viz. Obr. 30). Diferenční zapojení ovšem dosahuje pouze poloviny očekávaného zesílení (viz. Obr. 31). Příčina polovičního zesílení u diferenční verze filtru by mohla být způsobena rozdílnými parametry jak jednotlivých vstupů a výstupů zesilovačů DACA, tak rozdílnými parametry zesílení jednotlivých čipů DACA. Diferenční zapojení dále jeví lepší vlastnosti pro strmost poklesu u filtračních funkcí DP, HP a PP. U funkce typu PZ jeví lepší vlastnosti nediferenční zapojení, avšak ani jedno zapojení nedosahuje na očekávaný útlum -40 dB na charakteristickém kmitočtu (viz. Tab. 11). U diferenčního zapojení byl naměřen nepřesnější činitel jakosti oproti teoretickým předpokladům (viz. Tab. 10), to může mít za následek mírný překmit v přechodovém

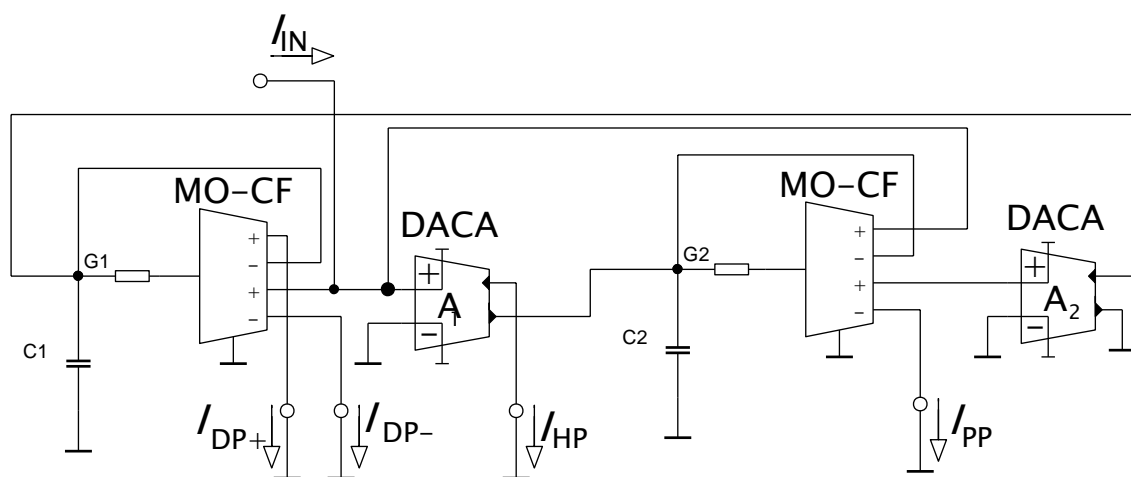
pásmu u diferenčního filtru. Funkce přeladování charakteristického kmitočtu je patrná z Obr. 33. Není možné přesně a jednoznačně určit, která verze zapojení dosahuje lepších výsledků při přesnosti nastavení charakteristického kmitočtu (viz. Tab. 9). V porovnání naměřených hodnot pro charakteristický kmitočet diferenčního zapojení s hodnotami získaných simulacemi vykazují simulované hodnoty bližší výsledky teoretickým předpokladům. U nediferenčního zapojení je toto porovnání nejednoznačné.

#### 4.5 Diferenční filtr DP a PP s použitím dvou prvků DACA a čtyř proudových sledovačů

Jedná se o filtr, který je schopný realizovat filtrační funkce typu DP a PP a pomocí dvou zesilovačů DACA je možné nastavovat charakteristický kmitočet filtru. U nediferenční verze filtru je možné realizovat oproti verzi diferenční navíc také filtrační funkce HP a PZ. Je to dáno tím, že u nediferenční verze je využit pouze jeden výstup prvku DACA, zatím co u diferenční verze jsou zapojeny oba výstupy (viz. Obr. 34,35).

Schéma zapojení a veškeré numerické hodnoty použitých prvků byly použity z návrhu, které bylo dodáno vedoucím této práce[14].

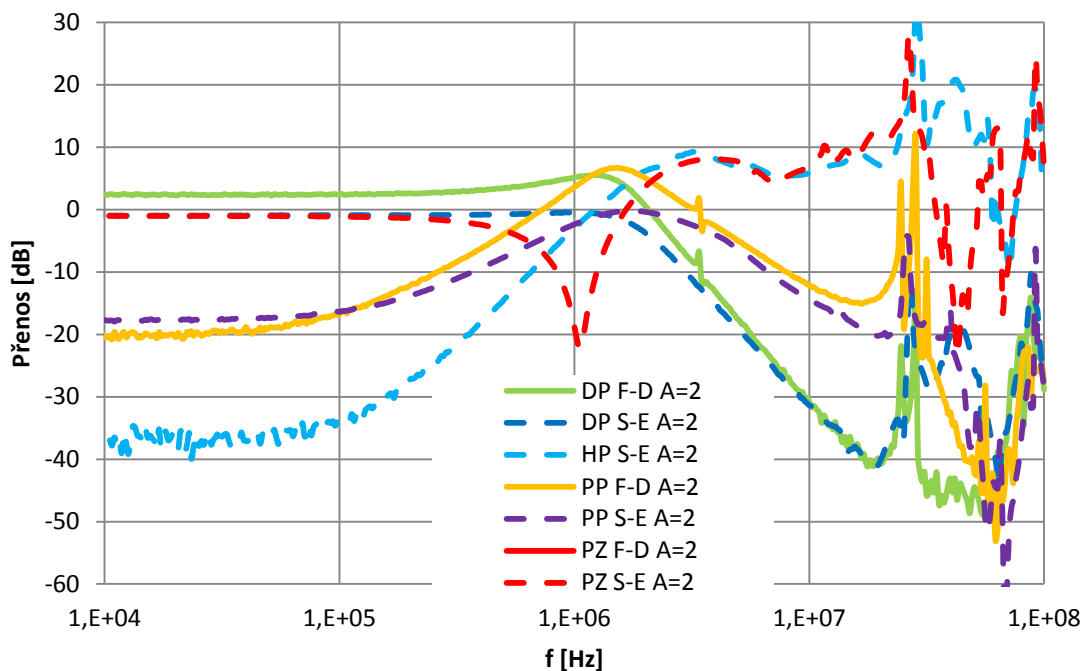
##### 4.5.1 Schematické zapojení diferenční a nediferenční verze filtru



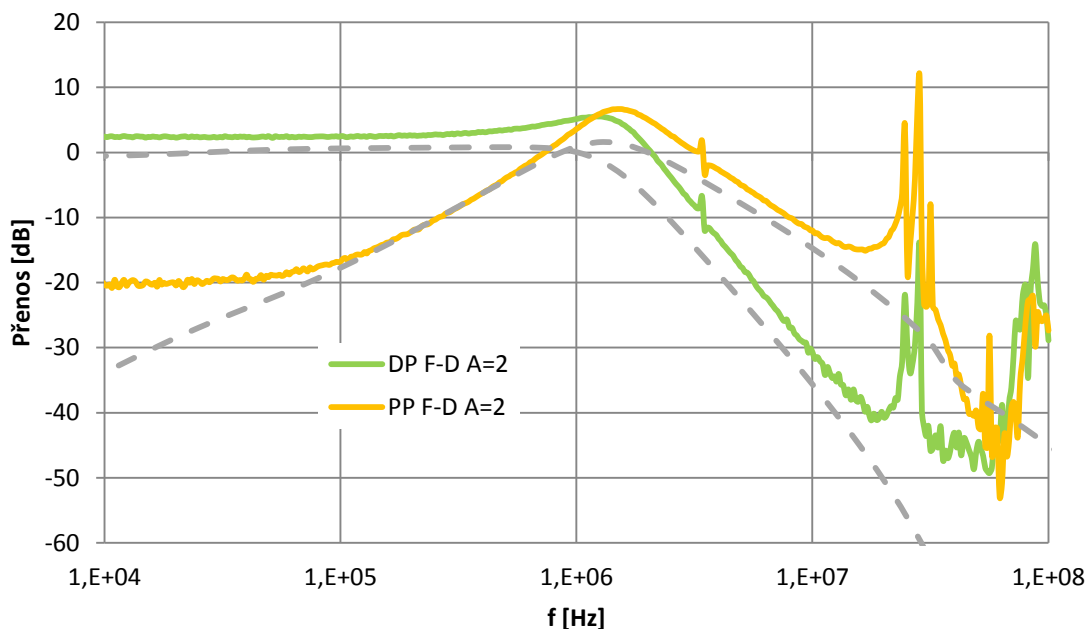
Obr. 34 Schéma zapojení nediferenční verze filtru



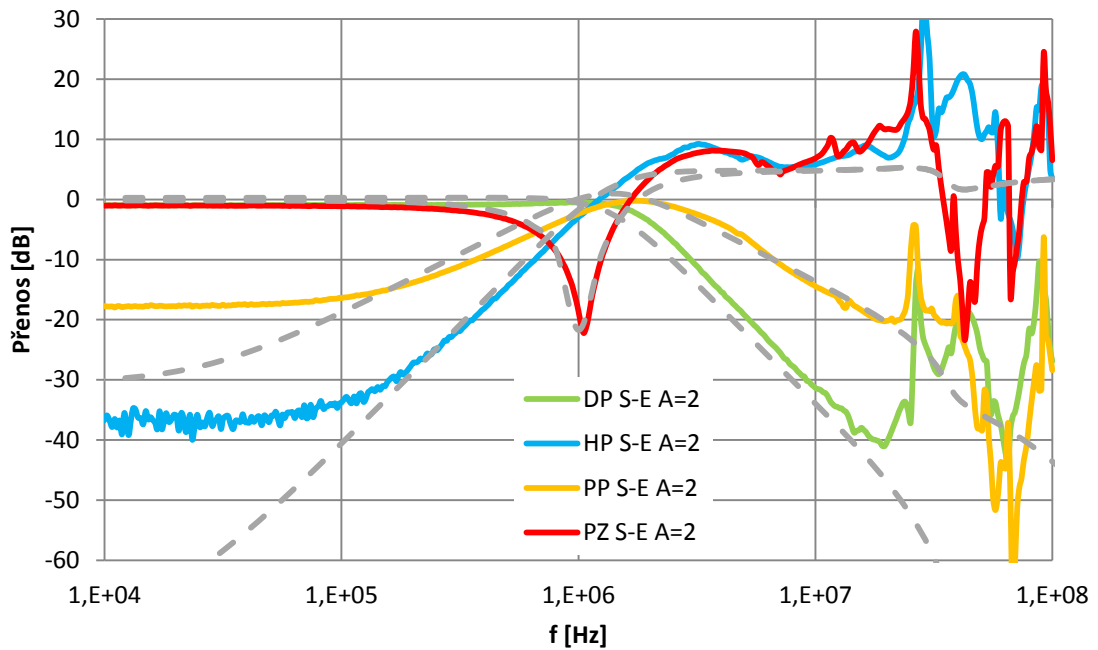
### 4.5.3 Výsledky praktického měření a provedených simulací



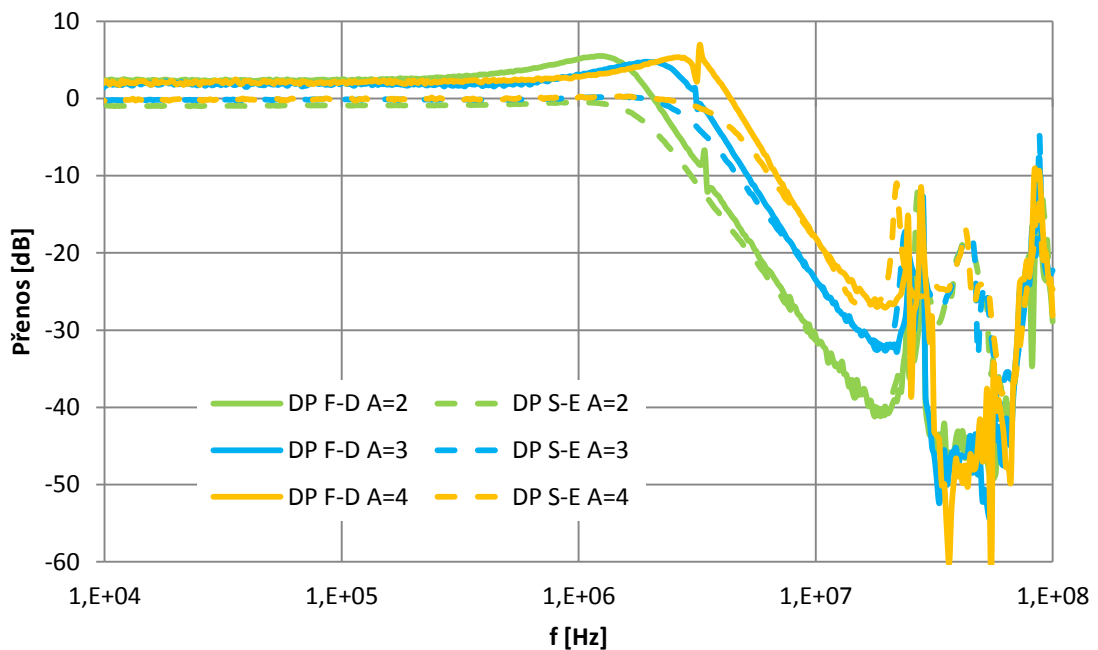
Obr. 36 Výsledky praktického měření F-D filtru (plná čára) a S-E filtru (přerušovaná čára) - Modulová kmitočtová charakteristika filtračních funkcí typu DP, HP, PP a PZ ( $A_{1,2} = 2$ )



Obr. 37 Výsledky praktického měření F-D filtru (plná čára) a simulací (přerušovaná čára) - Modulová kmitočtová charakteristika filtračních funkcí typu DP a PP (Reálné  $A_{1,2} = 2$  a simulované  $A_{1,2} = 1$ )



Obr. 38 Výsledky praktického měření S-E filtru (plná čára) a simulací (přerušovaná čára) - Modulová kmitočtová charakteristika filtračních funkcí typu DP, HP, PP a PZ (Reálné  $A_{1,2} = 2$  a simulované  $A_{1,2} = 2$ )



Obr. 39 Výsledky praktického měření F-D filtru (plná čára) a S-E filtru (přerušovaná čára) - Modulová kmitočtová charakteristika pro filtrační funkci DP a vliv změny  $A_{1,2}$  na charakteristický kmitočet (Zesílení A nastaveno na 2,3 a 4)

**Tab. 12: Porovnání hodnot charakteristického kmitočtu**

Charakteristický kmitočet [Hz]											
Teoretické				Simulované				Změřené			
A	Ideální	A (OrCad)	Neideální	A	F-D	A	S-E	A	F-D	A	S-E
1	1,02E+06	0,779	7,97E+05	0,5	X	1	6,83E+05	1	X	1	8,19E+05
2	2,05E+06	1,594	1,63E+06	1	1,40E+06	2	1,43E+06	2	1,49E+06	2	1,87E+06
3	3,07E+06	2,489	2,55E+06	1,5	2,35E+06	3	2,37E+06	3	2,40E+06	3	2,46E+06
4	4,09E+06	3,299	3,38E+06	2	3,25E+06	4	3,30E+06	4	3,24E+06	4	3,58E+06
5	5,12E+06	4,133	4,23E+06	2,5	4,38E+06	5	4,26E+06	5	4,00E+06	5	X
6	6,14E+06	4,936	5,05E+06	3	5,65E+06	6	5,25E+06	6	4,83E+06	6	X
7	7,16E+06	5,814	5,95E+06	3,5	6,75E+06	7	6,59E+06	7	5,75E+06	7	X
8	8,18E+06	6,609	6,76E+06	4	8,10E+06	8	7,80E+06	8	6,96E+06	8	X

**Tab. 13: Porovnání hodnot činitele jakosti**

	Činitel jakosti Q [-]		
	Teoretické	Simulované	Změřené
F-D	0,707	0,905	1,661
S-E	0,707	0,717	0,746

**Tab. 14: Porovnání hodnot pro pokles přenosu na dekádu (DP, HP, PP) a pokles při charakteristickém kmitočtu (PZ)**

Přenosová funkce	Strmost [dB/dek] (DP, HP, PP) a útlum [dB] při $f_0$ (PZ)				
	Teoretické	Simulované		Změřené	
	-	F-D	S-E	F-D	S-E
DP	40	41,24	38,01	38,96	37,77
HP	40	X	36,65	X	36,47
PP	20	18,85	20,16	19,95	17,38
PZ	-40	X	-19,2	X	-24,4

Prakticky se podařilo realizovat všechny očekávané filtrační funkce (viz. Obr. 37). U diferenční verze filtru bylo opět dosaženo pouze polovičního zesílení, než bylo očekáváno. Diferenční verze zapojení nejevila známky funkčnosti při zesílení  $A_{1,2} = 1$ . Avšak při vyšším zesílení fungovalo zapojení až do zesílení  $A_{1,2} = 8$  oproti nediferenčnímu zapojení, které vykazuje použitelné výsledky pouze do zesílení  $A_{1,2} = 4$ . Stejně jako u předchozího zapojení ani u tohoto filtru nelze jednoznačně určit, která verze filtru vykazuje lepší vlastnosti na přesnost charakteristického kmitočtu.

V porovnání naměřených hodnot charakteristického kmitočtu diferenčního zapojení s hodnotami získaných simulacemi vykazují naměřené hodnoty bližší výsledky teoretickým předpokladům. U nediferenčního zapojení je toto porovnání nejednoznačné. Opět však platí, že diferenční verze vykazuje lepší vlastnosti při měření strmosti útlumu kmitočtových charakteristik a horší vlastnosti činitele jakosti oproti verzi nediferenční (viz. Tab. 12,13,14). Při srovnání kmitočtových charakteristik pro DP a PP mezi diferenčním a nediferenčním zapojením je zřejmé, že u diferenčního filtru je pásmo přenosu posunuto asi o 2 dB do kladné části osy pro přenos signálu. U pásmové propusti je pak tento posun téměř o 5 dB.

## 5 ZÁVĚR

Bakalářská práce byla nejprve zaměřena na analyzování vlastností vytipovaných kmitočtových filtrů pracujících v proudovém módu vhodných k použití s reálným aktivním prvkem DACA. Na základě výsledků analýz byla zapojení z kapitol 4.3 a 4.4 upravena oproti původním návrhům k dosažení správných filtračních funkcí. Vybraná zapojení kmitočtových filtrů byla realizována do podoby desek plošných spojů a praktickým měřením byla srovnána s výsledky analýz simulací.

V kap. 2 se pojednává o všech použitých aktivních prvcích. Jedná se o transkonduktanční zesilovač BOTA, proudový sledovač MO-CF, zesilovač DACA a univerzální proudový konvektor UCC. Všechny tyto prvky jsou vhodné pro proudový mód. Kromě zesilovače DACA jsou ostatní prvky nahrazeny vhodným zapojením univerzálního proudového konvektoru UCC nebo proudového konvektoru druhé generace CCII+/- . V praktické realizaci byl použit čip s označením UCC-N1B, který obsahuje jak UCC, tak i CCII+/- .

V kap. 3 jsou vyjmenovány hlavní zásady dodržované při návrhu desek plošných spojů a také jsou zde vyjmenovány pouzdra jednotlivých použitých typů součástek.

V kap. 4 jsou prezentovány výsledky analýz simulací a praktických měření vybraných čtyř zapojení kmitočtových filtrů. Výsledky všech realizovaných filtrů v podobě DPS převážně odpovídají očekávaným výsledkům. Filtry z kapitoly 4.2, 4.4 a nediferenční zapojení z kapitoly 4.5 se potýkají s použitelnými výsledky pouze do zesílení proudového zesilovače DACA  $A = 4$ . Na rozdíl od zapojení z kapitoly 4.3 a zapojení v diferenční podobě z kapitoly 4.5, kde bylo dosaženo dobrých výsledků až do zesílení  $A = 8$ . K tomuto jevu by mohlo docházet z toho důvodu, že při měření bylo použito několik různých čipů DACA, kde každý čip má své specifické obvodové vlastnosti.

Zapojení z kap. 4.2 bylo navrženo pro změnu činitele jakosti a není tedy možné měnit charakteristický kmitočet pomocí prvku DACA, ale změnou rezistorů, které jsou zapojené do prvku UCC zapojeného jako transkonduktanční zesilovač BOTA. Hlavní výhodou zapojení z kapitoly 4.3 tedy je možnost přeladování charakteristického kmitočtu a činitele jakosti pomocí třech prvků DACA a to vzájemně nezávisle.

Zapojení z kapitol 4.4 a 4.5 byla realizována v diferenčních i nediferenčních podobách. Výhodou zapojení z kap. 4.4 je možnost realizace všech typů filtračních

funkcí v diferenční podobě na rozdíl od zapojení v kap. 4.5, které umožňuje v diferenční podobě pouze filtrační funkce typu DP a PP. Diferenční zapojení z kap. 4.4 dále vykazuje lepší vlastnosti na činitel jakosti než diferenční zapojení v kap. 4.5 a tím i menší překmit v přechodové oblasti mezi propustným a nepropustným pásmem. Praktickým měřením byly změřeny také fázové charakteristiky pro jednotlivé filtrační funkce všech zapojení. Charakter fázových charakteristik byl srovnatelný s teoretickými předpoklady. Výsledky měření fázových charakteristik lze nalézt v příloze č. 2. V příloze č. 1 se pak nachází obrázky znázorňující návrhy desek plošných spojů v návrhovém prostředí Eagle včetně fotografií zhotovených desek plošných spojů a v příloze č. 3 se nachází obsah elektronické přílohy.

# LITERATURA

- [1] HÁJEK, K. a J. SEDLÁČEK. *Kmitočtové filtry*. Praha, BEN 2002, 536s. ISBN 80-7300-023-7
- [2] DOSTÁL, Tomáš a Vladimír AXMAN. *Elektrické filtry*. Elektronická skripta FEKT VUT v Brně.
- [3] KUBÍK, Milan. *Diferenční kmitočtové filtry s moderními aktivními prvky*. Brno, 2011. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Ing. Jan Jeřábek.
- [4] BOKŮVKA, Tomáš. *Proudový zesilovač v diferenčních kmitočtových filtrech*. Brno, 2012. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Ing. Jan Jeřábek, Ph.D.
- [5] HORÁK, Ondřej. *Fázovací obvody s moderními funkčními bloky*. Brno, 2009. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Prof. Ing. Tomáš Dostál, DrSc.
- [6] HORÁK, Ondřej. *Aktivní říditelný kmitočtový filtr v proudovém módu*. Brno, 2010. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce prof. Ing. Lubomír Brančík, CSc.
- [7] BEČVÁŘ, Daniel a Kamil VRBA. *Univerzální proudový konvektor*. Elektorevue - Internetový časopis, 2000. Dostupné z: <http://www.elektorevue.cz/clanky/00007/index.html>
- [8] JEŘÁBEK, Jan a Kamil VRBA. *Návrh přeladitelného kmitočtového filtru s proudovými aktivními prvky za pomoci metody grafu signálových toků*. Elektorevue - internetový časopis, 2009. Dostupné z: <http://www.elektorevue.cz/cz/clanky/analogova-technika--vzajemny-a-d-prevod/25/navrh-preladitelného-kmitočtového-filtru-s-proudovými-aktivními-prvky-za-pomoci-metody-grafu-signalových-toků/>
- [9] JEŘÁBEK, Jan. *Kmitočtové filtry s proudovými aktivními prvky*. Brno, 2011. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.
- [10] ŠOTNER, Roman. *Studium elektronického řízení a reálného chování variabilních filtračních a oscilačních moderních aktivních prvků*. Brno, 2011. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce prof. Ing. Tomáš Dostál, DrSc.
- [11] JEŘÁBEK, Jan a Kamil VRBA. *Current-mode tunable and adjustable filter with digitally adjustable current amplifier and transconductance amplifiers*. 2010. Dostupné z: <http://www.wseas.us/e-library/conferences/2010/Tenerife/CSCC/CSCC-15.pdf>
- [12] SUCHÁNEK, Tomáš. *Elektronicky říditelné kmitočtové filtry s proudovými aktivními prvky*. Brno, 2011. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce ING. David Kubánek, Ph.D.
- [13] LANGHAMMER, Lukáš a Jan JEŘÁBEK. *Fully Differential Universal Current-Mode Frequency Filters Based on Signal-Flow Graphs Method*. Ijates - internetový časopis 2014. Dostupné z: <http://www.ijates.org/index.php/ijates/article/view/62/68>
- [14] LANGHAMMER, L., J. JEŘÁBEK, J. POLÁK a K. VRBA. *Fully Differential Universal Current-Mode Frequency Filters Based on Signal-Flow Graphs Method*. 2014. Dokument byl dodán vedoucím práce.

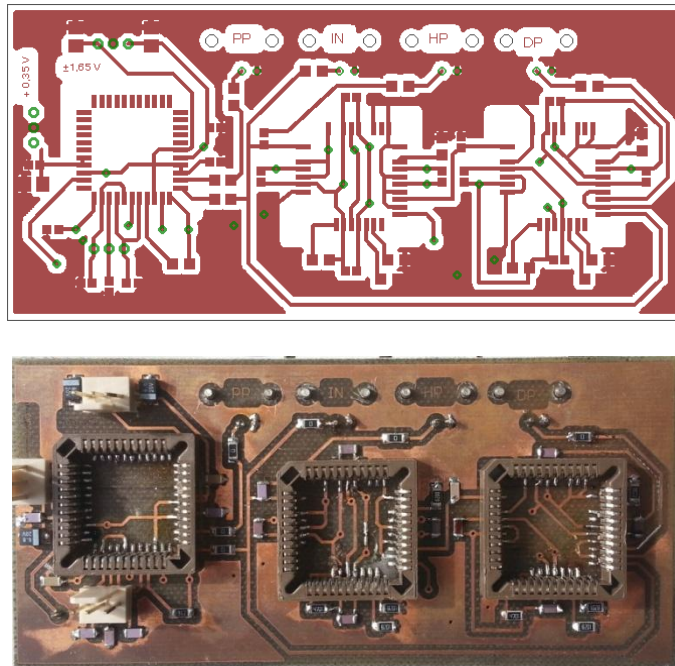
## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

BOTA	Balanced transconductance amplifier (transkonduktanční zesilovač s plovoucím výstupem)
BNC	Bayonet Neill–Concelman (konektor)
C	Kondenzátor
CCII+/-	Current conveyor second generation (proudový konvektor druhé generace)
CF	Current follower (proudový sledovač)
DACA	Digital Adjustable Current Amplifier (digitálně říditelný proudový zesilovač)
DP	Dolní propust
DPS	Deska plošných spojů
F-D	Full differential (plně diferenční)
HP	Horní propust
MO-CF	Multiple output- Current follower (proudový sledovač s více výstupy)
PCB	Printed circuit board (deska plošných spojů)
PP	Pásmová propust
PZ	Pásmová zadrž
S-E	Single-ended (nediferenční, jednoduše zakončený)
UCC	Universal current conveyor (univerzální proudový konvektor)

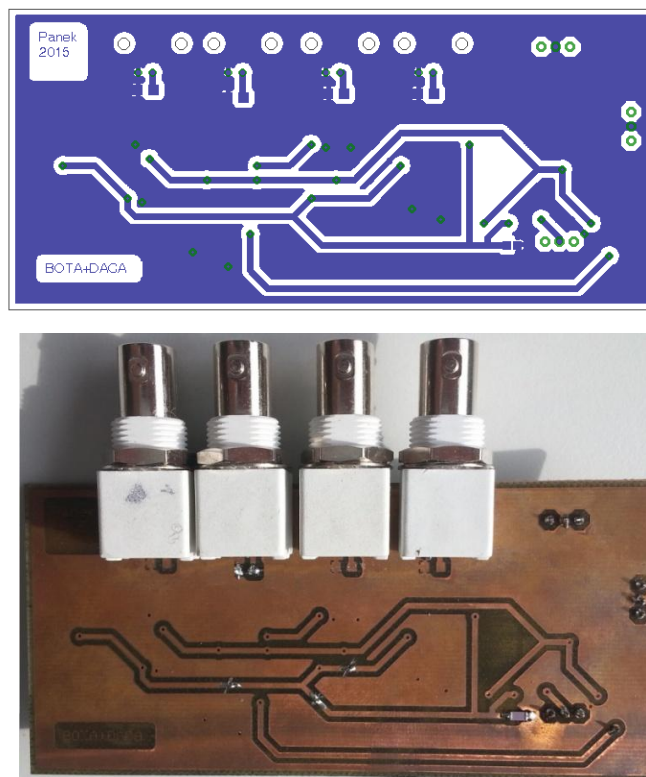
# SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Návrhy DPS a fotografie osazených DPS .....	58
Příloha 2 Fázové charakteristiky přenosových funkcí realizovaných filtrů .....	66
Příloha 3 Obsah přiloženého CD .....	70

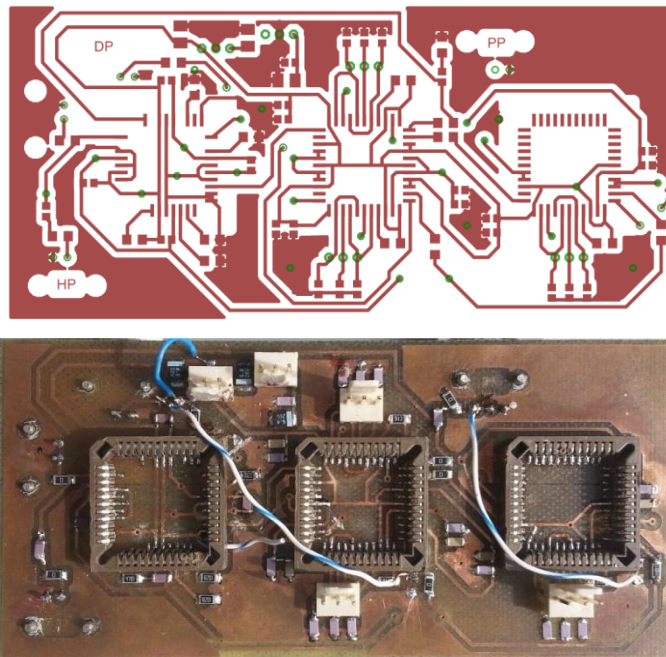
## Příloha 1 Návrhy DPS a fotografie osazených DPS



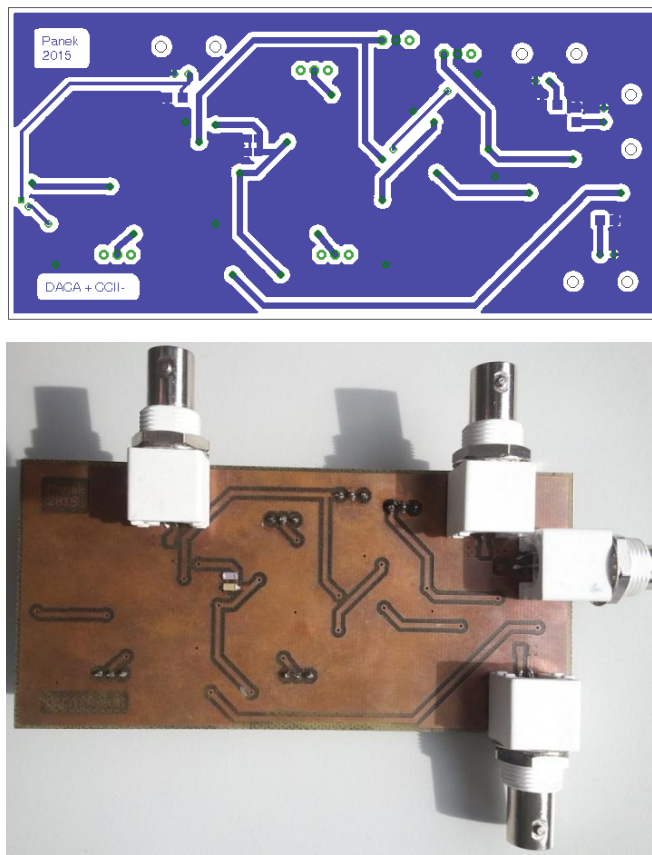
Obr. 40 DPS - Nediferenční multifunkční kmitočtový filtr s prvky BOTA a DACA – strana TOP



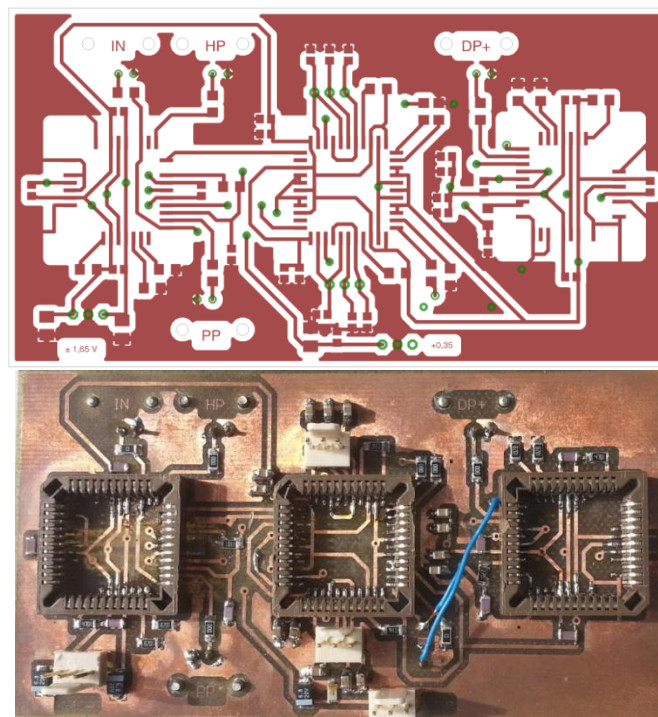
Obr. 41 DPS - Nediferenční multifunkční kmitočtový filtr s prvky BOTA a DACA – strana BOTTOM



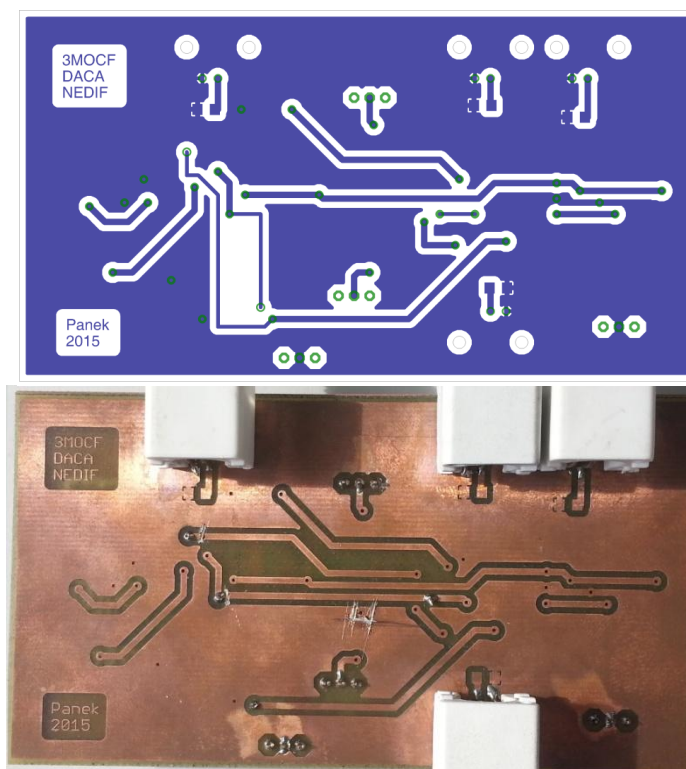
**Obr. 42 DPS - Nediferenční filtr s možností řízení změny činitele jakosti a charakteristického kmitočtu pomocí třech prvků DACA – strana TOP**



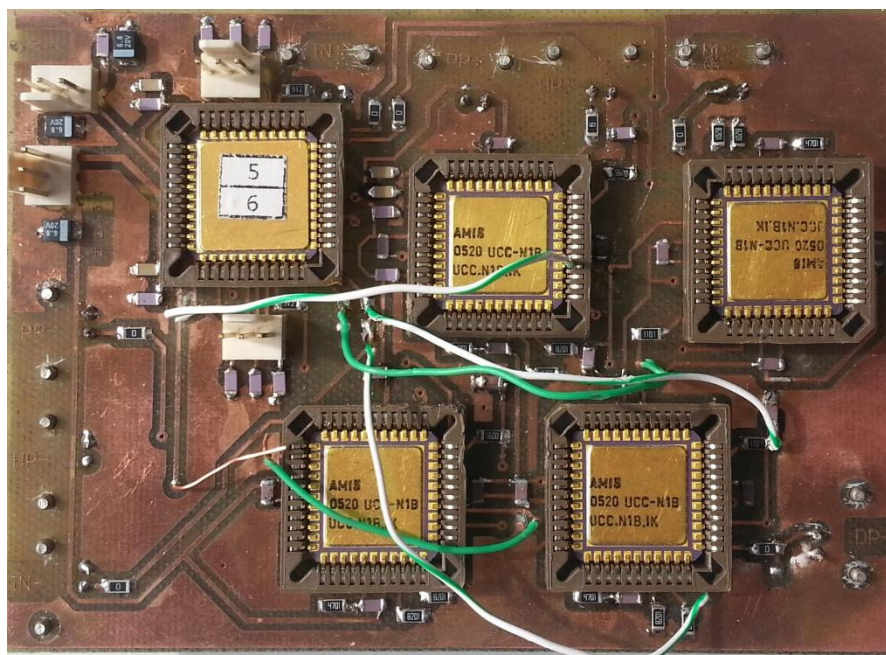
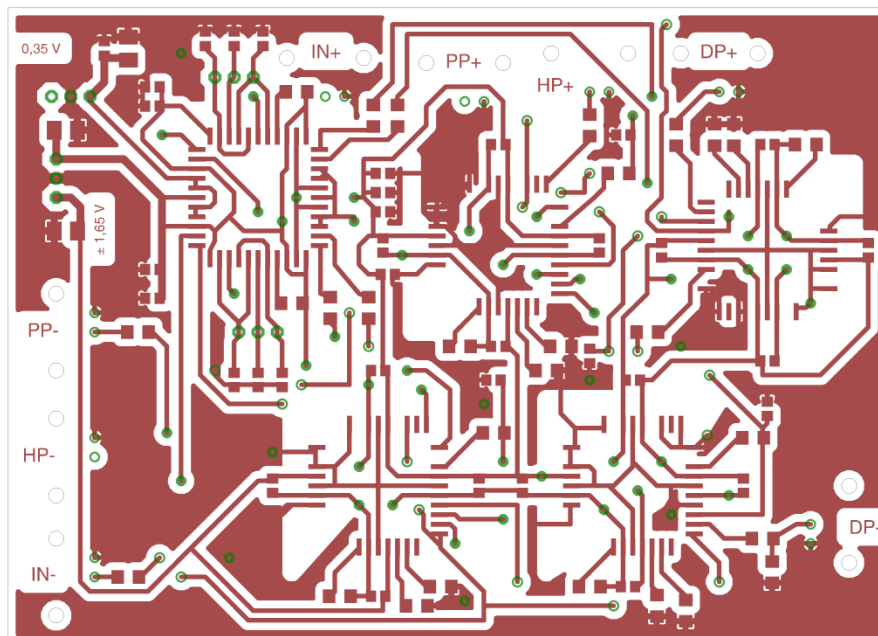
**Obr. 43 DPS - Nediferenční filtr s možností řízení změny činitele jakosti a charakteristického kmitočtu pomocí třech prvků DACA – strana TOP BOTTOM**



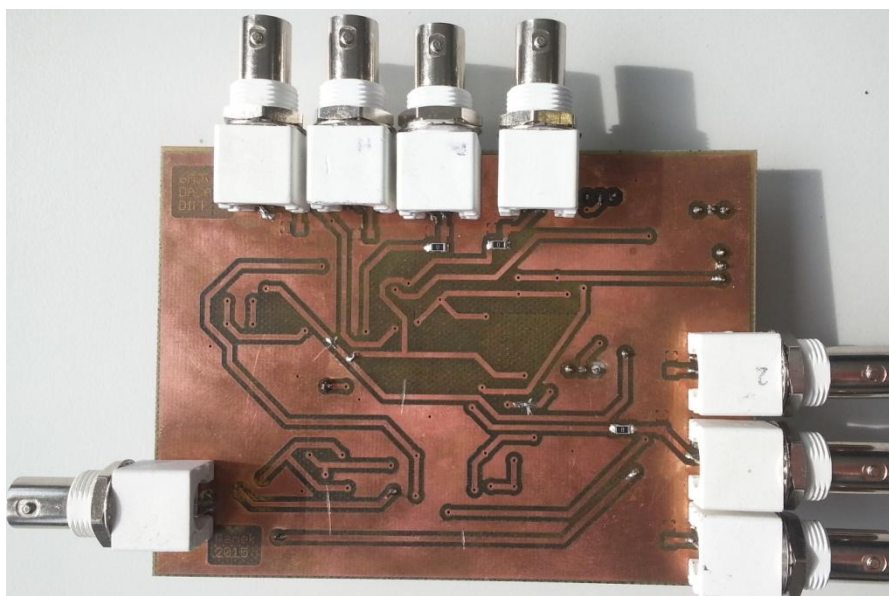
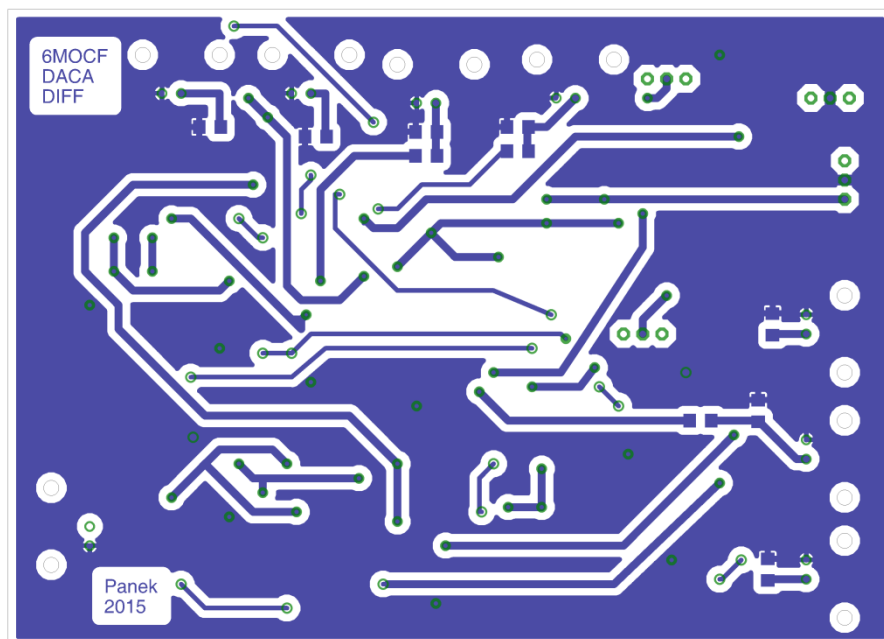
**Obr. 44 DPS - Nediferenční univerzální filtr s použitím dvou prvků DACA a tří proudových sledovačů – strana TOP**



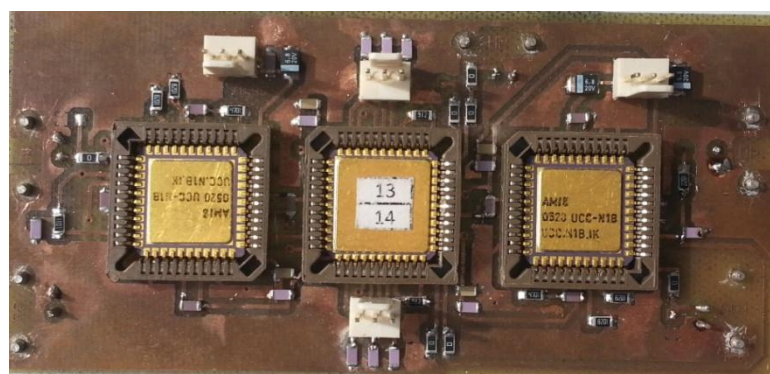
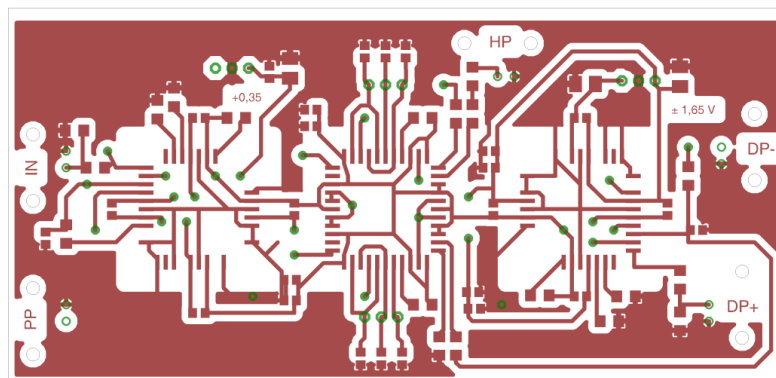
**Obr. 45 DPS - Nediferenční univerzální filtr s použitím dvou prvků DACA a tří proudových sledovačů – strana BOTTOM**



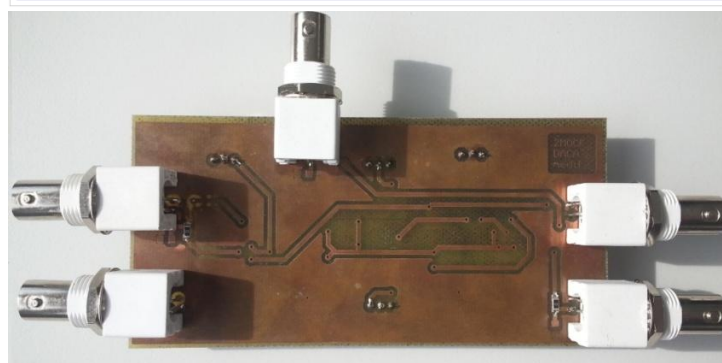
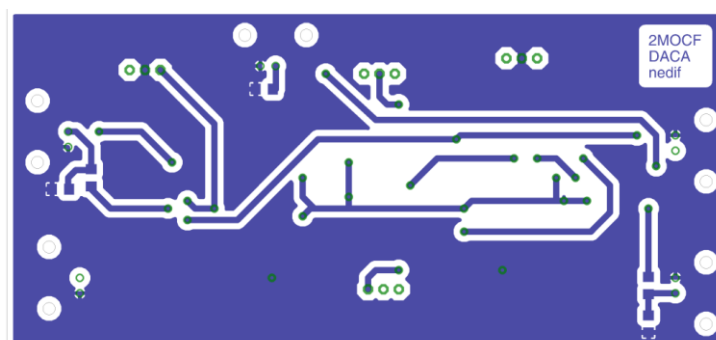
**Obr. 46 DPS - Diferenční univerzální filtr s použitím dvou prvků DACA a šesti proudových sledovačů – strana TOP**



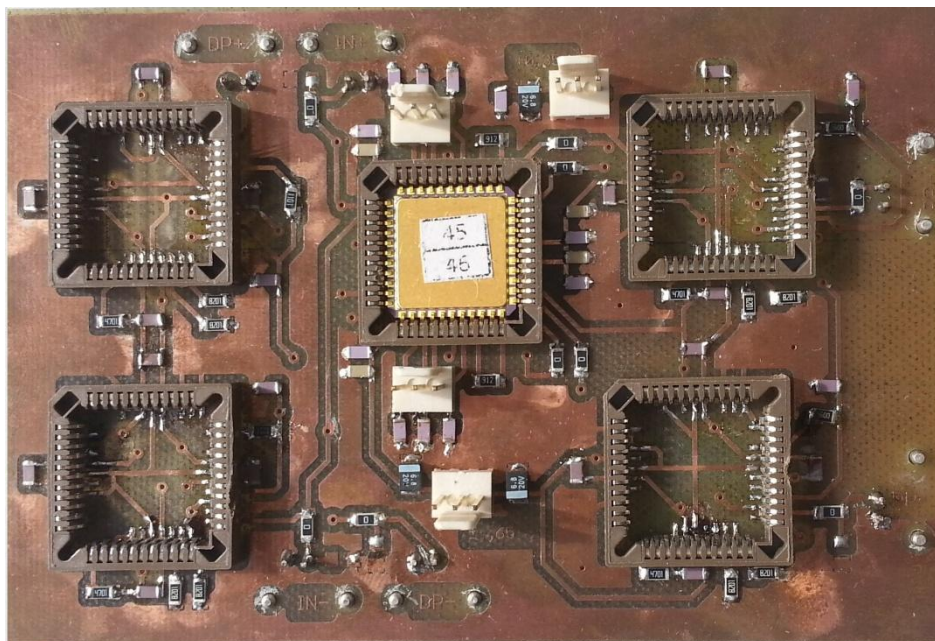
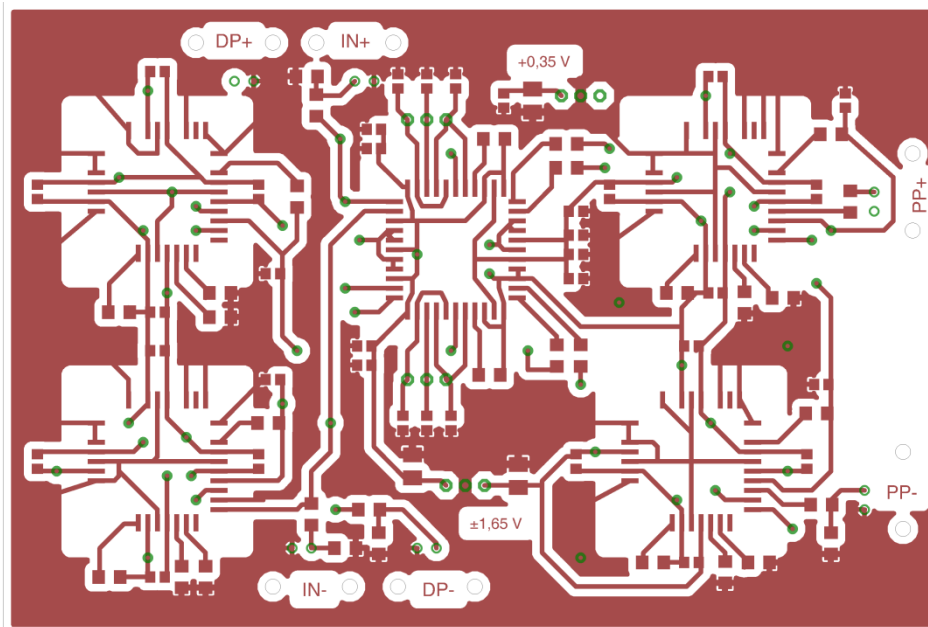
**Obr. 47 DPS - Diferenční univerzální filtr s použitím dvou prvků DACA a šesti proudových sledovačů – strana BOTTOM**



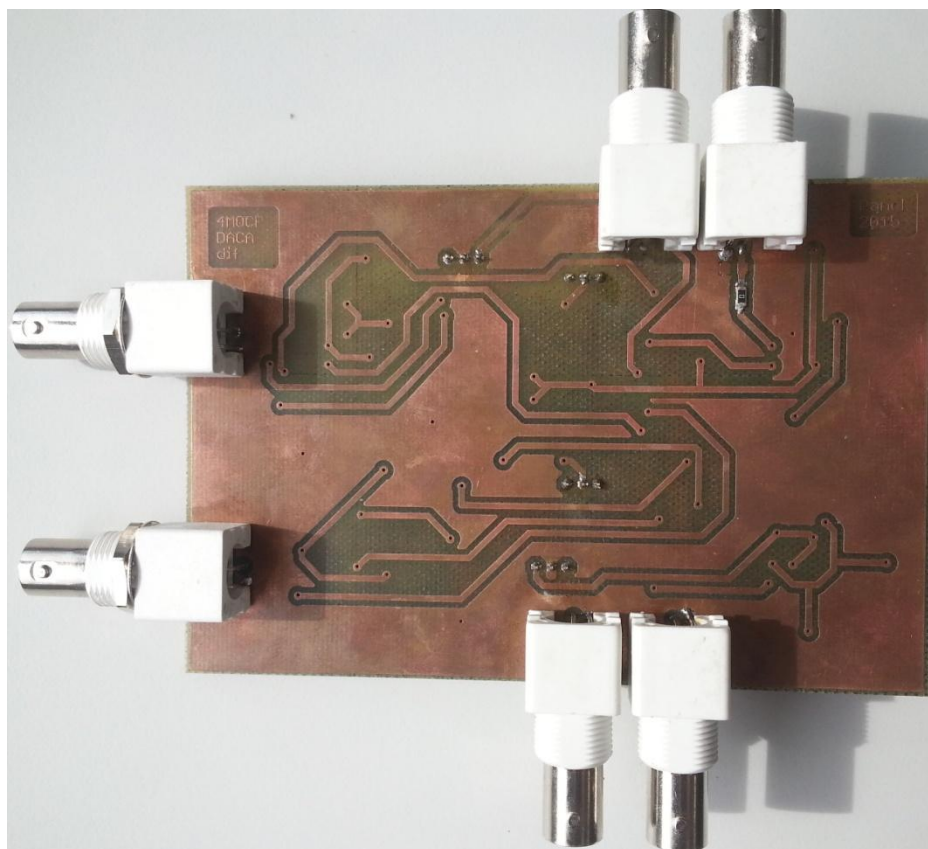
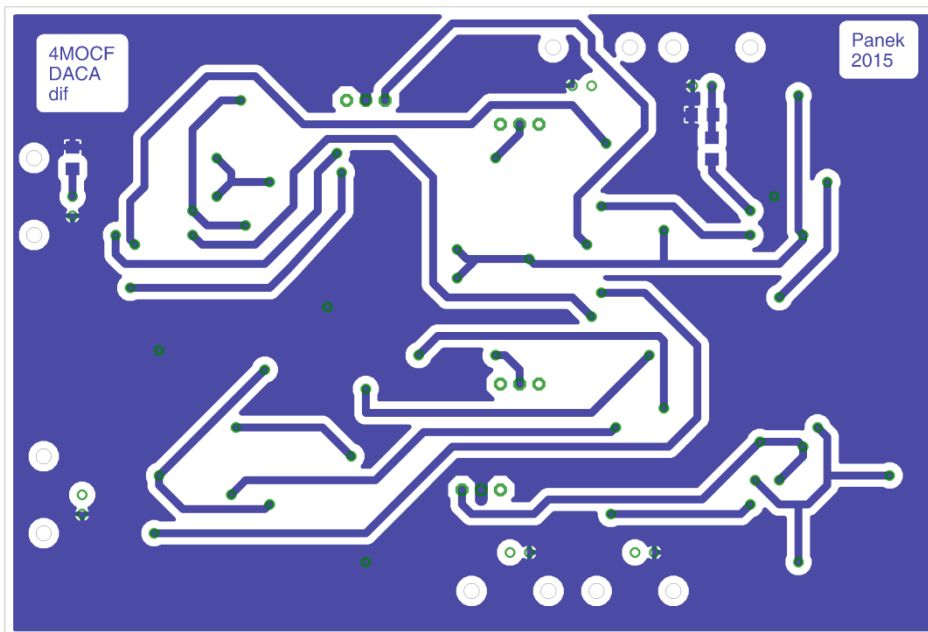
Obr. 48 DPS - Nediferenční univerzální filtr s použitím dvou prvků DACA a dvou proudových sledovačů – strana TOP



Obr. 49 DPS - Nediferenční univerzální filtr s použitím dvou prvků DACA a dvou proudových sledovačů – strana BOTTOM

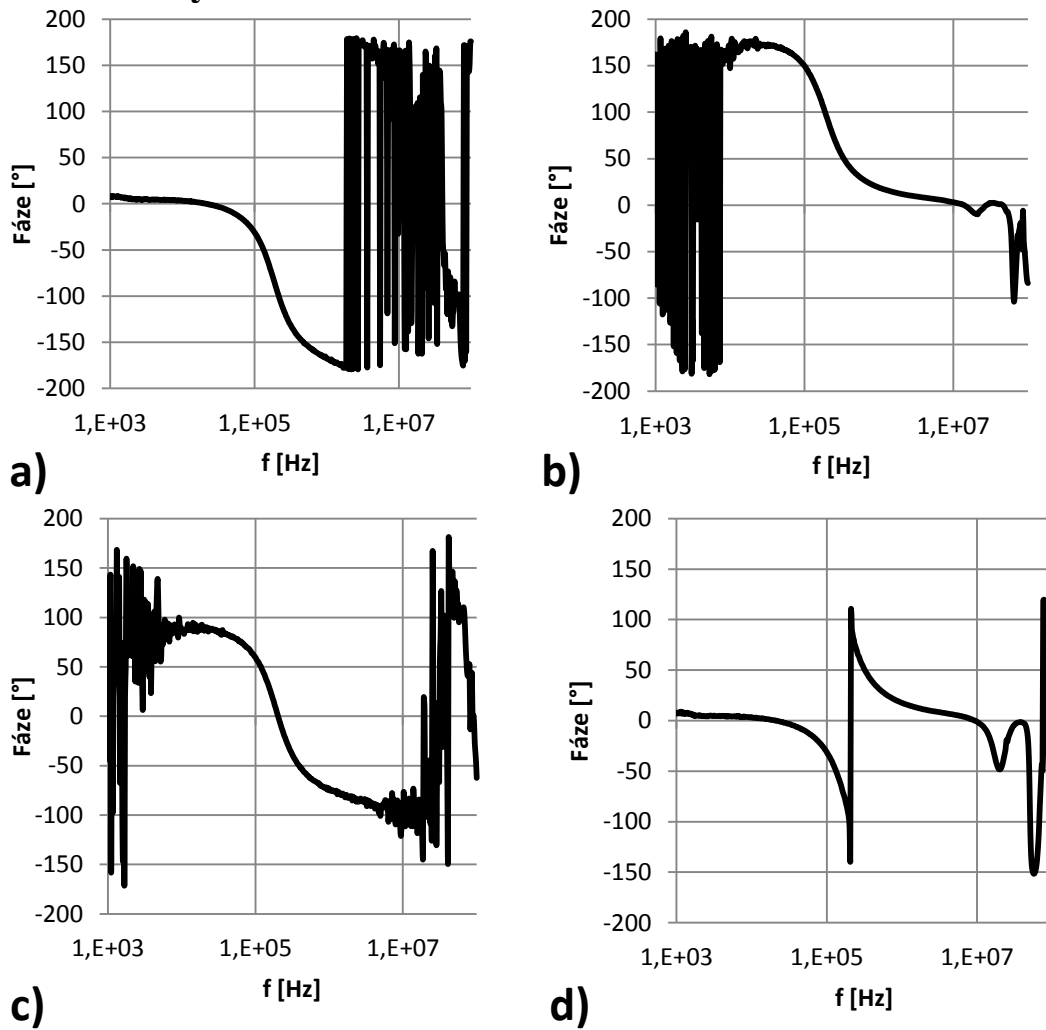


**Obr. 50 DPS - Diferenční univerzální filtr s použitím dvou prvků DACA a čtyř proudových sledovačů – strana TOP**

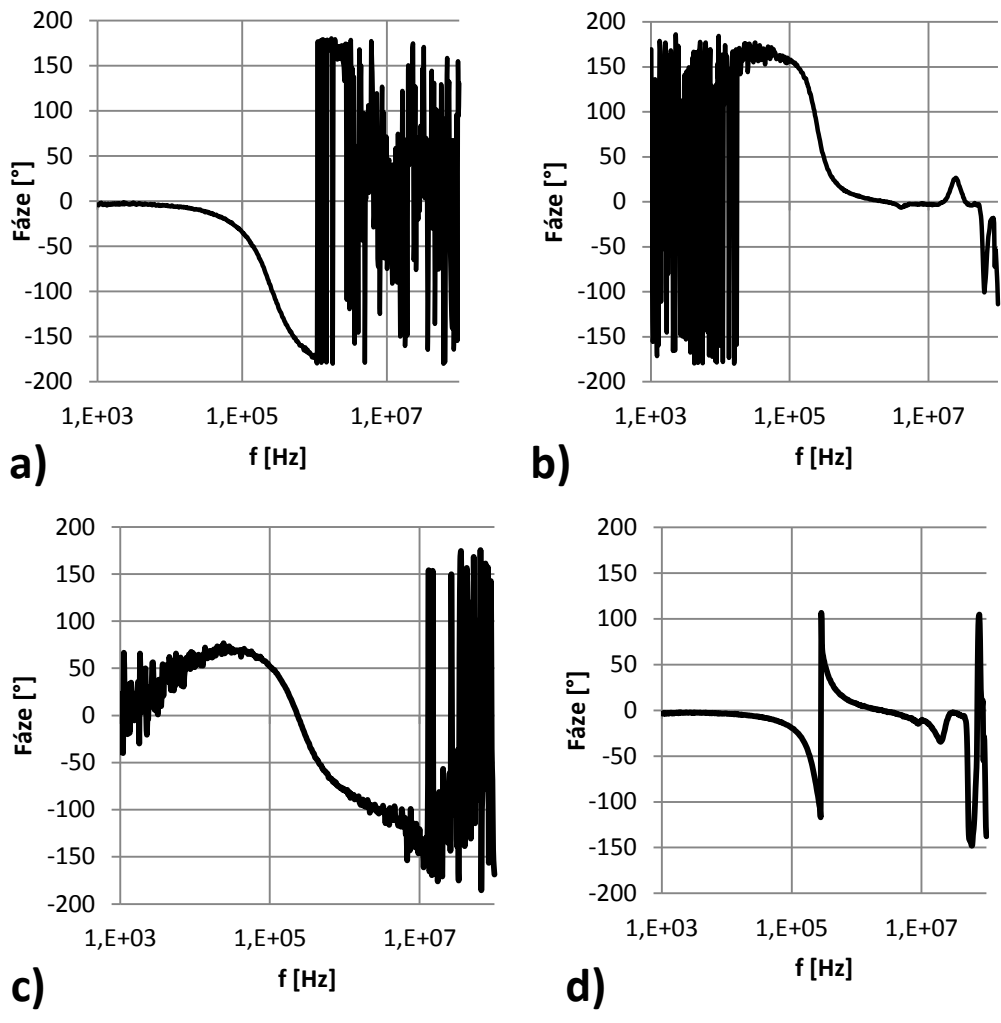


Obr. 51 DPS - Diferenční univerzální filtr s použitím dvou prvků DACA a čtyř proudových sledovačů – strana BOTTOM

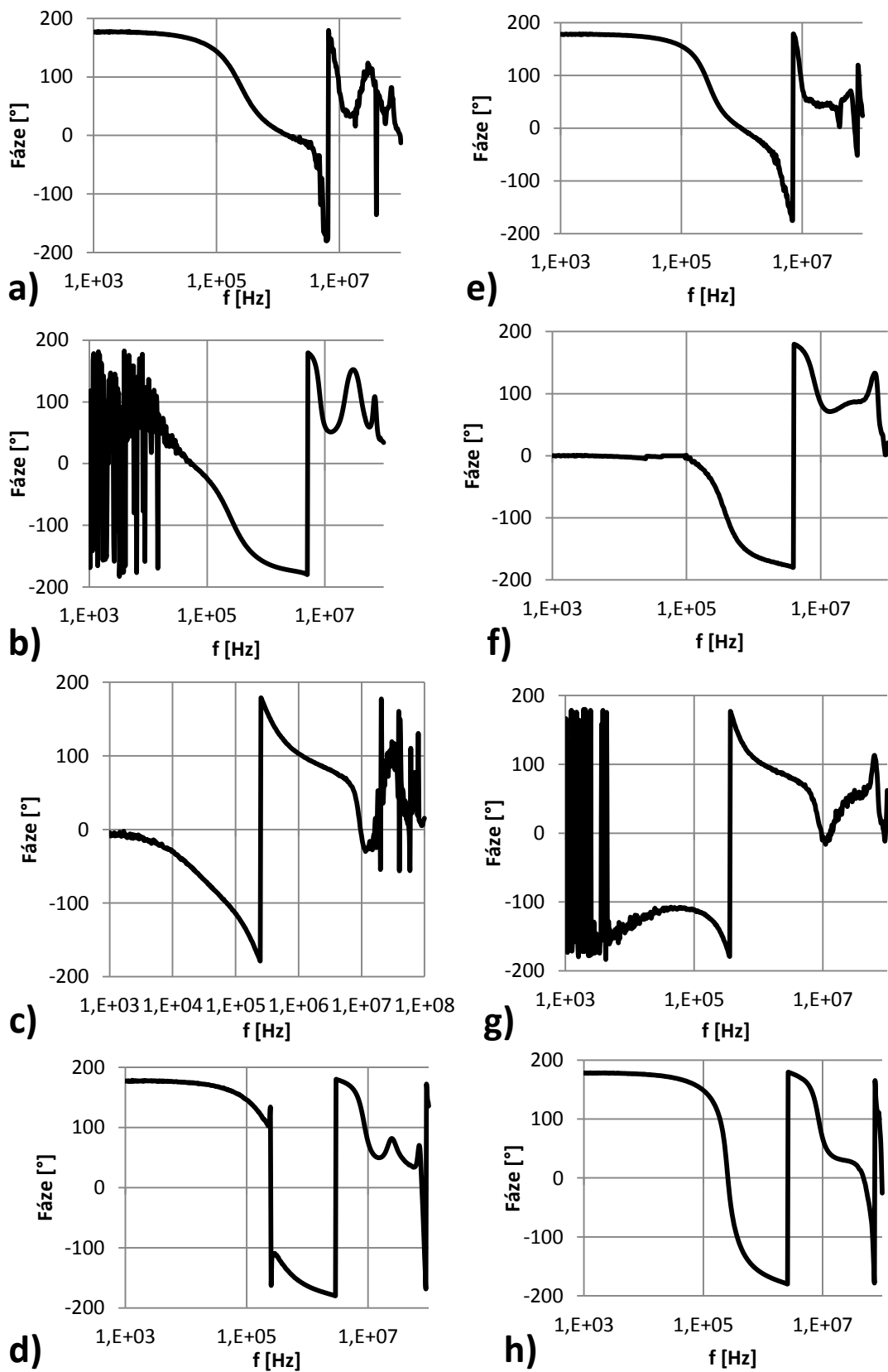
## Příloha 2 Fázové charakteristiky přenosových funkcí realizovaných filtrů



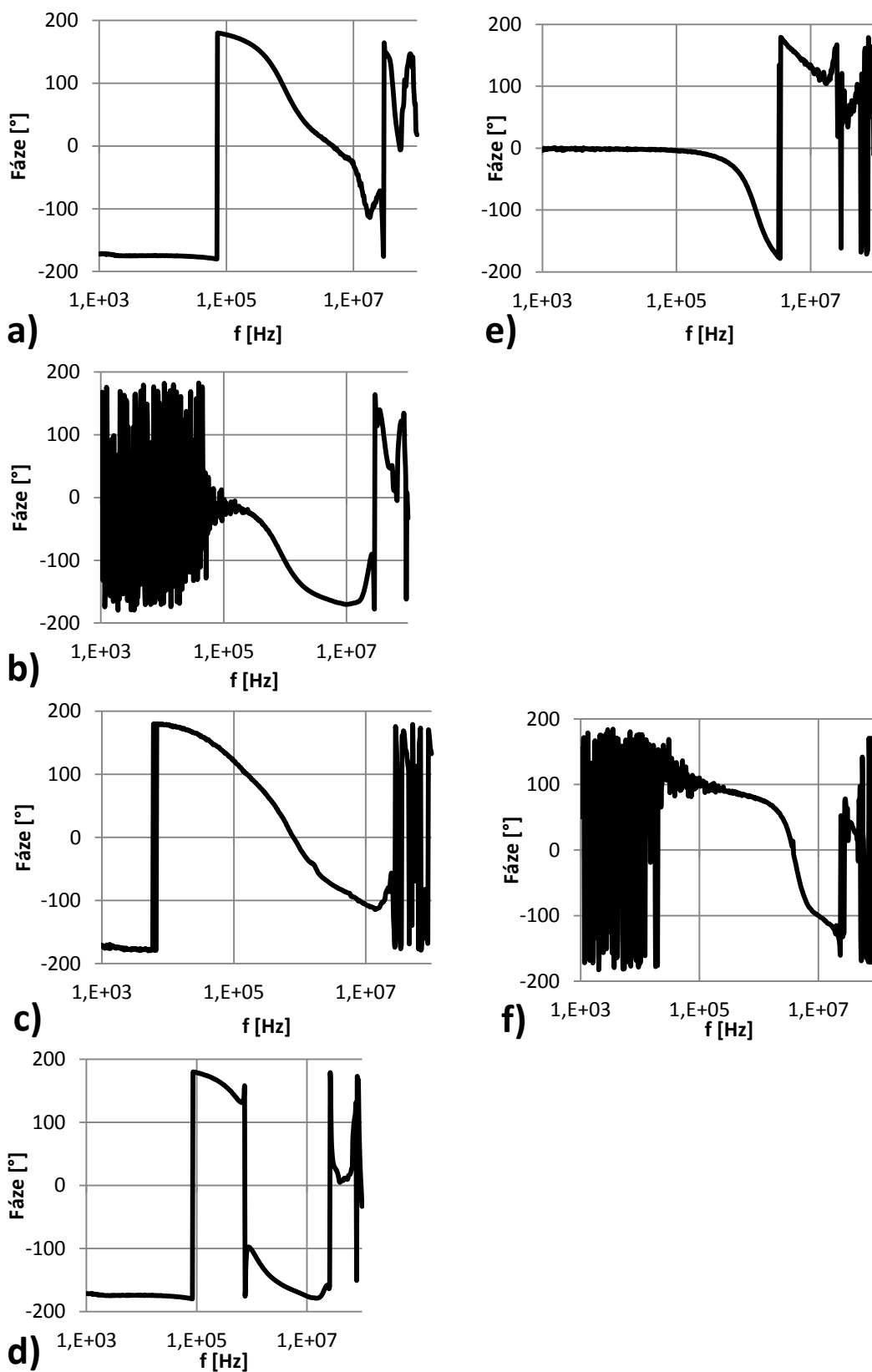
Obr. 52 Fázové charakteristiky a) DP, b) HP, c) PP, d) PZ - Nediferenční multifunkční kmitočtový filtr s prvky BOTA a DACA



Obr. 53 Fázové charakteristiky a) DP, b) HP, c) PP, d) PZ - Nediferenční filtr s možností řízení změny činitele jakosti a charakteristického kmitočtu pomocí třech prvků DACA



Obr. 54 Fázové charakteristiky a) DP, b) HP, c) PP, d) PZ, e) DP dif, f) HP dif, g) PP dif, h) PZ dif - Diferenční univerzální filtr s použitím dvou prvků DACA a šesti proudových sledovačů



Obr. 55 Fázové charakteristiky a) DP, b) HP, c) PP, d) PZ, e)DP dif, f) PP dif - Diferenční univerzální filtr s použitím dvou prvků DACA a čtyř proudových sledovačů

### **Příloha 3 Obsah přiloženého CD**

Na přiloženém CD jsou uloženy veškerá naměřená data a elektronická verze bakalářské práce. Na CD jsou uloženy soubory (Bakalářská práce\_Pánek\_David.pdf a Bakalářská práce\_Pánek\_David.docx) a také čtyři složky, jejichž obsah odpovídá následující struktuře.

- Bakalářská práce\_Pánek\_David.pdf
- Bakalářská práce\_Pánek\_David.docx
- Orcad a Snap
  - Složka obsahuje soubory vytvořené při simulacích testovaných kmitočtových filtrů
- Obrázky
  - Složka obsahuje obrázky použité v této práci včetně fotografií realizovaných filtrů
- Eagle – návrhy DPS
  - Složka obsahuje veškeré návrhy desek plošných spojů
- Naměřená data
  - Složka obsahuje soubory v Excelu, jejichž obsahem jsou naměřená data