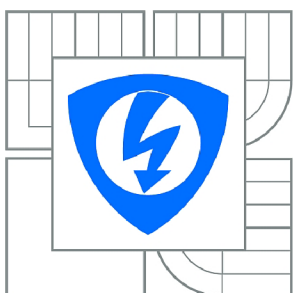




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

# NÁVRH PLNĚ DIFERENČNÍCH KMITOČTOVÝCH FILTRŮ S PROUDOVÝMI AKTIVNÍMI PRVKY ZA POMOCI METODY GRAFU SIGNÁLOVÝCH TOKŮ

FULLY-DIFFERENTIAL FREQUENCY FILTER DESIGNING WITH CURRENT ACTIVE ELEMENTS  
USING SIGNAL-FLOW GRAPHS METHOD

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. PETR ŠTORK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. LUKÁŠ LANGHAMMER

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor  
Telekomunikační a informační technika

**Student:** Bc. Petr Štork

**ID:** 130675

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2013/2014

## NÁZEV TÉMATU:

**Návrh plně diferenčních kmitočtových filtrů s proudovými aktivními prvky za pomoci metody grafu signálových toků**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte problematiku návrhu kmitočtových filtrů a to především návrhu za pomoci metody grafu signálových toků. Na základě známých zapojení těchto filtrů pracujících v proudovém módu a s vybranými aktivními prvky (proudové sledovače, transkonduktanční operační zesilovače, proudové zesilovače (DACA)) a za pomoci metody grafu signálových toků navrhnete jejich plně diferenční obdoby. Funkčnost navržených zapojení a jejich vlastnosti bude ověřena pomocí počítačových simulací za použití dostupných modelů aktivních prvků. Dále provedte srovnání vlastností nediferenčních (původních) a plně diferenčních (navržených) struktur. Vybraná navržená zapojení dále realizujte do podoby desek plošných spojů a provedte experimentální měření a srovnání s ideálními a simulovanými výsledky.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] □ KOTON, J.; VRBA, K. Zobecněné metody návrhu kmitočtových filtrů. Elektrotechnika - Internetový časopis (<http://www.elektrotechnika.cz>), 2008, roč. 2008, č. 26, s. 1 ( s.) ISSN: 1213- 1539.
- [2] □ JERABEK, J.; VRBA, K. Návrh přeladitelného kmitočtového filtru s proudovými aktivními prvky za pomoci metody grafu signálových toků. Elektrotechnika - Internetový časopis (<http://www.elektrotechnika.cz>), 2009, roč. 2009, č. 42, s. 1-7. ISSN: 1213- 1539.

**Termín zadání:** 10.2.2014

**Termín odevzdání:** 28.5.2014

**Vedoucí práce:** Ing. Lukáš Langhammer

**Konzultanti diplomové práce:**

**doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc.**

*Předseda oborové rady*

## ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá návrhem kmitočtových filtrů pracujících v proudovém, plně diferenčním módu, a to za pomoci grafů signálových toků. První část práce je zaměřena na obecný popis kmitočtových filtrů, jejich funkci a rozdělení. V další části práce jsou popisovány aktivní prvky, jenž tvoří tyto kmitočtové filtry, jako jsou více-výstupové proudové sledovače (MO-CF), dvou či více-výstupové transkonduktanční zesilovače (BOTA, MOTA) a digitálně říditelné diferenční proudové zesilovače (DACA). Dále je teoreticky probírána problematika a různé způsoby návrhu těchto filtrů. Ve zbývajících částech práce je podrobně popsáno šest navržených zapojení kmitočtových filtrů, které jsou pomocí takzvaného zrcadlení pasivních prvků převedeny na diferenční zapojení. Uvedeny jsou výpočty pasivních součástek a výsledky simulací, kde jsou porovnávány nediferenční a diferenční varianty těchto navržených kmitočtových filtrů. Nakonec jsou vybrány některé varianty návrhů, které byly zrealizovány, následně odměřeny a porovnány zejména mezi sebou a také se simulovanými výsledky.

## KLÍČOVÁ SLOVA

aktivní prvky, proudový mód, plně diferenční filtr, M-C grafy, grafy signálových toků, DACA, UCC, DO-CF, MO-CF, OTA, BOTA, MOTA

## ABSTRACT

This master's thesis deals with designing of fully-differential current-mode frequency filters using signal-flow graphs method. The first part is focused on a general description of frequency filters, its function and division. Active elements that create these frequency filters, such as multi-output current follower (MO-CF), balanced or multi-output transconductance amplifier (BOTA, MOTA) and digitally adjustable current amplifier (DACA) are described in the following part. Next, problems and various techniques of designing such filters are discussed on a theoretic basis. In the remaining part of the thesis there are six circuits of frequency filters described in detail; these connections are then transferred of passive elements to a proposed connections, with the assistance of a so-called reflection. Calculations of passive form are stated, as well as results of simulations, where non-differential and differential variations of these designed frequency filters are compared. Finally, it has been selected some variants of designs, which has been manufactured, then measured out and result has been compare between each other.

## KEYWORDS

active elements, current mode, fully-differential filter, M-C graphs, signal flow graph, DACA, UCC, DO-CF, MO-CF, OTA, BOTA, MOTA

ŠTORK, Petr *Návrh plně diferenčních kmitočtových filtrů s proudovými aktivními prvky za pomoci metody grafu signálových toků*: diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2014. 91 s. Vedoucí práce byl Ing. Lukáš Langhammer,

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Návrh plně diferenčních kmitočtových filtrů s proudovými aktivními prvky za pomoci metody grafu signálových toků“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové 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 diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové 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 autorského 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.

Brno .....

.....

(podpis autora)

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce, panu Ing. Lukáši Langhammerovi, za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno .....

.....

(podpis autora)



Faculty of Electrical Engineering  
and Communication  
Brno University of Technology  
Technicka 12, CZ-61600 Brno  
Czech Republic  
<http://www.six.feec.vutbr.cz>

## PODĚKOVÁNÍ

Výzkum popsáný v tomto semestrálním projektu byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

Brno .....

.....

(podpis autora)



EVROPSKÁ UNIE  
EVROPSKÝ FOND PRO REGIONÁLNÍ ROZVOJ  
INVESTICE DO VAŠÍ BUDOUCNOSTI



OP Výzkum a vývoj  
pro inovace

# OBSAH

|   |           |
|---|-----------|
| Úvod  | 14        |
| <b>1 KMITOČTOVÉ FILTRY</b>  | <b>15</b> |
| 1.1 Přenosové vlastnosti filtrů   | 16        |
| 1.2 Rozdělení filtrů  | 16        |
| 1.3 Základní parametry filtrů   | 18        |
| 1.3.1 Řád filtru  | 18        |
| 1.3.2 Mezní kmitočet  | 18        |
| 1.3.3 Jakost filtru   | 18        |
| 1.4 Proudový mód  | 18        |
| 1.5 Symetrie obvodů   | 18        |
| 1.5.1 Nesymetrické obvody   | 18        |
| 1.5.2 Symetrické (diferenční) obvody  | 19        |
| 1.6 Návrh diferenčních struktur   | 20        |
| 1.6.1 Transformace podélných struktur na diferenční                               | 20        |
| 1.6.2 Transformace příčných struktur na diferenční                                | 21        |
| <b>2 AKTIVNÍ PRVKY</b>  | <b>22</b> |
| 2.1 Proudový sledovač   | 22        |
| 2.2 Transkonduktanční operační zesilovač  | 24        |
| 2.3 Digitálně říditelný proudový zesilovač  | 26        |
| <b>3 Metody návrhu kmitočtových filtrů</b>  | <b>28</b> |
| 3.1 Návrh za pomoci úplné admitanční sítě   | 28        |
| 3.2 Způsob rozšiřování autonomních obvodů   | 30        |
| 3.3 Návrh filtrů se syntetickými prvky vyššího řádu                               | 31        |
| 3.4 Návrh filtrů pomocí grafů signálových toků                                    | 32        |
| 3.4.1 Obecný návrh M-C grafů  | 32        |
| 3.4.2 Výhody použití M-C grafů  | 35        |
| 3.4.3 Návrh filtračního obvodu pomocí zjednodušených M-C grafů                    | 35        |
| <b>4 Návrh diferenčních filtrů pomocí grafů signálových toků</b>                  | <b>38</b> |
| 4.1 Návrh filtru pro řízení mezního kmitočtu                                      | 38        |
| 4.2 Návrh filtru pro řízení změny mezního kmitočtu a změnu činitele jakosti       | 43        |
| 4.3 Návrh multifunkčního kmitočtového filtru s prvky MOTA                         | 48        |
| 4.4 Návrh multifunkčního kmitočtového filtru s prvky MOTA a třemi zesilovači DACA | 53        |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 4.5      | Multifunkční kmitočtový filtr s prvky MOTA a třemi proudovými zesilovači DACA . . . . . | 58        |
| 4.6      | Multifunkční kmitočtový filtr s prvky BOTA a dvěma proudovými zesilovači DACA . . . . . | 62        |
| <b>5</b> | <b>Praktická realizace</b>  | <b>66</b> |
| 5.1      | Realizace filtru pro řízení mezního kmitočtu . . . . .                                  | 67        |
| 5.2      | Realizace multifunkčního kmitočtového filtru s prvky MOTA . . . . .                     | 70        |
| <b>6</b> | <b>Závěr</b>  | <b>75</b> |
|          | <b>Literatura</b>   | <b>76</b> |
|          | <b>Seznam příloh</b>  | <b>80</b> |
| <b>A</b> | <b>Návrh DPS v programu Eagle 6.5.0</b>   | <b>81</b> |
| A.1      | Nediferenční kmitočtový filtr z kapitoly 4.1 . . . . .                                  | 81        |
| A.2      | Diferenční kmitočtový filtr z kapitoly 4.1 . . . . .                                    | 83        |
| A.3      | Nediferenční kmitočtový filtr z kapitoly 4.3 . . . . .                                  | 85        |
| A.4      | Diferenční kmitočtový filtr z kapitoly 4.3 . . . . .                                    | 87        |
| <b>B</b> | <b>Fotografie zkonstruovaných převodníků</b>  | <b>89</b> |
| <b>C</b> | <b>Soubory na CD</b>  | <b>91</b> |



# SEZNAM OBRÁZKŮ

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 1.1 | Příklad modulové charakteristiky ideálního (1) a reálného (2) filtru typu DP . . . . .                                 | 15 |
| 1.2 | Filtr jako lineární dvojbran . . . . .   | 16 |
| 1.3 | Zjednodušené zapojení nesymetrického vedení a) napěťové b) proudové  | 19 |
| 1.4 | Zjednodušené zapojení symetrického vedení a) napěťové b) proudové  | 19 |
| 1.5 | Zrcadlení podélných rezistorů a kapacitorů na diferenční strukturu . .   | 20 |
| 1.6 | Zrcadlení příčných rezistorů a kapacitorů na diferenční strukturu . . .  | 21 |
| 2.1 | a) Schématický model prvku MO-CF, b) Zjednodušený M-C graf MO-CF . . . . .   | 22 |
| 2.2 | Možná realizace MO-CF pomocí prvku UCC . . . . .   | 23 |
| 2.3 | Simulační model prvku MO-CF . . . . .  | 24 |
| 2.4 | a) Schematická značka prvku BOTA, b) zjednodušený M-C graf prvku BOTA . . . . .  | 25 |
| 2.5 | Možná realizace BOTA pomocí prvku UCC . . . . .  | 25 |
| 2.6 | Simulační model prvku BOTA . . . . .   | 26 |
| 2.7 | a) Schematická značka prvku DACA, b) zjednodušený M-C graf prvku DACA . . . . .  | 26 |
| 2.8 | Simulační model prvku DACA . . . . .   | 27 |
| 3.1 | Úplná admitanční síť se dvěma aktivními prvky GCC (Generalized Current Conveyor) . . . . .                             | 29 |
| 3.2 | a) Původní autonomní obvod, b) rozšířený autonomní obvod . . . . .   | 30 |
| 3.3 | Syntetické dvojpóly typu a) DP, b) EP, c) DS, d) ES . . . . .  | 31 |
| 3.4 | Obecná realizace pomocí syntetických prvků a) sériová kombinace, b) paralelní kombinace . . . . .                      | 32 |
| 3.5 | Dvě samostatné vlastní smyčky . . . . .  | 35 |
| 3.6 | Dva nedotýkající se integrační články . . . . .  | 36 |
| 3.7 | Graf obvodu s hlavní smyčkou . . . . .   | 36 |
| 3.8 | Výsledný zjednodušený M-C graf navrženého filtru . . . . .   | 37 |
| 4.1 | Navržený M-C graf pro změnu mezního kmitočtu . . . . .   | 39 |
| 4.2 | Nediferenční zapojení pro změnu mezního kmitočtu . . . . .   | 39 |
| 4.3 | Diferenční zapojení pro změnu mezního kmitočtu . . . . .   | 40 |
| 4.4 | Výsledky simulací (DP, PP, HP a PZ) navrženého filtru ze schematu na Obr. 4.2 a Obr. 4.3 . . . . .                     | 41 |
| 4.5 | Charakteristika DP pro všechny krokované mezní kmitočty navrženého filtru ze schematu na Obr. 4.2 a Obr. 4.3 . . . . . | 42 |
| 4.6 | Navržený M-C graf pro změnu mezního kmitočtu a činitele jakosti . .  | 43 |
| 4.7 | Nediferenční zapojení pro změnu mezního kmitočtu a činitele jakosti .  | 44 |

|      |   |    |
|------|---|----|
| 4.8  | Diferenční zapojení pro změnu mezního kmitočtu a činitele jakosti . .   | 44 |
| 4.9  | Výsledky simulací (DP, PP, HP) navrženého filtru ze schematu na<br>Obr. 4.7 a Obr. 4.8 . . . . .                                      | 46 |
| 4.10 | Charakteristika DP pro všechny krokované mezní kmitočty navrže-<br>ného filtru ze schematu na Obr. 4.7 a Obr. 4.8 . . . . .           | 46 |
| 4.11 | Charakteristika PP pro všechny krokované změny činitele jakosti na-<br>vrženého filtru ze schematu na Obr. 4.7 a Obr. 4.8 . . . . .   | 47 |
| 4.12 | Navržený M-C graf pro změnu mezního kmitočtu a činitele jakosti s<br>prvky MOTA . . . . .   | 48 |
| 4.13 | Nediferenční zapojení pro změnu mezního kmitočtu a činitele jakosti<br>s prvky MOTA . . . . .   | 49 |
| 4.14 | Diferenční zapojení pro změnu mezního kmitočtu a činitele jakosti s<br>prvky MOTA . . . . .   | 49 |
| 4.15 | Výsledky simulací (DP1, PP1, HP, PZ) navrženého filtru ze schematu<br>na Obr. 4.13 a Obr. 4.14 . . . . .                              | 51 |
| 4.16 | Charakteristika PP1 pro všechny krokované změny činitele jakosti<br>navrženého filtru ze schematu na Obr. 4.13 a Obr. 4.14 . . . . .  | 52 |
| 4.17 | Charakteristika DP1 pro všechny krokované mezní kmitočty navrže-<br>ného filtru ze schematu na Obr. 4.13 a Obr. 4.14 . . . . .        | 52 |
| 4.18 | Navržený M-C graf pro změnu mezního kmitočtu a činitele jakosti s<br>prvky BOTA a třemi prvky DACA . . . . .                          | 53 |
| 4.19 | Nediferenční zapojení pro změnu mezního kmitočtu a činitele jakosti<br>s prvky MOTA a třemi DACA . . . . .                            | 54 |
| 4.20 | Diferenční zapojení pro změnu mezního kmitočtu a činitele jakosti s<br>prvky MOTA a třemi DACA . . . . .                              | 54 |
| 4.21 | Výsledky simulací (DP, PP, HP, PZ) navrženého filtru ze schematu<br>na Obr. 4.19 a Obr. 4.20 . . . . .                                | 56 |
| 4.22 | Charakteristika DP pro všechny krokované mezní kmitočty navrže-<br>ného filtru ze schematu na Obr. 4.19 a Obr. 4.20 . . . . .         | 56 |
| 4.23 | Charakteristika PP pro všechny krokované změny činitele jakosti na-<br>vrženého filtru ze schematu na Obr. 4.19 a Obr. 4.20 . . . . . | 57 |
| 4.24 | Navržený M-C graf pro změnu mezního kmitočtu a činitele jakosti s<br>prvky MOTA a třemi prvky DACA . . . . .                          | 58 |
| 4.25 | Nediferenční zapojení s možností změny mezního kmitočtu a činitele<br>jakosti s prvky MOTA a třemi DACA . . . . .                     | 59 |
| 4.26 | Diferenční zapojení s možností změny mezního kmitočtu a činitele<br>jakosti s prvky MOTA a třemi DACA . . . . .                       | 59 |
| 4.27 | Výsledky simulací (DP, PP, HP, PZ) navrženého filtru ze schematu<br>na Obr. 4.25 a Obr. 4.26 . . . . .                                | 60 |

|      |  |    |
|------|--|----|
| 4.28 | Charakteristika DP pro všechny krokované mezní kmitočty navrženého filtru ze schematu na Obr. 4.25 a Obr. 4.26 . . . . .         | 61 |
| 4.29 | Charakteristika PP pro všechny krokované změny činitele jakosti navrženého filtru ze schematu na Obr. 4.25 a Obr. 4.26 . . . . . | 62 |
| 4.30 | Navržený M-C graf pro změnu mezního kmitočtu s prvky BOTA a dvěma DACA . . . . .   | 62 |
| 4.31 | Nediferenční zapojení pro změnu mezního kmitočtu s prvky BOTA a dvěma proudovými zesilovači DACA . . . . .                       | 63 |
| 4.32 | Diferenční zapojení pro změnu mezního kmitočtu s prvky BOTA a dvěma proudovými zesilovači DACA . . . . .                         | 63 |
| 4.33 | Výsledky simulací (DP, PP, HP) navrženého filtru ze schematu na Obr. 4.31 a Obr. 4.32 . . . . .                                  | 65 |
| 4.34 | Charakteristika DP pro všechny krokované mezní kmitočty navrženého filtru ze schematu na Obr. 4.31 a Obr. 4.32 . . . . .         | 65 |
| 5.1  | Blokové schéma měření proudových symetrických obvodů . . . . .   | 66 |
| 5.2  | Výsledky měření (DP, PP, HP a PZ) navrženého filtru z kapitoly 4.1 . . . . .   | 67 |
| 5.3  | Výsledky měření změny kmitočtu PP navrženého filtru z kapitoly 4.1 . . . . .   | 68 |
| 5.4  | Porovnání reálných výsledků s výsledky simulací pro nediferenční filtr z kapitoly 4.1 . . . . .                                  | 69 |
| 5.5  | Porovnání reálných výsledků s výsledky simulací pro diferenční filtr z kapitoly 4.1 . . . . .                                    | 70 |
| 5.6  | Výsledky měření (DP, PP, HP a PZ) navrženého filtru z kapitoly 4.3 . . . . .   | 71 |
| 5.7  | Výsledky měření posuvu mezní frekvence navrženého filtru z kapitoly 4.3 . . . . .  | 72 |
| 5.8  | Výsledky měření změny činitele jakosti navrženého filtru z kapitoly 4.3 . . . . .  | 73 |
| 5.9  | Porovnání reálných výsledků s výsledky simulací pro nediferenční filtr z kapitoly 4.3 . . . . .                                  | 74 |
| 5.10 | Porovnání reálných výsledků s výsledky simulací pro diferenční filtr z kapitoly 4.3 . . . . .                                    | 74 |
| A.1  | Schéma nediferenčního filtru z kapitoly 4.1 . . . . .  | 81 |
| A.2  | Layout nediferenčního filtru z kapitoly 4.1 (TOP) . . . . .  | 82 |
| A.3  | Layout nediferenčního filtru z kapitoly 4.1 (BOTTOM) . . . . .   | 82 |
| A.4  | Schéma diferenčního filtru z kapitoly 4.1 . . . . .  | 83 |
| A.5  | Layout diferenčního filtru z kapitoly 4.1 (TOP) . . . . .  | 84 |
| A.6  | Layout diferenčního filtru z kapitoly 4.1 (BOTTOM) . . . . .   | 84 |
| A.7  | Schéma nediferenčního filtru z kapitoly 4.3 . . . . .  | 85 |
| A.8  | Layout nediferenčního filtru z kapitoly 4.3 (TOP) . . . . .  | 86 |
| A.9  | Layout nediferenčního filtru z kapitoly 4.3 (BOTTOM) . . . . .   | 86 |
| A.10 | Schéma diferenčního filtru z kapitoly 4.3 . . . . .  | 87 |
| A.11 | Layout diferenčního filtru z kapitoly 4.3 (TOP) . . . . .  | 88 |

|      |  |    |
|------|--|----|
| A.12 | Layout diferenčního filtru z kapitoly 4.3 (BOTTOM) . . . . .               | 88 |
| B.1  | Fotografie nediferenčního filtru z kapitoly 4.1 (horní strana - TOP) . . . | 89 |
| B.2  | Fotografie diferenčního filtru z kapitoly 4.1 (horní strana - TOP) . . .   | 89 |
| B.3  | Fotografie nediferenčního filtru z kapitoly 4.3 (horní strana - TOP) . .   | 90 |
| B.4  | Fotografie diferenčního filtru z kapitoly 4.3 (horní strana - TOP) . . .   | 90 |

## SEZNAM TABULEK

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 2.1 | Zesílení prvku DACA v závislosti na bitovém slově . . . . .  | 27 |
| 4.1 | Označení přenosů jednotlivých aktivních prvků . . . . .  | 38 |
| 4.2 | Závislost mezního kmitočtu na zesílení A z grafu na Obr. 4.5 . . . . .                                   | 42 |
| 4.3 | Závislost mezního kmitočtu na zesílení A z grafu na Obr. 4.10 . . . . .                                  | 47 |
| 4.4 | Závislost mezního kmitočtu na transkonduktanci . . . . .   | 53 |
| 4.5 | Závislost mezního kmitočtu zesílení prvku DACA z grafu na Obr. 4.22 . . . . .                            | 57 |
| 4.6 | Závislost mezního kmitočtu zesílení prvku DACA z grafu Obr. 4.28 . . . . .                               | 61 |
| 5.1 | Tabulka závislosti mezního kmitočtu na zesílení A z grafu na Obr. 5.3 . . . . .                          | 69 |
| 5.2 | Tabulka naměřeného mezního kmitočtu za změny transkonduktance<br>$g_m$ z grafu na Obr. 5.7 . . . . .     | 72 |
| 5.3 | Tabulka naměřeného činitele jakosti v závislosti na změně zesílení<br>DACA z grafu na Obr. 5.8 . . . . . | 73 |

# ÚVOD

Kmitočtové filtry jsou nedílnou součástí dnešní doby a představují významnou část elektrotechnických obvodů. Základním principem filtru je možnost propustit nebo naopak potlačit některé složky frekvenčního signálu. To je důvodem jejich hojného využití, se kterým se můžeme setkat například v radioelektronice, v měřicích přístrojích, mobilních telefonech, hudební technice a mnoha dalších odvětvích.

Tato diplomová práce je zejména zaměřena na kmitočtové filtry, jenž pracují v proudovém diferenčním módu. Zejména právě proudový mód je v dnešní době velice v oblibě, protože při použití tohoto módu je nositelem informace proud, tím je možno v některých případech docílit lepších vlastností, jako jsou větší šířka pásma, větší dynamický rozsah a zlepšení poměru odstupu signálu od šumu.

Práce se skládá z pěti hlavních kapitol, kde první kapitola pojednává o obecném popisu kmitočtového filtru, přenosových vlastnostech, o jejich rozdělení z pohledu selektivity, základních parametrech a způsobu zapojení a průchodu signálu.

Druhá kapitola se zabývá použitými aktivními prvky, jako jsou proudové sledovače, více-výstupové transkonduktanční zesilovače, a digitálně říditelné diferenční proudové zesilovače.

Třetí kapitola pak pojednává o způsobech možného návrhu kmitočtových filtrů. Jsou zde zmíněny způsoby návrhu za pomoci úplné admitanční sítě, způsobu rozšiřování autonomních obvodů, návrhu filtrů se syntetickými prvky vyšších řádů a návrhu filtrů pomocí grafů signálových toků, na což je tato práce primárně zaměřena.

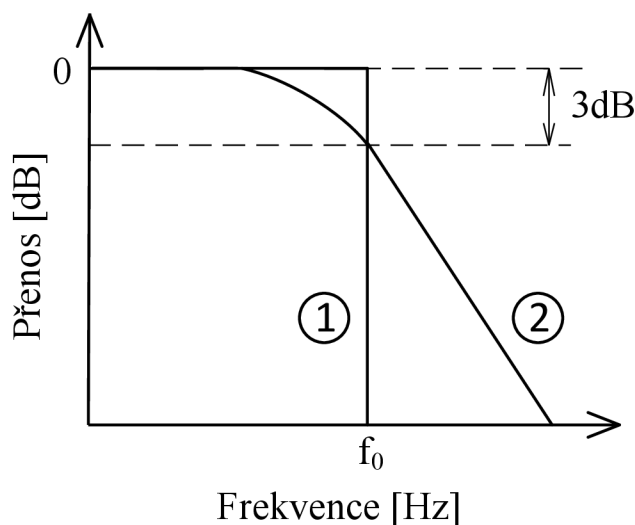
Čtvrtá kapitola obsahuje šest navržených zapojení kmitočtových filtrů pracujících v proudovém módu a jejich diferenční varianty, kterých bylo docíleno zrcadlením nediferenčních struktur. Funkčnost těchto obvodů byla ověřena pomocí PSpice simulací a programu snap. Tyto výsledky ze simulací jsou zároveň zhodnoceny.

A v poslední páté kapitole jsou zhodnoceny a porovnávány výsledky diferenčních a nediferenčních variant realizovaných návrhů a také jsou tyto výsledky v několika grafech porovnány se simulovanými hodnotami.

# 1 KMITOČTOVÉ FILTRY

Kmitočtové filtry [1] jsou jedny z nejpoužívanějších elektrických obvodů pro zpracování signálů. Jejich úkolem je propouštět, potlačovat nebo zadržovat frekvenční složky procházejícího signálu. Funkce těchto filtrů se dělí na dvě oblasti: na oblast propustnou, kde jsou složky signálu bez jakéhokoliv potlačení a na oblast nepropustnou, kde se složky potlačí s maximálním útlumem.

Selektivní vlastnosti v závislosti na frekvenci jsou popisovány modulovou a fázovou charakteristikou, kde by měl být přechod mezi propustnou a nepropustnou oblastí filtru ve tvaru obdélníku. Toto ovšem platí pouze u ideálního průběhu, kterého ve skutečnosti nikdy nedosáhneme. Lze se mu pouze co nejvíce přiblížit, a to za pomoci různých zpětnovazebních obvodů a aktivních operačních zesilovačů. Pak se jedná o aktivní filtry. Charakteristický kmitočet  $f_0$  udává pokles přenosu o -3 dB. Na Obr. 1.1 je příklad modulové charakteristiky ukazující rozdíl mezi ideálním a reálným průběhem signálu. Jedná se o filtr typu dolní propust.



Obr. 1.1: Příklad modulové charakteristiky ideálního (1) a reálného (2) filtru typu DP

## 1.1 Přenosové vlastnosti filtrů

Kmitočtový filtr si můžeme definovat jako lineární dvojbran [1], kde jeho chování lze vyjádřit pomocí přenosových funkcí.

Přenos napětí naprázdno:

$$K_U = \frac{U_2}{U_1}, \quad I_2 = 0 \quad (1.1)$$

Přenos proudu naprázdno:

$$K_I = \frac{I_2}{I_1}, \quad U_2 = 0 \quad (1.2)$$



Obr. 1.2: Filtr jako lineární dvojbran

Přenos lineárního dvojbranu lze matematicky popsat lomenou funkcí ve tvaru [1]:

$$K_I = \frac{U_2}{U_1} = \frac{a_m p^m + a_{m-1}(p)^{m-1} + \dots + a_1 p + a_0}{b_n p^n + b_{n-1}(p)^{n-1} + \dots + b_1 p + b_0} \quad (1.3)$$

kde  $a$ ,  $b$  jsou reálné koeficienty. Písmena  $m$ ,  $n$  udávají řád polynomu, přičemž musí platit, že čítec  $m$  je menší nebo roven jmenovateli  $n$ . Nejvyšší mocnina  $n$  ve jmenovateli udává řád filtru. Označení  $p$  udává komplexní kmitočet, pro který platí  $p = j\omega$ .

## 1.2 Rozdělení filtrů

Rozdělení filtrů lze popsat mnoha různými parametry, avšak v této práci je zmíněno hlavně rozdělení podle selektivity, způsobu realizace a podle použití stavebních prvků.



Jako první je uveden příklad rozdělení dle vykonávané funkce filtrů [1].

- **Dolní propust (DP)** - Tato realizace filtru odfiltrovává všechny frekvenční složky, které přesahují kmitočty nad mezní frekvenci  $f_0$ . Využití těchto filtrů je například v radioelektrotechnice, nebo v elektroakustice a mnoha dalších odvětvích.
- **Horní propust (HP)** - Realizace, která naopak od dolní propusti propouští frekvence nad mezním kmitočtem a odfiltrovává frekvence nižší, než je mezní kmitočet. Využití v podobných oblastech jako je tomu u DP.
- **pásmová propust (PP)** - Takto realizovaný filtr propouští jen složky signálu vymezené mezním kmitočtem dolní propusti ( $f_1$ ) a mezním kmitočtem horní propusti ( $f_2$ ). Je často využíván v telekomunikacích a datových přenosech.
- **Pásmová zádrž (PZ)** - Filtr naopak od pásmové propusti nepropouští složky signálu vymezené mezním kmitočtem DP ( $f_1$ ) a mezním kmitočtem HP ( $f_2$ ). Využití například při potlačení nežádoucích signálů.
- **Fázovací článek (FČ)** - Mění posuv fáze signálu v závislosti na kmitočtu.

Další způsob dělení filtrů závisí na tom, z jakých se skládají prvky.

- **Pasivní filtry** - Tyto filtry tvoří pasivní součástky R, L, C (rezistor, induktor, kapacitor) a jejich kombinací se vytvářejí obvody RC, LC, RLC [1]. Výhoda těchto filtrů je v jejich pořizovací ceně, kdy náklady nejsou moc velké a filtry nepotřebují externí napájecí zdroj.
- **Aktivní filtry** - Jejich základem jsou aktivní prvky, které se kombinují s pasivními součástkami R, L, C. Tyto obvody vykazují vyšší strmost a kvalitnější výstupní úroveň, které by pasivní filtry nebyly schopny dosáhnout. Dále umožňují změnu úhlového kmitočtu a změnu činitele jakosti nastavováním parametrů na aktivních prvcích [2]. Těmito filtry se bude tato práce dále zabývat. Jako aktivní prvky budou používány zejména proudové zesilovače DACA (Digitally Adjustable Current Amplifier) [3], univerzální proudové konvejory [4] a další vhodné prvky.

Posledním zmíněným rozdělením je rozdělení podle jejich symetrie, a to na diferenční a nediferenční struktury. Tyto struktury jsou popsány v kapitole 1.5.

## 1.3 Základní parametry filtrů

### 1.3.1 Řád filtru

Řád filtru udává strmost přechodu z propustného do nepropustného pásma a opačně. Čím vyšší řád, tím více se blíží k charakteristice ideálního filtru. Bohužel však s rostoucím řádem roste i cena filtru, a proto je nutné volit co nejnižší řád filtru, ovšem tak, aby stále zajistil požadované vlastnosti [2].

### 1.3.2 Mezní kmitočet

Jedná se o kmitočet, který nastává při poklesu přenosu signálu o 3 dB. Tento kmitočet lze měnit pomocí prvků R a C, kdy dochází k posuvu modulové a fázové charakteristiky beze změny tvaru [2]. Mezní kmitočet je označován jako  $f_0$ .

### 1.3.3 Jakost filtru

Jakost udává hodnotu ztrát v rezonančním obvodu. Označuje se písmenem Q a čím větší je hodnota jakosti, tím menší jsou ztráty. U cívek jsou ztráty způsobeny především odporem vodiče, u kondenzátorů udává ztráty především dielektrikum [2].

## 1.4 Proudový mód

Obvod pracující v proudovém módu se vyznačuje proudovým vstupem a proudovým výstupem tohoto daného obvodu. Nositelem informace je elektrický proud, což znamená, že na vstupních a výstupních svorkách je sledována velikost proudu. Jeho výhodou je velká šířka frekvenčního pásma, velký dynamický rozsah a nižší spotřeba zapříčiněná možností využití nižších napájecích napětí [5]. Tyto obvody mají velkou nevýhodu a to takovou, že neexistují měřicí přístroje, které by dokázaly změřit proudové buzení signálu. Proto je u takových obvodů nutné použití převodníků napětí na proud a proudu na napětí.

## 1.5 Symetrie obvodů

### 1.5.1 Nesymetrické obvody

Nesymetrická vedení se zpravidla vyznačují jedním živým, neboli signálovým vodičem a druhým vodičem který je připojen k zemi. Nevýhodou těchto obvodů se vyznačuje možnost velkého rušení signálu a jedinou ochranou před tímto rušením je

samotné stínění vodiče. V audiotechnice tak vzniká brum a šum [5]. Zjednodušené zapojení takového vedením je nakresleno na Obr. 1.3



Obr. 1.3: Zjednodušené zapojení nesymetrického vedení a) napěťové b) proudové

### 1.5.2 Symetrické (diferenční) obvody

Symetrické, neboli také diferenční obvody využívají typicky dva signálové vodiče a jednoho vodiče vztaženého k zemi. Oba signálové vodiče mají nést stejnou informaci, která se liší v opačné fázi, tedy posunu o  $180^\circ$ . Nebo je také přenášená informace udaná rozdílem obou signálů. takové to obvody se nejčastěji využívají v audiotechnice či přenosové technice a videotechnice [6]. Zjednodušené zapojení symetrického (diferenčního) obvodu je na Obr. 1.4



Obr. 1.4: Zjednodušené zapojení symetrického vedení a) napěťové b) proudové

Symetrické napětí:

$$U = U_1 - U_2 \quad (1.4)$$

Symetrický proud:

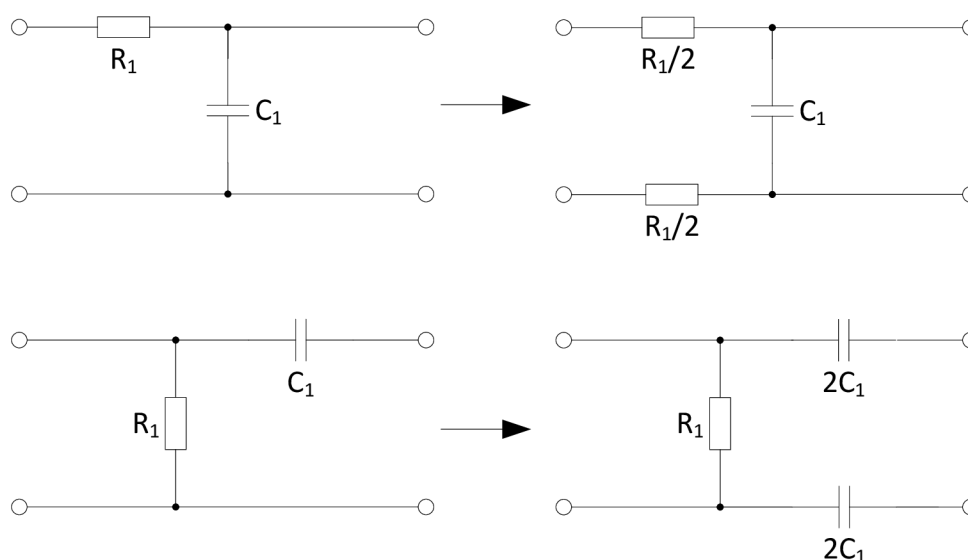
$$I = I_1 - I_2 \quad (1.5)$$

## 1.6 Návrh diferenčních struktur

Nejjednodušším a nejpoužívanějším způsobem návrhu diferenčního obvodu je jeho transformace z nediferenční podoby. Toho lze dosáhnout pomocí takzvaného zrcadlení, kdy zrcadlíme pasivní součástky okolo aktivních prvků [7]. Při tomto návrhu se zvýší počet pasivních prvků zhruba na dvojnásobek. Aktivní prvky lze buďto nahradit za jejich diferenční ekvivalenty s diferenčními vstupy a výstupy, nebo je lze taktéž zrcadlit a zvýšit jejich počet o dvojnásobek. Při této metodě je nutné určit hodnoty pasivních součástek po jejich zrcadlení, přičemž se řídíme podle toho, jakou metodu transformace použijeme. Je na výběr mezi transformací podélných nebo příčných struktur.

### 1.6.1 Transformace podélných struktur na diferenční

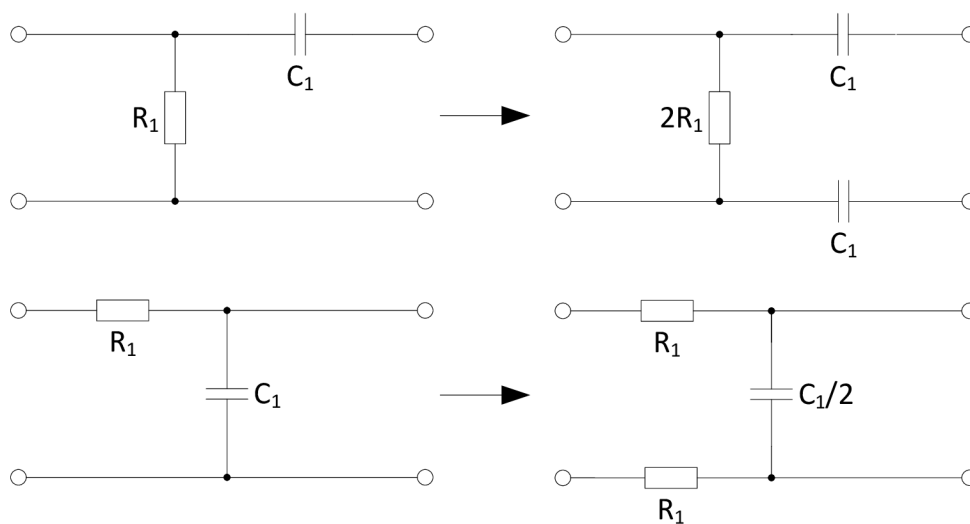
Při transformaci podélných struktur na diferenční struktury se zrcadlí a mění hodnoty prvků ležících v podélné větvi. Prvky v příčné větvi se nijak nemění. Při transformaci se řídíme následujícími pravidly: pokud zrcadlíme rezistor, potom je jeho hodnota v obou podélných větvích poloviční. U kapacitoru se při zrcadlení hodnota zdvojnásobuje, a to taktéž v obou větvích [7]. Příklad takto zrcadlených odporů a kapacitorů je na Obr. 1.5.



Obr. 1.5: Zrcadlení podélných rezistorů a kapacitorů na diferenční strukturu

## 1.6.2 Transformace příčných struktur na diferenční

U transformace příčných struktur na diferenční struktury se rovněž zrcadlí prvky ležící v podélné větvi, avšak měníme hodnoty součástí v příčné větvi. Při zrcadlení se hodnota rezistorů v příčné větvi zdvojnásobuje a u kapacitorů snižuje na polovinu [7]. Ukázka tohoto zrcadlení je na Obr. 1.6.



Obr. 1.6: Zrcadlení příčných rezistorů a kapacitorů na diferenční strukturu

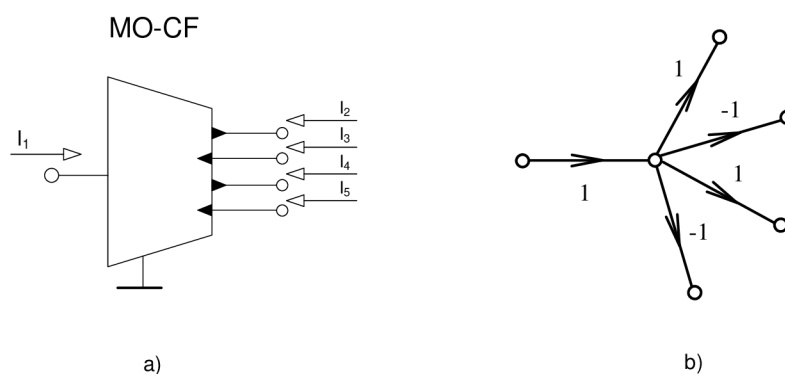
## 2 AKTIVNÍ PRVKY

Pod pojmem aktivní prvek si lze nejčastěji představit operační zesilovač (OZ) [8]. Tato součástka je vhodná zejména pro napěťový mód, ale i pro větší spotřebu energie, nižší šířku pásma a rychlosti přeběhu, začala být postupem času nahrazována modernějšími aktivními prvky, jako jsou napěťové či proudové konvejory a transkonduktanční zesilovače [9]. Jelikož se dále v práci vyskytují prvky MO-CF (Multi Output-current Follower), BOTA (Balanced Operational Transconductance Amplifier) a DACA (Digitally Adjustable Current Amplifier), v následujících podkapitolách budou představeny a znázorněny jejich schématické modely, zjednodušený M-C graf a možná realizace pomocí jiných prvků.

### 2.1 Proudový sledovač

Jedním z nejvyužívanějších aktivních prvků při návrhu vysokofrekvenčních filtrů pracujících v proudovém módu je proudový sledovač [9], který je označován jako CF (Current Follower). Tento proudový sledovač bývá označován také jako DO-CF (Dual Output-current Follower), který se vyznačuje dvěma vysokoimpedančními výstupy, MO-CF (Multi Output-current Follower) s více výstupy a jako FD-CF (Fully-differential Current Follower) [11], neboli plně diferenční proudový sledovač. Tyto proudové sledovače mají vysokoimpedanční výstupy, díky čemuž nezatěžují nadcházející obvod při kaskádním řazení kmitočtových filtrů. Dále v této práci se budeme setkávat především s prvkem MO-CF, který je díky více výstupům výhodnější.

Schématický model a zjednodušený M-C graf je znázorněn na Obr. 2.1



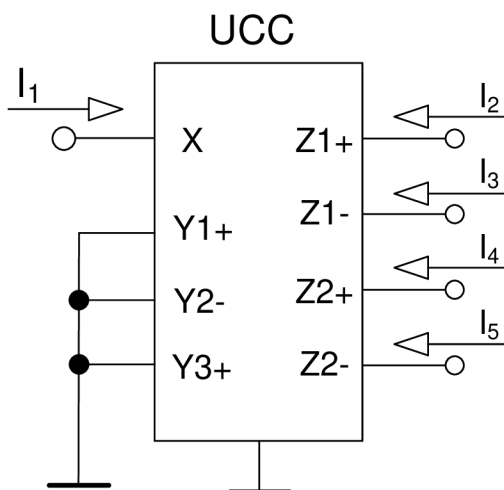
Obr. 2.1: a) Schématický model prvku MO-CF, b) Zjednodušený M-C graf MO-CF

Zobrazený MO-CF obsahuje jeden vstup a čtyři proudové výstupy, kde dva jsou kladné a dva záporné. Následující rovnice popisují funkci tohoto prvku.

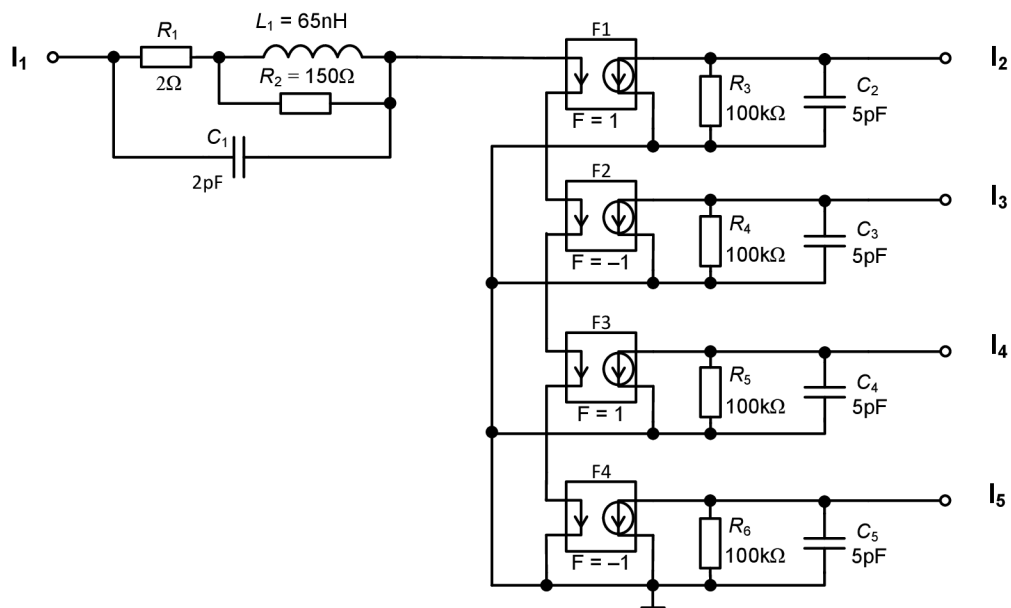
$$I_1 = I_2 = I_4 \quad (2.1)$$

$$-I_1 = I_3 = I_5 \quad (2.2)$$

Tento proudový sledovač lze tak jako většinu prvků pracujících v proudovém módu realizovat pomocí proudového konvejeoru UCC (Universal Current Conveyor) [10]. Zobrazení této možné realizace pomocí UCC je nakresleno na Obr. 2.2, kde je vstup připojen na svorku s označením X a s výstupy na svorkách Z+- . Vývody s označením Y1,Y2,Y3 jsou uzemněny, tudíž nijak nezasahují do funkce UCC. Na Obr. 2.3 se nachází simulační model prvku MO-CF, který byl použit při simulacích navržených obvodů.



Obr. 2.2: Možná realizace MO-CF pomocí prvku UCC



Obr. 2.3: Simulační model prvku MO-CF

## 2.2 Transkonduktanční operační zesilovač

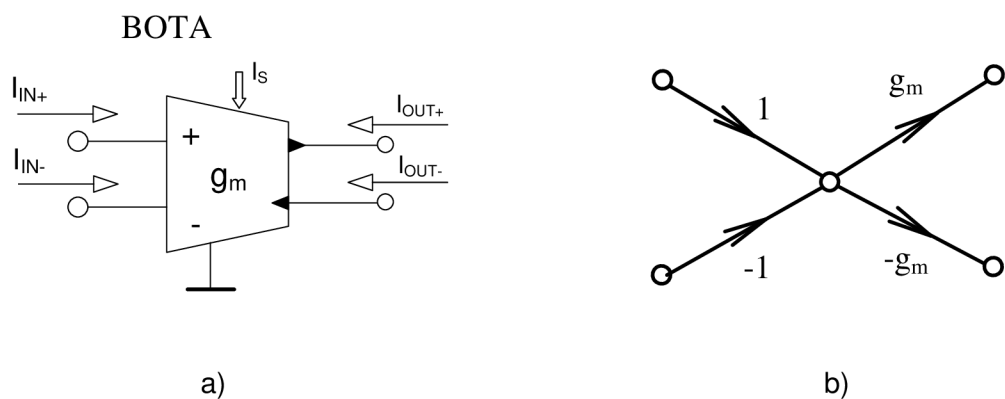
Jeho označení je OTA (Operational Transconductance Amplifier). Hlavním charakteristickým parametrem je jeho transkonduktance  $g_m$ , neboli převodní vodivost. Vztah popisující jeho chování lze popsat následující rovnicí (2.3).

$$I_{out} = g_m(u_+ - u_-) \quad (2.3)$$

Ideální OTA zesilovač by se měl chovat jako řízený zdroj proudu s nekonečnými vstupními a výstupními impedancemi a s konstantní transkonduktancí. To ovšem u reálného prvku není možné a od tohoto ideálu se díky mnoha faktorům vzdaluje. Těmito faktory mohou například být vstupní a výstupní kapacity, které mohou snižovat pracovní frekvence filtru a dále pak třeba výstupní odpor. Nastavitelnost tohoto prvku a jeho transkonduktanci lze měnit pomocí externího proudu  $I_S$ . Tento prvek je vhodný pro vysokofrekvenční filtry, díky jeho schopnosti práce na vyšších frekvencích [9].

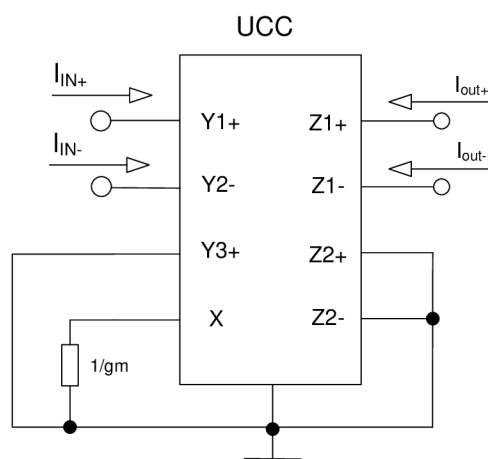
Pro práci s těmito zesilovači můžeme použít dvouvýstupovou variantu označenou jako BOTA (Balanced Operational Transconductance Amplifier) a nebo vícevýstupovou variantu MOTA (Multi-output Operational Transconductance Amplifier). Schématickou značku prvku BOTA a zjednodušený M-C graf znázorňuje Obr. 2.4.



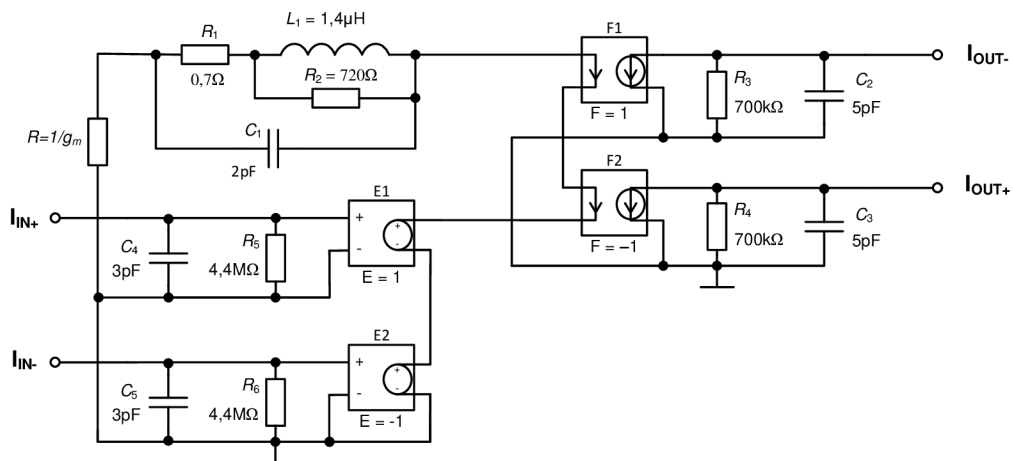


Obr. 2.4: a) Schematická značka prvku BOTA, b) zjednodušený M-C graf prvku BOTA

Obvod je taktěž možné realizovat pomocí UCC konvejeoru [12]. Na Y1 a Y2 se připojí oba diferenční vstupy, Y3 se uzemní a na vstup X se přivede odpor na zem, který udává  $g_m$  celého prvku, dle vztahu  $R = 1/g_m$ . Z1+ a Z1- slouží jako diferenční výstupy a další Z2+ a Z2- se přivede na zem, případně se mohou použít jako další diferenční výstupy, z čehož by vznikl prvek MOTA. Tato realizace je na Obr. 2.5. Simulační model prvku BOTA, jenž byl užit pro simulace navržených obvodů je na Obr. 2.6.



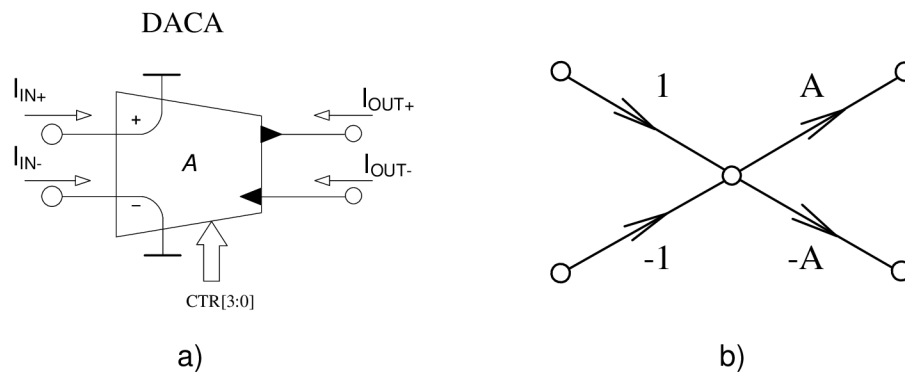
Obr. 2.5: Možná realizace BOTA pomocí prvku UCC



Obr. 2.6: Simulační model prvku BOTA

## 2.3 Digitálně říditelný proudový zesilovač

Prvek DACA (Digitally Adjustable Current Amplifier) má dva vstupy a dva výstupy a je v mnoha hlediscích podobný obyčejnému proudovému sledovači (CF), jenž byl popsán v kapitole 2.1. Jedná se o plně diferenční prvek s možností pracovat na velké šířce pásma a na kterém je možno řídit zesílení ( $A$ ) pomocí tříbitové digitální sběrnice [3]. Zesílení je tedy možno nastavovat v rozsahu od jedné do osmi (Tab. 2.1). Schématická značka a zjednodušené znázornění M-C grafu je na Obr. 2.7



Obr. 2.7: a) Schématická značka prvku DACA, b) zjednodušený M-C graf prvku DACA

Vztahy udávající proudové zesílení tohoto prvku jsou:

$$I_{out+} = A(I_{in+} - I_{in-}) \quad (2.4)$$

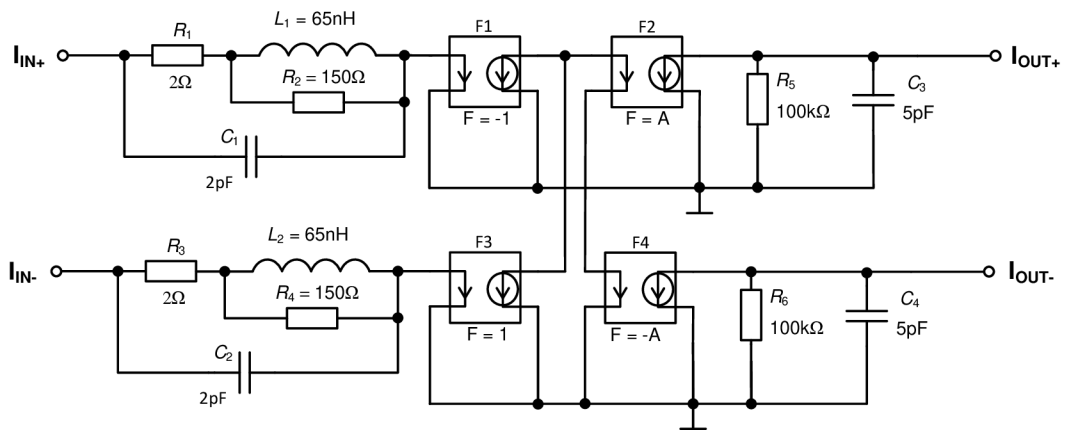
$$I_{out-} = A(I_{in+} - I_{in-}) \quad (2.5)$$

Tab. 2.1: Zesílení prvku DACA v závislosti na bitovém slově

| Bitové slovo | 000 | 001 | 010 | 011 | 100 | 101 | 110 | 111 |
|--------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Zesílení     | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   |

Během experimentálních měření byly využívány náhradní obvody realizované jako externí desky. Tyto náhradní obvody byly použity pro možnost měnit zesílení analogově od nuly do pěti a také pro možnost více výstupů, které pak mohly či byly použity.

Při simulacích filtrů s využitím prvku DACA bylo využito vnitřní zapojení z Obr. 2.8. Jak je vidno, tento prvek v sobě má dva plně samostatné zesilovače, kde vstupy  $I_{IN+}$  a  $I_{IN-}$  mají nízkou impedanci a oba výstupy jsou naopak vysokoimpedanční [13].



Obr. 2.8: Simulační model prvku DACA

## 3 METODY NÁVRHU KMITOČTOVÝCH FILTRŮ

Existuje více způsobů návrhu kmitočtových filtrů, proto si v této kapitole ukážeme několik z nich, přičemž nejdůkladněji se budeme věnovat návrhu za pomoci grafů signálových toků, kde si ukážeme i praktický příklad krok po kroku, jak takovýto filtr navrhnout.

### 3.1 Návrh za pomoci úplné admitanční sítě

Jedná se o často využívanou metodu k návrhu kmitočtových filtrů, detailně popsanou v [14]. Autonomní obvod je ve skutečnosti struktura pasivních a aktivních prvků, která nepotřebuje být buzena žádným zdrojem signálu na vstupu, přičemž ani nemusí být snímána napěťová či proudová odezva na výstupu. Z této struktury je pouze známa jeho charakteristická rovnice, která je dána determinantem admitanční matice. Z jejího tvaru je pak možné určit, jaký řád filtru bude u daného autonomního obvodu možno realizovat.

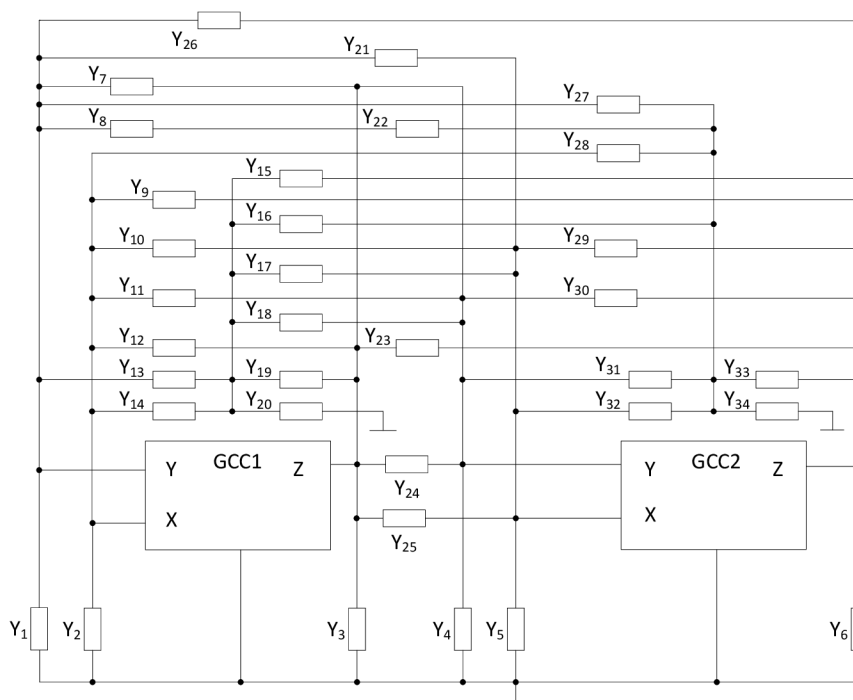
Důležitou částí je nalezení vhodného postupu při sestavování struktury autonomního obvodu. Jednou z variant je využití intuitivního postupu zkušeného návrháře. Tento postup lze zobecnit tím, že je použita úplná admitanční síť s připojením zvoleného počtu aktivních prvků. Nevýhoda při tomto postupu se projevuje ve značné časové náročnosti při použití velkého množství aktivních prvků.

V prvním kroku této metody se tedy sestaví úplná admitanční síť, která bude buzena zvoleným počtem aktivních prvků. Následně se z této admitanční sítě postupným zjednodušováním vytváří množina autonomních obvodů, které jsou určeny počtem pasivních prvků. Cílem je dosažení co nejvíce uzemněných pasivních součástí pro následnou jednodušší realizaci. Po analýze obecných struktur pak lze tyto obvody využít pro nejrůznější realizace multifunkčních nebo univerzálních kmitočtových filtrů.

Obecně musí úplná admitanční síť obsahovat  $n(m + 1)$  uzlů, kde  $n$  označuje počet aktivních prvků a  $m$  počet jeho bran. Po zapojení patřičného aktivního prvku do takto vytvořeného schématu dojde k jeho částečné redukci admitancí, které jsou poté nadbytečné. Schéma takovéhoho zapojení je prezentováno v [14].

Při využití zapojení jednoho aktivního prvku do úplné admitanční sítě je umožněno navrhovat kmitočtové filtry druhého řádu, avšak tyto filtry ve většině případů umožňují jen jedinou užitečnou přenosovou funkci, a tak nejsou zcela multifunkční. Při návrhu se naopak snažíme, aby námi vytvořené filtry byly multifunkční či univerzální, a proto je třeba využít dvou aktivních prvků. Poté je možné realizovat funkce,

jako jsou například DP, HP, PP, PZ, nebo FČ. Příklad takovéto úplné admitanční sítě je zobrazen na Obr. 3.1 [14].



Obr. 3.1: Úplná admitanční síť se dvěma aktivními prvky GCC (Generalized Current Conveyor)

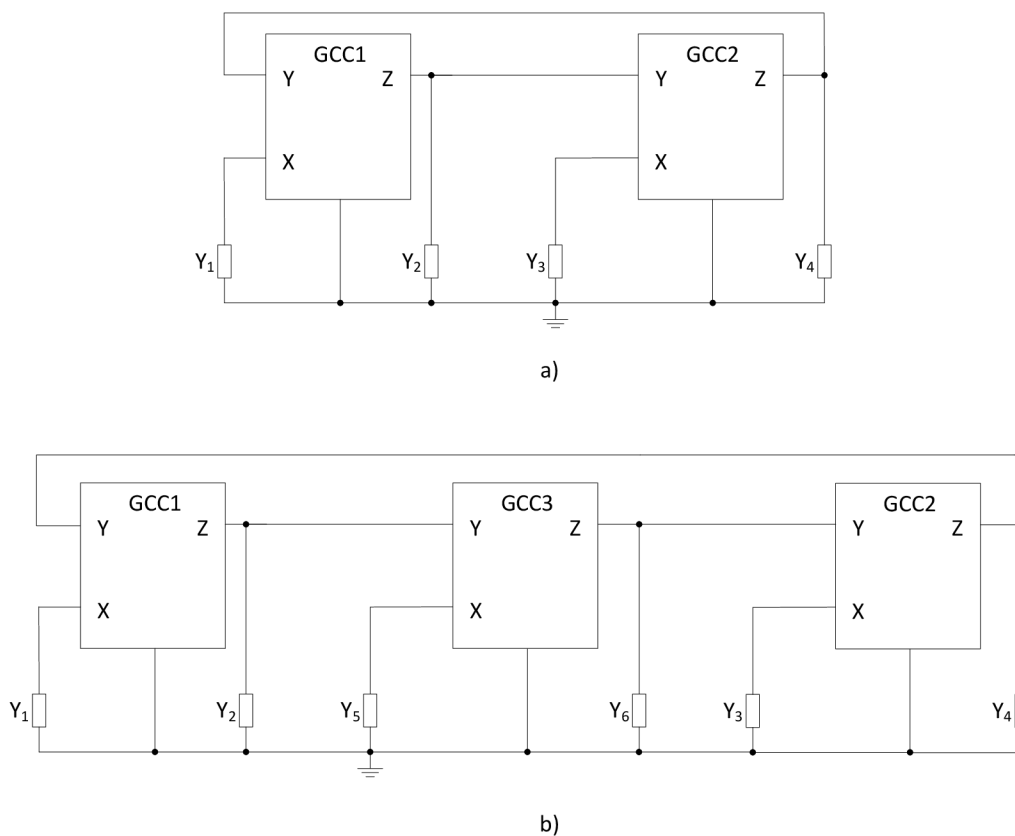
Navrženou strukturu úplné admitanční sítě s určitým počtem aktivních prvků lze použít k vytvoření autonomního obvodu. Tento obvod je dán počtem uzemněných, či neuzemněných prvků. Při návrhu se dvěma aktivními prvky je vhodné omezit se pouze na čtyři pasivní prvky tak, aby zajišťovaly jeho citlivostní charakteristiky. Z takového obvodu s použitím minimálního počtu pasivních součástek poté vyplývá výhoda jeho jednoduchého numerického návrhu. Autonomní obvody s GCC a se čtyřmi pasivními prvky byly publikovány v [15].

Postup pro nalezení skupin autonomních obvodů z úplné admitanční sítě je následující:

- Určení dvojpólů a součinnů koeficientů pro požadovaný tvar rovnice
- Určení, zdali bude obvod buzen proudově či napětově
- Určení koeficientů zobecněného aktivního prvku s ohledem na splnění podmínek pro výsledný součinn koeficientů dle předchozích dvou bodů
- Nahrazení zobecněného aktivního prvku jeho konkrétním ekvivalentem

## 3.2 Způsob rozšiřování autonomních obvodů

Jelikož pro kmitočtové filtry vyššího řádu než druhého bychom byli nuceni upravit admitanční síť o další aktivní a pasivní prvky, a tudíž by se nám hledání autonomního obvodu značně komplikovalo, využíváme způsobu rozšiřování autonomních obvodů z již nalezených obvodů, které doplníme o nutný počet aktivních a pasivních součástí [14]. Aplikace této metody spočívá v rozšíření výchozí struktury o další uzel nezávislého napětí, a tak dochází k navýšení řádu filtru. Při doplnění struktury o další aktivní prvek platí pravidlo, že nesmí být napěťová brána Y připojena do uzlu, kde již je připojena brána Y nebo proudová brána X některého z dalších aktivních prvků. Při tomto opatření dochází ke značnému usnadnění návrhu kmitočtových filtrů vyšších řádů. Jednoduchý příklad takto rozšířeného obvodu je zobrazen na Obr. 3.2 [14].



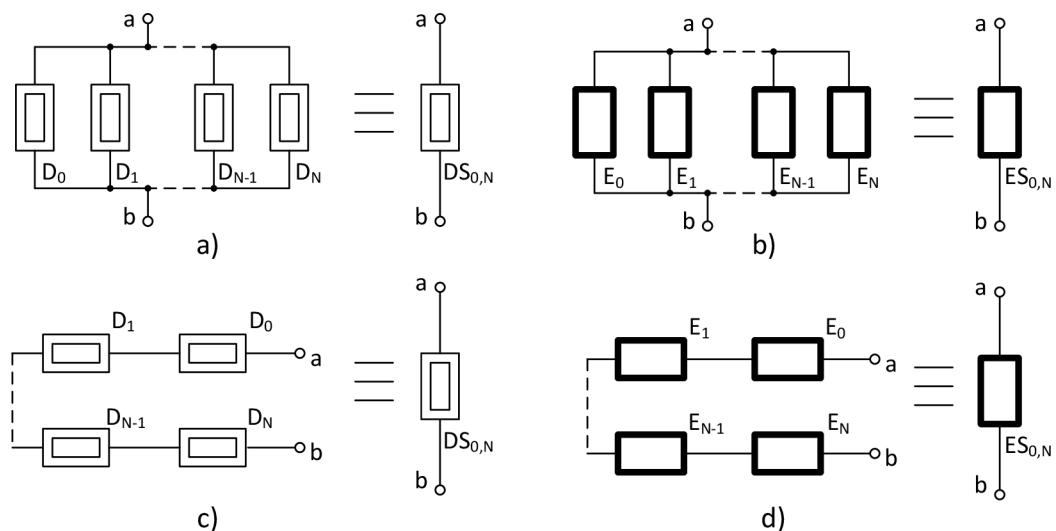
Obr. 3.2: a) Původní autonomní obvod, b) rozšířený autonomní obvod

### 3.3 Návrh filtrů se syntetickými prvky vyššího řádu

Dříve bylo využíváno syntetických imitančních prvků k návrhu klasických induktorů, které však byly na nízkých kmitočtech příliš rozměrné a drahé. Na vyšších kmitočtech je tento problém návrhu odstraněn v případě, jsou-li realizované induk-tory v diskrétní podobě. Pokud má být vytvářena obvodová struktura v integrované podobě, je nutno sáhnout k syntetickým prvkům [14].

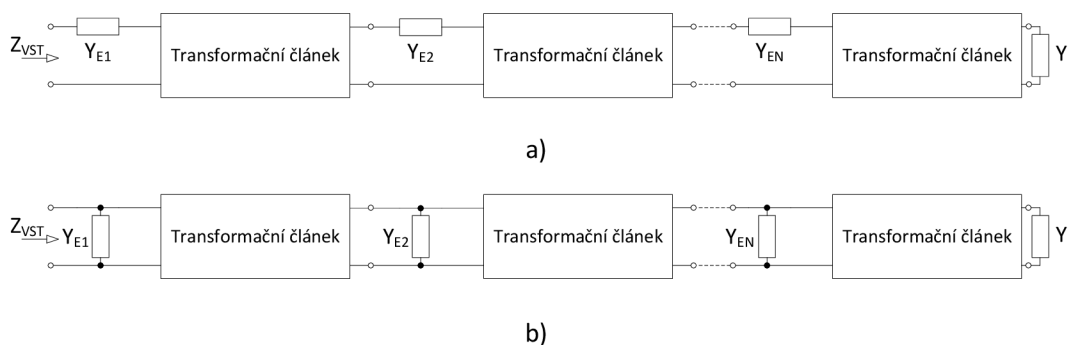
Při návrhu je možné definovat syntetické prvky vyšších řádů a není tak nutné se pouze omezovat na realizaci syntetických induktorů a kmitočtově závislých negativ-ních rezistorů. Tyto prvky vyšších řádů lze zapojit do kmitočtově závislých děličů napětí nebo proudů a tím realizovat kmitočtový filtr požadovaného řádu. Syntetické prvky se dají považovat za pasivní. Realizované kmitočtové filtry mohou pracovat jak v napěťovém, tak i v proudovém módu, a to za pomoci přidružené transformace [17]. Tato transformaci se omezuje na vzájemnou změnu vstupu a výstupu navr-ženého zapojení. Pokud má zapojení pracovat v napěťovém módu, potom je nutné provést impedanční přizpůsobení.

Syntetické prvky vyšších řádů je možné dělit na sériové nebo paralelní a podle způsobu zapojení elementárních dvojpólů typu D a E [16]. Můžeme popsat čtyři základní soustavy syntetických dvojpólů s impedancemi vyšších řádů, a to na typ DP, EP, DS a ES (Obr. 3.3) a dále je lze rozdělit na plovoucí nebo uzemněné.



Obr. 3.3: Syntetické dvojpóly typu a) DP, b) EP, c) DS, d) ES

Pro zajištění stability těchto kmitočtových filtrů je nutno, aby syntetický prvek obsahoval elementární dvojpól typu D nebo E [14]. Tato podmínka platí pro všechny řády od nejnižších (nultého nebo prvního řádu) až po nejvyšší (N-tého řádu). K realizaci je nutno využít transformačních článků, které navyšují řád imitance připojené na jeho výstupní bránu. Na Obr. 3.4 je znázorněno zapojení sériové kombinace a paralelní kombinace. Tyto kombinace se liší v počtu pasivních součástek.



Obr. 3.4: Obecná realizace pomocí syntetických prvků a) sériová kombinace, b) paralelní kombinace

Sériového zapojení z Obr. 3.4a lze realizovat pomocí prvků DS a ES a paralelní zapojení z Obr. 3.4b prvky DP a EP.

## 3.4 Návrh filtrů pomocí grafů signálových toků

### 3.4.1 Obecný návrh M-C grafů

Grafů signálových toků [19] lze využívat v mnoha technických odvětvích. V roce 1953 byly navrženy panem Samuelem Jeffersonem Masonem pro popis a řešení lineárních obvodů a později se objevily zobecněné Coatesovy grafy [18]. V elektrických a elektrotechnických obvodech se využívá kombinace těchto typů grafů, přičemž jsou nazývány jako Masonovy-Coatesovy grafy, nebo-li také M-C grafy [14].

Grafy jsou reprezentovány soustavou bodů a úseček tvořících uzly a větve. Každý konec větve musí být připojen k nějakému uzlu, přičemž oba konce větve mohou být připojeny ke stejnému uzlu. V jednoduchosti se dá říct o grafu signálových toků, že se jedná o diagram znázorňující vzájemné vztahy mezi proměnnými. Každý uzel grafu představuje nějakou proměnnou a propojující větve určují jejich vzájemný vztah. Výhodou užití grafů signálových toků v teorii lineárních obvodů je ve snadném způsobu výpočtu přenosových funkcí, a to i relativně složitých obvodů.



V této práci jsou využity právě Masonovy-Coatesovy (M-C) grafy, které jsou vhodné pro syntézu a analýzu elektrických obvodů a jsou vhodné pro přímý návrh obvodů s požadovaným tvarem přenosové funkce.

Přenosovou funkci grafu lze vypočítat podle Masonova pravidla [19] uvedeného v následujícím vztahu.

$$K = \frac{Y}{X} = \frac{1}{\Delta} \sum P_i \Delta_i, \quad (3.1)$$

kde  $P_i$  je přenos  $i$ -té přímé cesty ze vstupního uzlu X do výstupního uzlu Y a  $\Delta$  je determinant grafu, který je dán vztahem

$$\Delta = V - \sum_k S_1^{(k)} V_1^{(k)} + \sum_l S_2^{(l)} V_2^{(l)} + \sum_m S_3^{(m)} V_3^{(m)} + \dots \quad (3.2)$$

Zde v tomto vztahu je  $V$  součin vlastních smyček,  $S_1^{(k)}$  je přenos  $k$ -té smyčky a  $V_1^{(k)}$  je součin všech vlastních smyček uzlů, kterých se  $k$ -tá smyčka nedotýká.  $S_2^{(l)}$  je součin přenosů dvou nedotýkajících se smyček a  $V_2^{(l)}$  je součin všech vlastních smyček uzlů, kterých se  $l$ -tá smyčka nedotýká. V případě více nedotýkajících se smyček je ve vztahu třetí suma a stejným způsobem by se postupovalo dále do té doby, dokud by existoval daný počet nedotýkajících se smyček. Jestliže se  $k$ -tá přímá cesta dotýká všech uzlů, pak je součin  $V$ , nebo-li také  $\Delta_i$  identicky roven jedné.  $\Delta_i$  je determinantem části grafu nedotýkající se  $i$ -té přímé cesty.

Determinant grafu signálových toků definovaný (3.2) reprezentuje levou stranu charakteristické rovnice CE, jejíž tvar velkou měrou určuje chování analyzovaného obvodu [14]. Pokud navrhujeme kmitočtový filtr  $n$ -tého řádu, potom by se ve jmenovateli přenosové funkce mělo objevit  $n + 1$  členů. Tyto členy by měly být všechny z důvodu stability kladné. Počet členů by měl být co nejnižší z důvodu snadného numerického návrhu pasivních součástek.

Pro předpoklad realizovatelnosti daného kmitočtového filtru druhého řádu je nutné splnit tyto následující podmínky:

- v grafu se nachází jediná orientovaná smyčka a dva napěťové uzly, kdy minimálně k jednomu z nich jsou připojeny dva a více pasivních součástek.
- v grafu se nachází dvě vzájemně se dotýkající se orientované smyčky a dva napěťové uzly, ke kterým je připojena jedna admitance.

V kmitočtových filtrech jsou aktivní prvky využívány jako oddělovací členy, které slouží k separaci dílčích pasivních struktur. Takto navržený filtr potom nemusí obsahovat orientované smyčky a determinant by se skládal ze součinu přenosů vlastních

smyček. Tímto způsobem jsou realizovány primitivní kmitočtové filtry s využitím kaskádního řazení [14].

Mezi podmínky správného počtu členů charakteristické rovnice lze taktéž zařadit podmínku na její konkrétní tvar, tedy možnost měnit činitel jakosti  $Q$  na charakteristickém kmitočtu  $f_0$ , nebo možnost zakomponování podmínky na změnu parametru  $Q$  nezávisle na  $f_0$ .

Příklad charakteristické rovnice dovolující změnu činitele jakosti  $Q$  nezávisle na kmitočtu:

$$CE = n_1 p^2 C_1 C_2 + p C_1 G_1 + n_1 G_1 G_2 = 0. \quad (3.3)$$

Zde ovlivňuje činitel jakosti změna proudového přenosu  $n_1$ .

Jako další příklad charakteristické rovnice je uveden tvar pro nezávislou změnu kmitočtu  $f_0$  na činitele jakosti  $Q$

$$CE = p^2 C_1 C_2 + n_1 p C_1 G_1 + n_1 n_2 G_1 G_2 = 0 \quad (3.4)$$

nebo

$$CE = n_1 p^2 C_1 C_2 + p C_1 G_1 + n_2 G_1 G_2 = 0 \quad (3.5)$$

kde platí, že  $n_1 = n_2$  resp.  $n_1 = 1/n_2$ .

Posledním uvedeným příkladem charakteristická rovnice je tvar pro nezávislou změnu kmitočtu  $f_0$  a změnu činiteli jakosti  $Q$

$$CE = p^2 C_1 C_2 + n_1 n_2 p C_1 G_1 + n_2 n_3 G_1 G_2 = 0 \quad (3.6)$$

nebo

$$CE = n_2 p^2 C_1 C_2 + n_1 p C_1 G_1 + n_3 G_1 G_2 = 0. \quad (3.7)$$

Zde je možné měnit činitel jakosti změnou proudového přenosu  $n_1$ . Charakteristický kmitočet je možné měnit parametry  $n_2$  a  $n_3$ , přičemž musí platit  $n_2 = n_3$  resp.  $n_2 = 1/n_3$ .

Jestliže jsou navrženy charakteristické rovnice dle (3.3) až (3.7), potom je nutné stanovit nové podmínky tvaru M-C grafu [14]:

- v grafu se nachází dvě vzájemně se dotýkající se orientované smyčky a tři napěťové uzly, ke kterým je připojena jedna admitance,
- v grafu se nachází jeden vysokoimpedanční uzel a tři vzájemně se dotýkající se orientované smyčky, které tímto uzlem prochází.

### 3.4.2 Výhody použití M-C grafů

- Jednoduché sestavení M-C grafu přímo ze schématu
- Jednoduchá struktura
- Jednoduchá pravidla při vyhodnocování
- Umožňují vyhodnocení napěťových i proudových přenosů

### 3.4.3 Návrh filtračního obvodu pomocí zjednodušených M-C grafů

Nejprve si musíme určit vstupní podmínky a cíle navrženého obvodu stanovením charakteristické rovnice CE. Ta byla stanovena takto:

$$CE = p^2 C_1 C_2 + p C_1 G_2 A_1 + G_1 G_2 A_1 A_2 \quad (3.8)$$

Stanovená rovnice díky, níž je možno přeladovat mezní kmitočet  $f_0$  za předpokladu, že  $A_1 = A_2 = A_{12}$ .

Dalším postupem je už samotný návrh zjednodušeného M-C grafu. Výsledný graf bude obsahovat několik smyček, které je potřeba sestavit tak, aby vznikla požadovaná charakteristická rovnice, která je zároveň determinanem grafu. Jelikož se jedná o kmitočtový filtr druhého řádu, bude při sestavování nutno začít se dvěma nedotýkajícími se vlastními smyčkami, které jsou zobrazeny na Obr. 3.5.

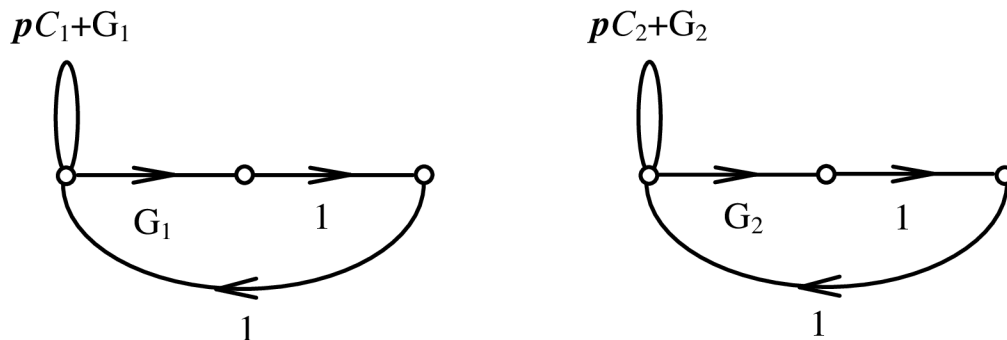


Obr. 3.5: Dvě samostatné vlastní smyčky

Determinant grafu z Obr. 3.5 je roven:

$$\Delta = (pC_1 + G_1)(pC_2 + G_2) = p^2 C_1 C_2 + p C_1 G_2 + p C_2 G_1 + G_1 G_2 \quad (3.9)$$

Dále je nutné eliminovat některé členy determinantu což se provede zavedením nedotýkajících se smyček. Obr. 3.6

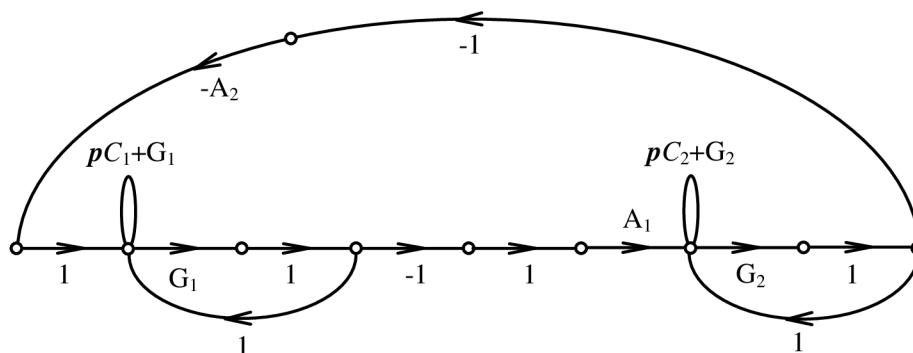


Obr. 3.6: Dva nedotýkající se integrační články

Determinant grafu z Obr. 3.6 je roven:

$$\begin{aligned} \Delta &= p^2 C_1 C_2 + p C_1 G_2 + p C_2 G_1 + G_1 G_2 - G_1 (p C_2 + G_2) - G_2 (p C_1 + G_1) + \\ &+ G_1 G_2 = p^2 C_1 C_2 + p C_1 G_2 + p C_2 G_1 + G_1 G_2 - p C_2 G_1 - p C_1 G_2 - \\ &- G_1 G_2 - G_1 G_2 + G_1 G_2 = p^2 C_1 C_2 \end{aligned} \quad (3.10)$$

Zavedením hlavní smyčky je přidán další člen do charakteristické rovnice. Obr 3.7

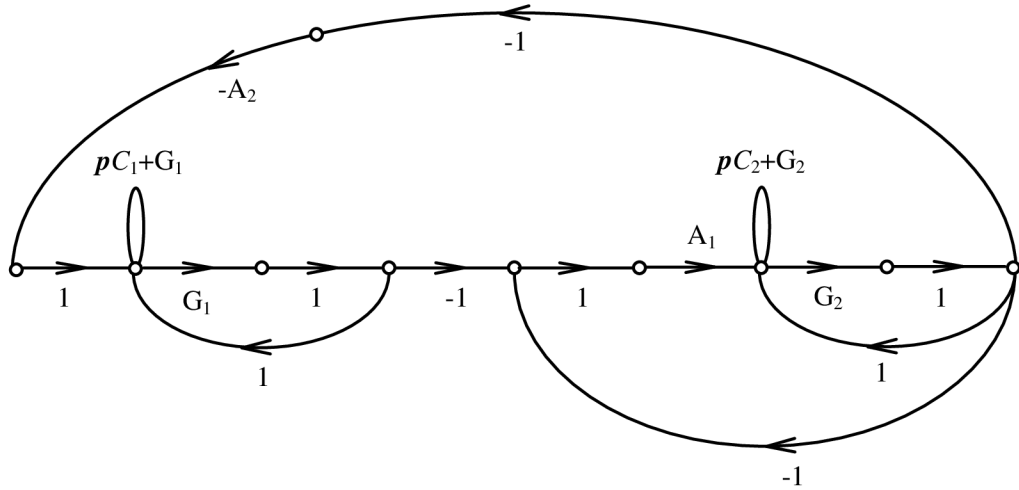


Obr. 3.7: Graf obvodu s hlavní smyčkou

Determinant grafu z Obr. 3.7 je roven:

$$\Delta = p^2 C_1 C_2 - (-A_1 A_2 G_1 G_2) = p^2 C_1 C_2 + G_1 G_2 A_1 A_2 \quad (3.11)$$

V posledním kroku je přidána poslední smyčka, která vytvoří první mocninu  $p$ . Takto vytvořený návrh je nyní kompletní a je zobrazen na Obr. 3.8.



Obr. 3.8: Výsledný zjednodušený M-C graf navrženého filtru

Determinant grafu z Obr. 3.8 je roven:

$$\begin{aligned}
 \Delta &= p^2 C_1 C_2 + G_1 G_2 A_1 A_2 - (p C_1 + G_1)(-A_1 G_2) + G_1(-A_1 G_2) = \\
 &= p^2 C_1 C_2 + G_1 G_2 A_1 A_2 + p C_1 G_2 A_1 + A_1 G_1 G_2 - A_1 G_1 G_2 = \\
 &= p^2 C_1 C_2 + p C_1 G_2 A_1 + G_1 G_2 A_1 A_2
 \end{aligned} \tag{3.12}$$

Tímto navrženým kmitočtovým filtrem se dále budeme zabývat v následující kapitole, kde je proveden numerický návrh, odvozené schéma zapojení a kde je provedena simulace jeho výstupních parametrů.

## 4 NÁVRH DIFERENČNÍCH FILTRŮ POMOCÍ GRAFŮ SIGNÁLOVÝCH TOKŮ

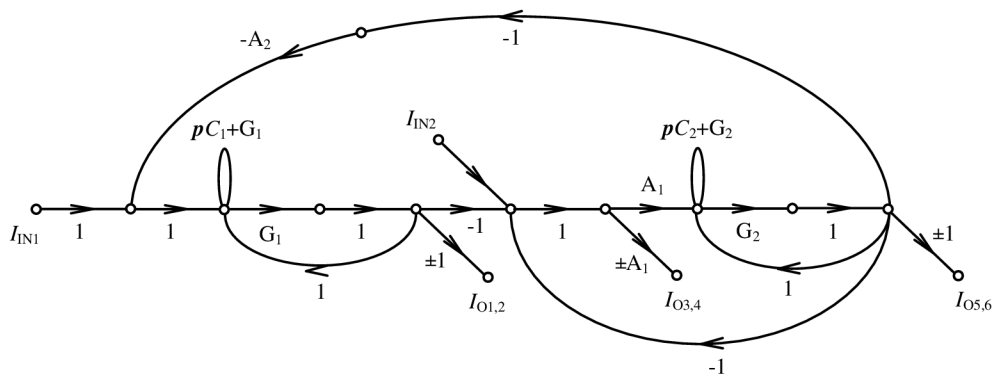
V této kapitole se budeme zabývat šesti navrženými filtračními strukturami pracujícími v proudovém módu a jejich diferenčními ekvivalenty. Tyto struktury byly navrženy a znázorněny pomocí zjednodušených M-C grafů. K jejich sestavení byly v kombinaci s pasivními součástkami využity aktivní prvky uvedené výše. Všechny filtrační struktury byly navrženy obdobným způsobem jako tomu bylo u filtru v kapitole 3.4.3 a následně byly zrcadlením převedeny do diferenčních podob. Některá diferenční zapojení používají zrcadlené nediferenční aktivní prvky z důvodu jejich snadnější implementace na desku plošného spoje. Navržené struktury jsou druhého řádu a umožňují minimálně funkce typu dolní propusti, horní propusti a pásmové propusti. Přenosové vlastnosti byly ověřeny programem SNAP a následně i pomocí simulací v programu OrCAD verze 10.3. Simulace probíhaly od hodnoty 10 kHz do 100 MHz, kde byla zkoumána jejich modulová charakteristika. Mezní kmitočet pro všechna navržená zapojení byl zvolen na hodnotě 1 MHz s možností přeladitelnosti za pomoci aktivních prvků BOTA či DACA. V každém grafu jsou vyneseny průběhy pro nediferenční varianty, které jsou znázorněny barevnými čarami a průběhy jejich ekvivalentů v diferenční podobě. V Tab. 4.1 jsou uvedeny jednotlivé přenosy aktivních prvků, tak jak jsou označeny v zjednodušených M-C grafech, schématech zapojení a v programech SNAP a OrCAD.

Tab. 4.1: Označení přenosů jednotlivých aktivních prvků

| Prvek | M-C graf | Schéma zapojení | SNAP | OrCAD |
|-------|----------|-----------------|------|-------|
| CF    | +1       | ▷               | -1   | -     |
|       | -1       | ◁               | +1   | +     |
| OTA   | $g_m$    | ▷               | ▷    | +     |
|       | $-g_m$   | ◁               | ◁    | -     |
| DACA  | $A$      | ▷               | ▷    | -     |
|       | $-A$     | ◁               | ◁    | +     |

### 4.1 Návrh filtru pro řízení mezního kmitočtu

Pomocí grafů signálových toků bylo navrženo zapojení, které umožňuje realizovat filtrační funkce typu DP, HP, PP, PZ a také umožňuje změnu mezního kmitočtu  $f_0$  pomocí dvou prvků DACA. Podrobný postup návrhu tohoto zapojení byl předveden v kapitole 3.4.3. Navržený M-C graf i s jeho vstupy a výstupy je na Obr. 4.1.



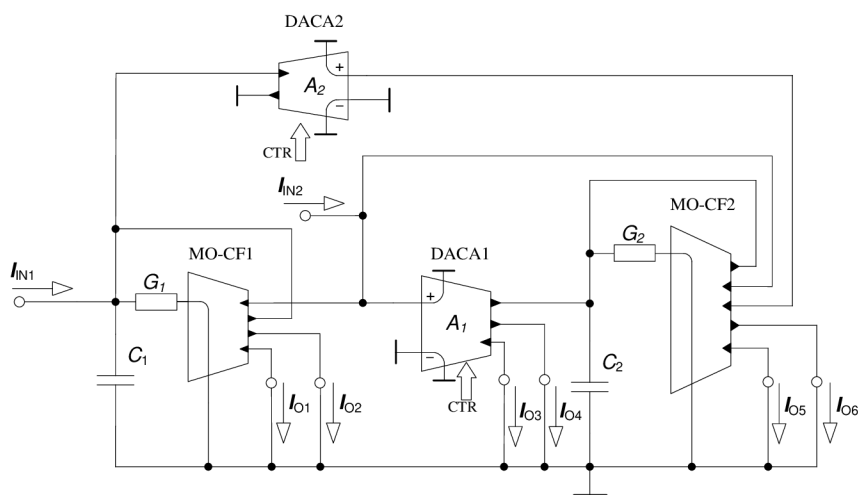
Obr. 4.1: Navržený M-C graf pro změnu mezního kmitočtu

Pro tento graf má výsledná charakteristická rovnice tvar

$$CE = p^2 C_1 C_2 + p C_1 G_2 A_1 + G_1 G_2 A_1 A_2, \quad (4.1)$$

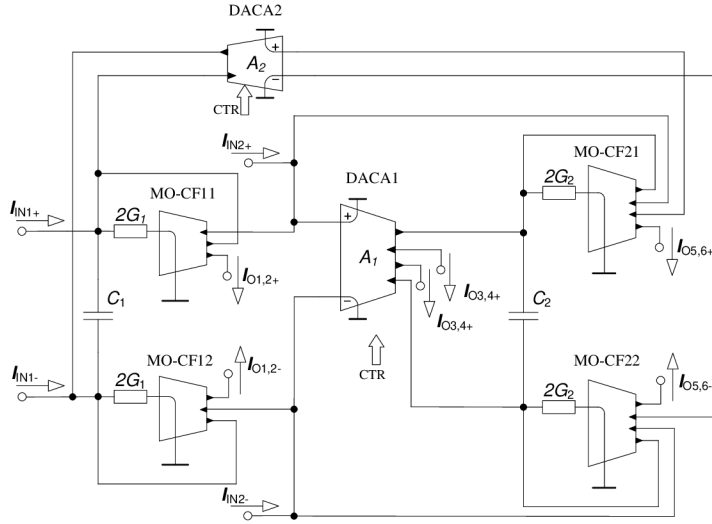
kde platí, že  $A_1 = A_2$ .

Ze zjednodušeného M-C grafu bylo možné realizovat nediferenční zapojení kmitočtového filtru (Obr. 4.2), kde si lze všimnout dvou prvků DACA pro možnost změny mezního kmitočtu. Dále má obvod tři vstupy a tři výstupy pro možnosti realizace DP, HP PP a PZ.



Obr. 4.2: Nediferenční zapojení pro změnu mezního kmitočtu

Nediferenční zapojení bylo převedeno pomocí podélné transformace na diferenční viz Obr. 4.3. V porovnání obou zapojení si lze povšimnout prvků MO-CF, kterých je nyní v zapojení dvojnásobek. Změna mezního kmitočtu bude realizována stejným způsobem, jako tomu bylo u nediferenční varianty, a to změnou proudového zesílení prvku DACA.



Obr. 4.3: Diferenční zapojení pro změnu mezního kmitočtu

Přenosové funkce nediferenčního obvodu pro změnu mezního kmitočtu jsou vyjádřeny jako:

$$K_{DP} = \frac{I_{O6}}{I_{IN1}} = \frac{-I_{O5}}{I_{IN1}} = \frac{G_1 G_2 A_1 A_2}{CE} \quad (4.2)$$

$$K_{PP} = \frac{I_{O6}}{I_{IN2}} = \frac{-I_{O5}}{I_{IN2}} = \frac{pC_1 G_2 A_1}{CE} \quad (4.3)$$

$$K_{HP} = \frac{I_{O4}}{I_{IN2}} = \frac{-I_{O3}}{I_{IN2}} = \frac{p^2 C_1 C_2}{CE} \quad (4.4)$$

$$K_{PZ} = \frac{I_{O2} + I_{O4}}{I_{IN2}} = \frac{-(I_{O1} + I_{O3})}{I_{IN2}} = \frac{p^2 C_1 C_2 A_1 + G_1 G_2 A_1 A_2}{CE} \quad (4.5)$$

Pro numerický návrh byly stanoveny tyto počáteční podmínky:  $f_0 = 1$  MHz,  $Q = 0,707$  a  $A = 1$ . Pro obvod platí podmínka  $A_1 = A_2 = A$ . Hodnoty krokování pro změnu frekvence byly nastavovány na  $A = [0,5; 1; 2]$ , přičemž zesílení prvku



DACA je pro diferenční struktury poloviční. Hodnoty pasivních součástek zůstávají při krokování stejné. V poslední řadě je nutno zvolit hodnoty kondenzátorů  $C_1 = C_2 = C = 220$  pF. Následně lze dopočítat hodnoty vodivosti ze vztahů:

$$G_1 = Q^2 G_2 = 0,977 \text{ mS}, \quad R_1 = \frac{1}{G_1} = 1024 \text{ } \Omega \quad (4.6)$$

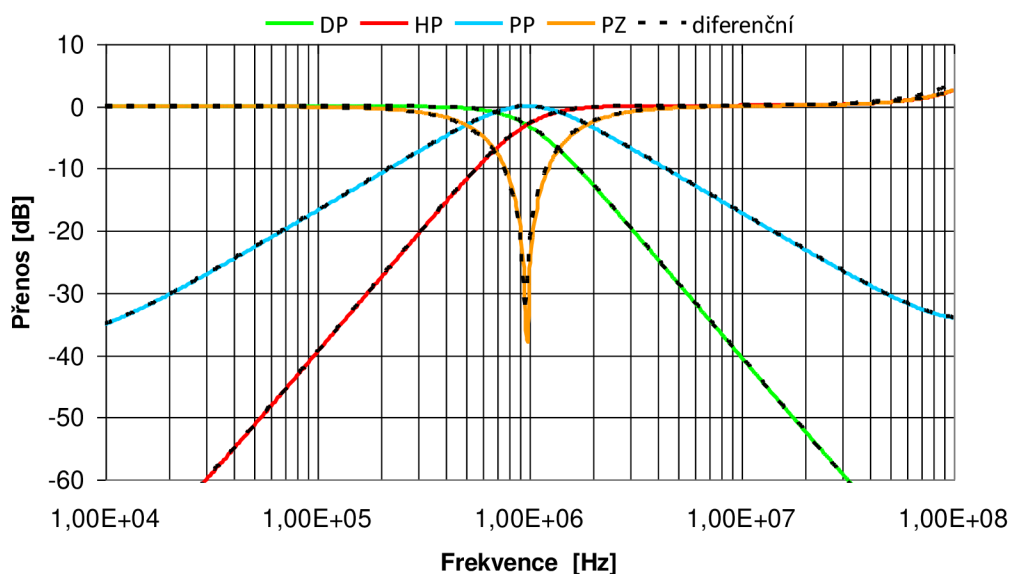
$$G_2 = \frac{2\pi f C}{A Q} = 1,955 \text{ mS}, \quad R_2 = \frac{1}{G_2} = 512 \text{ } \Omega \quad (4.7)$$

kdy se vycházelo se z rovnic:

$$f_0 = \frac{A}{2\pi} \sqrt{\frac{G_1 G_2}{C_1 C_2}} [\text{Hz}] \quad (4.8)$$

$$Q = \sqrt{\frac{C_2 G_1}{C_1 G_2}} [-] \quad (4.9)$$

Výsledky první simulace na Obr. 4.4 zachycují průběhy funkcí realizovatelných tímto filtrem.

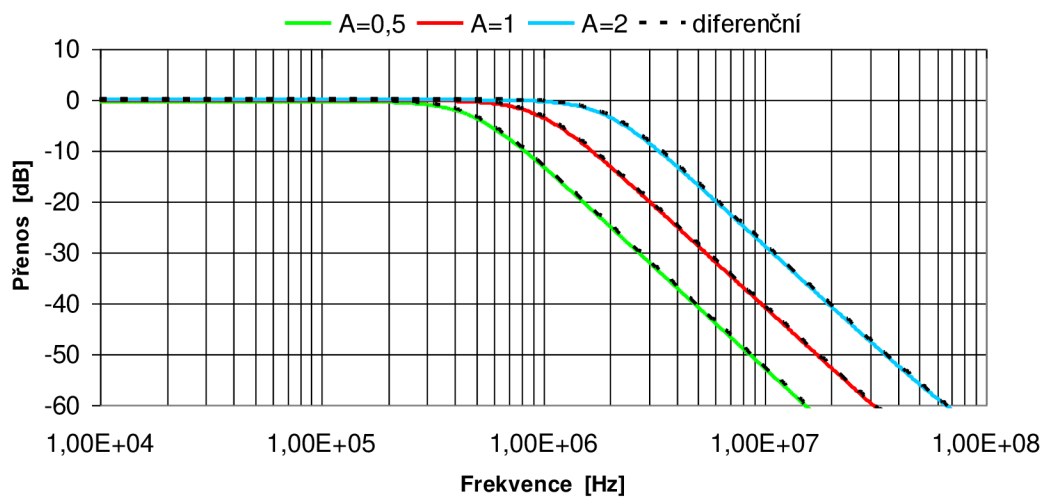


Obr. 4.4: Výsledky simulací (DP, PP, HP a PZ) navrženého filtru ze schematu na Obr. 4.2 a Obr. 4.3

Výchozí hodnota činitele jakosti odpovídá  $Q = 0,707$ . Výsledná charakteristika má výbornou selektivitu a její levá strana průběhu pásmové propusti klesá s odpovídajícím sklonem  $-20$  dB na dekádu a útlum při hodnotě  $10$  kHz je  $-35$  dB, u diferenčního zapojení je tento průběh velmi podobný. Při srovnání výsledků s diferenčním

zapojením (čárkovaný průběh) nevidíme příliš velké odchylky, až na hodnoty útlumu pásmové zadržky, která dosahuje při nediferenčním zapojení -38 dB a při diferenčním jen přibližně do -33 dB. Zde se tedy jeví nediferenční varianta lépe.

Další simulace (Obr. 4.5) ukazuje na změnu mezní frekvence daného filtru pomocí krokování koeficientů  $A = [0,5; 1; 2]$ . Pro diferenční zapojení to byly poloviční hodnoty těchto koeficientů. Takto zvolené koeficienty zesílení  $A$  jsou pro ukázkou možnosti pohybovat mezním kmitočtem jak nahoru, tak ale i dolů. Z důvodů přehlednosti je zobrazen pouze filtr typu dolní propusti. Ze srovnání diferenčního zapojení s jeho nediferenční variantou vyplývá jen malá odchylka. Porovnání mezních kmitočtů těchto zapojení je v Tab. 4.2, kde diferenční zapojení vykazuje lepší hodnoty směrem k vypočteným hodnotám.



Obr. 4.5: Charakteristika DP pro všechny krokované mezní kmitočty navrženého filtru ze schematu na Obr. 4.2 a Obr. 4.3

Tab. 4.2: Závislost mezního kmitočtu na zesílení  $A$  z grafu na Obr. 4.5

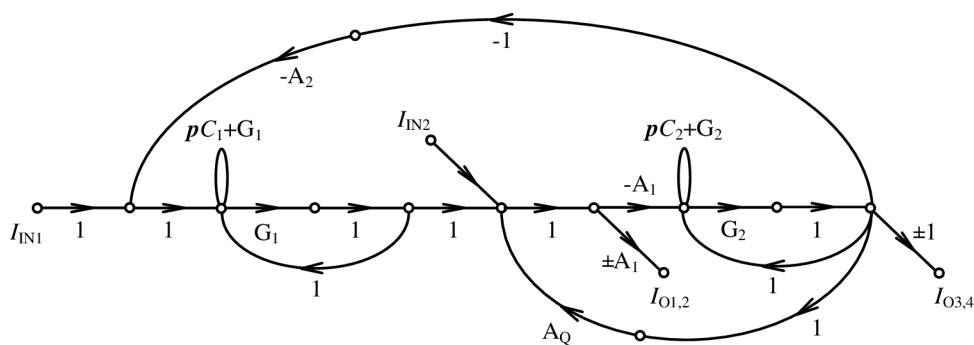
|        | Nedif. zapojení      | Dif. zapojení        | Vypočtené   |
|--------|----------------------|----------------------|-------------|
| $A[-]$ | $f_0$ [kHz] simulace | $f_0$ [kHz] simulace | $f_0$ [kHz] |
| 0,5    | 477                  | 487                  | 500         |
| 1      | 964                  | 987                  | 1000        |
| 2      | 1905                 | 1940                 | 2000        |

## 4.2 Návrh filtru pro řízení změny mezního kmitočtu a změnu činitele jakosti

Jedná se o zapojení, které částečně vychází z návrhu v předchozí kapitole 4.1, ale je také doplněné o možnost změny činitele jakosti. Toho bylo docíleno přidáním třetího prvku DACA. M-C graf signálových toků pro tento druh zapojení je zobrazen na Obr. 4.6. Pro tento graf má výsledná charakteristická rovnice tvar

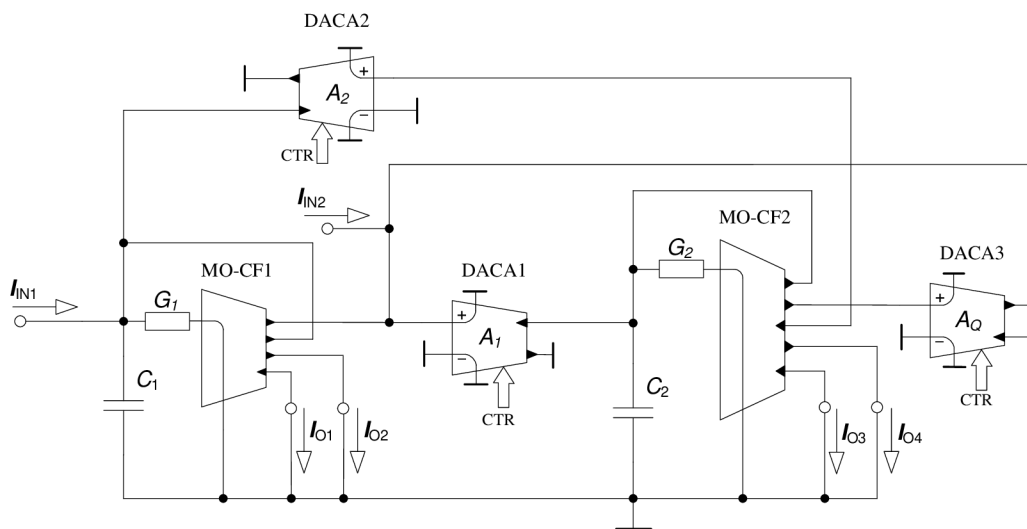
$$CE = p^2 C_1 C_2 + p C_1 G_2 A_1 A_Q + G_1 G_2 A_1 A_2, \quad (4.10)$$

kde platí, že  $A_1 = A_2$ .



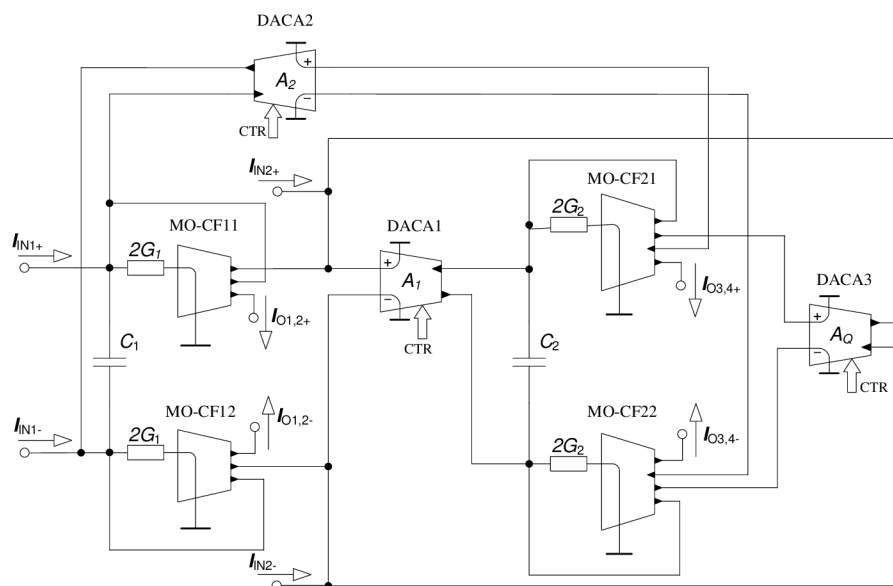
Obr. 4.6: Navržený M-C graf pro změnu mezního kmitočtu a činitele jakosti

Z M-C grafu bylo možné realizovat nediferenční zapojení kmitočtového filtru (Obr. 4.7), kde si lze všimnout dvou doplnění o třetí prvek DACA, kterým je možné měnit činitel jakosti. Obvod dva vstupy a dva výstupy pro možnost realizace DP, HP a PP.



Obr. 4.7: Nediferenční zapojení pro změnu mezního kmitočtu a činitele jakosti

Nediferenční zapojení bylo převedeno pomocí podélné transformace na diferenční, viz Obr. 4.8. Změna mezního kmitočtu a činitele jakosti bude realizována stejným způsobem jako tomu bylo u nediferenční varianty, a to změnou proudového zesílení prvků DACA.



Obr. 4.8: Diferenční zapojení pro změnu mezního kmitočtu a činitele jakosti

Přenosové funkce nediferenčního obvodu pro změnu mezního kmitočtu jsou v vyjádřeny následujících rovnicích:

$$K_{DP} = \frac{I_{O4}}{I_{IN1}} = \frac{-I_{O3}}{I_{IN1}} = \frac{G_1 G_2 A_1 A_2}{CE} \quad (4.11)$$

$$K_{PP} = \frac{I_{O4}}{I_{IN2}} = \frac{-I_{O3}}{I_{IN2}} = \frac{pC_1 G_2 A_1}{CE} \quad (4.12)$$

$$K_{HP} = \frac{I_{O2}}{I_{IN2}} = \frac{-I_{O1}}{I_{IN2}} = \frac{p^2 C_1 C_2}{CE} \quad (4.13)$$

Pro numerický návrh byly stanoveny tyto počáteční podmínky:  $f_0 = 1$  MHz,  $Q = 0,707$ ,  $A = 1$  a  $A_Q = 1$ . Pro obvod platí podmínka  $A_1 = A_2 = A$ . Hodnoty krokování pro změnu frekvence byly nastavovány na  $A = [0,5; 1; 2]$ , přičemž zesílení prvku DACA je pro diferenční struktury poloviční. Hodnoty krokování pro změnu činitele jakosti byly nastaveny na  $A_Q = [0,25; 0,5; 1]$ , kde pro diferenční zapojení jsou rovněž poloviční. Hodnoty pasivních součástí zůstávají při obou krokování stejné. Nakonec je nutno zvolit hodnoty kondenzátorů  $C_1 = C_2 = C = 220$  pF. Následně lze dopočítat hodnoty vodivosti ze vztahů:

$$G_1 = Q^2 A_Q^2 G_2 = 0,977 \text{ mS}, \quad R_1 = \frac{1}{G_1} = 1024 \text{ } \Omega \quad (4.14)$$

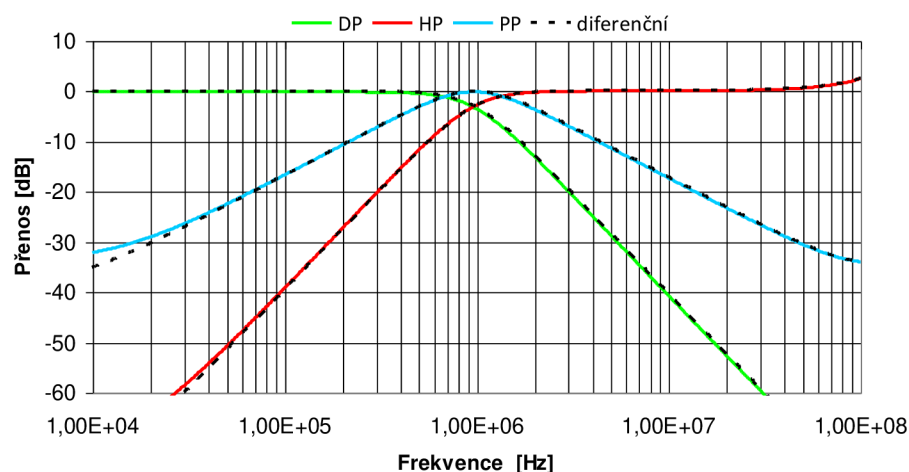
$$G_2 = \frac{2\pi f C}{Q A_Q A} = 1,955 \text{ mS}, \quad R_2 = \frac{1}{G_2} = 512 \text{ } \Omega \quad (4.15)$$

Kdy se vycházelo se z rovnic:

$$f_0 = \frac{A}{2\pi} \sqrt{\frac{G_1 G_2}{C_1 C_2}} \text{ [Hz]} \quad (4.16)$$

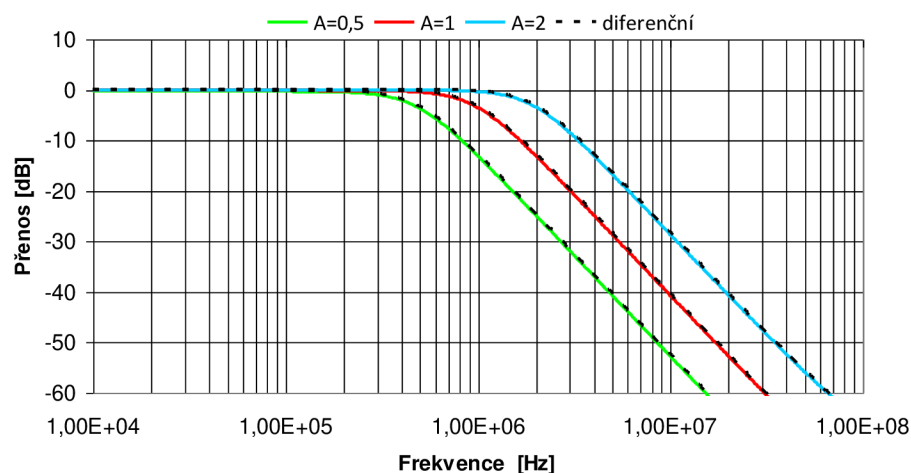
$$Q = \frac{1}{A_Q} \sqrt{\frac{C_2 G_1}{C_1 G_2}} \text{ [-]} \quad (4.17)$$

Výsledky první simulace na Obr. 4.9 zachycují všechny tři průběhy funkcí realizovatelných tímto filtrem. Výchozí hodnota činitele jakosti odpovídá  $Q = 0,707$ . Výsledná charakteristika vykazuje dobrou selektivitu s -20 dB na dekádu a útlum při hodnotě 10 kHz dosahuje -32 dB a 35 dB při diferenčním zapojení. Jestliže tedy srovnáme výsledky simulací tohoto zapojení doplněného o změnu činitele jakosti a porovnání zapojení z kapitoly 4.1, pak si lze všimnout, že přidání dalšího prvku DACA se nikterak záporně neprojeví na jeho přenosových parametrech.



Obr. 4.9: Výsledky simulací (DP, PP, HP) navrženého filtru ze schematu na Obr. 4.7 a Obr. 4.8

Simulace z Obr. 4.10 ukazuje na změnu mezní frekvence daného filtru pomocí krokování koeficientů  $A = [0,5; 1; 2]$ . Pro diferenční zapojení to byly poloviční hodnoty těchto koeficientů. Porovnání mezních kmitočtů těchto zapojení je v Tab. 4.3, kde diferenční zapojení vykazuje lepší hodnoty směrem k vypočteným hodnotám.

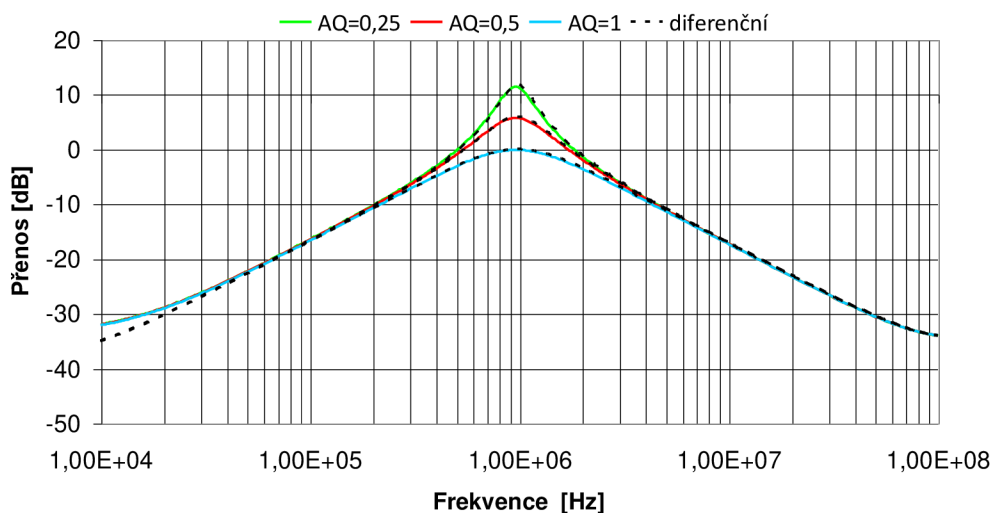


Obr. 4.10: Charakteristika DP pro všechny krokované mezní kmitočty navrženého filtru ze schematu na Obr. 4.7 a Obr. 4.8

Tab. 4.3: Závislost mezního kmitočtu na zesílení A z grafu na Obr. 4.10

|      | Nedif. zapojení      | Dif. zapojení        | Vypočtené   |
|------|----------------------|----------------------|-------------|
| A[-] | $f_0$ [kHz] simulace | $f_0$ [kHz] simulace | $f_0$ [kHz] |
| 0.5  | 478                  | 487                  | 500         |
| 1    | 952                  | 981                  | 1000        |
| 2    | 1920                 | 1952                 | 2000        |

Poslední simulací pro tento navržený filtr je ukázka změny činitele jakosti při krokování přenosů prvku DACA. Tyto hodnoty byly stanoveny na  $A_Q = [0,25; 0,5; 1]$ , pro diferenční zapojení jsou poloviční. Z výsledků si lze povšimnout klesající tendenci činitele jakosti Q s rostoucím koeficientem  $A_Q$ . Dále je možné sledovat se snižujícím se činitelem jakosti lehké snížení mezní frekvence filtru, přičemž i zde se ukazuje o něco málo lepší charakter diferenčního zapojení (čárkovaná čára).

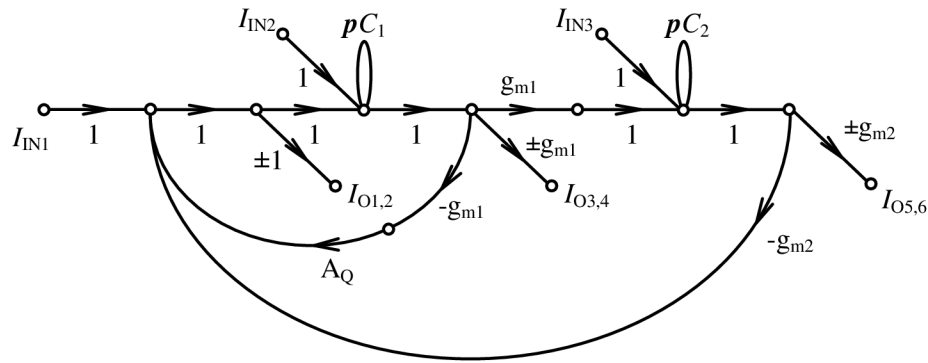


Obr. 4.11: Charakteristika PP pro všechny krokované změny činitele jakosti navrženého filtru ze schematu na Obr. 4.7 a Obr. 4.8

### 4.3 Návrh multifunkčního kmitočtového filtru s prvky MOTA

Při návrhu kmitočtového filtru bylo zaměřeno na možnost změny činitele jakosti a možnost změny mezního kmitočtu pomocí transkonduktance prvku OTA, či jejich vícevýstupových alternativ MOTA. Zapojení dále obsahuje proudové sledovače MO-CF, nebo v případě diferenčního zapojení plně diferenční proudový sledovač FD-CF. M-C graf signálových toků je uveden na Obr. 4.12. Charakteristická rovnice má tvar

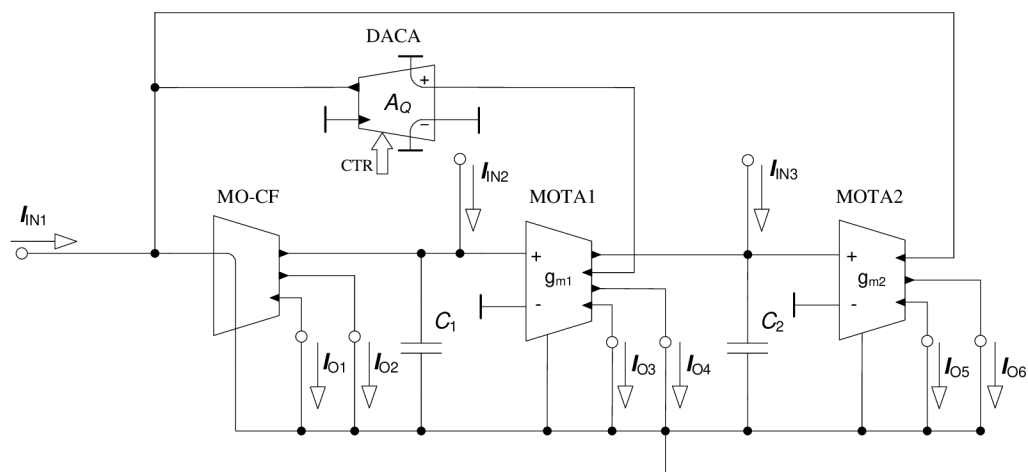
$$CE = p^2 C_1 C_2 + p C_2 g_{m1} A_Q + g_{m1} g_{m2}. \quad (4.18)$$



Obr. 4.12: Navržený M-C graf pro změnu mezního kmitočtu a činitele jakosti s prvky MOTA

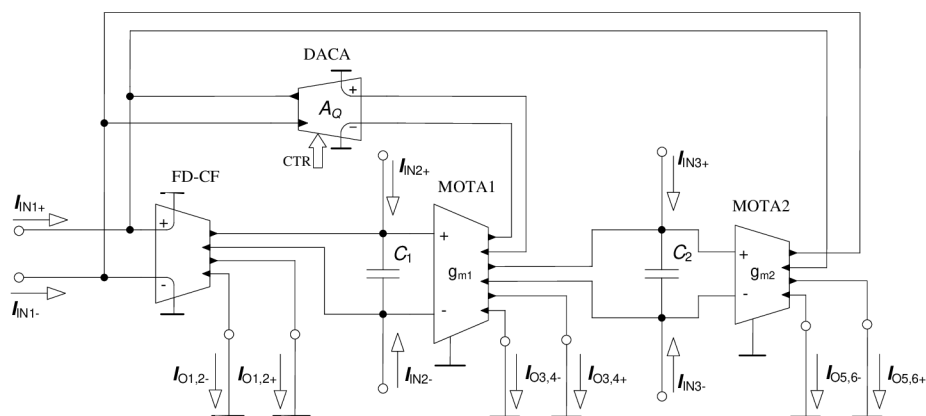
Z M-C grafu bylo realizováno nediferenční zapojení kmitočtového filtru Obr. 4.13, kde si lze všimnout jednoho prvku DACA, kterým je možné měnit činitel jakosti a dvou vícevýstupových prvků MOTA. V obvodu jsou znázorněny všechny vstupy a výstupy pro různé možnosti kombinace a realizace DP, HP a PP. Tento filtr taktéž umožňuje realizaci PZ a FČ.





Obr. 4.13: Nediferenční zapojení pro změnu mezního kmitočtu a činitele jakosti s prvky MOTA

Rovněž i zde bylo převedeno nediferenční zapojení pomocí podélné transformace na diferenční, viz Obr. 4.14. Změna mezního kmitočtu a činitele jakosti bude realizována stejným způsobem, jako tomu bylo u nediferenční varianty, a to změnou transkonduktancí a proudového zesílení prvku DACA.



Obr. 4.14: Diferenční zapojení pro změnu mezního kmitočtu a činitele jakosti s prvky MOTA

Na tomto návrhu je ukázána možnost variability zapojení filtrů, kdy je možnost připojovat vstupy na různá místa v obvodu. Všechny tyto možnosti připojení vstupů a jejich přenos na výstupech jsou předvedeny v následujících rovnicích.

$$K_{DP1} = \frac{I_{O6}}{I_{IN1}} = \frac{-I_{O5}}{I_{IN1}} = \frac{I_{O6}}{I_{IN2}} = \frac{-I_{O5}}{I_{IN2}} = \frac{I_{O4}}{I_{IN3}} = \frac{-I_{O3}}{I_{IN3}} = \frac{g_{m1}g_{m2}}{CE} \quad (4.19)$$

$$K_{DP2} = \frac{I_{O2} + I_{O5}}{I_{IN3}} = -\frac{I_{O1} + I_{O6}}{I_{IN3}} = \frac{g_{m1}g_{m2}A_Q}{CE} \quad (4.20)$$

$$K_{HP} = \frac{I_{O2}}{I_{IN1}} = \frac{-I_{O1}}{I_{IN1}} = \frac{p^2C_1C_2}{CE} \quad (4.21)$$

$$K_{PP1} = \frac{I_{O4}}{I_{IN1}} = \frac{-I_{O3}}{I_{IN1}} = \frac{I_{O4}}{I_{IN2}} = \frac{-I_{O3}}{I_{IN2}} = \frac{pC_2g_{m1}}{CE} \quad (4.22)$$

$$K_{PP2} = \frac{I_{O2}}{I_{IN3}} = \frac{-I_{O1}}{I_{IN3}} = \frac{pC_1g_{m2}}{CE} \quad (4.23)$$

$$K_{PP3} = \frac{I_{O2} + I_{O5}}{I_{IN2}} = -\frac{I_{O1} + I_{O6}}{I_{IN2}} = \frac{pC_2g_{m1}A_Q}{CE} \quad (4.24)$$

$$K_{PZ} = \frac{I_{O6} + I_{O2}}{I_{IN1}} = -\frac{I_{O5} + I_{O1}}{I_{IN1}} = \frac{g_{m1}g_{m2} + p^2C_1C_2}{CE} \quad (4.25)$$

Pro numerický návrh byly stanoveny tyto počáteční podmínky:  $f_0 = 1$  MHz,  $Q = 0,707$ ,  $A_Q = 1$ . Hodnoty krokování transkonduktancí pro změnu frekvence byly nastavovány na  $g_m = [0,977; 1,961; 3,909]$  mS. Hodnoty krokování pro změnu činitele jakosti byly nastaveny na  $A_Q = [0,25; 0,5; 1]$ , kde pro diferenční zapojení jsou rovněž poloviční. Hodnoty pasivních součástí zůstávají při krokování stejné. Nakonec je nutno zvolit hodnoty transkonduktancí  $g_{m1} = g_{m2} = g_m = 1,961$  mS. Následně lze dopočítat hodnoty kapacitorů ze vztahů:

$$C_1 = Q^2 A_Q^2 C_2 = 220,6 \text{ pF} \quad (4.26)$$

$$C_2 = \frac{g_m}{2\pi f Q A_Q} = 441,4 \text{ pF} \quad (4.27)$$

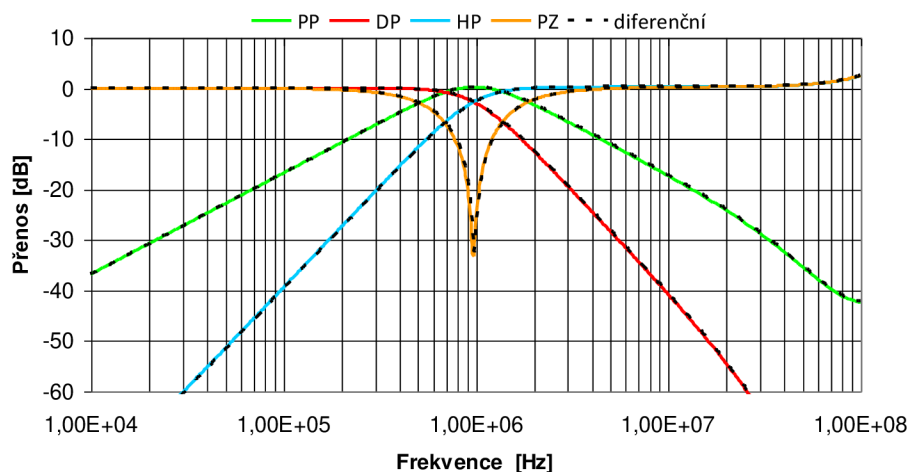
Kdy se vycházelo se z rovnic:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g_{m1}g_{m2}}{C_1C_2}} \text{ [Hz]} \quad (4.28)$$

$$Q = \frac{1}{A_Q} \sqrt{\frac{C_1 g_{m2}}{C_2 g_{m1}}} \quad [-] \quad (4.29)$$

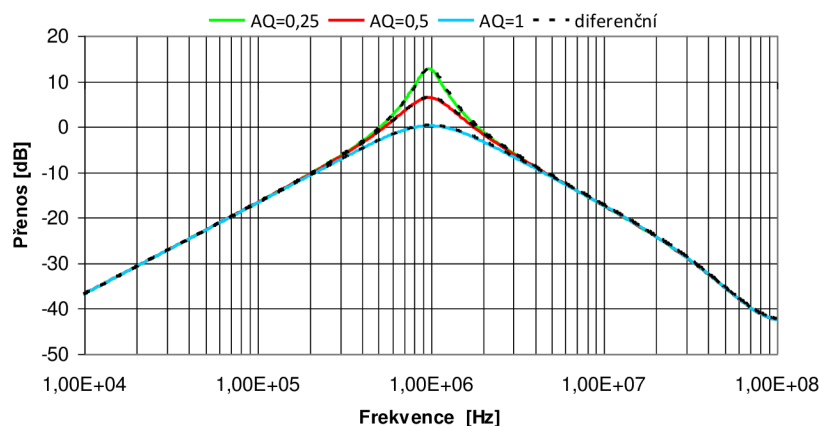
Hodnoty vypočítaných součástek byly pro simulace nahrazeny  $C_1 = 220$  pF a  $C_2 = 440$  pF.

V první simulaci na Obr. 4.15 jsou vyneseny průběhy filtrů typu DP, PP, HP a PZ pro výchozí hodnotu činitele jakosti  $Q = 0,707$ . Výsledná charakteristika vykazuje slušné selektivní vlastnosti hodnotou s -20 dB na dekádu, kdy se průběh na pravé straně mírně deformuje, ale to až při vyšších kmitočtech, na kterých se chování nedá předpovídat. Mezní frekvence je přibližně na hodnotě 1 MHz. Útlum při hodnotě 10 kHz dosahuje -37 dB a to i při diferenčním zapojení. Průběh PZ dosahuje hodnot útlumu -33 dB. Jestliže tedy srovnáme výsledky simulací nediferenčního a diferenčního průběhu, můžeme vidět, že se jejich charakteristiky příliš neliší.



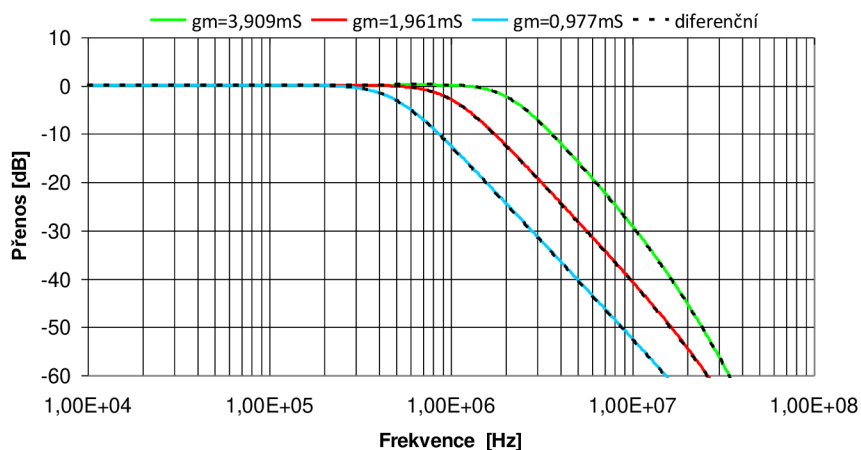
Obr. 4.15: Výsledky simulací (DP1, PP1, HP, PZ) navrženého filtru ze schematu na Obr. 4.13 a Obr. 4.14

V grafu na Obr. 4.16 simulací tohoto navrženého filtru jsou zobrazeny výsledky pro změnu činitele jakosti pomocí prvku DACA. Tyto krokovací hodnoty byly stanoveny na  $A_Q = [0,25; 0,5; 1]$ , pro diferenční zapojení jsou poloviční. Z výsledků je patrná klesající tendence průběhu činitele jakosti  $Q$  s rostoucím koeficientem  $A_Q$ . O trochu lepší průběhy vykazuje diferenční zapojení, a to zejména při nižších hodnotách činitele jakosti.



Obr. 4.16: Charakteristika PP1 pro všechny krokované změny činitele jakosti navrženého filtru ze schematu na Obr. 4.13 a Obr. 4.14

Simulace z Obr. 4.17 ukazuje na změnu mezní frekvence daného filtru pomocí krokování transkonduktancí pro hodnoty  $g_m = [0,977; 1,961; 3,909]$  mS. Porovnání mezních kmitočtů těchto zapojení je v Tab. 4.4. Z grafu si lze všimnout zhoršující se selektivity při vyšších kmitočtech nad 10 MHz.



Obr. 4.17: Charakteristika DP1 pro všechny krokované mezní kmitočty navrženého filtru ze schematu na Obr. 4.13 a Obr. 4.14

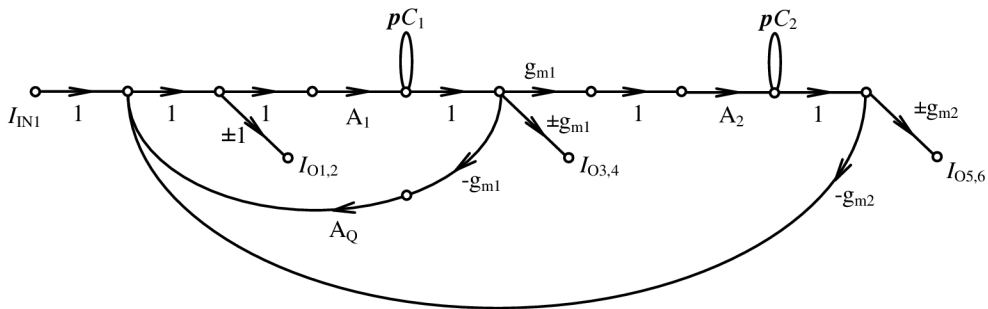
Tab. 4.4: Závislost mezního kmitočtu na transkonduktanci

|            | Nedif. zapojení      | Dif. zapojení        | Vypočtené   |
|------------|----------------------|----------------------|-------------|
| $g_m$ [mS] | $f_0$ [kHz] simulace | $f_0$ [kHz] simulace | $f_0$ [kHz] |
| 0,977      | 496                  | 487                  | 500         |
| 1,961      | 1002                 | 1018                 | 1000        |
| 3,909      | 2181                 | 2167                 | 2000        |

## 4.4 Návrh multifunkčního kmitočtového filtru s prvky MOTA a třemi zesilovači DACA

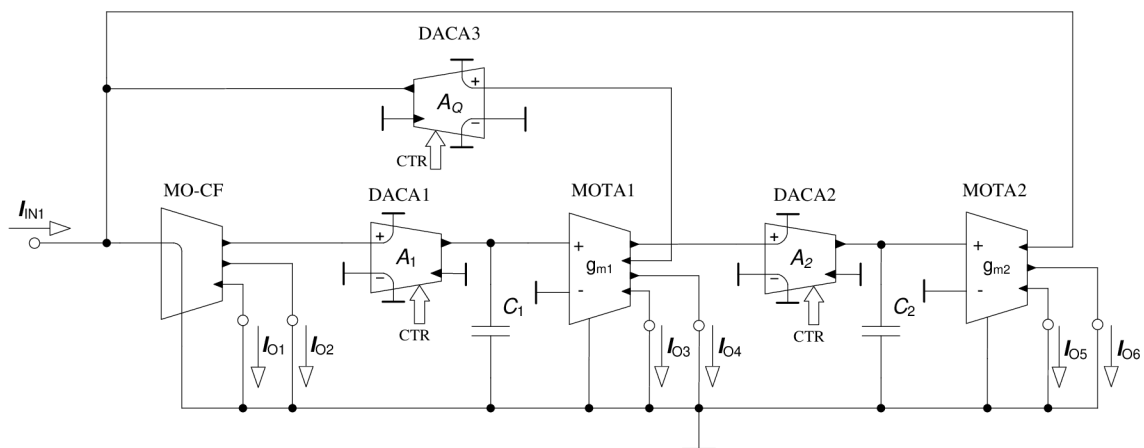
Jedná se o podobný návrh, jako byl uveden v kapitole 4.3, s tím rozdílem, že nyní je využito tří zesilovacích prvků DACA, kterými následně můžeme měnit jak činitel jakosti, tak ale i mezní kmitočet. Právě pro změnu mezního kmitočtu už nebudou ke změně využívány transkonduktanční obvody, ale zesilující prvky DACA. Tohoto je využito pro snazší manipulaci s filtrem, neboli také přesnější požadované zesílení. Filtr umožňuje realizaci DP, HP, PP, PZ a FČ. Navržený M-C graf signálových toků je zobrazen na Obr. 4.18. Jeho charakteristická rovnice je

$$CE = p^2 C_1 C_2 + p C_2 g_{m1} A_Q A_1 + g_{m1} g_{m2} A_1 A_2. \quad (4.30)$$



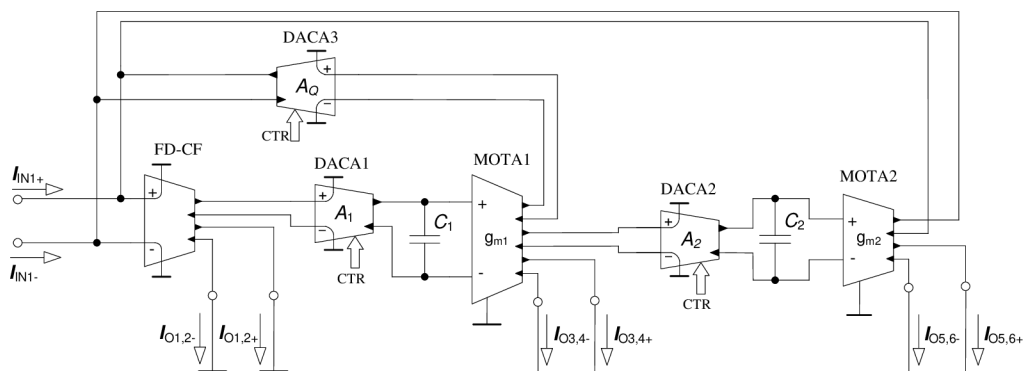
Obr. 4.18: Navržený M-C graf pro změnu mezního kmitočtu a činitele jakosti s prvky BOTA a třemi prvky DACA

Z M-C grafu bylo realizováno nediferenční zapojení kmitočtového filtru (Obr. 4.19), kde si lze všimnout tří prvků DACA, kterými je možné měnit činitel jakosti a mezní kmitočet. A také zde jsou dva vícevýstupové prvky MOTA.



Obr. 4.19: Nediferenční zapojení pro změnu mezního kmitočtu a činitele jakosti s prvky MOTA a třemi DACA

Na Obr. 4.20 se nachází převedené zapojení do diferenčního módu. Změna mezního kmitočtu a činitele jakosti bude realizována stejným způsobem jako tomu bylo u nediferenční varianty, neboli změnou proudového zesílení prvků DACA.



Obr. 4.20: Diferenční zapojení pro změnu mezního kmitočtu a činitele jakosti s prvky MOTA a třemi DACA

Přenosové funkce nediferenčního obvodu pro změnu mezního kmitočtu a činitele jakosti jsou vyjádřeny v následujících rovnicích:

$$K_{DP} = \frac{I_{O6}}{I_{IN1}} = \frac{-I_{O5}}{I_{IN1}} = \frac{g_{m1}g_{m2}A_1A_2}{CE} \quad (4.31)$$

$$K_{PP} = \frac{I_{O4}}{I_{IN1}} = \frac{-I_{O3}}{I_{IN1}} = \frac{pC_2g_{m1}A_1}{CE} \quad (4.32)$$

$$K_{HP} = \frac{I_{O2}}{I_{IN1}} = \frac{-I_{O1}}{I_{IN1}} = \frac{p^2C_1C_2A_2}{CE} \quad (4.33)$$

$$K_{PZ} = \frac{I_{O6} + I_{O2}}{I_{IN1}} = -\frac{I_{O5} + I_{O1}}{I_{IN1}} = \frac{g_{m1}g_{m2}A_1A_2 + p^2C_1C_2A_2}{CE} \quad (4.34)$$

Pro numerický návrh byly stanoveny tyto počáteční podmínky:  $f_0 = 1$  MHz,  $Q = 0,707$ ,  $A_Q = 1$ ,  $A = 1$ , přičemž platí, že  $A_1 = A_2 = A$ . Hodnoty krokování prvků DACA pro změnu kmitočtu jsou  $A = [0,5; 1; 2]$ . Hodnoty krokování pro změnu činitele jakosti byly nastaveny na  $A_Q = [0,25; 0,5; 1]$ , kde pro diferenční zapojení jsou tyto hodnoty poloviční. Hodnoty pasivních součástek zůstávají při krokování stejné. Nakonec je nutno zvolit hodnoty transkonduktancí  $g_{m1} = g_{m2} = g_m = 1,961$  mS. Následně lze dopočítat hodnoty kapacitorů ze vztahů:

$$C_1 = Q^2 A_Q^2 C_2 = 220,6 \text{ pF} \quad (4.35)$$

$$C_2 = \frac{g_m}{2\pi f Q A_Q} = 441,4 \text{ pF}, \quad (4.36)$$

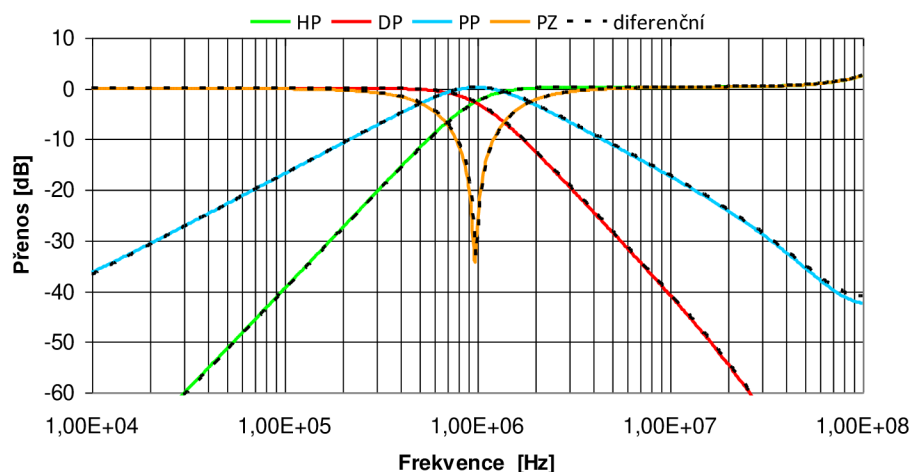
kdy se vycházelo se z rovnic:

$$f_0 = \frac{A}{2\pi} \sqrt{\frac{g_{m1}g_{m2}}{C_1C_2}} \text{ [Hz]} \quad (4.37)$$

$$Q = \frac{1}{A_Q} \sqrt{\frac{C_1g_{m2}A_2}{C_2g_{m1}A_1}} \text{ [-]}. \quad (4.38)$$

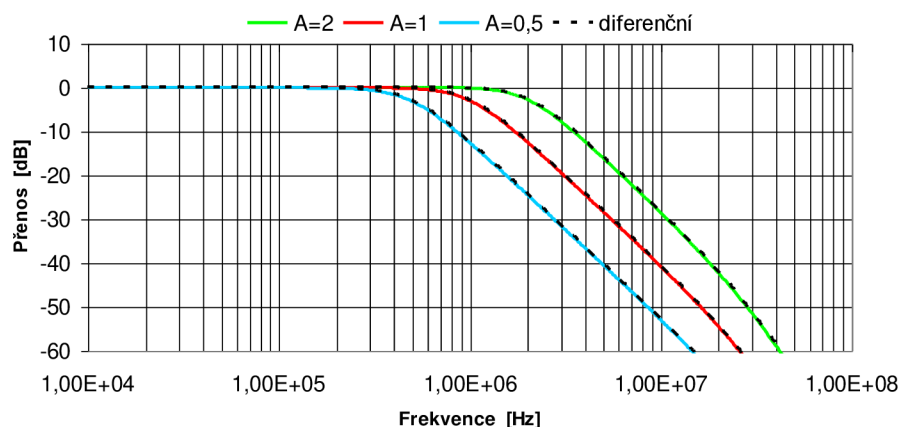
Hodnoty vypočítaných součástek byly pro simulace nahrazeny  $C_1 = 220$  pF a  $C_2 = 440$  pF.

V prvním grafu ze simulací jsou vyneseny všechny tři funkce filtru a to dolní propusti, pásmové propusti a horní propusti. Obr. 4.21



Obr. 4.21: Výsledky simulací (DP, PP, HP, PZ) navrženého filtru ze schematu na Obr. 4.19 a Obr. 4.20

Hodnoty v této modulové kmitočtové charakteristice z Obr. 4.21 byly nastaveny pro činitel jakosti  $Q = 0,707$  a mezní kmitočet 1 MHz. Výsledné charakteristiky se chovají podle očekávání, kdy jeho selektivní vlastnosti vykazují pro jak levou, tak i pravou stranu pokles  $-20$  dB na dekádu. Mezní frekvence se pohybuje okolo 1 MHz s tím, že diferenční zapojení je lehce nad touto hranicí. Ze srovnání těchto dvou zapojení vyplývá, že se od sebe příliš neliší.



Obr. 4.22: Charakteristika DP pro všechny krokované mezní kmitočty navrženého filtru ze schematu na Obr. 4.19 a Obr. 4.20

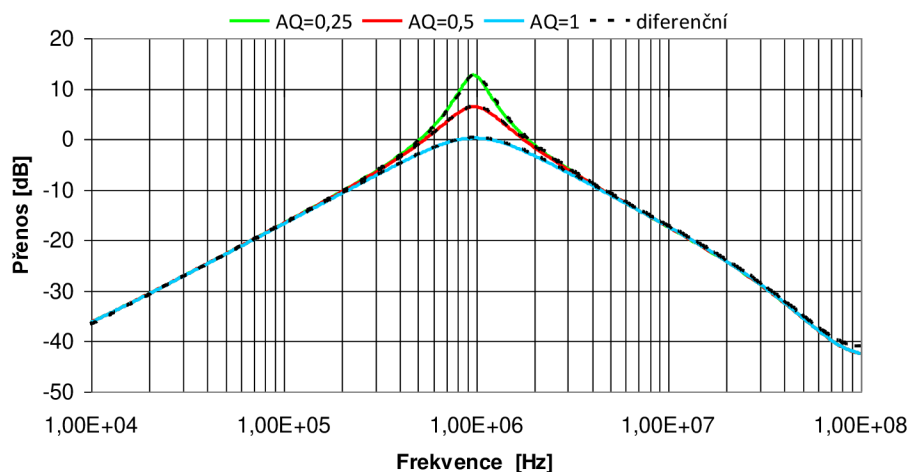


Na Obr. 4.22 máme zobrazenou modulovou charakteristiku pro změnu mezního kmitočtu za pomoci dvou prvků DACA. Zesílení bylo krokováno na hodnoty  $A = [0,5; 1; 2]$ . Porovnání mezních kmitočtů těchto zapojení je v Tab. 4.5. Z grafu je také patrná zhoršující se selektivita při vyšších kmitočtových úrovních nad 10 MHz.

Tab. 4.5: Závislost mezního kmitočtu zesílení prvku DACA z grafu na Obr. 4.22

|        | Nedif. zapojení      | Dif. zapojení        | Vypočtené   |
|--------|----------------------|----------------------|-------------|
| $A[-]$ | $f_0$ [kHz] simulace | $f_0$ [kHz] simulace | $f_0$ [kHz] |
| 0.5    | 488                  | 487                  | 496         |
| 1      | 1001                 | 1017                 | 1000        |
| 2      | 2051                 | 2089                 | 2000        |

Graf s charakteristikami změnou činitele jakosti je na Obr. 4.23. Je z něj patrná klesající tendence průběhu činitele jakosti  $Q$  s rostoucím koeficientem  $A_Q$ . Hodnoty krokování zesílení prvku DACA byly stanoveny  $A_Q = [0,25; 0,5; 1]$ . Hodnoty pasivních součástí zůstávají při krokování stejné. I zde pro tento graf se změnou činitele jakosti si můžeme všimnout lehkého poklesu mezní frekvence při snižování činitele jakosti.

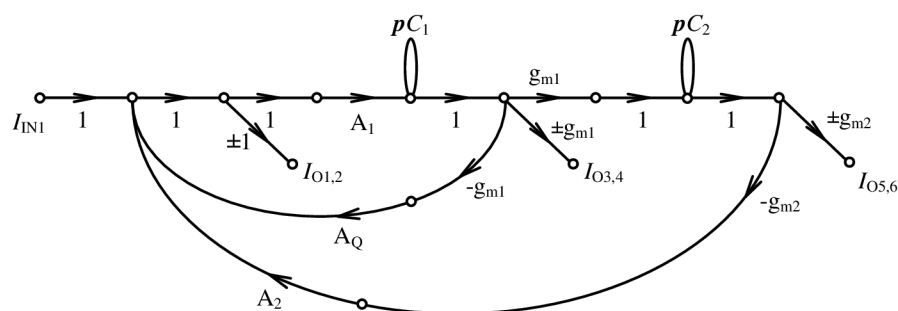


Obr. 4.23: Charakteristika PP pro všechny krokované změny činitele jakosti navrženého filtru ze schematu na Obr. 4.19 a Obr. 4.20

## 4.5 Multifunkční kmitočtový filtr s prvky MOTA a třemi proudovými zesilovači DACA

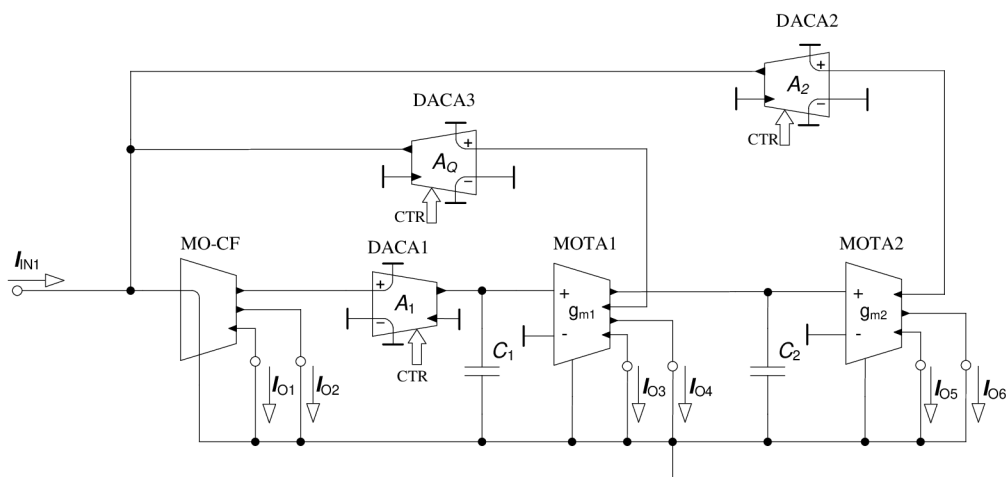
Jedná se o zapojení, které bylo navrženo jako alternativa k zapojení obvodu z návrhu v kapitole 4.4. Jde rovněž o zapojení, které umožňuje měnit mezní kmitočet a činitel jakosti pomocí tří prvků DACA. Rozdílem mezi těmito dvěma obvody je jiné umístění prvku DACA. Toho si lze všimnout na Obr. 4.24 v navrženém M-C grafu signálových toků. Filtrem je rovněž možno realizovat DP, HP, PP, PZ a FČ. Charakteristická rovnice tohoto zapojení má tvar

$$CE = p^2 C_1 C_2 + p C_2 g_{m1} A_Q A_1 + g_{m1} g_{m2} A_1 A_2. \quad (4.39)$$

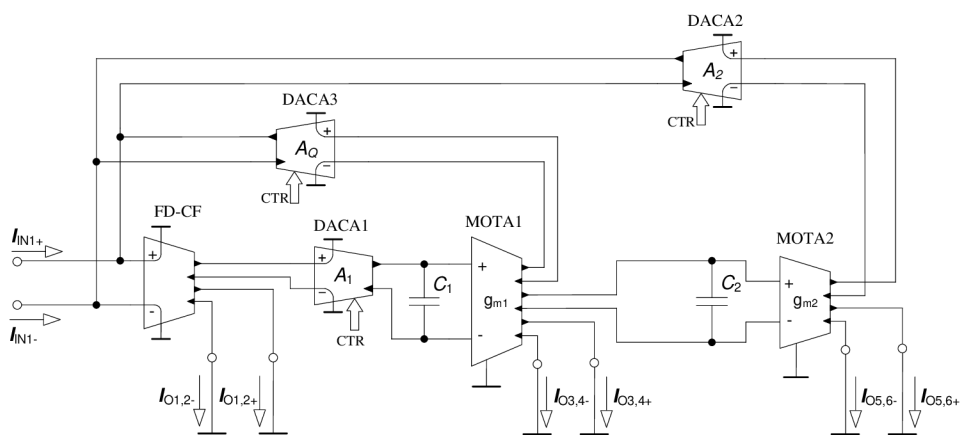


Obr. 4.24: Navržený M-C graf pro změnu mezního kmitočtu a činitele jakosti s prvky MOTA a třemi prvky DACA

Následně bylo z tohoto M-C grafu navrženo nediferenční zapojení s jedním proudovým sledovačem MO-CF, třemi prvky DACA a dvěma prvky MOTA. Obr. 4.25. Z nediferenčního zapojení bylo odvozeno diferenční pomocí zrcadlení pasivních součástí. Obr. 4.26



Obr. 4.25: Nediferenční zapojení s možností změny mezního kmitočtu a činitele jakosti s prvky MOTA a třemi DACA



Obr. 4.26: Diferenční zapojení s možností změny mezního kmitočtu a činitele jakosti s prvky MOTA a třemi DACA

Přenosové funkce nediferenčního obvodu pro změnu mezního kmitočtu a činitele jakosti jsou vyjádřeny v následujících rovnicích. Zde si můžeme všimnout rozdílné přenosové charakteristiky DP oproti filtru z kapitoly 4.4.

$$K_{DP} = \frac{I_{O6}}{I_{IN1}} = \frac{-I_{O5}}{I_{IN1}} = \frac{g_{m1}g_{m2}A_1}{CE} \quad (4.40)$$

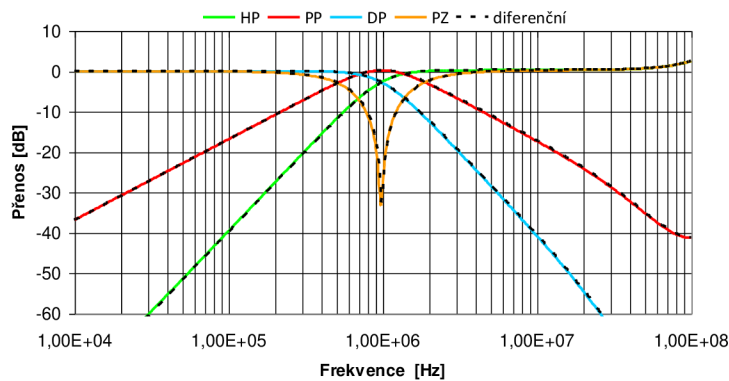
$$K_{PP} = \frac{I_{O4}}{I_{IN1}} = \frac{-I_{O3}}{I_{IN1}} = \frac{pC_2g_{m1}A_1}{CE} \quad (4.41)$$

$$K_{HP} = \frac{I_{O2}}{I_{IN1}} = \frac{-I_{O1}}{I_{IN1}} = \frac{p^2C_1C_2A_2}{CE} \quad (4.42)$$

$$K_{PZ} = \frac{I_{O6} + I_{O2}}{I_{IN1}} = -\frac{I_{O5} + I_{O1}}{I_{IN1}} = \frac{g_{m1}g_{m2}A_1 + p^2C_1C_2A_2}{CE} \quad (4.43)$$

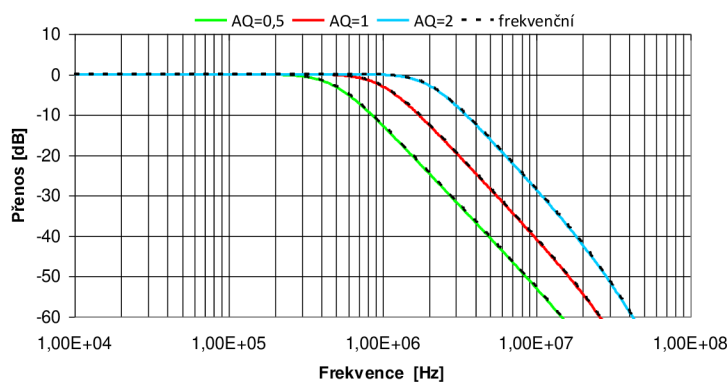
V numerickém návrhu byly stanoveny hodnoty stejné jako v předchozí kapitole, protože se jejich vztahy pro výpočet nijak neliší. Tyto vztahy jsou uvedeny v (4.35) až (4.38). Hodnoty tedy jsou  $f_0 = 1$  MHz,  $Q = 0,707$ ,  $A_Q = 1$ ,  $A = 1$ , přičemž platí, že  $A_1 = A_2 = A$ ,  $g_{m1} = g_{m2} = g_m = 1,961$  mS a dopočítané kondenzátory o hodnotách  $C_1 = 220$  pF a  $C_2 = 440$  pF hodnoty krokování prvků DACA pro změnu kmitočtu jsou  $A = [0,5; 1; 2]$ . Hodnoty krokování pro změnu činitele jakosti byly nastaveny na  $A_Q = [0,25; 0,5; 1]$ , kde pro diferenční zapojení jsou tyto hodnoty poloviční. Hodnoty pasivních součástek zůstávají při krokování stejné.

Při srovnání všech grafů, tedy grafu znázorňující charakteristiky DP, PP, HP a PZ z Obr. 4.27, grafu DP se změnou mezní frekvence (Obr. 4.28), grafu se změnou činitele jakosti (Obr. 4.29) a výsledků z předchozí kapitoly tak můžeme usoudit, že jsou si obvody značně podobné a vykazují podobné parametry.



Obr. 4.27: Výsledky simulací (DP, PP, HP, PZ) navrženého filtru ze schematu na Obr. 4.25 a Obr. 4.26

Hodnoty v této modulové kmitočtové charakteristice z Obr. 4.27 byly nastaveny pro činitel jakosti  $Q = 0,707$  a mezní kmitočet 1 MHz. Výsledné charakteristiky se chovají podle očekávání, kdy jeho selektivní vlastnosti vykazují pro jak levou, tak i pravou stranu pokles  $-20$  dB na dekádu. Mezní frekvence se pohybuje okolo 1 MHz s tím, že diferenční zapojení je lehce nad touto hranicí.



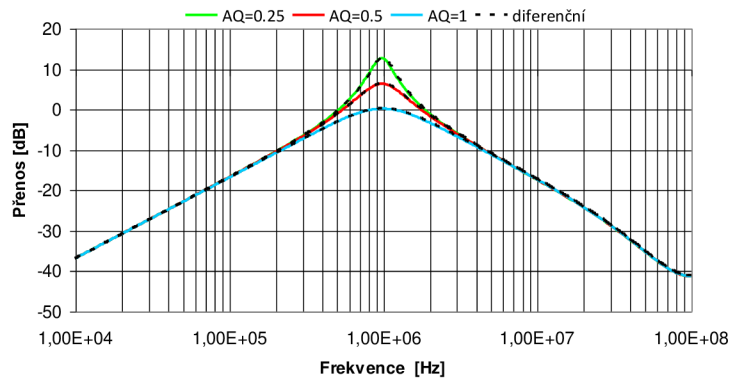
Obr. 4.28: Charakteristika DP pro všechny krokované mezní kmitočty navrženého filtru ze schematu na Obr. 4.25 a Obr. 4.26

Na Obr. 4.28 máme zobrazenou modulovou charakteristiku pro změnu mezního kmitočtu za pomoci dvou prvků DACA. Zesílení bylo krokováno na hodnoty  $A = [0,5; 1; 2]$ . Porovnání mezních kmitočtů těchto zapojení je v Tab. 4.6. Z grafu je také patrná zhoršující se selektivita při vyšších kmitočtových úrovních nad 10 MHz.

Tab. 4.6: Závislost mezního kmitočtu zesílení prvku DACA z grafu Obr. 4.28

|        | Nedif. zapojení      | Dif. zapojení        | Vypočtené   |
|--------|----------------------|----------------------|-------------|
| $A[-]$ | $f_0$ [kHz] simulace | $f_0$ [kHz] simulace | $f_0$ [kHz] |
| 0.5    | 496                  | 490                  | 500         |
| 1      | 1000                 | 1018                 | 1000        |
| 2      | 2050                 | 2090                 | 2000        |

Graf s charakteristikami změn činitele jakosti je na Obr. 4.29. Je z něj patrná klesající tendence průběhu činitele jakosti  $Q$  s rostoucím koeficientem  $A_Q$ . Hodnoty krokování zesílení prvku DACA byly stanoveny  $A_Q = [0,25; 0,5; 1]$ . I v tomto grafu se změnou činitele jakosti si můžeme všimnout lehký pokles mezní frekvence při snižování činitele jakosti.

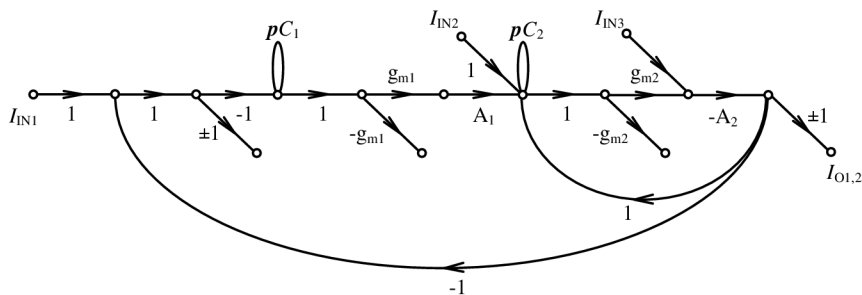


Obr. 4.29: Charakteristika PP pro všechny krokované změny činitele jakosti navrženého filtru ze schematu na Obr. 4.25 a Obr. 4.26

## 4.6 Multifunkční kmitočtový filtr s prvky BOTA a dvěma proudovými zesilovači DACA

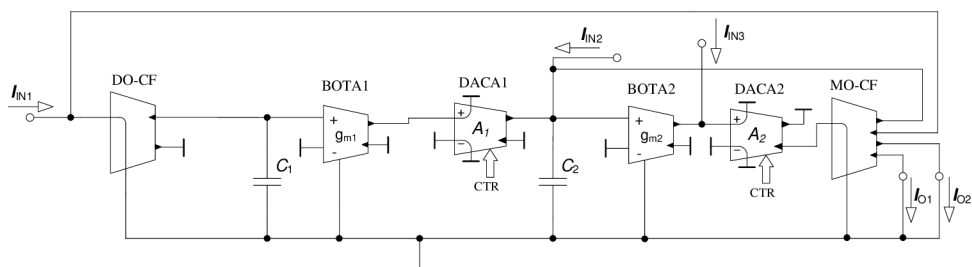
Jedná se o kmitočtový filtr s prvky BOTA, který realizuje funkce typu DP, HP a PP. Další jeho vlastností je možnost změny mezního kmitočtu za pomoci dvou DACA zesilovačů. Tento filtr se vyznačuje třemi vstupy a jedním výstupem. M-C graf je prezentován na Obr. 4.30 a jeho přenosová funkce je

$$CE = p^2 C_1 C_2 + p C_1 g_{m2} A_2 + g_{m1} g_{m2} A_1 A_2. \quad (4.44)$$



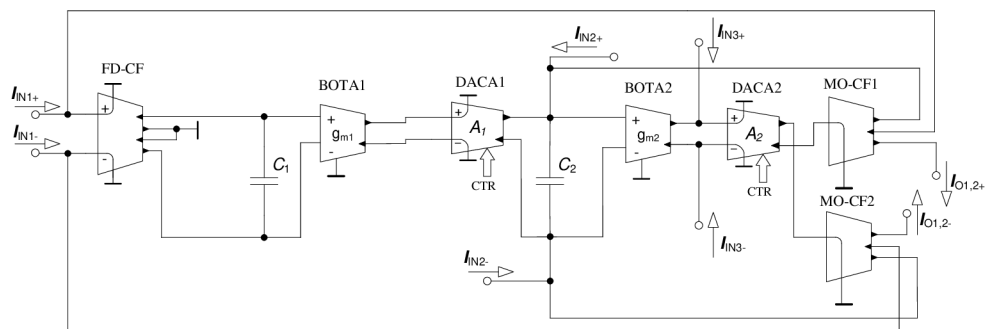
Obr. 4.30: Navržený M-C graf pro změnu mezního kmitočtu s prvky BOTA a dvěma DACA

Z tohoto M-C grafu bylo realizováno nediferenční zapojení kmitočtového filtru (Obr. 4.31), kde si lze všimnout dvou prvků DACA pro možné nastavení zesílení pro změnu mezní frekvence, dvou prvky BOTA a dvou proudových sledovačů, přičemž jeden pouze dvouvýstupový (DO-CF). V obvodu jsou znázorněny tři vstupy a jeden výstup. Z toho plyne, že tento filtr umožňuje realizovat pouze jednu filtrační propust (DP, HP a PP), podle toho na který vstup se přivede vstupní signál.



Obr. 4.31: Nediferenční zapojení pro změnu mezního kmitočtu s prvky BOTA a dvěma proudovými zesilovači DACA

I toto poslední zapojení bylo převedeno do diferenční podoby pomocí zrcadlení. Diferenční zapojení na Obr. 4.32



Obr. 4.32: Diferenční zapojení pro změnu mezního kmitočtu s prvky BOTA a dvěma proudovými zesilovači DACA

Přenosové funkce nediferenčního obvodu pro změnu mezního kmitočtu jsou vyjádřeny v následujících rovnicích:

$$K_{DP} = \frac{I_{O2}}{I_{IN1}} = \frac{-I_{O1}}{I_{IN1}} = \frac{g_{m1}g_{m2}A_1A_2}{CE} \quad (4.45)$$

$$K_{PP} = \frac{I_{O2}}{I_{IN2}} = \frac{-I_{O1}}{I_{IN2}} = \frac{pC_1g_{m2}A_2}{CE} \quad (4.46)$$

$$K_{HP} = \frac{I_{O2}}{I_{IN3}} = \frac{-I_{O1}}{I_{IN3}} = \frac{p^2C_1C_2}{CE} \quad (4.47)$$

Pro numerický návrh byly stanoveny tyto počáteční podmínky:  $f_0 = 1$  MHz,  $Q = 0,707$ ,  $A = 1$ , přičemž platí, že  $A_1 = A_2 = A$ . Hodnoty krokování prvků DACA pro změnu kmitočtu jsou  $A = [0,5; 1; 2]$ , kde pro diferenční zapojení jsou tyto hodnoty poloviční. Hodnoty pasivních součástek zůstávají při krokování stejné. Nakonec je nutno zvolit hodnoty transkonduktancí  $g_{m1} = g_{m2} = g_m = 1,961$  mS a následně dopočítat hodnoty kapacitorů ze vztahů:

$$C_1 = \frac{g_m A}{2\pi f Q} = 441,4 \text{ pF} \quad (4.48)$$

$$C_2 = Q^2 C_1 = 220,6 \text{ pF} \quad (4.49)$$

Kdy se vycházelo se z rovnic:

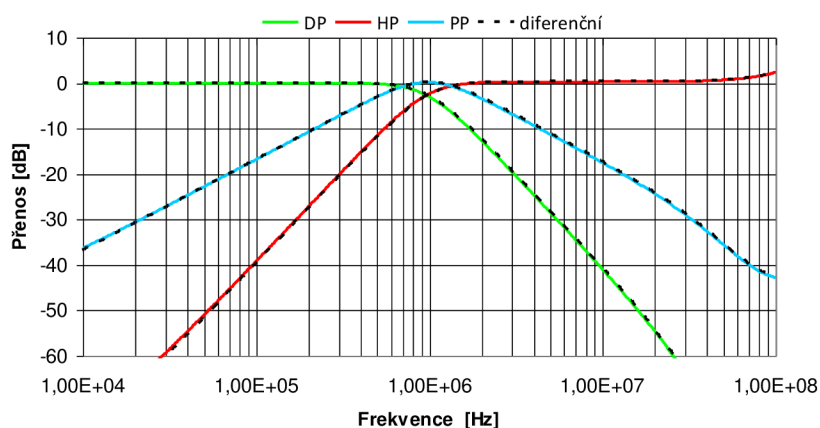
$$f_0 = \frac{A}{2\pi} \sqrt{\frac{g_{m1}g_{m2}}{C_1C_2}} \text{ [Hz]} \quad (4.50)$$

$$Q = \sqrt{\frac{C_2g_{m1}}{C_1g_{m2}}} \text{ [-]} \quad (4.51)$$

Hodnoty vypočítaných součástek byly pro simulace zvoleny a nahrazeny  $C_1 = 440$  pF a  $C_2 = 220$  pF.

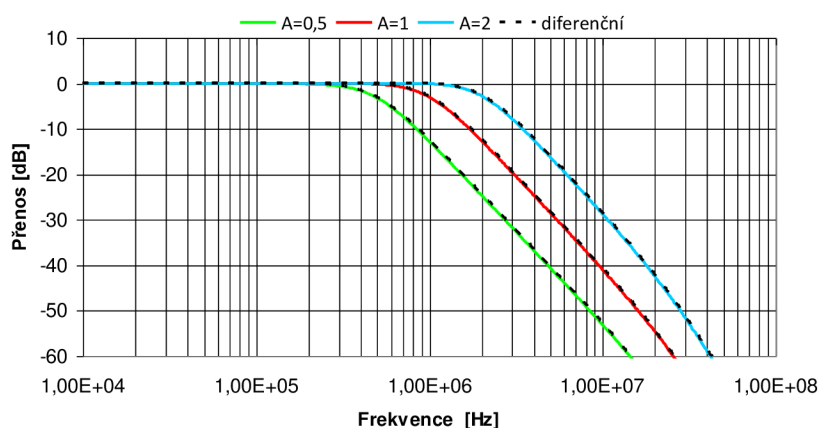
Hodnoty modulové kmitočtové charakteristiky z Obr. 4.33 byly nastaveny pro činitel jakosti  $Q = 0,707$  a mezní kmitočet 1 MHz. Výsledné charakteristiky vykazují očekávané chování. Selektivní vlastnosti jak pro levou, tak i pravou stranu mají předpokládaný pokles -20 dB na dekádu. Mezní frekvence se taktéž pohybuje okolo 1 MHz. Při srovnání diferenčního a nediferenčního zapojení se ukazují jen nepatrné odlišnosti.





Obr. 4.33: Výsledky simulací (DP, PP, HP) navrženého filtru ze schematu na Obr. 4.31 a Obr. 4.32

Stejně jako u všech ostatních zapojení s možností posuvu frekvence si i tady ukážeme jejich naměřené charakteristiky (Obr. 4.34). Zesílení prvku DACA bylo krokováno na hodnoty  $A = [0,5; 1; 2]$ , pro diferenční zapojení to byly poloviční hodnoty. Výsledné charakteristiky se chovají podle očekávání, pouze na vysokých kmitočtech nad 10 MHz už nedosahují požadovaného útlumu. Tak jako u všech předchozích navržených filtrů se mezní kmitočet krokovaného zesílení pohyboval okolo předpokládaných teoretických hodnot.

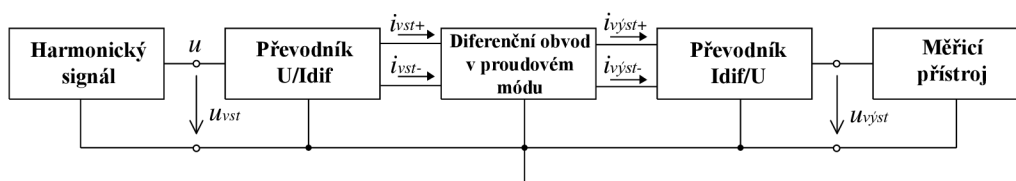


Obr. 4.34: Charakteristika DP pro všechny krokované mezní kmitočty navrženého filtru ze schematu na Obr. 4.31 a Obr. 4.32

## 5 PRAKTICKÁ REALIZACE

Pro praktickou realizaci byly vybrány dvě varianty kmitočtových filtrů. První varianta, také popsána v kapitole 4.1, se skládá z proudových sledovačů MO-CF a prvků DACA pro možnost změny mezního kmitočtu. Druhá varianta multifunkčního kmitočtového filtru pak obsahuje jeden proudový sledovač a dva prvky MOTA. Tento filtr, jenž je popsán v kapitole 4.3 umožňuje změnu mezního kmitočtu pomocí transkonduktance a změnu činitele jakosti pomocí prvku DACA. Obě tyto varianty umožňují filtrační funkce typu DP, HP, PP, PZ, FČ a byly realizovány jak v nediferenční, tak i v diferenční podobě. Jedná se tedy o čtyři desky plošných spojů, které byly navrženy v programu EAGLE verze 6.5.0 (viz. přílohy). Jako vstupy a výstupy těchto desek byly použity konektory BNC pro snadné připojování do měřicí soustavy. Pasivní součástky byly vybírány z odporové řady E24, díky čemuž došlo ke změně hodnot u některých navržených součástek oproti simulacím. Pouzdro pasivních součástek bylo zvoleno o velikosti R1206.

Samotná měření probíhala za pomoci obvodového analyzátoru Agilent 4395A, který obstarával jak zdroj harmonického signálu na vstupu, tak samotný měřicí přístroj na výstupu. Měření probíhala od hodnoty 10 kHz do 500 MHz s šířkou pásma 300 Hz. Do této měřicí soustavy bylo nutné ještě přidat převodníky napětí na proud, či diferenční proud a zpětně pak proudu, či diferenčního proudu na napětí. Názorná ukázka měřicí soustavy pro měření diferenčního obvodu pracujícího v proudovém módu je vyobrazena na Obr. 5.1.

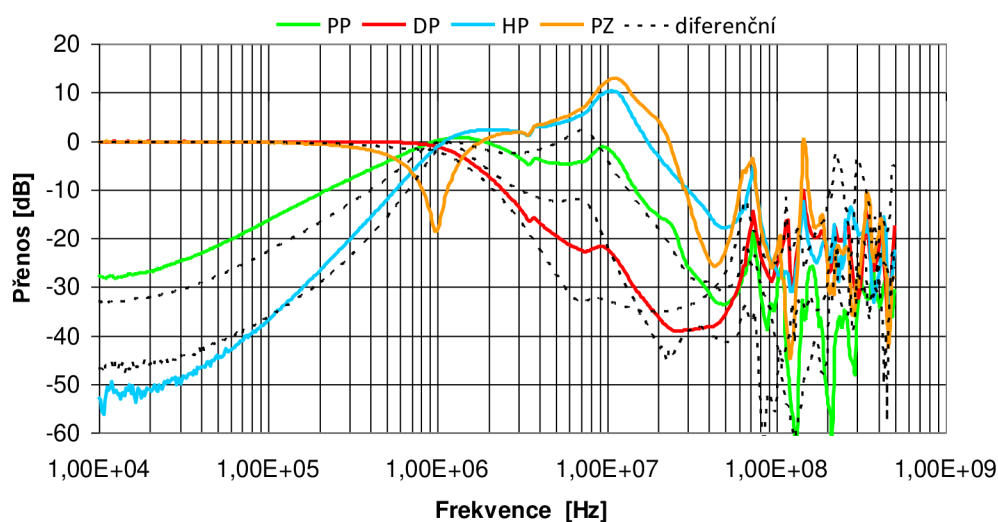


Obr. 5.1: Blokové schéma měření proudových symetrických obvodů

## 5.1 Realizace filtru pro řízení mezního kmitočtu

Jedná se o návrh kmitočtového filtru z kapitoly 4.1. Tento návrh se vyznačuje možností řízení mezního kmitočtu, který je nastaven při zesílení jedna na hodnotu 1 MHz. Filtr je sestaven ze dvou, či čtyřech v případě diferenčního zapojení, proudových sledovačů MO-CF a dvou prvků DACA pro změnu mezního kmitočtu. Prvky DACA byly realizovány externími deskami plošných spojů dostupnými na ústavě telekomunikací a jelikož prvek MO-CF není dostupný v integrované podobě, tak byl použit jeho ekvivalent v podobě univerzálního proudového konveje UCC, jak bylo naznačeno na Obr. 2.2. V diferenčním zapojení bylo na místo elektrolityckých kondenzátorů použito dvou keramických kondenzátorů o dvojnásobné hodnotě, jenž byly vztaženy k zemi.

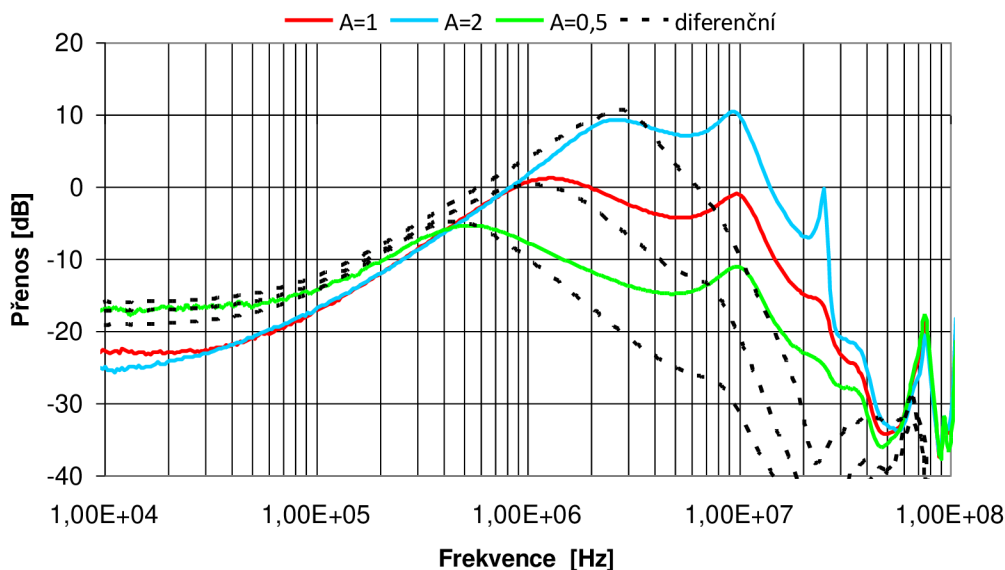
Na Obr. 5.2 je graf s výslednými funkcemi (DP, HP, PP a PZ) experimentálního měření, kde můžeme srovnat nediferenční (barevně označené funkce) a diferenční (čárkované funkce) zapojení navrženého kmitočtového filtru. Zde si lze všimnout poměrně velkých odlišností obou zapojení, jelikož s diferenční deskou nastali při měření problémy a nepodařilo se těmto problémům předejít i přes výměnu součástek a důkladného prozkoumání samotné desky plošného spoje. Přesto se však podařilo dosáhnout porovnatelných výsledků. Avšak funkci pásmové zadržky se nepodařilo odměřit vůbec, proto v porovnání chybí.



Obr. 5.2: Výsledky měření (DP, PP, HP a PZ) navrženého filtru z kapitoly 4.1

Z grafu lze dále vyčíst zhoršená selektivita pásmové propusti oproti ideální charakteristice, kdy by měla mít pokles -20 dB na dekádu, avšak nediferenční zapojení dosahuje přibližně -16 dB a diferenční -19 dB, což ale zkresluje nelinearita průběhu. Útlum při hodnotě 10 kHz dosahuje -28 dB pro nediferenční zapojení a diferenční -33 dB. Zde se jeví jako lepší dosažené hodnoty diferenčního zapojení i přes již zmíněné potíže. Z ideálního průběhu by tato hodnota měla dosahovat -37 dB. Útlum pásmové zadržky dosahuje jen něco málo přes -18 dB, což je vzhledem k ideálu, který dosahuje hodnoty přibližně -37 dB, skoro o polovinu méně. Z dosažených průběhů si lze taktéž povšimnout vlivu převodníků, které pracují maximálně do hodnot 30 MHz, proto se průběhy nad tuto hodnotu už nedají brát v potaz. Zde jsou výsledky použitelné k hranici přibližně 3 MHz pro nediferenční zapojení a 6 MHz diferenčního zapojení. I zde tak je ověřena vhodnější použitelnost diferenčního zapojení.

Z dalšího grafu na Obr. 5.3 můžeme vypočítat změnu mezní frekvence ovlivněnou krokováním koeficientů prvku DACA o hodnoty  $A = [0,5; 1; 2]$  pro nediferenční zapojení a poloviční tyto hodnoty v případě diferenčního zapojení. Na grafu je znázorněná funkce typu pásmové propusti. Posun úrovně hladiny přenosu je ovlivněn jedním z prvků DACA přes který je odebíraný výsledný signál. Zde se již ukazuje nediferenční zapojení jako lépe fungující s lepší selektivitou signálu.



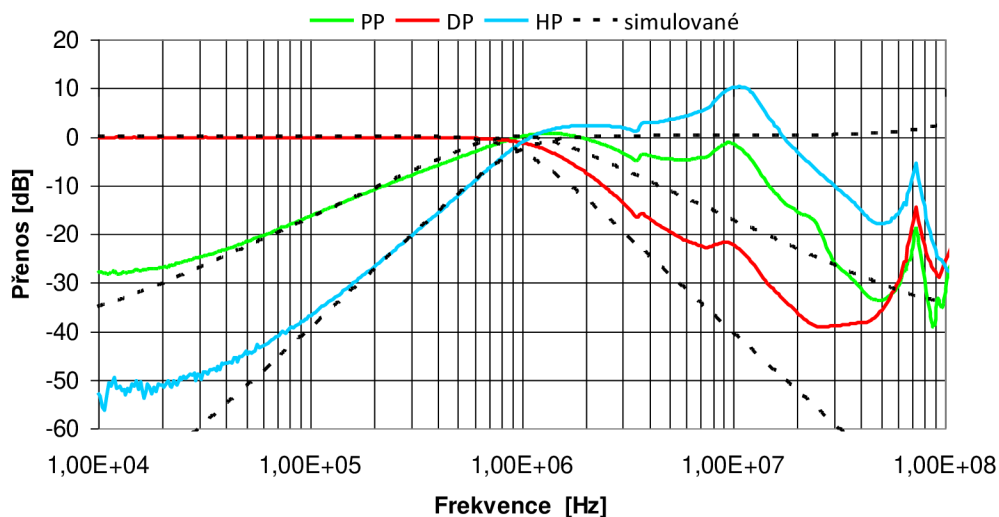
Obr. 5.3: Výsledky měření změny kmitočtu PP navrženého filtru z kapitoly 4.1

Srovnání naměřeného a vypočítaného mezního kmitočtu podle reálně použitých součástek dle (4.8) se nachází v Tab. 5.1. Z tabulky lze posoudit, to jak se mezní kmitočty naměřené z výsledků reálných měření jen nepatrně odchyľuje od teoreticky vypočtených hodnot. Tyto hodnoty se velice odchyľují až na vyšších frekvencích, kdy dochází ke zkreslení zapříčiněné pracovními frekvencemi převodníků.

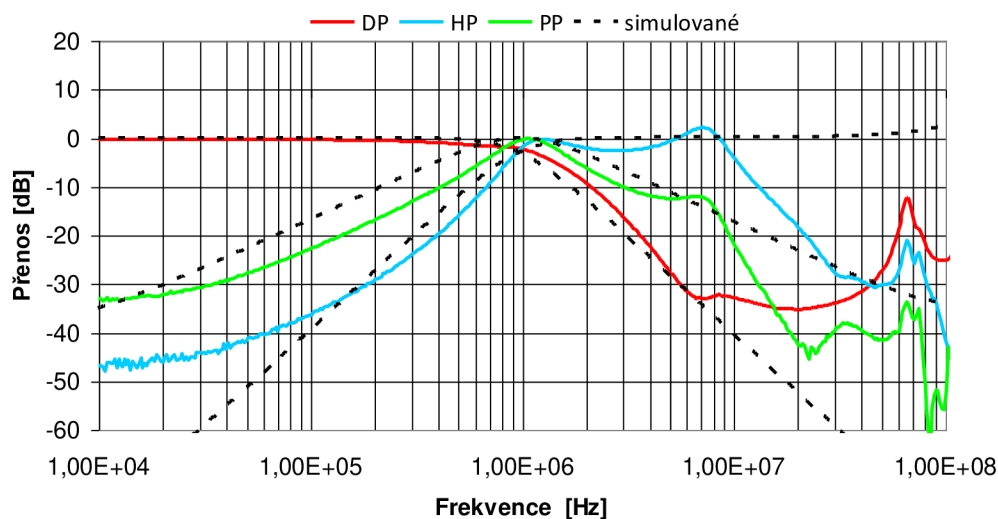
Tab. 5.1: Tabulka závislosti mezního kmitočtu na zesílení A z grafu na Obr. 5.3

|       | Změřené Nedif. | Vypočtené Nedif. | Změřené Dif. | Vypočtené Dif. |
|-------|----------------|------------------|--------------|----------------|
| A [-] | $f_0$ [kHz]    | $f_0$ [kHz]      | $f_0$ [kHz]  | $f_0$ [kHz]    |
| 0.5   | 530            | 507              | 465          | 502            |
| 1     | 1335           | 1013             | 1080         | 1003           |
| 2     | 2580           | 2026             | 2739         | 2006           |

Grafy na Obr. 5.4 a Obr. 5.5 porovnávají výsledky měřených charakteristik dolní propusti, horní propusti a pásmové propusti s výsledky simulovaných charakteristik. Zde jsou vidět drobné odlišnosti, kde se liší v selektivitě, přesnosti nastavení mezního kmitočtu a maximální šířky pásma, která není ovlivněna reálnými převodníky napětí na proud a proud na napětí.



Obr. 5.4: Porovnání reálných výsledků s výsledky simulací pro nediferenční filtr z kapitoly 4.1



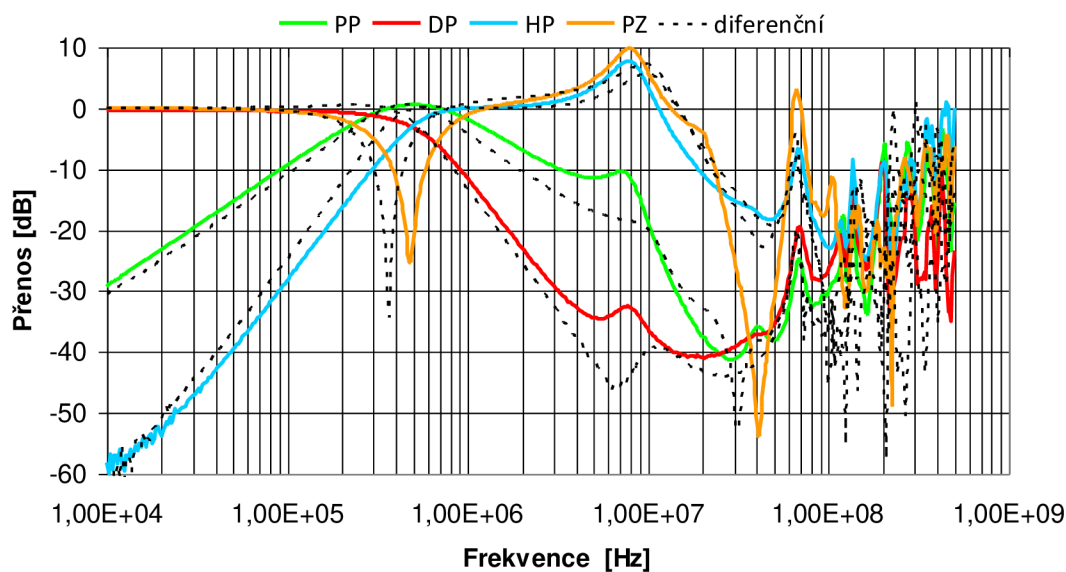
Obr. 5.5: Porovnání reálných výsledků s výsledky simulací pro diferenční filtr z kapitoly 4.1

## 5.2 Realizace multifunkčního kmitočtového filtru s prvky MOTA

Tato realizace vychází z návrhu v kapitole 4.3. Jedná se o návrh umožňující změnu kmitočtu pomocí změny transkonduktance prvků MOTA a také o návrh, který umožňuje změnu činitele jakosti  $Q$  za pomoci prvku DACA. Byly taktéž jako v předchozí kapitole realizovány dvě varianty tohoto návrhu. Nediferenční zapojení (Obr. 4.13) a diferenční zapojení (Obr. 4.14). Filtr umožňuje funkce typu DP, HP, PP, PZ. Tyto funkce jsou reálně odměřeny a vyobrazeny v grafu na Obr. 5.6. Samotný filtr nediferenčního zapojení se pak skládá ze tří univerzálních proudových konvektorů (UCC), které mají za funkci nahradit prvek MO-CF a také prvky MOTA. Náhradní zapojení prvku MOTA je naznačeno na Obr. 2.5. Prvek DACA byl realizován externí deskou plošného spoje, která představuje právě tento prvek. U diferenčního zapojení je praktický návrh obdobný, kdy prvky MOTA jsou nahrazeny proudovými konvektory UCC, avšak prvek FD-CF je realizován taktéž externí deskou plošného spoje, tak jako v případě prvku DACA.

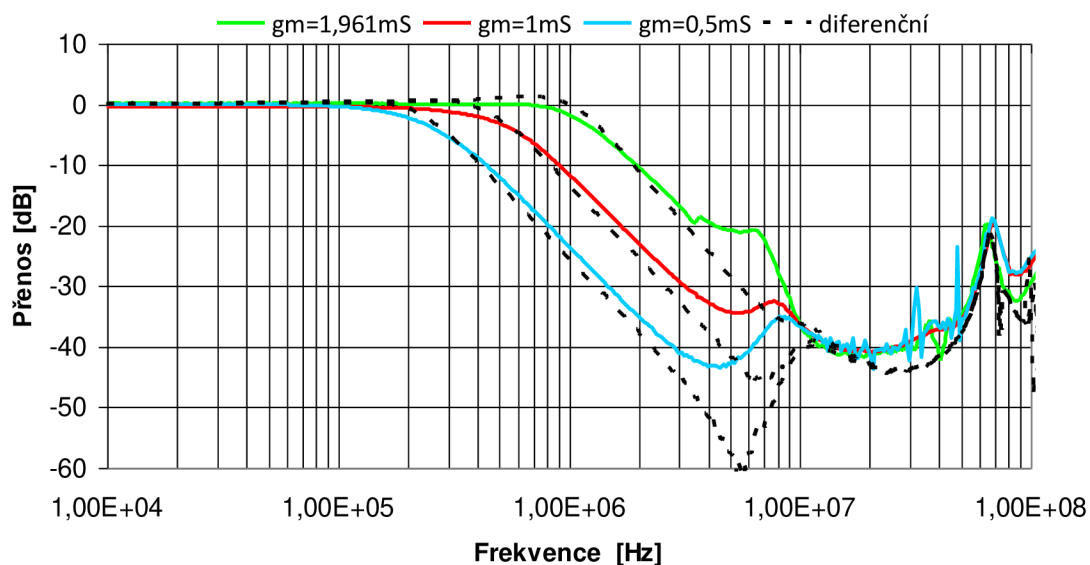
Výsledky měření tohoto filtru jsou zobrazeny v několika následujících grafech. První z nich na Obr. 5.6 zobrazuje porovnání diferenčního zapojení (čárkovaný průběh) s jeho nediferenčním protějškem (barevný průběh). Filtr je nastaven na hodnoty mezního kmitočtu 500 MHz, což je oproti předchozímu filtru nastaveno z důvodu

lepší čitelnosti výsledných průběhů. Z tohoto grafu lze vyčíst mezní frekvence, která se téměř shoduje s teoreticky nastavenou mezní frekvencí, dle hodnot použitých pasivních součástek, dále pak výborná selektivita pro oba průběhy, tedy diferenčního i nediferenčního zapojení a to -20 dB na dekádu, přičemž má až do hodnoty 20 kHz přímý lineární průběh. Na hodnotě 20 kHz má pak útlum -29 dB a -30 dB pro diferenční zapojení. Tyto hodnoty se takřka shodují se simulovanými, což je porovnáno v dalších grafech na Obr. 5.9 a Obr. 5.10. Hodnoty útlumu pásmové zadržky dosahují -25 dB v případě nediferenčního zapojení a -34 dB pro diferenční variantu, avšak ta je mírně vychýlena mimo mezní frekvenci. Pro srovnání v ideálním návrhu by tato hodnota útlumu pásmové zadržky dosahovala hodnoty přibližně -34 dB. Hodnoty těchto filtračních funkcí jsou použitelné zhruba do frekvencí okolo 5 MHz, pro diferenční zapojení o něco více a hodnoty nad 30 MHz jsou pak již naprosto nepoužitelné a taktéž jako v předchozím návrhu to ovlivňuje maximální pracovní rozsah převodníků napětí na proud a proudu na napětí.



Obr. 5.6: Výsledky měření (DP, PP, HP a PZ) navrženého filtru z kapitoly 4.3

Další graf na Obr. 5.7 zobrazuje změřené charakteristiky dolní propusti pro různé mezní frekvence. Tyto frekvence byly nastavovány pomocí prvků MOTA a to na hodnoty  $g_m = [1,961; 1; 0,5]$  mS. Porovnání teoreticky vypočítaných mezních frekvencí podle skutečně použitých součástek s naměřenými hodnotami jsou přehledně zpracovány v Tab. 5.2.



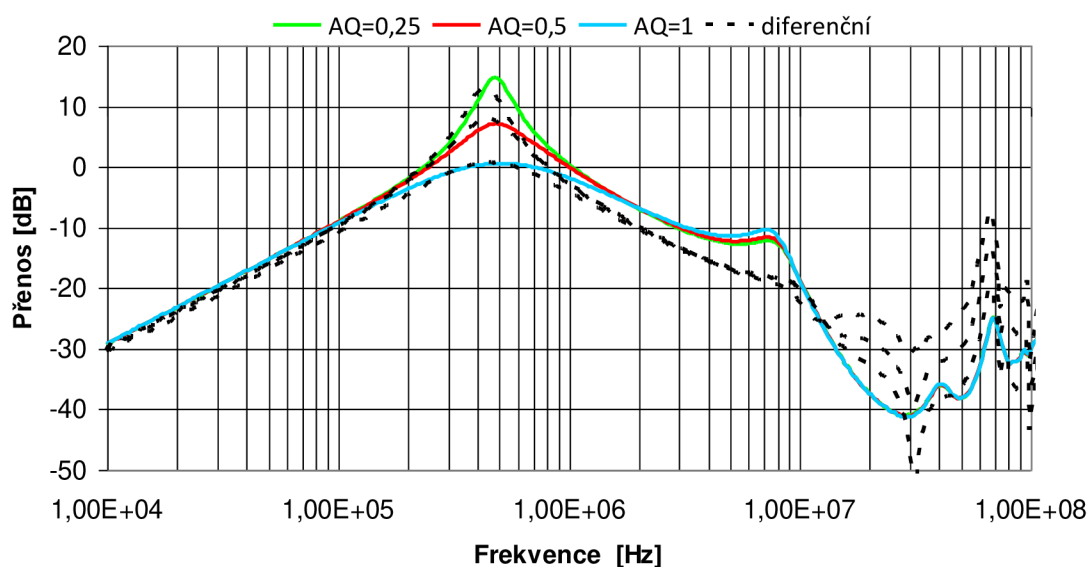
Obr. 5.7: Výsledky měření posuvu mezní frekvence navrženého filtru z kapitoly 4.3

Tab. 5.2: Tabulka naměřeného mezního kmitočtu za změny transkonduktance  $g_m$  z grafu na Obr. 5.7

|            | Změřené Nedif. | Změřené Dif. | Vypočtené   |
|------------|----------------|--------------|-------------|
| $g_m$ [mS] | $f_0$ [kHz]    | $f_0$ [kHz]  | $f_0$ [kHz] |
| 0.5        | 231            | 259          | 226         |
| 1          | 516            | 520          | 512         |
| 1,961      | 1152           | 1274         | 1003        |

Jak již bylo zmíněno v úvodu této kapitoly, tak realizovaný kmitočtový filtr umožňuje i změnu činitele jakosti  $Q$  změnou zesílení prvku DACA. Graf na Obr. 5.8 je výsledkem tohoto měření, s tím, že kroková změna zesílení nabývala hodnot  $A_Q = [0,25; 0,5; 1]$ . Pro diferenční zapojení byly tyto hodnoty poloviční. Ze srovnání těchto výsledků je vidno, že diferenční zapojení je mírně odchýleno od nastavené mezní frekvence, což zřejmě taky zapříčinilo upravování vybraných pasivních součástí z řady E24. Také je vidět odlišný činitel jakosti. Toto srovnání je vyčísleno v tabulce (Tab. 5.3), která porovnává diferenční a nediferenční zapojení s teoretickými hodnotami nastaveného činitele jakosti.



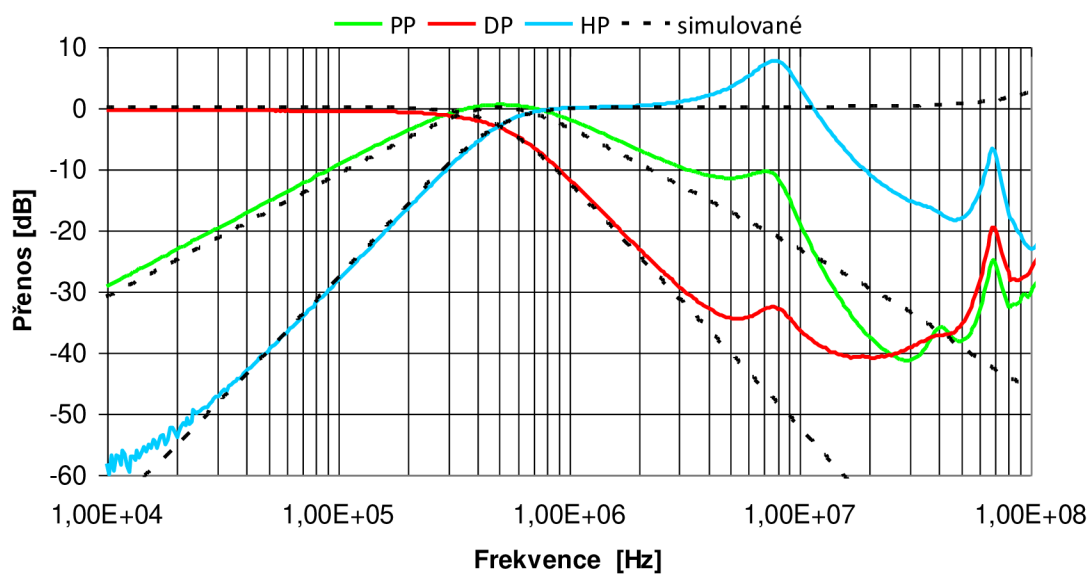


Obr. 5.8: Výsledky měření změny činitele jakosti navrženého filtru z kapitoly 4.3

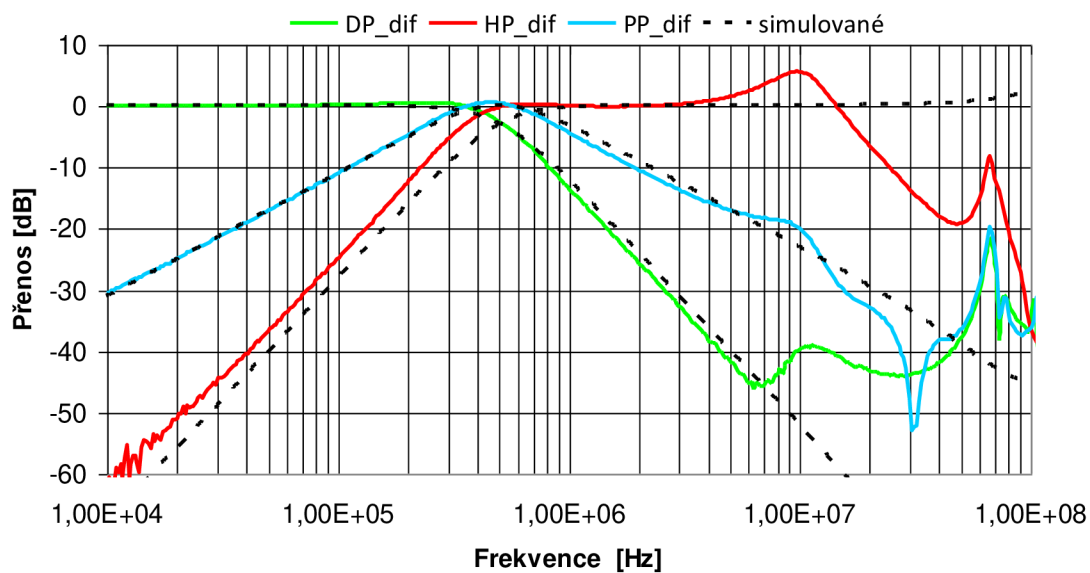
Tab. 5.3: Tabulka naměřeného činitele jakosti v závislosti na změně zesílení DACA z grafu na Obr. 5.8

|       | Změřené Nedif. | Změřené Dif. | Vypočtené |
|-------|----------------|--------------|-----------|
| A [-] | Q [-]          | Q [-]        | Q [-]     |
| 0,25  | 0,144          | 0,145        | 0,177     |
| 0,5   | 0,336          | 0,258        | 0,354     |
| 1     | 0,843          | 0,523        | 0,707     |

Poslední dva grafy (Obr. 5.9 a Obr. 5.10) pak porovnávají naměřené hodnoty filtračních funkcí se simulovanými hodnotami v programu OrCAD. Z těchto grafů se dá vyčíst několik odlišností, zejména pak na vyšších kmitočtech, ale i rozdílné úrovně útlumu, nepřesnosti v nastavení mezní frekvence a rozdílného činitele jakosti.



Obr. 5.9: Porovnání reálných výsledků s výsledky simulací pro nediferenční filtr z kapitoly 4.3



Obr. 5.10: Porovnání reálných výsledků s výsledky simulací pro diferenční filtr z kapitoly 4.3

## 6 ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo prostudovat problematiku návrhu kmitočtových filtrů pracujících v proudovém módu a to především za pomoci metody grafu signálových toků. Na základě těchto znalostí bylo navrženo šest nediferenčních zapojení, které se následně převedly na plně diferenční varianty. V zapojeních byly použity aktivní prvky jako proudové sledovače (MO-CF), transkonduktanční zesilovače a digitálně říditelné proudové zesilovače DACA. Kmitočtové filtry byly navrženy tak aby umožňovali realizaci dolní propusti, horní propusti a pásmové propusti, přičemž zapojení z kapitoly 4.1, 4.3, 4.4 a 4.5 umožňují realizovat i pásmovou zádrž a fázovací článek. Navrhovaná zapojení se taktéž lišila v možnostech změny činitele jakosti, mezního kmitočtu nebo obou těchto variant zároveň.

Po návrhu zjednodušených M-C grafů signálových toků z podmínek námi určené charakteristické rovnice, byly tyto M-C grafy překresleny na elektrotechnická schémata a následně ověřena jejich správnost programem SNAP. Poté byly provedeny simulace programem OrCAD, kde byly porovnávány modulové charakteristiky přenosu signálu od 10 kHz do 100 MHz mezi nediferenčním a diferenčním zapojením navrhovaného kmitočtového filtru. Možnosti změny činitele jakosti nebo změny mezní frekvence byly taktéž ověřovány za pomoci simulací a následně byly vyneseny do grafu modulové charakteristiky. Po srovnání všech výsledků se jevila navrhovaná schémata, jako vhodná pro realizaci, avšak některá z nich nejsou příliš praktická z důvodu jejich nutnosti přepojování vstupních signálu pro dosažení požadované funkce. Ze simulací také vyplývalo, že diferenční varianty měly o trochu lepší charakteristiky útlumu, nežli jejich nediferenční protějšky a to zejména v kapitole 4.2.

Posledním bodem této práce bylo vybrat některé z navržených kmitočtových filtrů pro následnou realizaci a ověření funkčnosti pomocí experimentálních měření. Konkrétně se jednalo o návrhy z kapitol 4.1 a 4.3, přičemž byly zkonstruovány jak v nediferenčních, tak v diferenčních variantách. Výsledky z experimentálních měření diferenčních a nediferenčních variant se příliš nelišily, i tak se diferenční varianty zdají vhodnější, což odpovídá teoretickým předpokladům, a to zejména pro jejich dosažené hodnoty útlumu, které jsou blíže k simulovaným hodnotám a také pro jejich vyšší frekvenční rozsah oproti nediferenčním zapojení. Naměřené výsledky se při porovnávání se simulovanými hodnotami taktéž v mnoha ohledech velmi podobají, ne-li přímo shodují, což potvrzuje správnost návrhu. Lze tak dobře rozeznat jednotlivé funkce, vliv řízení prvků DACA, nebo vliv změny transkonduktance prvků MOTA. Nutno však podotknout, že zrealizovaná diferenční varianta návrhu z kapitoly 4.1 se chovala nevypočitatelně a to i přes veškerou snahu na zjištění a nápravu této příčiny. Přesto se však podařilo dosáhnout srovnatelných výsledků.

## LITERATURA

- [1] HAJEK, Karel; SEDLAČEK, Jiří. *Kmitočtové filtry*. 1. vydání. Praha : Technická literatura BEN, 2002. 536 s. ISBN 80-7300-023-7.
- [2] DOSTÁL, Tomáš. *Elektrické filtry: skripta*. První vydání. Brno: FEI VUT v Brně., 2004. 136 s. ISBN 80-214-2561-X.
- [3] JEŘÁBEK, J. *Dual wide-bandwidth digitally adjustable current amplifier (DACA)*. Brno University of Technology, ON Semiconductor, Czech Republic, 2010. Dostupné z WWW: <<http://www.utko.feec.vutbr.cz/jerabekj/daca.pdf>>.
- [4] KOTON, J. *Universal current conveyor (UCC) and second-generation current conveyor (CCII+/-)*. Brno University of Technology, ON Semiconductor, Czech Republic, 2010. Dostupné z WWW: <<http://www.utko.feec.vutbr.cz/koton>>.
- [5] DOSTÁL, T. *Teorie obvodů*. [online]. Brno : FEKT, VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ , 21. 8. 2006 [cit. 2013-11-20]. Dostupné z WWW: <[www.vutbr.cz](http://www.vutbr.cz)>.
- [6] JEŘÁBEK, J.; VRBA, K. *Diferenční převodníky  $U/I$  a  $I/U$  pro měření obvodů v proudovém módu*. Elektrovue - Internetový časopis (<http://www.elektrovue.cz>), 2011, roč. 2011, č. 40, s. 1-5. ISSN: 1213-1539 [cit. 2013-11-20].
- [7] KUBÁNEK, D. *Teoretický návrh ADSL Splitterů. Studijní zpráva pro STROM telecom*. Ústav telekomunikací, FEKT, VUT v Brně, 2003. 119 pages.
- [8] DOSTÁL, J. *Operační zesilovače*. 1. vyd. Praha: BEN, 2005, 504 s. ISBN 80-730-0049-0.
- [9] JEŘÁBEK, Jan; ŠOTNER, Roman; VRBA, Kamil. *Univerzální filtr s proudovými sledovači a transkonduktančními zesilovači*. Elektrovue - Internetový časopis (<http://www.elektrovue.cz>), 2010, roč. 2010, č. 3, s. 1-4. ISSN: 1213-1539 [cit. 2013-11-20].
- [10] BEČVÁŘ D., VRBA K. *Univerzální proudový konvektor*. Elektrovue - Internetový časopis (<http://www.elektrovue.cz>), 2000, roč. 2000, č. 7, s. 1-1. [cit. 2013-11-20].

- [11] JEŘÁBEK, J.; VRBA, K. *Říditelný univerzální filtr s vícevýstupovými proudovými sledovači*. Elektrovue - Internetový časopis (<http://www.elektrovue.cz>), 2008, roč. 2008, č. 3, s. 1-10. ISSN: 1213-1539 [cit. 2013-11-20].
- [12] JEŘÁBEK, J., VRBA, K. *Current-mode tunable and adjustable filter with digitally adjustable current amplifier and transconductance amplifiers*. In Proceedings of the European Conference of Circuits Technology and Devices, ECCTD'10, Puerto de la Cruz, Španělsko, 2010, p. 101-104.
- [13] KOTON, J.; HERENCŠÁR, N.; JEŘÁBEK, J.; VRBA, K. *Fully Differential Current- Mode Band-Pass Filter: Two Design Solutions*. 33rd International Conference on Telecommunications and Signal Processing - TSP 2010, p. 1-4, 2010.
- [14] KOTON, J.; VRBA, K. *Zobecněné metody návrhu kmitočtových filtrů*. Elektrovue - Internetový časopis (<http://www.elektrovue.cz>), 2008, roč. 2008, č. 26, s. 1-17. ISSN: 1213-1539 [cit. 2013-11-20].
- [15] KOTON, J.; VRBA, K. *Návrh kmitočtových filtrů pomocí autonomního obvodu s úplnou sítí admitancí (Frequency Filter Design Using Autonomous Circuits with Full-Admittance Network)*. Elektrovue - Internetový časopis (<http://www.elektrovue.cz>), 2005, No. 33, ISSN 1213-1539 [cit. 2013-11-20].
- [16] BRUTON, L. T. *RC Active Circuits - Theory and Design*, New Jersey, Prentice - Hall 1980, ISBN 0-1375-3467-1 [cit. 2013-11-20].
- [17] ROBERTS, G. W., SEDRA, A. S. *Current-mode Frequency Selective Filters*, Electronics Letters, 1989, Vol. 25, No. 12, pp. 759-760 [cit. 2013-11-20].
- [18] CHEN, W.-K. *The Circuits and Filters Handbook*, New York, CRC Press, 2003, 2. vydání, ISBN 0-8493-0912-3 [cit. 2013-11-20].
- [19] BIOLEK, D. *elektronické obvody aneb kniha o jejich analýze*, Praha: BEN Technická literatura, 2004. s. 1-520. ISBN:80-7300-125-X [cit. 2013-11-20].
- [20] *OrCAD* In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2012-05-28]. Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/OrCAD>
- [21] JERABEK, J.; VRBA, K. *Návrh přeladitelného kmitočtového filtru s proudovými aktivními prvky za pomoci metody grafu signálových toků*. Elektrovue - Internetový časopis (<http://www.elektrovue.cz>), 2009, roč. 2009, č. 42, s. 1-7. ISSN: 1213-1539.

## SEZNAM POUŽITÝCH VELIČIN, SYMBOLŮ A ZKRATEK

|                                     |   |
|-------------------------------------|---|
| A                                   | Zesílení prvku DACA   |
| C                                   | Elektrická kapacita   |
| f                                   | Kmitočet  |
| $f_0$                               | Mezní kmitočet  |
| I                                   | Elektrický proud  |
| $I_{IN}$                            | Vstupní proud   |
| $I_{OUT}$                           | Výstupní proud  |
| K                                   | Přenos  |
| R                                   | Elektrický odpor  |
| D                                   | Jmenovatel přenosové funkce či elementární dvojpól typu D   |
| DP                                  | Paralelní syntetický prvek typu D                           |
| E                                   | Elementární dvojpól typu E                                  |
| N                                   | Řád syntetického prvku                                      |
| $g_m$                               | Transkonduktance  |
| G                                   | Vodivost  |
| i                                   | Bránový proud aktivního prvku                               |
| Q                                   | Činitel jakosti   |
| R                                   | Rezistor  |
| $Y_{1+}, Y_{2-}, Y_{3+}$            | Vstupní napěťové brány konvejeoru UCC                       |
| $X, Z_{1+}, Z_{1-}, Z_{2+}, Z_{2-}$ | Vstupní či výstupní proudové brány konvejeoru UCC           |
| $\omega = 2\pi f$                   | Úhlový kmitočet   |
| $\Delta$                            | Determinant   |
| DP                                  | Dolní propust   |
| HP                                  | Horní propust   |
| PP                                  | Pásmová propust   |
| PZ                                  | Pásmová zádrž   |
| FČ                                  | Fázovací článek   |
| UCC                                 | Univerzální proudový konvejeor (Universal Current Conveyor) |
| p                                   | Laplaceův operand   |

|       |   |
|-------|---|
| MO-CF | Více-výstupový proudový sledovač (Multiple-Output Current Follower)           |
| DACA  | Digitálně řízený proudový zesilovač (Digitally Adjustable Current Amplifier)  |
| OTA   | Operační transkonduktanční zesilovač (Operational Transconductance Amplifier) |
| CFA   | Operační zesilovač s proudovou zpětnou vazbou (Current Feedback Amplifier)    |
| OZ    | Operační zesilovač  |
| CE    | Charakteristická rovnice  |
| SNAP  | Program pro symbolickou analýzu obvodů (Symbolic Network Analysis Program)    |
| OrCAD | Program pro analýzu elektronických obvodů                                     |
| M-C   | Masonovy-Coatesovy grafy signálových toků                                     |

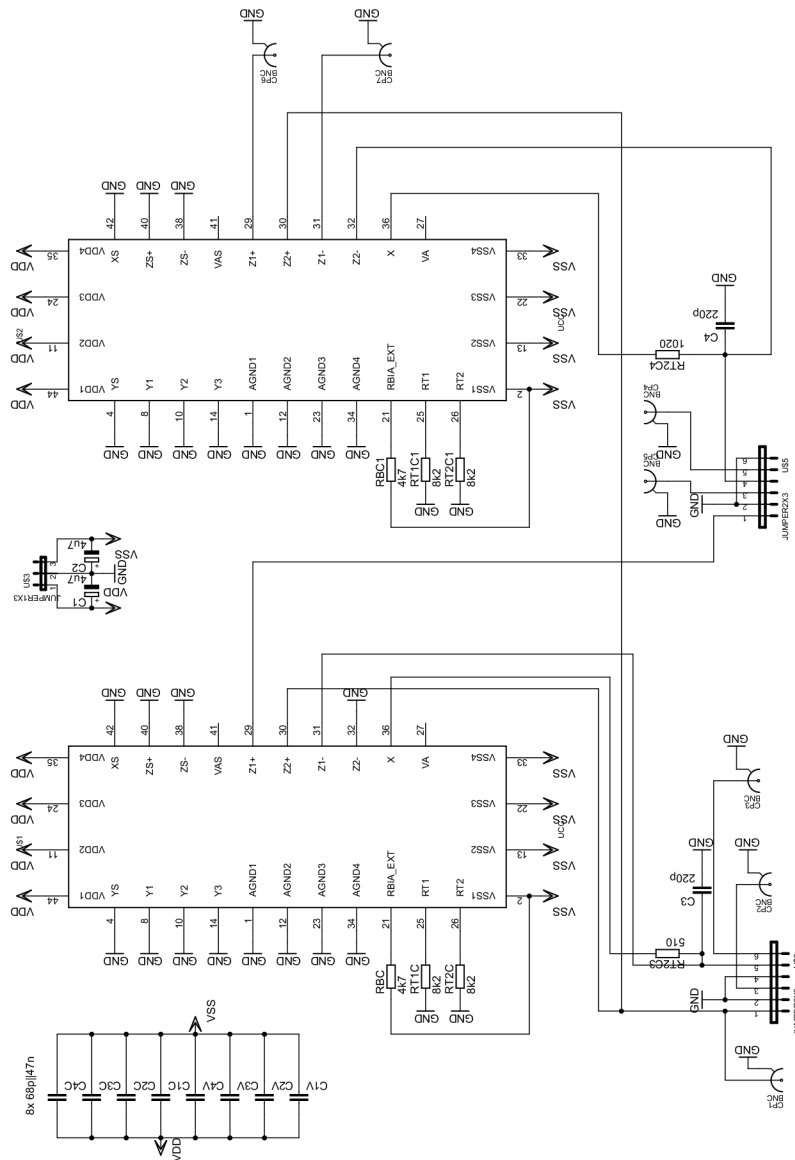
# SEZNAM PŘÍLOH

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>A</b> | <b>Návrh DPS v programu Eagle 6.5.0</b>                | <b>81</b> |
| A.1      | Nediferenční kmitočtový filtr z kapitoly 4.1 . . . . . | 81        |
| A.2      | Diferenční kmitočtový filtr z kapitoly 4.1 . . . . .   | 83        |
| A.3      | Nediferenční kmitočtový filtr z kapitoly 4.3 . . . . . | 85        |
| A.4      | Diferenční kmitočtový filtr z kapitoly 4.3 . . . . .   | 87        |
| <b>B</b> | <b>Fotografie zkonstruovaných převodníků</b>           | <b>89</b> |
| <b>C</b> | <b>Soubory na CD</b>                                   | <b>91</b> |

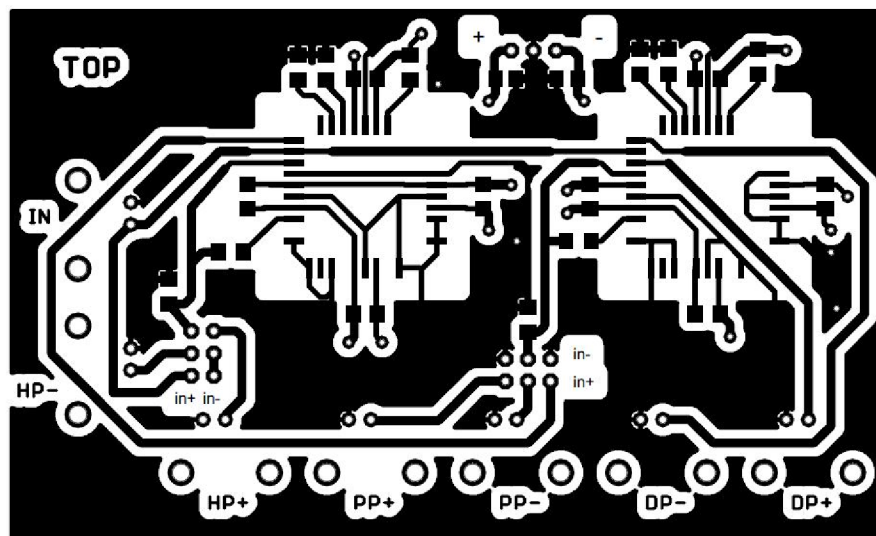


# A NÁVRH DPS V PROGRAMU EAGLE 6.5.0

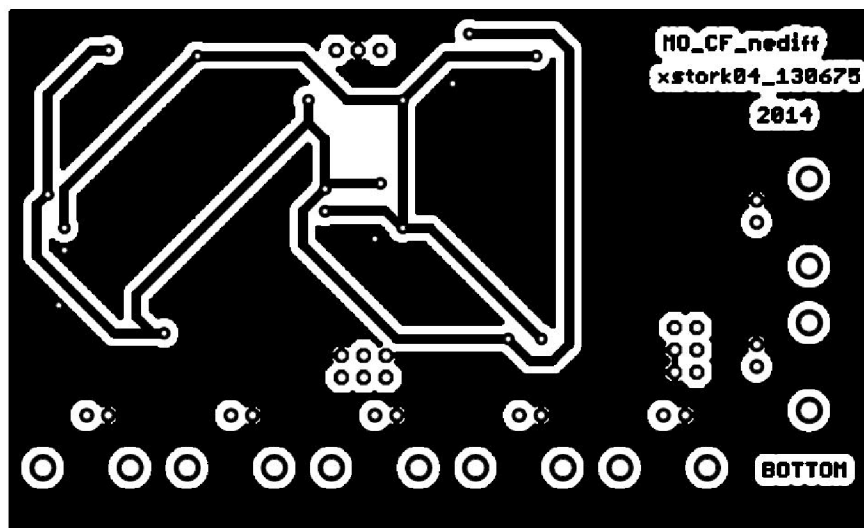
## A.1 Nediferenční kmitočtový filtr z kapitoly 4.1



Obr. A.1: Schéma nediferenčního filtru z kapitoly 4.1

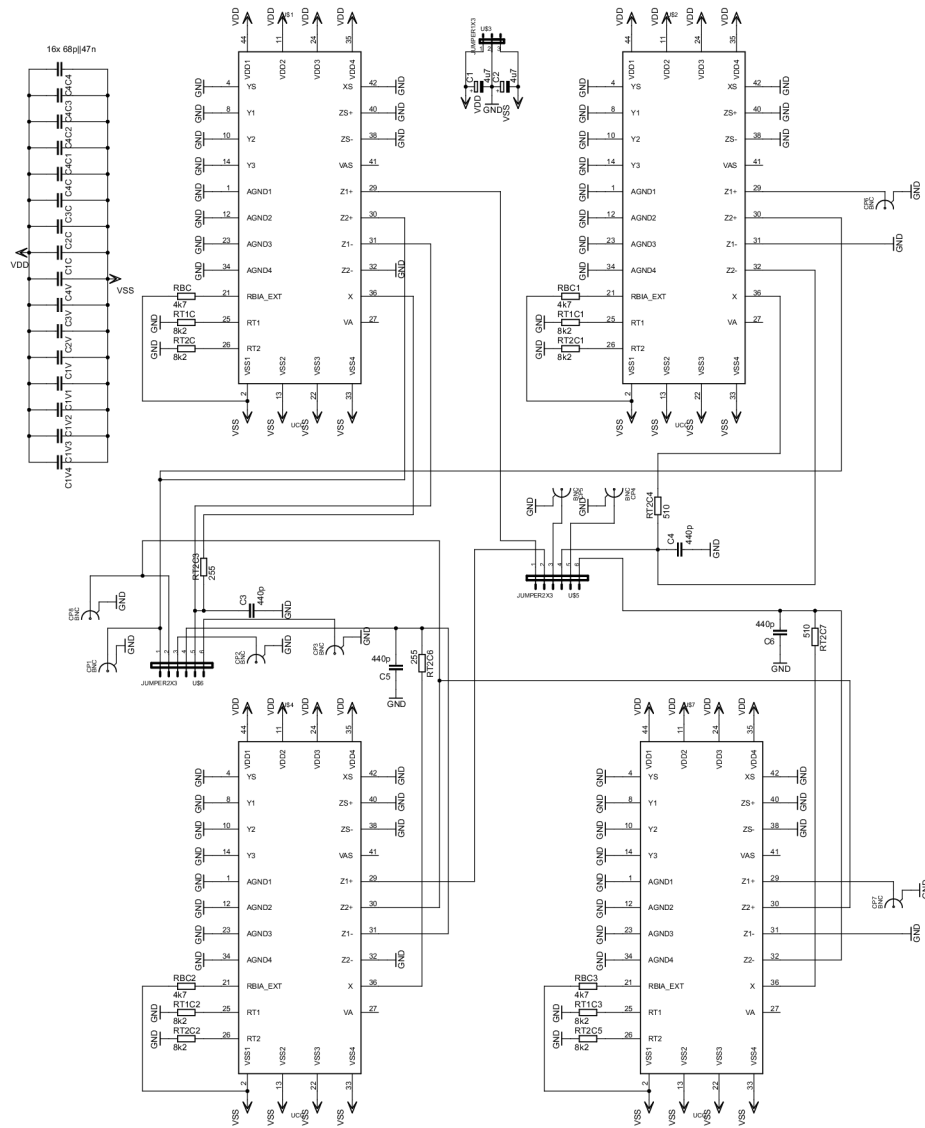


Obr. A.2: Layout nediferenčního filtru z kapitoly 4.1 (TOP)

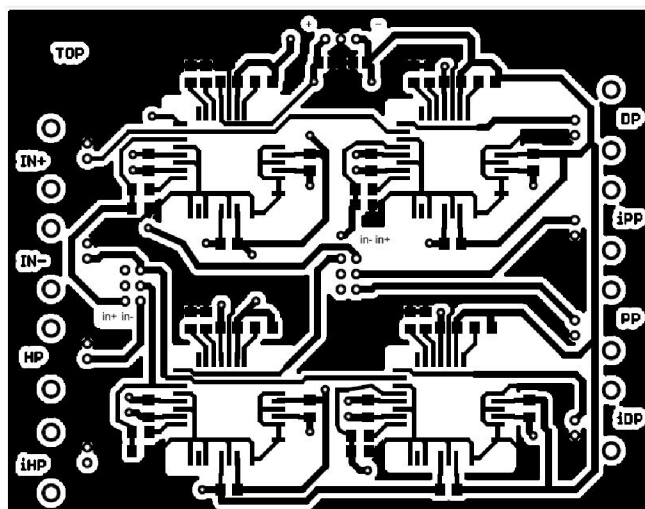


Obr. A.3: Layout nediferenčního filtru z kapitoly 4.1 (BOTTOM)

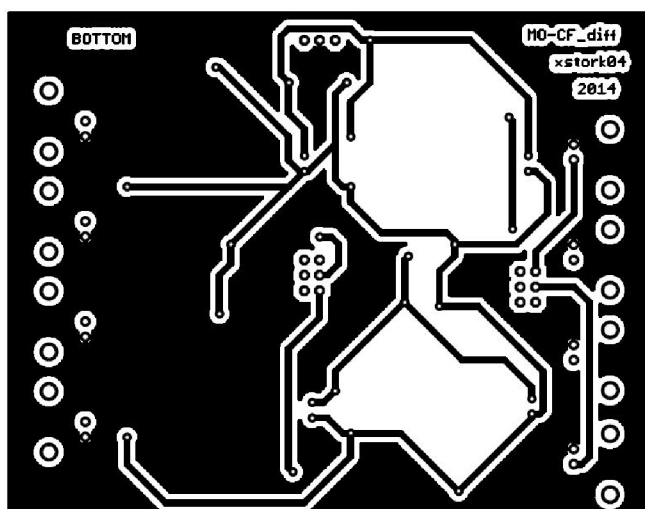
## A.2 Diferenční kmitočtový filtr z kapitoly 4.1



Obr. A.4: Schéma diferenčního filtru z kapitoly 4.1

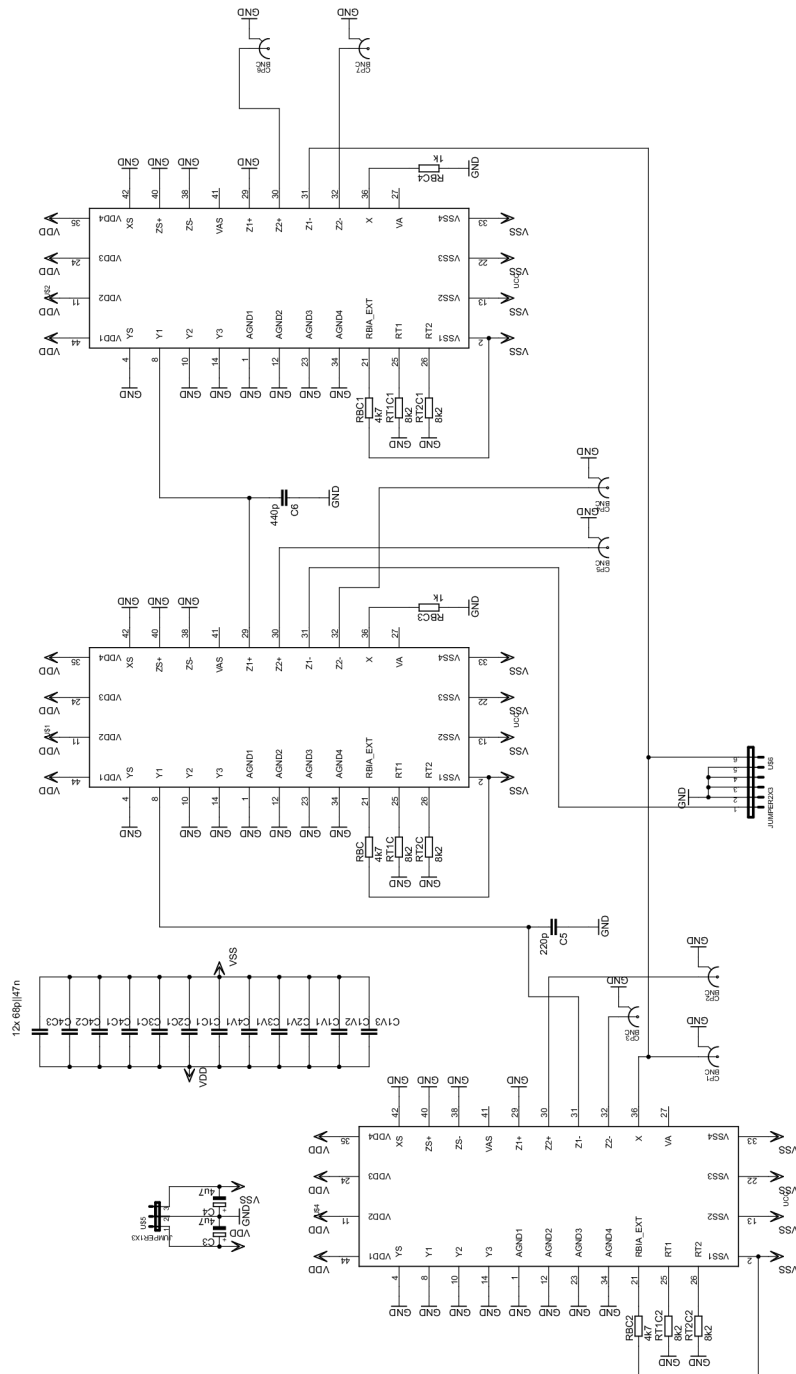


Obr. A.5: Layout diferenčního filtru z kapitoly 4.1 (TOP)

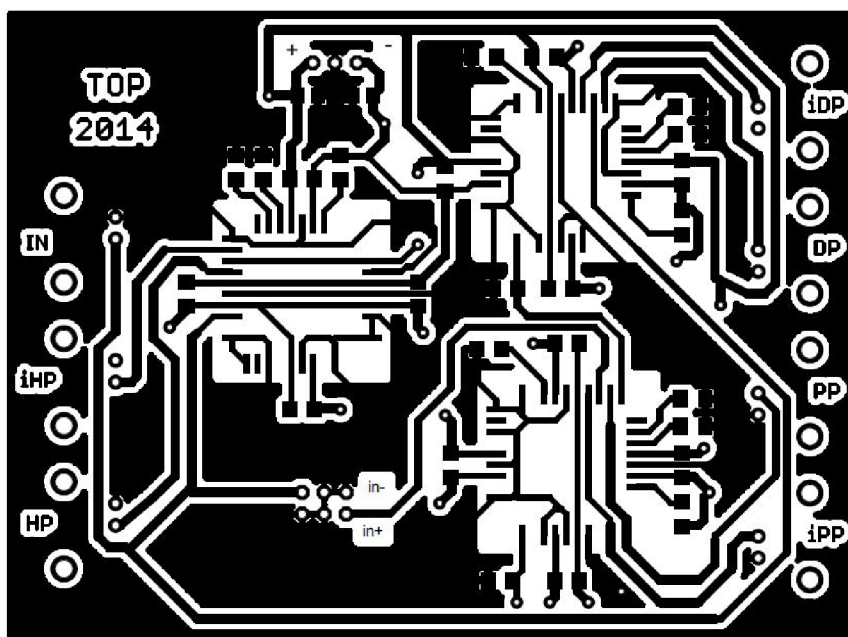


Obr. A.6: Layout diferenčního filtru z kapitoly 4.1 (BOTTOM)

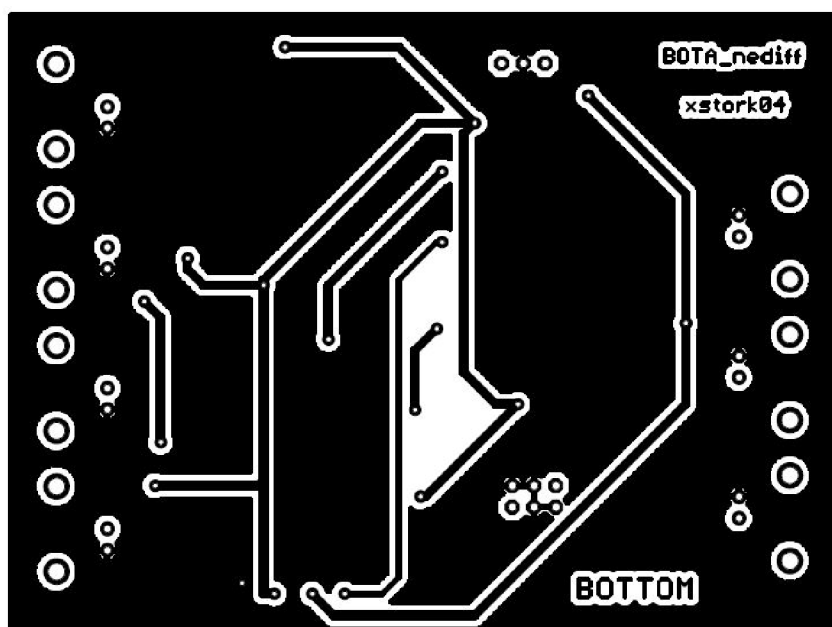
## A.3 Nediferenční kmitočtový filtr z kapitoly 4.3



Obr. A.7: Schéma nediferenčního filtru z kapitoly 4.3

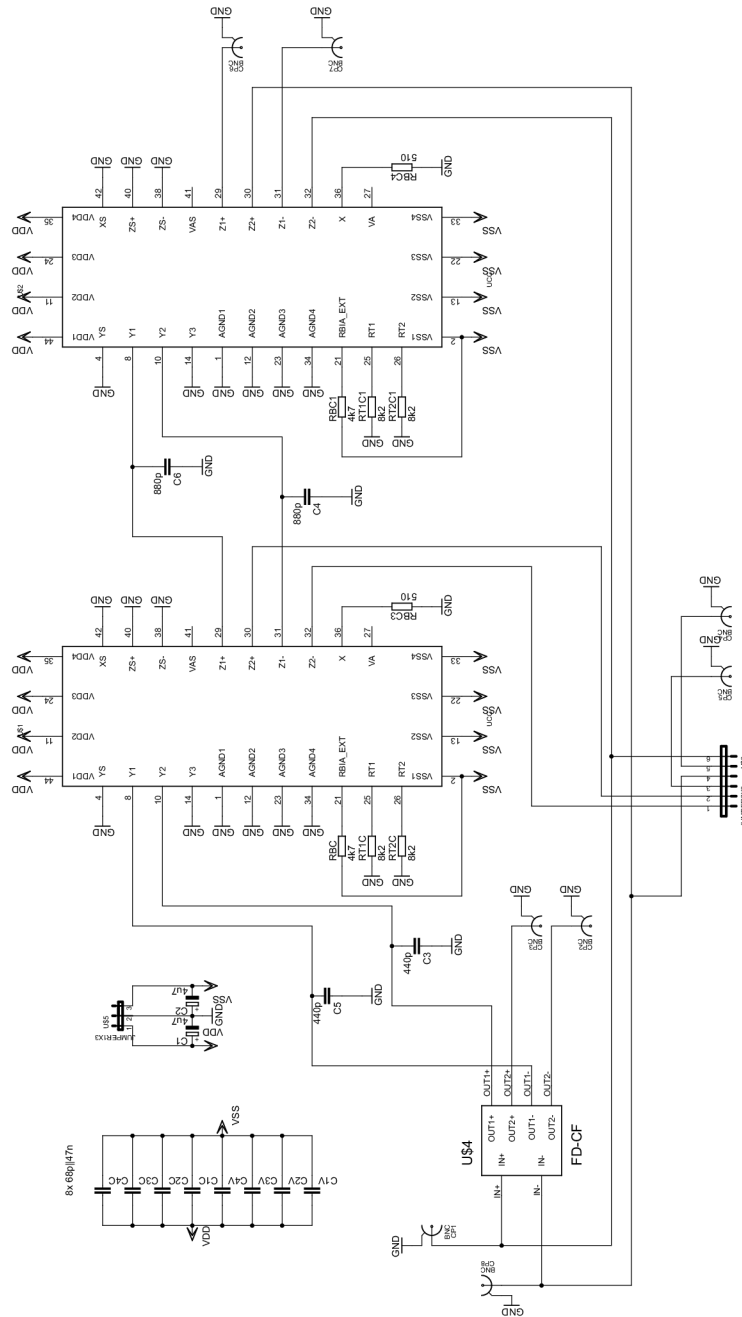


Obr. A.8: Layout nediferenčního filtru z kapitoly 4.3 (TOP)

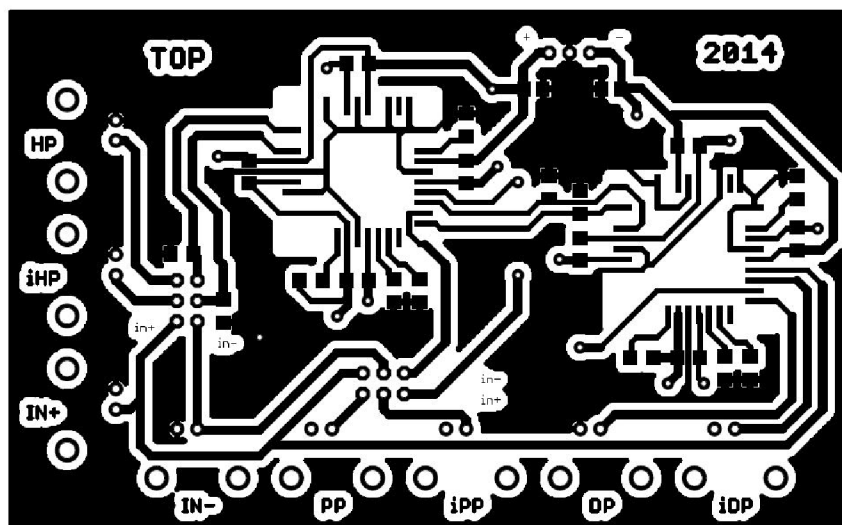


Obr. A.9: Layout nediferenčního filtru z kapitoly 4.3 (BOTTOM)

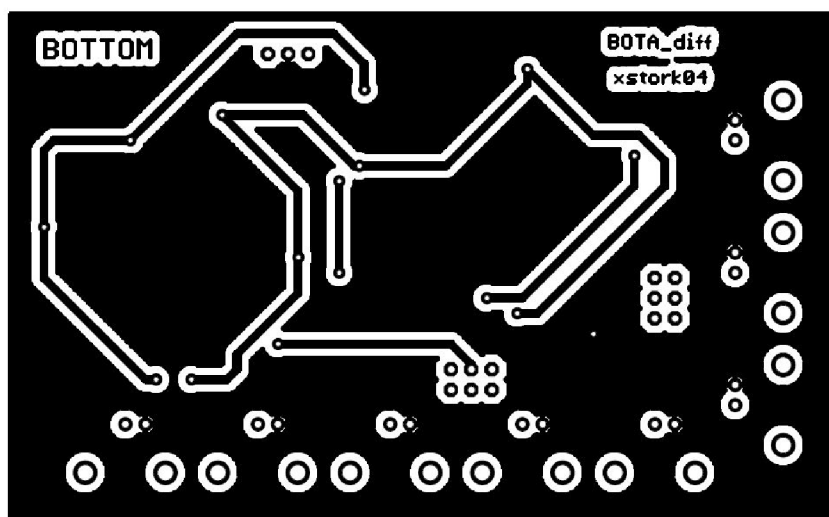
## A.4 Diferenční kmitočtový filtr z kapitoly 4.3



Obr. A.10: Schéma diferenčního filtru z kapitoly 4.3



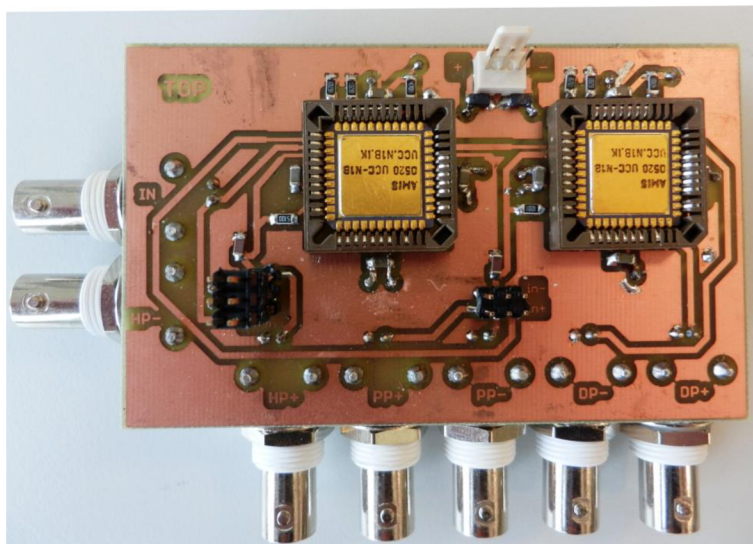
Obr. A.11: Layout diferenčního filtru z kapitoly 4.3 (TOP)



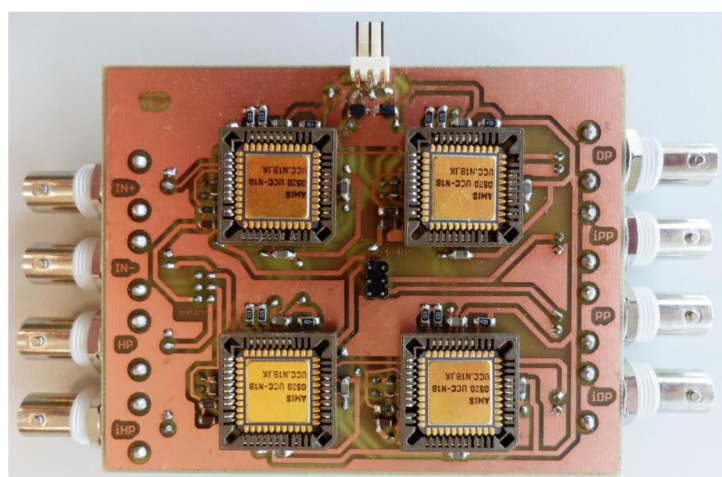
Obr. A.12: Layout diferenčního filtru z kapitoly 4.3 (BOTTOM)



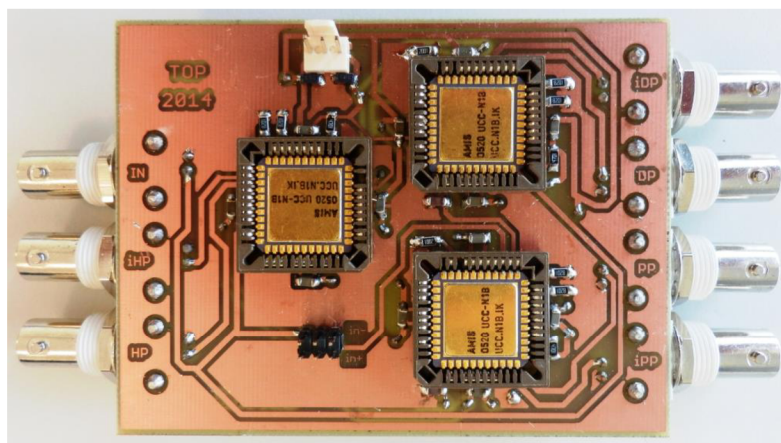
## B FOTOGRAFIE ZKONSTRUOVANÝCH PŘEVODNÍKŮ



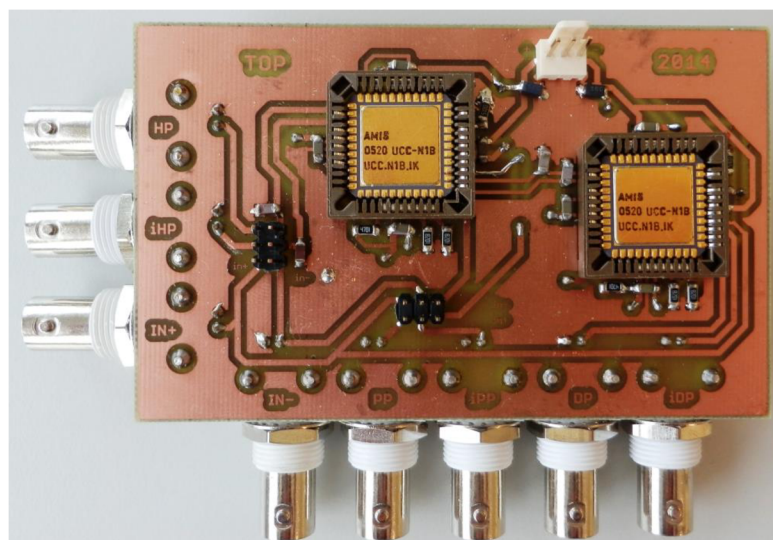
Obr. B.1: Fotografie nediferenčního filtru z kapitoly 4.1 (horní strana - TOP)



Obr. B.2: Fotografie diferenčního filtru z kapitoly 4.1 (horní strana - TOP)



Obr. B.3: Fotografie nediferenčního filtru z kapitoly 4.3 (horní strana - TOP)



Obr. B.4: Fotografie diferenčního filtru z kapitoly 4.3 (horní strana - TOP)

## C SOUBORY NA CD

Příložené CD obsahuje sedm hlavních složek ve kterých se nachází veškeré mnou použité použité materiály. Jedná se o tyto složky:

- 1) **Diplomová práce** – Složka obsahuje hlavní dokument diplomové práce ve formátu PDF
- 2) **Dokumenty** – Tato složka obsahu soubory MS Office Excel, kde jsou vytvořeny všechny grafy ze simulovaných a měřených průběhů.
- 3) **MSVisio** – Obsahuje veškeré obrázky, schémata a grafy vytvořené programem MS Office Visio.
- 4) **OrCAD** – Zde se nachází soubory programu OrCAD, v němž byly simulovány všechny navržené struktury kmitočtových filtrů.
- 5) **SNAP** – Obsahuje soubory vytvořené programem SNAP, ve kterém byly ověřovány rovnice přenosových funkcí.
- 6) **EAGLE** – Složka obsahující návrhy schémat a návrhy desek plošných spojů z programu EAGLE verze 6.5.0
- 7) **Fotografie DPS** – Ve složce se nachází fotografie všech čtyř zhotovených kmitočtových filtrů