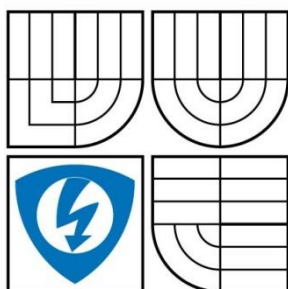


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND
COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

KMITOČTOVÉ FILTRY S ŘIDITELNÝM PROUDOVÝM ZESILOVAČEM

FREQUENCY FILTERS WITH TUNABLE CURRENT AMPLIFIER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

LUKÁŠ JEMELÍK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. JAN JEŘÁBEK

BRNO 2009

ANOTACE

Vysoké učení technické v Brně
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav telekomunikací

KMITOČTOVÉ FILTRY S ŘIDITELNÝM PROUDOVÝM ZESILOVAČEM

Bakalářská práce

Zaměření studia: Teleinformatika
Autor: Lukáš Jemelík
Vedoucí práce: Ing. Jan Jeřábek

Abstrakt:

Bakalářská práce pojednává o návrhu aktivních kmitočtových filtrů druhého řádu, které budou využívat aktivní prvky. Tyto filtry byly navrženy pomocí metody autonomních obvodů. Aktivními prvky jsou říditelný proudový zesilovač DCCA a vícevýstupový proudový sledovač MO-CF. Všechny navržené filtry pracují v proudovém módu. Práce je rozdělena do pěti kapitol. V úvodní kapitole jsou obecně popsány vlastnosti kmitočtových filtrů, druhá se zabývá popisem použitých aktivních prvků, třetí použitými návrhovými metodami. Ve čtvrté kapitole jsou popsána jednotlivá zapojení, jejich přenosové funkce a ověření jejich funkčnosti v počítačovém software.

Klíčová slova: kmitočtový filtr, proudový mód, proudový zesilovač, proudový sledovač, DCCA, MO-CF.

ABSTRAKT

Brno University of Technology
Faculty of Electrical Engineering and Communication
Department of telecommunication

FREQUENCY FILTERS WITH TUNABLE CURRENT AMPLIFIER

Bachelor's thesis

Specialisation of study: Teleinformatics
Student: Lukáš Jemelík
Supervisor: Ing. Jan Jeřábek

Abstract:

The bachelor thesis deals with the designing of active frequency filters of the second – order which are make use of active elements. These filters were designed by means of autonomous circuits. Digitally Controlled Current Amplifier DCCA and Multiple Output Current Follower MO-CF were used as active elements. Designed filters works in current mode. The bachelor thesis is divided into five chapters. In the introductory part there are described general characters of frequency filters, the second part contains the description of the active elements, the third part includes the method of construction high – order filters. In fourth part there are described particular circuitry, their transmission functions and confirmation of their functionality in computer software.

Keywords: frequency filter, current mode, current amplifier, current follower, DCCA, MO-CF

JEMELÍK, L. *Kmitočtové filtry s říditelným proudovým zesilovačem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 54s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jan Jeřábek.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma “KMITOČTOVÉ FILTRY S ŘIDITELNÝM PROUDOVÝM ZESILOVAČEM” jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.“

V Brně dne

.....

(podpis autora)

Poděkování

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

V Brně dne

.....

(podpis autora)

OBSAH

1 Kmitočtové filtry	13
1.1 Úvod	13
1.2 Filtrační funkce	14
1.2.1 Dolní propust (DP)	14
1.2.2 Horní propust (HP)	14
1.2.3 Pásmová propust (PP)	15
1.2.4 Pásmová zadrž (PZ)	15
1.2.5 Fázovací článek (FČ)	15
1.3 Přenosová funkce filtru	16
1.4 Charakteristická rovnice	17
1.5 Typy filtrů	18
1.5.1 Pasivní filtry	18
1.5.2 Aktivní filtry.....	19
2 Aktivní prvky vhodné pro proudový mód	20
2.1 Řiditelný proudový zesilovač DCCA	20
2.2 Vícevýstupový proudový sledovač MO-CF	21
3 Návrhové metody	23
3.1 Metoda autonomního obvodu	23
4 Vlastní návrh	24
4.1 Kmitočtové filtry s jedním aktivním prvkem	24
4.2 Kmitočtový filtr se dvěma aktivními prvky DCCA	27
4.2.1 První odvod se dvěma DCCA	27
4.2.2 Druhý obvod se dvěma DCCA	31
4.2.3 Třetí obvod se dvěma DCCA	35
4.2.4 Čtvrtý obvod se dvěma DCCA	37

4.3 Kmitočtový filtr s kombinací dvou aktivních prvků	41
4.3.1 První obvod s kombinací prvků DCCA a MO-CF	41
4.3.2 Druhý obvod s kombinací prvků DCCA a MO-CF.....	44
5 Závěr	49
Literatura	50
Seznam použitých veličin, symbolů a zkratk	51
Seznam příloh	53

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1:	Přenosová charakteristika dolní propusti	14
Obr. 1.2:	Přenosová charakteristika horní propusti	14
Obr. 1.3:	Přenosová charakteristika pásmové propusti	15
Obr. 1.4:	Přenosová charakteristika pásmové zádrži	15
Obr. 1.5:	Blokové schéma přenosové funkce obvodu	16
Obr. 1.7:	Pasivní horní propust prvního řádu	19
Obr. 1.8:	Schematická značka DCCA	20
Obr. 1.9:	Schematická značka MO-CF	22
Obr. 1.10:	Realizace MO-CF pomocí UCC	22
Obr. 4.1:	Autonomní obvod s jedním DCCA	24
Obr. 4.2:	Výsledné zapojení filtračního obvodu s jedním DCCA	25
Obr. 4.3:	Graf neinvertované HP obvodu s DCCA	26
Obr. 4.4:	Graf PP obvodu s DCCA	27
Obr. 4.5:	První autonomní obvod se dvěma DCCA	28
Obr. 4.6:	Výsledné zapojení prvního obvodu se dvěma DCCA	29
Obr. 4.7:	Graf neinvertované DP prvního obvodu se dvěma DCCA	30
Obr. 4.8:	Graf invertované DP prvního obvodu se dvěma DCCA	30
Obr. 4.9:	Druhý autonomní obvod se dvěma DCCA	31
Obr. 4.10:	Výsledné zapojení druhého obvodu se dvěma DCCA	32
Obr. 4.11:	Graf invertované HP druhého obvodu se dvěma DCCA	33
Obr. 4.12:	Graf neinvertované HP druhého obvodu se dvěma DCCA	33
Obr. 4.13:	Graf PP druhého obvodu se dvěma DCCA	34
Obr. 4.14:	Třetí autonomní obvod se dvěma DCCA	35
Obr. 4.15:	Výsledné zapojení třetího obvodu se dvěma DCCA	36
Obr. 4.16:	Graf PP třetího obvodu se dvěma DCCA	37
Obr. 4.17:	Čtvrtý autonomní obvod se dvěma DCCA	37
Obr. 4.18:	Výsledné zapojení čtvrtého obvodu se dvěma DCCA	39
Obr. 4.19:	Graf DP čtvrtého obvodu se dvěma DCCA	40
Obr. 4.20:	Graf HP čtvrtého obvodu se dvěma DCCA	40
Obr. 4.21:	Graf PP čtvrtého obvodu se dvěma DCCA	41
Obr. 4.22:	Autonomní obvod s prvky DCCA a MO-CF	42
Obr. 4.23:	Výsledné zapojení prvního obvodu s DCCA a MO-CF	43

Obr. 4.24:	Graf PP prvního obvodu s DCCA a MO-CF	44
Obr. 4.25:	Druhý autonomní obvod s prvky DCCA a MO-CF	44
Obr. 4.26:	Výsledné zapojení druhého obvodu s DCCA a MO-CF.....	46
Obr. 4.27:	Graf neinvertované DP druhého obvodu s DCCA a MO-CF	47
Obr. 4.28:	Graf invertované DP druhého obvodu s DCCA a MO-CF.....	47

SEZNAM TABULEK

Tab. 1.1:	Přehled dostupných zesílení DCCA [3]	21
Tab. 4.1:	Přehled variant voleb pasivních prvků obvodu s jedním DCCA	25
Tab. 4.2:	Přehled hodnot pasivních prvků obvodu s jedním DCCA	26
Tab. 4.3:	Přehled variant voleb pasivních prvků prvního obvodu se dvěma DCCA.....	28
Tab. 4.4:	Přehled hodnot pasivních prvků prvního obvodu se dvěma DCCA	29
Tab. 4.5:	Přehled variant voleb pasivních prvků druhého obvodu se dvěma DCCA	31
Tab. 4.6:	Přehled hodnot pasivních prvků druhého obvodu se dvěma DCCA	33
Tab. 4.7:	Přehled variant voleb pasivních prvků třetího obvodu se dvěma DCCA	35
Tab. 4.8:	Přehled hodnot pasivních prvků třetího obvodu se dvěma DCCA	36
Tab. 4.9:	Přehled variant voleb pasivních prvků čtvrtého obvodu se dvěma DCCA	38
Tab. 4.10:	Přehled hodnot pasivních prvků čtvrtého obvodu se dvěma DCCA	39
Tab. 4.11:	Přehled variant voleb pasivních prvků prvního obvodu s DCCA a MO-CF.....	42
Tab. 4.12:	Přehled hodnot pasivních prvků prvního obvodu s DCCA a MO-CF.....	43
Tab. 4.13:	Přehled variant voleb pasivních prvků druhého obvodu s DCCA a MO-CF	45
Tab. 4.14:	Přehled hodnot pasivních prvků druhého obvodu s DCCA a MO-CF	46

1 KMITOČTOVÉ FILTRY

1.1 Úvod

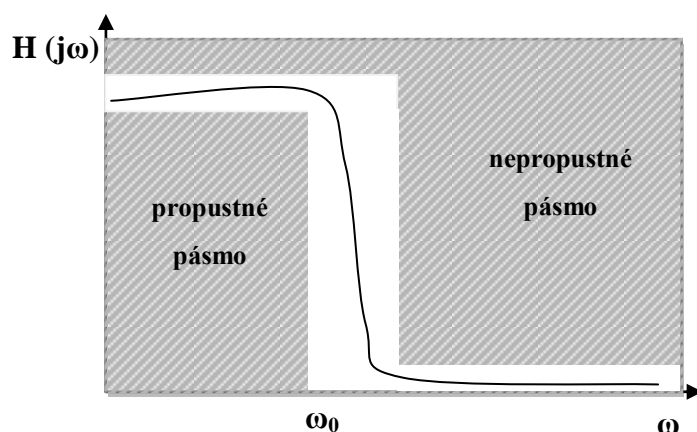
Kmitočtové filtry nalezneme v celé řadě obvodů a systémů, které mají za úkol odstranit nebo oddělit určité části spektra. Jsou tedy definovány dvě části pásma a to propustné a nepropustné. Slouží například k odfiltrování vyšších harmonických složek, k oddělení požadovaného signálu, k úpravě spektra akustických signálů atd. Základní filtry lze realizovat pomocí pasivních prvků RLC. Rozlišujeme pět základních typů filtrů. Jsou to dolní propust (DP), pásmová propust (PP), horní propust (HP), pásmová zadrž (PZ) a fázovací článek (FČ). Je ovšem také důležité zdůraznit, že hranice mezi pásmy je udána mezní frekvencí filtru. Problém pasivních filtrů nastává při praktické realizaci, kdy se v případě nízkých mezních kmitočtů projevují příliš velké indukčnosti a s ním související parazitní vlastnosti. Proto se začala rozvíjet oblast aktivních filtrů a pro nás nejvíce důležitých filtrů pracujících v proudovém módu. V tomto perspektivním módu se budeme v této bakalářské práci pohybovat. Trend přechodu na proudové prvky je zapříčiněn neustálým snižováním napájecích napětí a tudíž zmenšováním odstupu signál – šum.

1.2 Filtrační funkce

Rozeznáváme pět základních typů filtračních funkcí [1],[11].

1.2.1 Dolní propust (DP)

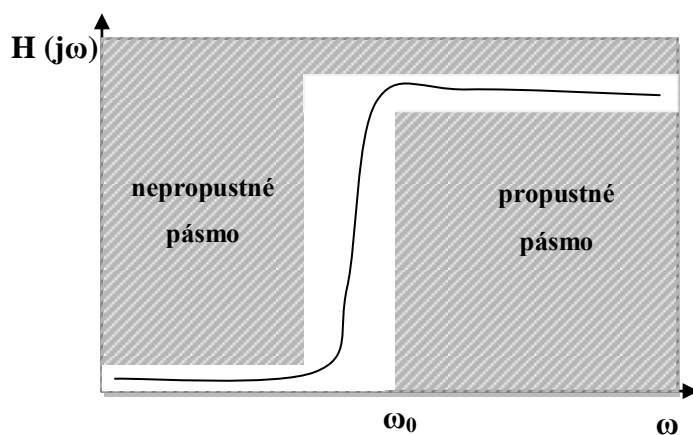
Utlumuje vyšší frekvence než je mezní kmitočet filtru ω_0 . Na obr. 1.1 je vidět teoretická křivka. Aby křivka přenosové funkce vyhovovala podmínkám DP, nesmí opustit vymezené pásmo (bílé) a zasáhnout do šrafované oblasti.



Obr. 1.1: Přenosová charakteristika dolní propusti

1.2.2 Horní propust (HP)

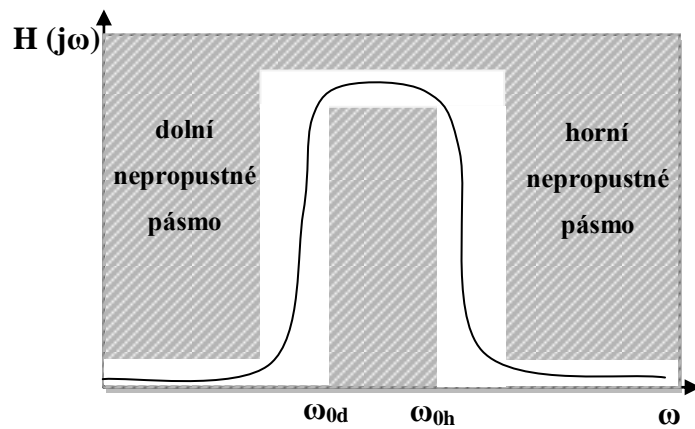
Propouští vyšší frekvence než je mezní kmitočet filtru ω_0 , jak je znázorněno na obr. 1.2. Znovu platí, že křivka musí být ve vymezené bílé oblasti.



Obr. 1.2: Přenosová charakteristika horní propusti

1.2.3 Pásmová propust (PP)

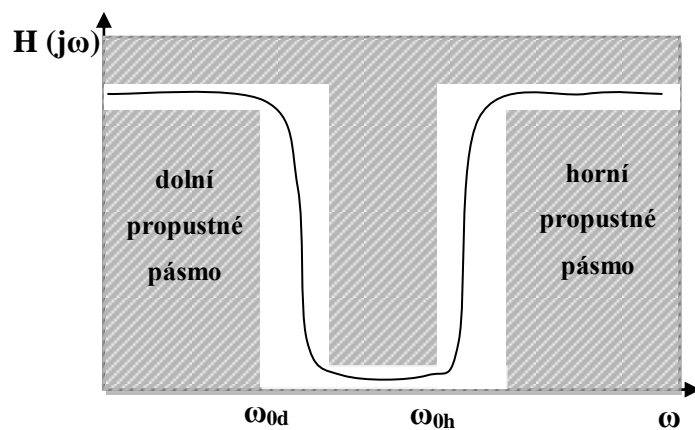
Pásmová propust (obr. 1.3) propouští určité pásmo frekvencí, které je dáno dvěma mezními frekvencemi ω_{0d} a ω_{0h} .



Obr. 1.3: Přenosová charakteristika pásmové propusti

1.2.4 Pásmová zádrž (PZ)

Jak je vidět na obr. 1.4, pásmová propust utlumuje určité pásmo frekvencí, které je dáno dvěma mezními frekvencemi ω_{0d} a ω_{0h} .



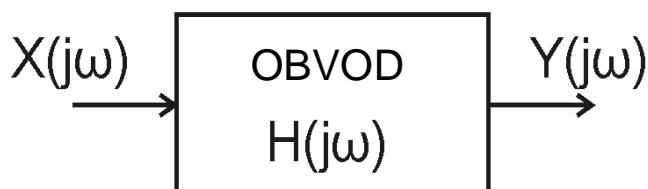
Obr. 1.4: Přenosová charakteristika pásmové zádrži

1.2.5 Fázovací článek (FČ)

Fázovací článek (FČ), nefiltruje signál, nýbrž jej pouze časově posouvá.

1.3 Přenosová funkce filtru

Přenosovou funkcí vyjadřujeme chování obvodu na jeho vnějších vstupních a výstupních svorkách. Na obr. 1.5 je obvod jednoduše znázorněn blokovým schématem [2].



Obr. 1.5: Blokové schéma přenosové funkce obvodu

Obecně lze tvar přenosové charakteristiky obvodu z obr. 1.5 popsat rovnicí:

$$H(\mathbf{p}) = \frac{Y}{X}, \quad (1.1)$$

kde X je vstupní veličina, Y výstupní veličina, H je přenosová funkce, $\mathbf{p}=\mathbf{j}\omega$ je komplexní proměnná.

Po dosazení za obecné veličiny dostaneme jednoduchou úpravou:

$$H(\mathbf{p}) = \frac{U_{out}}{U_{in}}, \quad (1.2)$$

kde U_{in} je vstupní napětí, U_{out} výstupní napětí.

V této práci budeme především uvažovat proudový mód:

$$H(\mathbf{p}) = \frac{I_{out}}{I_{in}}, \quad (1.3)$$

kde I_{in} je vstupní proud, I_{out} výstupní proud.

Po úpravě a dosazení funkce na reálně racionálně lomenou funkci komplexní proměnné dostaneme:

$$H(\mathbf{p}) = \frac{\sum_{k=0}^{m} a_k \cdot (\mathbf{p})^k}{\sum_{i=0}^{n} b_i \cdot (\mathbf{p})^i} = \frac{N(\mathbf{p})}{D(\mathbf{p})} = \frac{a_0 + a_1 \cdot \mathbf{p} + \dots + a_{m-1} \cdot \mathbf{p}^{m-1} + a_m \cdot \mathbf{p}^m}{b_0 + b_1 \cdot \mathbf{p} + \dots + b_{n-1} \cdot \mathbf{p}^{n-1} + \mathbf{p}^n}, \quad (1.4)$$

kde $N(\mathbf{p})$, $D(\mathbf{p})$ jsou mnohočleny komplexní proměnné $\mathbf{p}=\mathbf{j}\omega$, a , b jsou reálné koeficienty a platí $m \leq n$, n je řád filtru.

Z rovnice (1.4) můžeme určit modulovou charakteristiku

$$H(\mathbf{p}) = \text{mod } H(\mathbf{p}) \quad (1.5)$$

a charakteristiku argumentovou

$$\varphi(\mathbf{p}) = \text{arg } H(\mathbf{p}). \quad (1.6)$$

V kapitole 1.2 zmiňuji veličinu ω_0 . Jedná se o úhlový kmitočet, který vychází z mezní úhlové frekvence. Vztah mezi těmito veličinami je:

$$\omega_0 = 2\pi f_0, \quad (1.7)$$

kde f_0 je mezní frekvence filtru.

1.4 Charakteristická rovnice

Charakteristická rovnice je velmi důležitá pro určení chování obvodu. V naší práci se budeme zabírat většinou filtry druhého řádu, pro které musí platit rovnice (1.8). Důležité je, aby obsahovala všechny tři členy \mathbf{p}^0 , \mathbf{p}^1 , \mathbf{p}^2 a všechny byly kladné. To je podmínka stability filtru [11].

$$\mathbf{D} = b_0 + \mathbf{p}b_1 + \mathbf{p}^2b_2, \quad (1.8)$$

kde b_0 , b_1 , b_2 jsou reálné a kladné koeficienty.

Dále pro výpočet kvality jakosti (1.9) a mezní frekvence (1.10) využijeme koeficientů z rovnice (1.8) a vypočteme jejich velikost [6].

$$Q = \sqrt{\frac{b_0b_2}{b_1^2}} = \frac{\sqrt{b_0b_2}}{b_1}, \quad (1.9)$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{b_0}{b_2}} \Rightarrow f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{b_0}{b_2}}, \quad (1.10)$$

kde Q je kvalita jakosti, ω_0 je úhlový kmitočet a f_0 je mezní frekvence filtru.

1.5 Typy filtrů

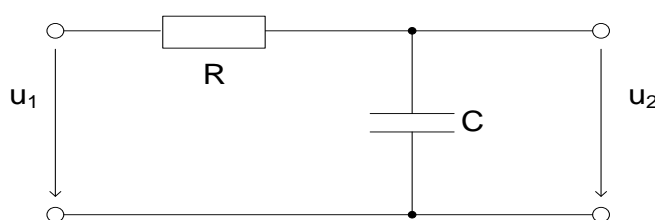
Rozlišujeme dva typy filtrů podle použitých prvků a funkcí, které mohou zastávat. Jedná se o pasivní a aktivní filtry.

1.5.1 Pasivní filtry

Jak už název napovídá, jedná se o filtry obsahující pouze pasivní prvky – rezistory R, kapacity C a indukčnosti L. Není zde využit žádný aktivní prvek, z čehož vyplývá, že jejich zesílení v propustném pásmu nemůže být větší jak 1. Ve většině obvodů se snažíme nevyužívat indukčnost, jelikož má nezanedbatelné parazitní vlastnosti a také jejich velikost bývá v mnoha případech nevyhovující pro realizaci. Pasivní RLC filtry umí realizovat filtry typu DP, HP, PZ, PP i FČ prvního a vyšších řádů. Jako příklad uvedu v této práci jen zapojení a rovnice pouze pro případ filtru typu DP a HP prvního řádu. Ostatní lze nalézt v literatuře [2].

a. Dolní propust RC

Jako první uvedu dolní propust prvního řádu, která je znázorněna na obr. 1.6.



Obr. 1.6: Pasivní dolní propust prvního řádu

Uřídíme přenosovou charakteristiku dolní propusti z obecné rovnice (1.1)

$$H(\omega) = \frac{U_2(\omega)}{U_1(\omega)} = \frac{Z_2}{Z_2 + Z_1} = \frac{1/j\omega C}{R + 1/j\omega C} = \frac{1}{1 + j\omega RC}. \quad (1.8)$$

Odtud můžeme podle (1.5) určit modulovou charakteristiku

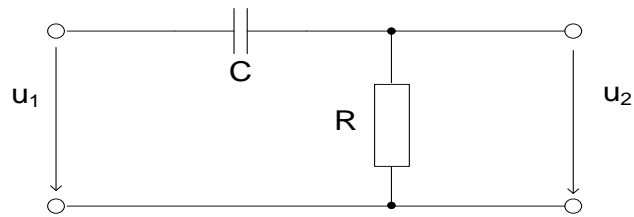
$$H(\omega) = \text{mod } H(\omega) = \sqrt{(\text{Re}H(\omega))^2 + (\text{Im}H(\omega))^2} = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 R^2 C^2}}, \quad (1.9)$$

a její argumentovaná charakteristika je

$$\varphi(\omega) = \text{arg } H(\omega) = \arctan \frac{\text{Im}H(\omega)}{\text{Re}H(\omega)} = -\arctan \omega RC. \quad (1.10)$$

b. *Horní propust RC*

Dalším nejběžnějším pasivním filtrem je horní propust znázorněná na obr. 1.7.



Obr. 1.7: Pasivní horní propust prvního řádu

Určíme přenosovou charakteristiku horní propusti z obecné rovnice (1.1)

$$H(\omega) = \frac{U_2(\omega)}{U_1(\omega)} = \frac{Z_2}{Z_2 + Z_1} = \frac{R}{1/j\omega C + R} = \frac{1}{1 + 1/j\omega RC}. \quad (1.11)$$

1.5.2 Aktivní filtry

Výhodou aktivních filtrů je jejich realizace bez potřeby induktorů [2]. Pro vysoké frekvence by induktor nečinil velké potíže, ovšem pro nízké kmitočty není vhodný. Proto používáme RC filtry společně s aktivními prvky zejména operačními zesilovači. V této práci nás ovšem budou zajímat především aktivní filtry v proudovém módu, kdy se používají např. proudové sledovače, proudové konvejory, proudové zesilovače a další prvky pracující v proudovém módu.

2 AKTIVNÍ PRVKY VHODNÉ PRO PROUDOVÝ MÓD

2.1 Řiditelný proudový zesilovač DCCA

Na Ústavu telekomunikací byl vyvinut nový prvek s pracovním názvem DCCA (Digitally Controlled Current Amplifier) [3] tedy Digitálně řízený proudový zesilovač. Schématická značka prvku DCCA je naznačena na obr. 1.8. Jeho charakteristické rovnice jsou:

$$I_{out+} = A_I(I_{in+} - I_{in-}) \quad (2.1)$$

$$I_{out-} = -A_I(I_{in+} - I_{in-}) \quad (2.2)$$

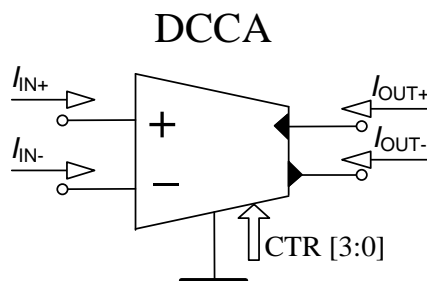
kde A_I je proudové zesílení, I_{in+} a I_{in-} , I_{out+} a I_{out-} jsou proudy tekoucí do vstupních a výstupních proudových svorek.

Výše zmíněné proudové zesílení A_I je digitálně řízeno pomocí čtyřbitové sběrnice CTR [3:0]. Toto zesílení je dáno vztahy:

$$A_I = 24 \cdot 10^{-3} \cdot K, \quad (2.3)$$

$$K = D_3 \cdot 2 \cdot 10^{-3} + D_2 \cdot 10^{-3} + D_1 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} + D_0 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3} + 0,125 \cdot 10^{-3} \quad (2.4)$$

kde D_3, D_2, D_1, D_0 jsou bity nastavované směrnice, A_I je požadované zesílení.



Obr. 1.8: Schématická značka DCCA

Tabulka (1.1) ukazuje možná nastavení zesílení A_I prvku DCCA.

Tab. 1.1: Přehled dostupných zesílení DCCA [3]

i	D3	D2	D1	D0	Ai [-]	Ai [dB]
0	0	0	0	0	3	9,54
1	0	0	0	1	9	19,08
2	0	0	1	0	15	23,52
3	0	0	1	1	21	26,44
4	0	1	0	0	27	28,63
5	0	1	0	1	33	30,37
6	0	1	1	0	39	31,82
7	0	1	1	1	45	33,06
8	1	0	0	0	51	34,15
9	1	0	0	1	57	35,12
10	1	0	1	0	63	35,99
11	1	0	1	1	69	36,78
12	1	1	0	0	75	37,50
13	1	1	0	1	81	38,17
14	1	1	1	0	87	38,79
15	1	1	1	1	93	39,37

V práci je dále uvažováno i zesílení $A_I = 1$, s kterým se výhledově u nové verze prvku DCCA počítá.

2.2 Vícevýstupový proudový sledovač MO-CF

Tento aktivní prvek [5] má schematickou značku znázorněnou na obr. 1.9. Obsahuje dva kladné a dva záporné proudové výstupy, přičemž má jeden proudový vstup. Je charakterizován těmito vztahy:

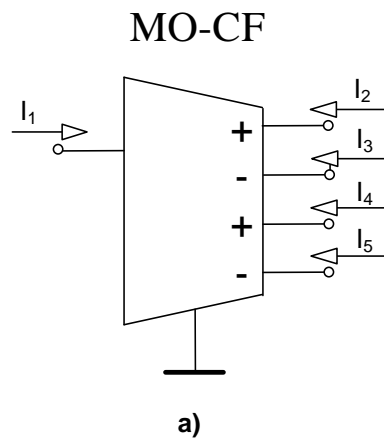
$$I_1 = I_2 = I_4 \quad , \quad (2.5)$$

$$-I_1 = I_3 = I_5 \quad , \quad (2.6)$$

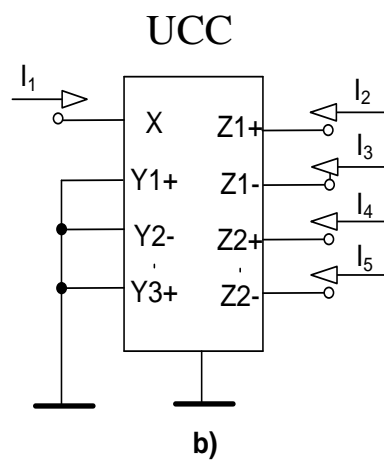
kde I_1 je proud tekoucí do proudového vstupu, I_2 a I_4 jsou proudy kladně orientovaných výstupů, I_3 a I_5 jsou proudy ze záporných výstupů.

Přímo prvek MO-CF není na trhu dosud dostupný, ale k jeho realizaci lze použít univerzální obvod UCC (Universal Current Conveyor) [9], který je multifunkční. Proto jsou jeho vlastnosti mírně omezeny, kdy šířka pásma mezi vstupem a výstupy je asi 40 MHz. Zapojení prvku UCC ve funkci MO-CF je možné

nalézt na obr. 1.10. V simulačním programu SNAP [7], který budu dále používat, je prvek MO-CF označován jako MCMI.



Obr. 1.9: Schematická značka MO-CF



Obr. 1.10: Realizace MO-CF pomocí UCC

3 NÁVRHOVÉ METODY

3.1 Metoda autonomního obvodu

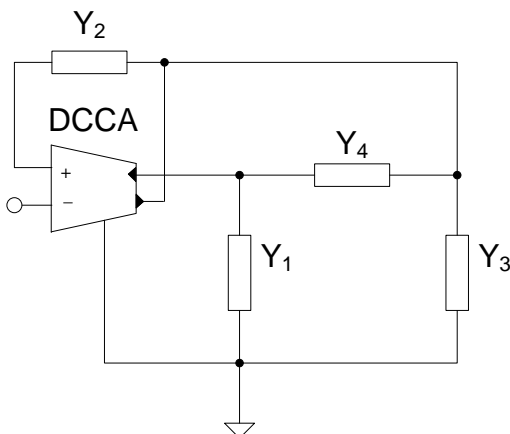
Pro hledání autonomních obvodů pracujících v čistě proudovém módu, postupujeme dle následujících kroků [4][6]:

- Připojíme admitanční síť k aktivnímu prvku a hledáme jednodušší řešení pro zvolený počet pasivních prvků. Úplná admitanční síť musí obsahovat $n(m+1)$ uzlů, kde n je počet aktivních prvků a m počet bran aktivního prvku.
- Vypočteme charakteristickou rovnici autonomního obvodu, což budeme provádět pro usnadnění práce v programu SNAP.
- Zvolíme přenosové koeficienty aktivního prvku, čímž dosáhneme zjednodušení charakteristické rovnice při dodržení jedné z podmínek stability, že jednotlivé členy musí být kladné.
- V případě návrhu říditelného filtru necháme vhodné koeficienty nezvolené, aby pomocí nich bylo později možné nastavovat např. činitel jakosti.
- Nahradíme za obecné admitance konkrétní pasivní prvky (rezistory a kapacitory).
- Určíme umístění vstupních a výstupních bran. Proudové vstupy se zapojují do uzlu a proudové výstupy do smyčky, přičemž různým zapojením vstupů a výstupů lze dosáhnout vícera přenosových funkcí – multifunkční filtr.
- Na závěr vypočteme pomocí SNAPu hledanou přenosovou funkci.

4 VLASTNÍ NÁVRH

4.1 Kmitočtové filtry s jedním aktivním prvkem

Nejprve se zaměříme na filtry s jedním aktivním prvkem, kterým bude říditelný proudový zesilovač (kapitola 2.1). Jedná se o první navržený obvod se čtyřmi pasivními a jedním aktivním prvkem, který je naznačen na obr. 4.1.



Obr. 4.1: Autonomní obvod s jedním DCCA

Charakteristickou rovnicí tohoto autonomního obvodu je:

$$\mathbf{D} = \mathbf{Y}_1\mathbf{Y}_2 + \mathbf{Y}_1\mathbf{Y}_3 + \mathbf{Y}_1\mathbf{Y}_4 + \mathbf{Y}_3\mathbf{Y}_4 + \mathbf{Y}_2\mathbf{Y}_4 - \mathbf{Y}_1\mathbf{Y}_2\mathbf{A} = 0, \quad (4.1)$$

kde \mathbf{Y}_X jsou obecné admitance a \mathbf{A} zesílení DCCA.

Z rovnice (4.1) je jasné, že zvolením $\mathbf{A} = 1$ zjednodušíme charakteristickou rovnici, ovšem zbavíme se možnosti využít zesílení obvodové prvku DCCA k řízení filtru. Zjednodušený tvar je

$$\mathbf{D} = \mathbf{Y}_1\mathbf{Y}_3 + \mathbf{Y}_1\mathbf{Y}_4 + \mathbf{Y}_3\mathbf{Y}_4 + \mathbf{Y}_2\mathbf{Y}_4 = 0, \quad (4.2)$$

Dále nahradíme obecné admitance skutečnými pasivními prvky, přičemž je nezbytné je volit tak, abychom ve výsledné rovnici dostali všechny mocniny \mathbf{p} . Možnosti, jak toho dosáhnout shrnuje tab. 4.1.

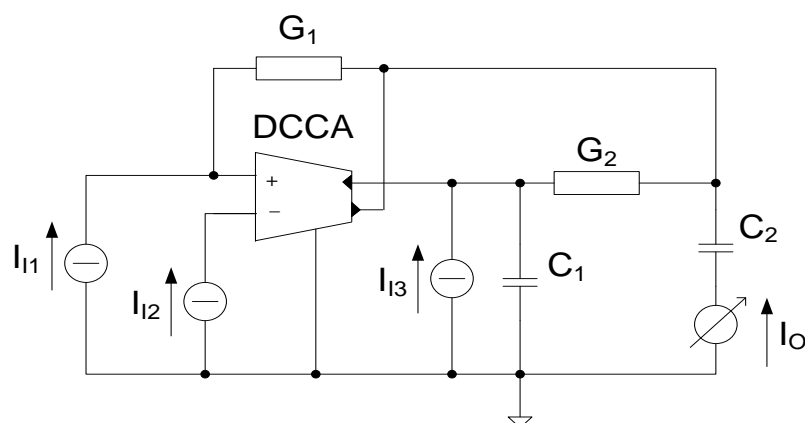
Tab. 4.1: Přehled variant voleb pasivních prvků obvodu s jedním DCCA

VARIANTA	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4
A	G_1	pC_1	G_2	pC_2
B	pC_1	G_1	pC_2	G_2

Zvolil jsem variantu B a po dosazení do (4.2) dostaneme rovnici (4.3).

$$D = G_1 G_2 + p(C_1 G_2 + C_2 G_1) + p^2 C_1 C_2, \quad (4.3)$$

Na obr. 4.2 vidíme, jak bude obvod vypadat po nahrazení obecných admitancí reálnými pasivními prvky.



Obr. 4.2: Výsledné zapojení filtračního obvodu s jedním DCCA

Tento obvod může vykonávat dvě přenosové funkce a to horní a pásmovou propust, přičemž HP v invertované tak i neinvertované formě. Přenosové funkce jsou:

$$\frac{I_O}{I_{I1}} = -\frac{p^2(C_1 C_2)}{D}, \quad (4.4)$$

$$\frac{I_O}{I_{I2}} = \frac{p^2(C_1 C_2)}{D}, \quad (4.5)$$

$$\frac{I_O}{I_{I3}} = -\frac{pC_2G_2}{D}, \quad (4.6)$$

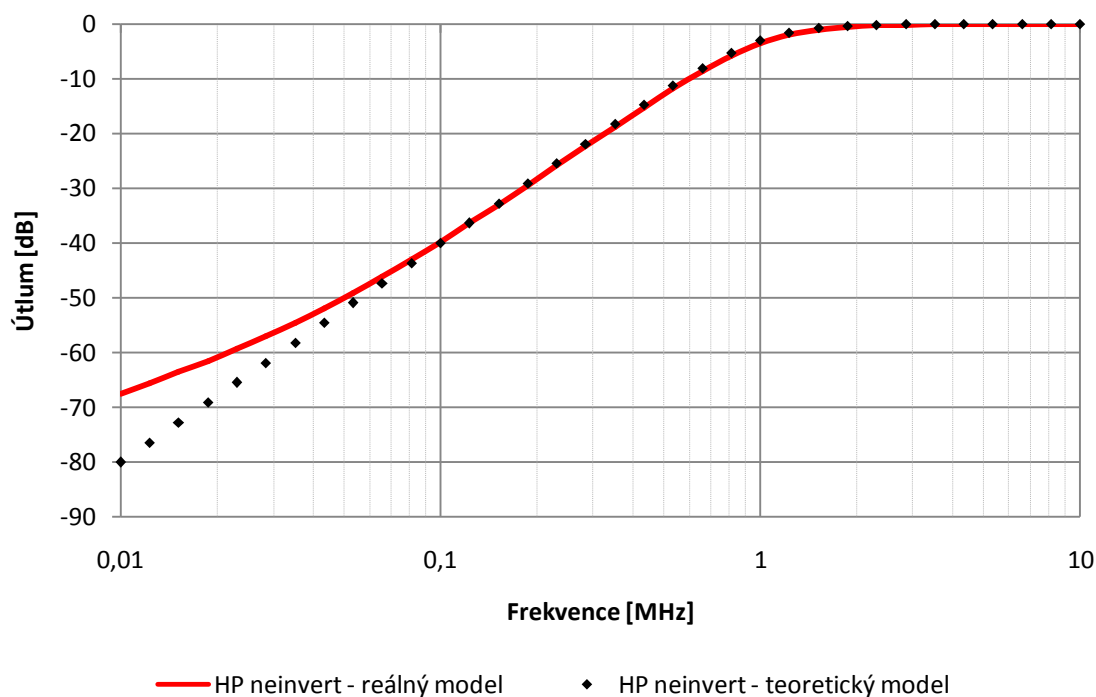
kde I_O , I_{I1} , I_{I2} a I_{I3} jsou výstupní a vstupní snímané proudy, D charakteristická rovnice (4.3).

Posledním bodem pro návrh obvodu je určení hodnot jednotlivých součástí pasivních prvků, abychom následně mohli simulovat jeho vlastnosti. Hodnoty vypočteme pomocí vzorců 1.9 a 1.10 a výsledky jsou uvedeny v tab. 4.2. Jako výchozí byl zvolen mezní kmitočet $f_0 = 1\text{MHz}$, kvalita jakosti $Q = 0,707$ a hodnoty kondenzátorů $C_1 = C_2 = 300\text{pF}$.

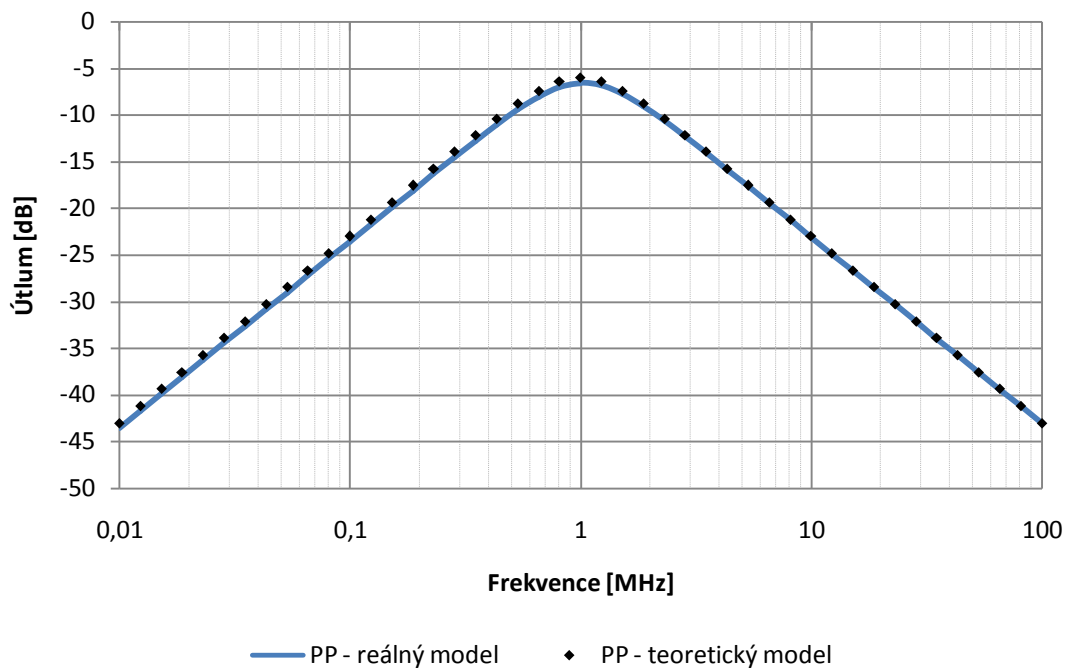
Tab. 4.2: Přehled hodnot pasivních prvků obvodu s jedním DCCA

C_1 [pF]	C_2 [pF]	G_1 [μS]	R_1 [k Ω]	G_2 [μS]	R_2 [k Ω]	f_0 [MHz]	Q [-]
300	300	2670	0,375	1333	0,75	1	0,707

Výsledné simulace přenosových funkcí prvního obvodu jsou na obr. 4.3 a obr. 4.4, přičemž první zmíněná je horní propust a druhá pásmová propust.



Obr. 4.3: Graf neinvertované HP obvodu s DCCA



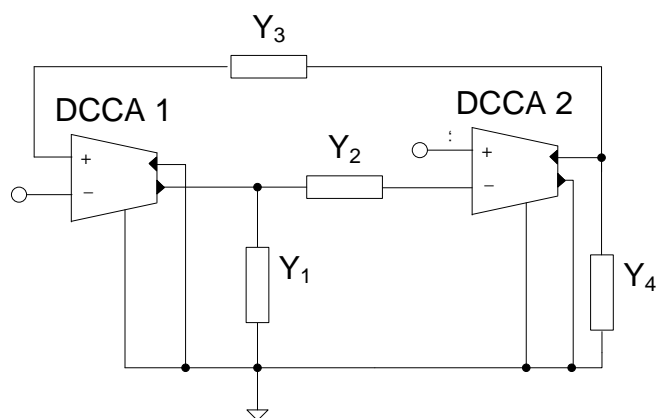
Obr. 4.4: Graf PP obvodu s DCCA

Kmitočtový filtr druhého řádu s jedním aktivním proudovým zesilovačem může být využit jako horní či pásmová propust. Dle simulací v OrCadu, jsem použil hodnoty pasivních prvků (tab. 4.2) tak, aby reálná charakteristika filtru byla co nejvíce shodná s charakteristikou teoretického modelu. Přenosové charakteristiky invertované a neinvertovaná HP jsou shodné, proto jsem uvedl jen jeden graf. Mezní frekvence je 1,068MHz, pokles na dekádu je 37,4dB. Výrazná odchylka se projevila na nízkých frekvencích. Ta je způsobena reálnou výstupní impedancí na kladném výstupu prvku DCCA. Pásmová propust tohoto filtru má téměř ideální průběh, když mezní frekvence je přesně 1MHz. Pokles na dekádu je 19,6dB. Z grafů je patrná dobrá shoda teoretických a reálných průběhů propustí a proto lze tento filtr považovat za dobrý.

4.2 Kmitočtový filtr se dvěma aktivními prvky DCCA

4.2.1 První odvod se dvěma DCCA

Dále byly analyzovány obvody se dvěma aktivními prvky. V prvním případě se dvěma říditelnými zesilovači, jehož navržené zapojení je na obr. 4.5.



Obr. 4.5: První autonomní obvod se dvěma DCCA

Charakteristická rovnice obvodu je:

$$D = Y_1 Y_3 + Y_1 Y_4 + Y_2 Y_3 + Y_2 Y_4 - Y_2 Y_3 A_1 A_2 = 0, \quad (4.7)$$

kde Y_X jsou obecné admittance a A_1, A_2 zesílení dvou DCCA.

Pro zjednodušení rovnice zvolíme zesílení $A_1 = 1$ a $A_2 = 1$.

$$D = Y_1 Y_3 + Y_1 Y_4 + Y_2 Y_4 = 0, \quad (4.8)$$

Dále postupujeme stejně jako v předchozím případě, tedy zvolením pasivních prvků za obecné admittance. Možnosti, jak toho dosáhnout, jsou shrnuty v tab. 4.3.

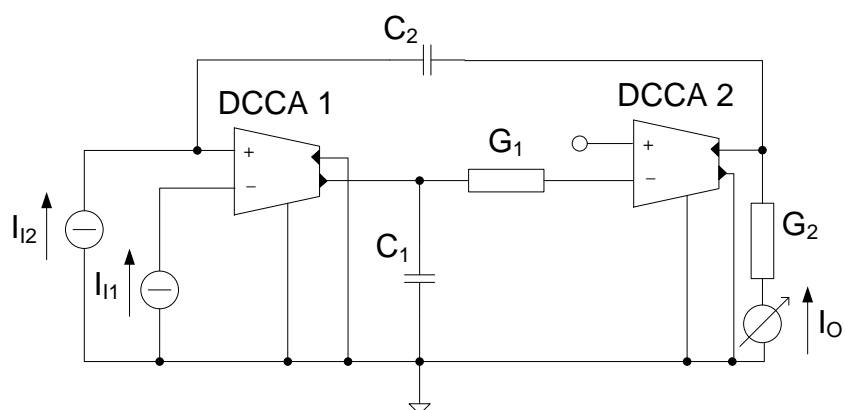
Tab. 4.3: Přehled variant voleb pasivních prvků prvního obvodu se dvěma DCCA

VARIANTA	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4
A	pC_1	G_1	pC_2	G_2
B	G_1	pC_1	G_2	pC_2

Z tab. 4.3 jsem zvolil variantu A z čehož plyne rovnice:

$$D = G_1 G_2 + pC_1 G_2 + p^2 C_1 C_2, \quad (4.9)$$

Po nahrazení obecných admitancí je výsledné zapojení na obr. 4.6.



Obr. 4.6: Výsledné zapojení prvního obvodu se dvěma DCCA

Budící proud zdroje může být zapojen do invertovaného nebo neinvertovaného vstupu prvku DCCA 1. V tomto případě však nejde o multifunkční filtr a zapojení dokáže realizovat jen DP.

$$\frac{I_O}{I_{I1}} = \frac{G_1 G_2}{D}, \quad (4.10)$$

$$\frac{I_O}{I_{I2}} = -\frac{G_1 G_2}{D}, \quad (4.11)$$

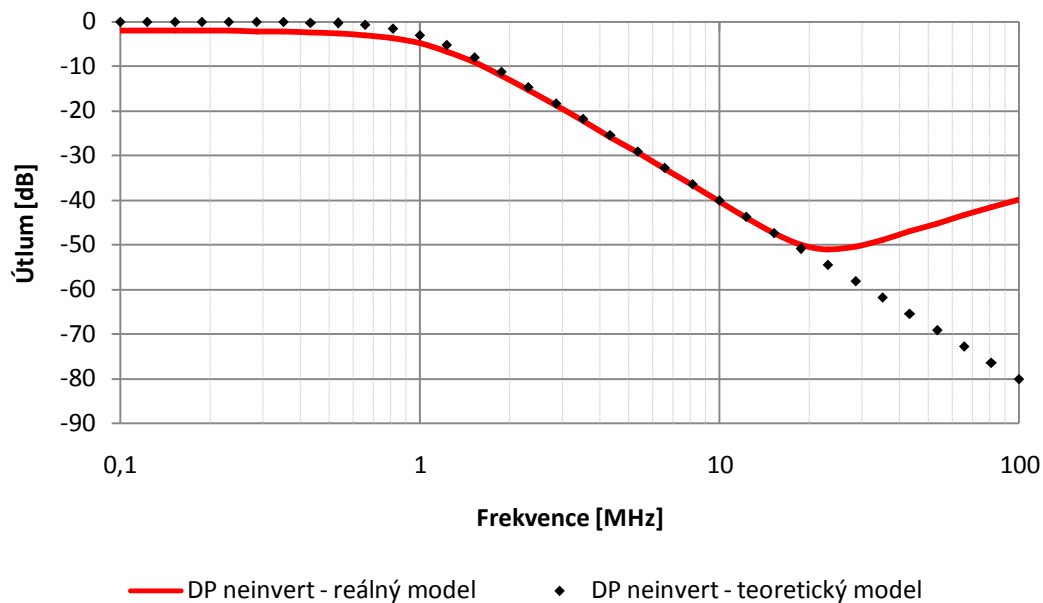
kde I_O , I_{I1} a I_{I2} jsou výstupní a vstupní snímané proudy.

Předposledním bodem pro návrh obvodu je určení hodnot jednotlivých součástek pasivních prvků, abychom následně mohli simulovat jeho vlastnosti. Hodnoty vypočteme pomocí vzorců (1.9) a (1.10) a jsou shrnuty v tab. 4.4. Jako výchozí byl zvolen mezní kmitočet $f_0 = 1\text{MHz}$, kvalita jakosti $Q = 0,707$ a hodnoty kondenzátorů $C_1 = 300\text{pF}$ a $C_2 = 50\text{pF}$.

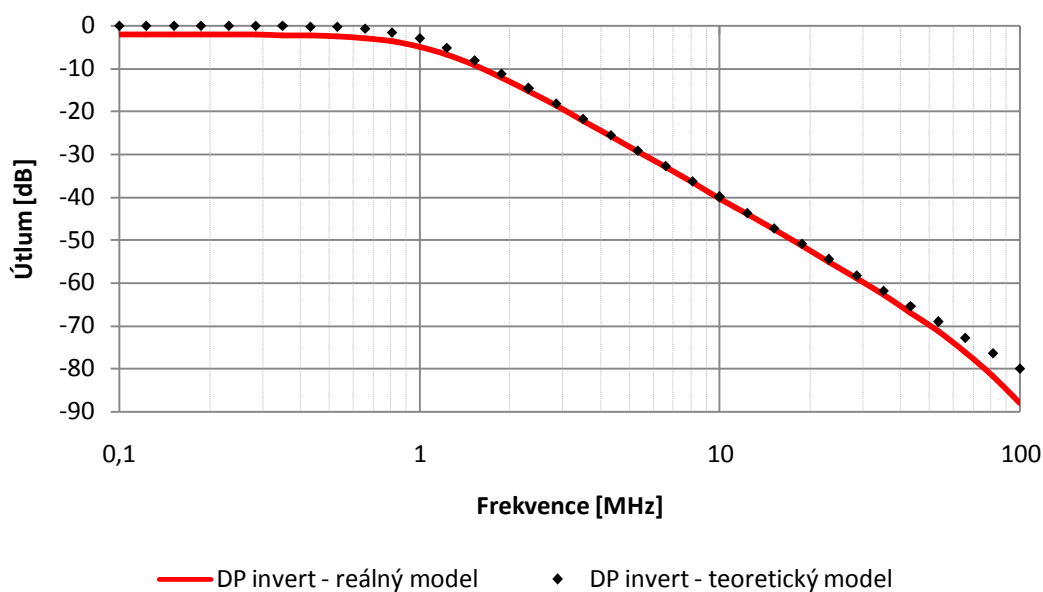
Tab. 4.4: Přehled hodnot pasivních prvků prvního obvodu se dvěma DCCA

C_1 [pF]	C_2 [pF]	G_1 [μS]	R_1 [k Ω]	G_2 [μS]	R_2 [k Ω]	f_0 [MHz]	Q [-]
300	50	1333	0,75	444	2,25	1	0,707

Výsledky simulací dolních propustí jsou na obr. 4.7 a 4.8.



Obr. 4.7: Graf neinvertované DP prvního obvodu se dvěma DCCA

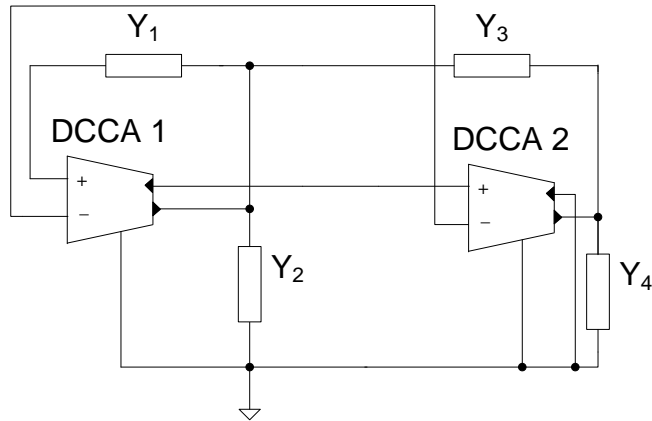


Obr. 4.8: Graf invertované DP prvního obvodu se dvěma DCCA

Na první pohled je patrná odlišnost mezi teoretickým a reálným průběhem u neinvertované dolní propusti. Odchylka nastává od 16MHz a je způsobena reálnou impedancí na neinvertovaném vstupu prvku DCCA 1. Mezní frekvence je 1,01MHz, pokles na dekádu je 38,3dB. Invertovaná DP naopak odpovídá mnohem lépe teoretickým předpokladům, kdy pokles na dekádu je 40,3dB, mezní kmitočet 1,012MHz, jenž můžeme považovat za velmi dobrý výsledek. Nevýhodou filtru je, že realizuje pouze DP.

4.2.2 Druhý obvod se dvěma DCCA

Nevýhodou předchozího zapojení se dvěma říditelnými zesilovači byla realizace pouze dolní propusti, proto byl navržen druhý obvod se dvěma DCCA, jehož autonomní zapojení je znázorněno na obr. 4.9.



Obr. 4.9: Druhý autonomní obvod se dvěma DCCA

Charakteristická rovnice obvodu je:

$$D = Y_1 Y_3 - Y_1 Y_3 A_1 + Y_1 Y_4 - Y_1 Y_4 A_1 + Y_2 Y_3 + Y_2 Y_4 + Y_3 Y_4 + Y_1 Y_3 A_1 A_2 = 0 \quad (4.12)$$

Rovnici (4.12) můžeme zjednodušit dosazením za $A_1 = 1$ a $A_2 = 1$.

$$D = Y_1 Y_3 + Y_2 Y_3 + Y_2 Y_4 + Y_3 Y_4 = 0, \quad (4.13)$$

Následně postupujeme opět stejným způsobem - zvolením pasivních prvků (tab. 4.5) za obecné admittance a především s přihlédnutím k realizovatelnosti filtru druhého řádu.

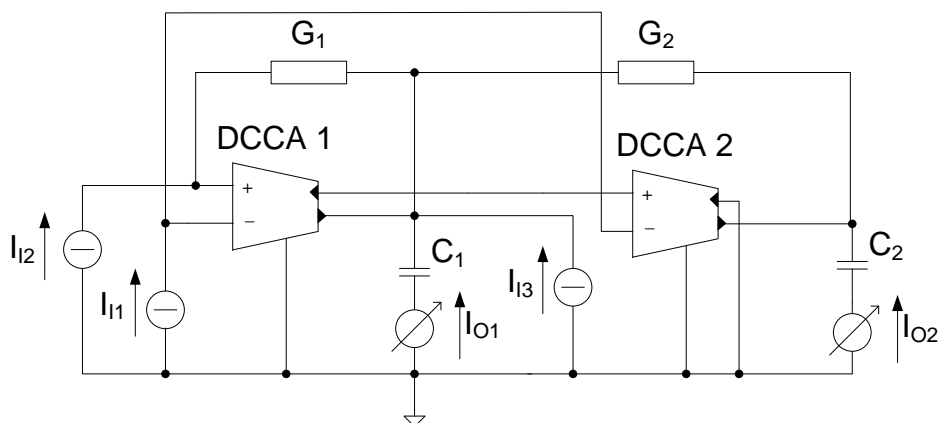
Tab. 4.5: Přehled variant voleb pasivních prvků druhého obvodu se dvěma DCCA

VARIANTA	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4
A	pC_1	G_1	pC_2	G_2
B	G_1	pC_1	G_2	pC_2

Z tabulky 4.5 jsem v tomto případě zvolil variantu B, z čehož plyne rovnice (4.14).

$$D = G_1 G_2 + p(C_1 G_2 + C_2 G_2) + p^2 C_1 C_2, \quad (4.14)$$

Výsledné zapojení pak vidíme na obr. 4.10.



Obr. 4.10: Výsledné zapojení druhého obvodu se dvěma DCCA

Podle zapojení vstupů a výstupů může obvod vykonávat dvě různé přenosové funkce. Jsou to horní propust v invertovaném i neinvertovaném zapojení a pásmová propust.

$$\frac{I_{O1}}{I_{I1}} = \frac{p^2(C_1 C_2)}{D}, \quad (4.15)$$

$$\frac{I_{O1}}{I_{I2}} = -\frac{p^2(C_1 C_2)}{D}, \quad (4.16)$$

$$\frac{I_{O2}}{I_{I3}} = \frac{p C_1 G_2}{D}, \quad (4.17)$$

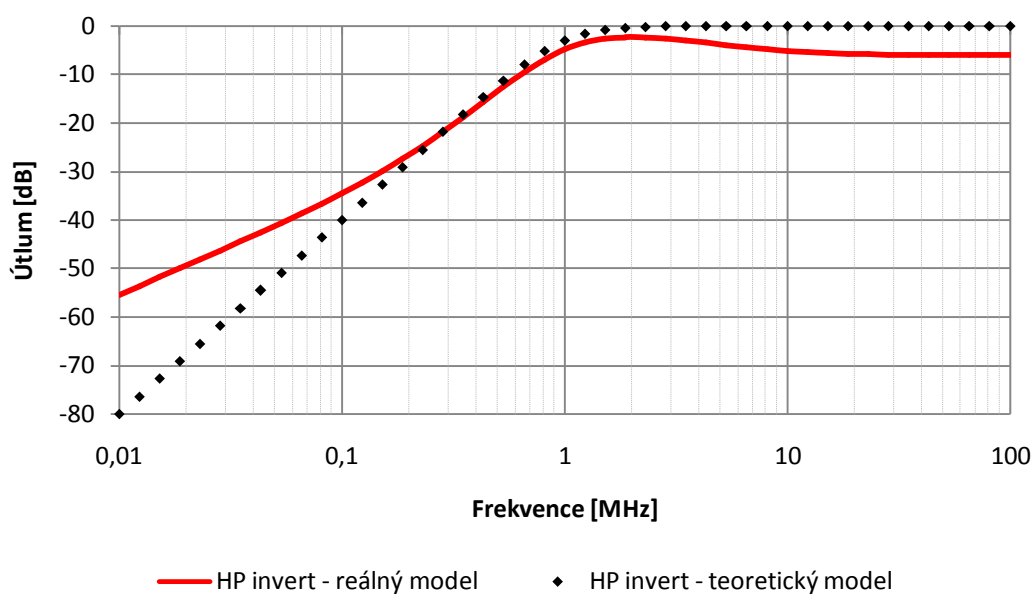
kde I_{O1} a I_{O2} , I_{I1} , I_{I2} a I_{I3} jsou výstupní a vstupní snímané proudy.

K provedení simulace v OrCadu jsem vypočetl hodnoty součástek pro stejnou mezní frekvenci a kvalitu jakosti, jako v předešlém případě. Výpočet jsem provedl s odlišnými hodnotami kondenzátorů oproti předešlému zapojení $C_1 = C_2 = 200\text{pF}$. Přehled hodnot součástek je uveden v tab. 4.6.

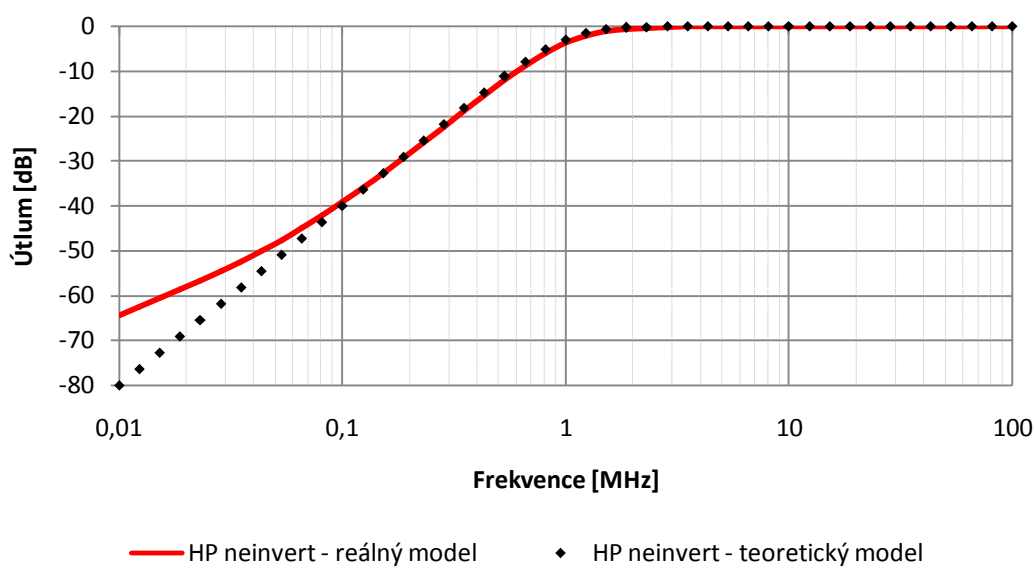
Tab. 4.6: Přehled hodnot pasivních prvků druhého obvodu se dvěma DCCA

C_1 [pF]	C_2 [pF]	G_1 [μ S]	R_1 [k Ω]	G_2 [μ S]	R_2 [k Ω]	f_0 [MHz]	Q [-]
200	200	1777	0,563	889	1,125	1	0,707

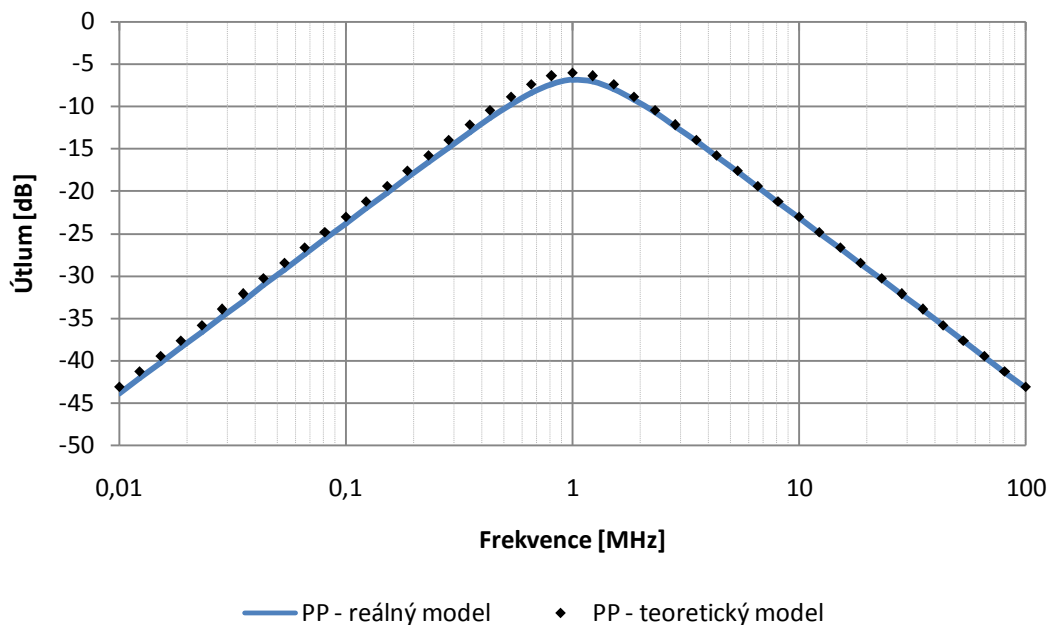
Výsledky simulací z programu OrCad jsou na obr. 4.11, 4.12, 4.13.



Obr. 4.11: Graf invertované HP druhého obvodu se dvěma DCCA



Obr. 4.12: Graf neinvertované HP druhého obvodu se dvěma DCCA

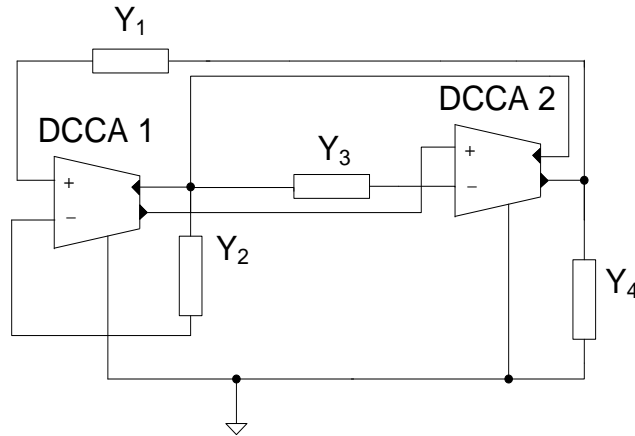


Obr. 4.13: Graf PP druhého obvodu se dvěma DCCA

Reálný průběh pásmové propusti je téměř shodný s teoretickým průběhem. Mezní kmitočet je přesně 1MHz a pokles na dekádu je 19,2dB. Neinvertovaná HP má mezní frekvenci 1,1MHz. Pokles na dekádu je 36,2dB. V nízkých kmitočtech dochází k odchylce od teoretického průběhu, která je zapříčiněna impedancí invertovaného výstupu DCCA 1. Zapojení HP do invertovaného vstupu je v praxi špatně použitelné, když mezní kmitočet je 644kHz a navíc je zde útlum i v přenosovém pásmu -6dB. To je dáno vlivem vstupní invertované impedance prvku DCCA 2. Odchylna od teoretického průběhu nastává také v nízkých kmitočtech. Ta je zapříčiněna impedancí invertovaného výstupu DCCA 1. Filtr vykazuje dobré vlastnosti především v zapojení jako PP.

4.2.3 Třetí obvod se dvěma DCCA

Další navržený obvod je opět vytvořen ze dvou DCCA a čtyř pasivních prvků. Jeho autonomní obvod je znázorněn na obr. 4.14.



Obr. 4.14: Třetí autonomní obvod se dvěma DCCA

Charakteristická rovnice obvodu má tvar

$$D = Y_1 Y_2 - Y_1 Y_2 A_1 - 2Y_1 Y_2 A_1 A_2 + Y_1 Y_3 - Y_1 Y_3 A_2 - 2Y_1 Y_3 A_1 A_2 + Y_2 Y_4 - Y_2 Y_4 A_1 - Y_2 Y_4 A_1 A_2 + Y_3 Y_4 - Y_3 Y_4 A_2 = 0 \quad (4.18)$$

Rovnici (4.18) můžeme zjednodušit dosazením za $A_1 = 1$ a $A_2 = 1$.

$$D = 2Y_1 Y_2 + 2Y_1 Y_3 + Y_2 Y_4 = 0, \quad (4.19)$$

Následně postupujeme opět stejným způsobem - zvolením pasivních prvků (tab. 4.7) za obecné admittance a především s přihlédnutím k realizovatelnosti filtru druhého řádu.

Tab. 4.7: Přehled variant voleb pasivních prvků třetího obvodu se dvěma DCCA

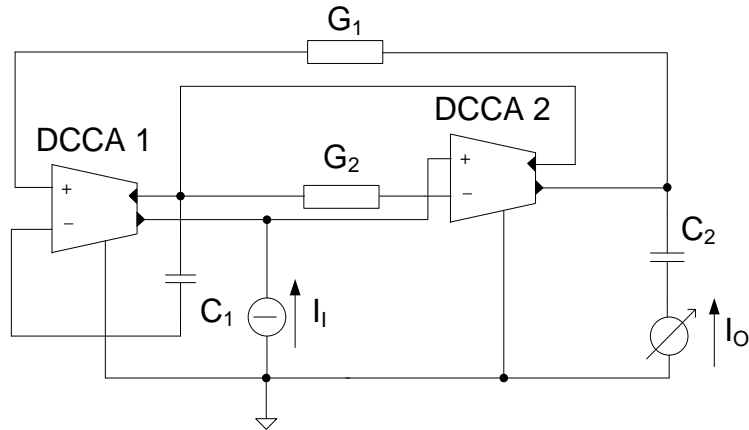
VARIANTA	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4
A	pC_1	G_1	pC_2	G_2
B	G_1	pC_1	G_2	pC_2

Z tab. 4.7 jsem zvolil variantu B, přičemž jsem přihlédl ke skutečnosti, že v druhém případě by byly připojeny kondenzátory do proudových vstupů DCCA a to

má v praxi většinou negativní důsledky na kmitočtovou charakteristiku. Charakteristická rovnice má tvar:

$$D = 2G_1G_2 + p(2C_1G_1) + p^2(C_1C_2), \quad (4.20)$$

Výsledné zapojení pak vidíme na obr. 4.15.



Obr. 4.15: Výsledné zapojení třetího obvodu se dvěma DCCA

Zapojení je možno využít pouze jako filtr typu pásmová propust.

$$\frac{I_O}{I_I} = \frac{pC_2G_2}{D}, \quad (4.21)$$

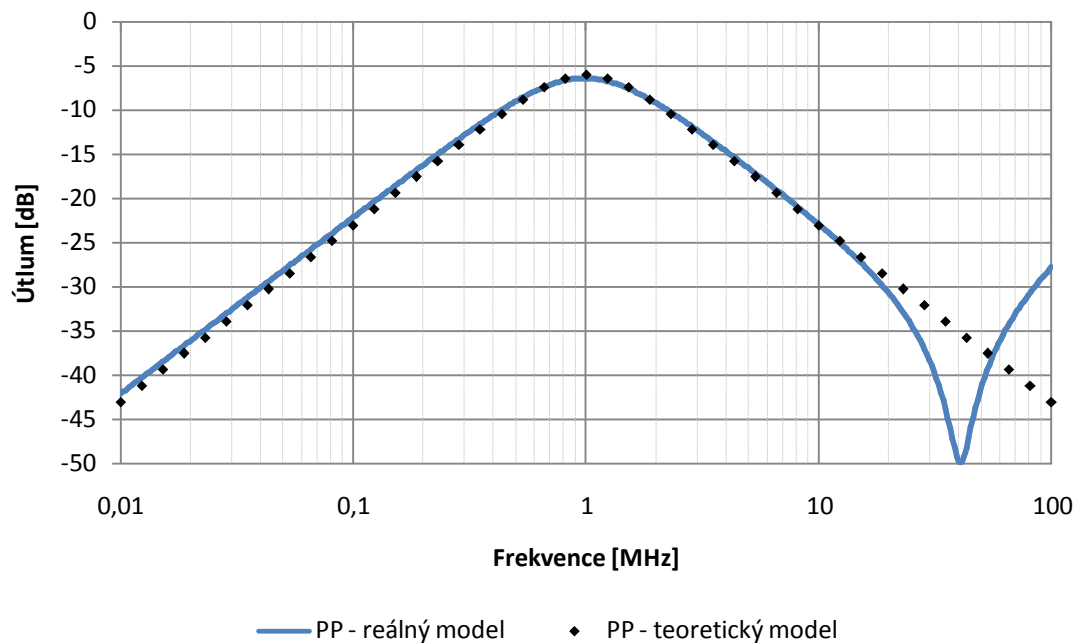
kde I_O, I_I jsou výstupní a vstupní snímané proudy.

Předposledním bodem pro návrh obvodu je určení hodnot jednotlivých součástek pasivních prvků, abychom následně mohli simulovat jeho vlastnosti. Hodnoty jsou shrnuty v tab. 4.8. Jako výchozí byl zvolen mezní kmitočet $f_0 = 1\text{MHz}$, kvalita jakosti $Q = 0,707$ a hodnoty kondenzátorů $C_1 = 400\text{pF}$ a $C_2 = 50\text{pF}$.

Tab. 4.8: Přehled hodnot pasivních prvků třetího obvodu se dvěma DCCA

C_1 [pF]	C_2 [pF]	G_1 [μS]	R_1 [k Ω]	G_2 [μS]	R_2 [k Ω]	f_0 [MHz]	Q [-]
400	50	222	4,5	1777	0,563	1	0,707

Výsledky simulace pásmové propusti je na obr. 4.16.

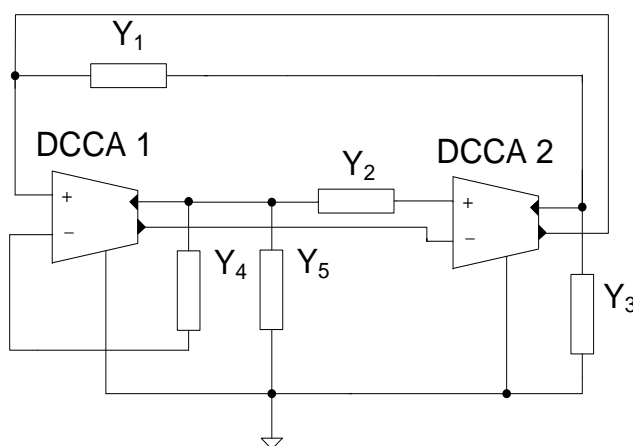


Obr. 4.16: Graf PP třetího obvodu se dvěma DCCA

Třetí obvod funguje jako pásmová propust. Jeho mezní frekvence je 1MHz, ovšem propustné pásmo je posunuto do hodnoty -6dB. To je zapříčiněno činitelem p charakteristické rovnice, kde je činitel dvojnásobný ($p2C_1G_1$). Útlum na dekádu je 19,1dB. Na frekvenci 43,3MHz nastala nula v charakteristice.

4.2.4 Čtvrtý obvod se dvěma DCCA

Poslední navržený obvod, kde jsou použity dva proudové zesilovače a v tomto případě pět pasivních prvků, je na obr. 4.17.



Obr. 4.17: Čtvrtý autonomní obvod se dvěma DCCA

Charakteristická rovnice tohoto obvodu je:

$$D = Y_1 Y_4 - Y_1 Y_4 A_1 - Y_3 Y_4 A_1 + Y_3 Y_4 + Y_3 Y_4 A_1 A_2 + Y_1 Y_2 + Y_1 Y_5 + Y_2 Y_3 + 2Y_2 Y_3 A_1 A_2 + Y_3 Y_5 + Y_3 Y_5 A_1 A_2 = 0 \quad (4.22)$$

Rovnici (4.22) můžeme zjednodušit dosazením za $A_1 = 1$ a $A_2 = 1$.

$$D = Y_1 Y_2 + Y_1 Y_5 + 3Y_2 Y_3 + Y_3 Y_4 + 2Y_3 Y_5 = 0, \quad (4.23)$$

Následně postupujeme opět stejným způsobem - zvolením pasivních prvků (tab. 4.9) za obecné admitance a především s přihlédnutím k realizovatelnosti filtru druhého řádu.

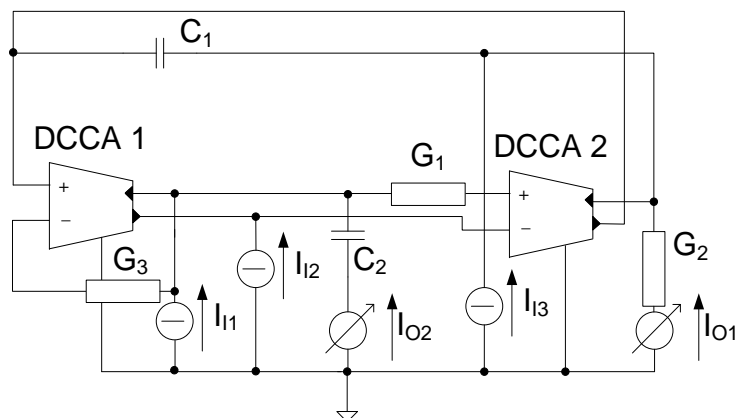
Tab. 4.9: Přehled variant voleb pasivních prvků čtvrtého obvodu se dvěma DCCA

VARIANTA	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5
A	pC_1	pC_2	G_1	G_2	G_3
B	pC_1	G_1	G_2	G_3	pC_2
C	G_1	G_2	pC_1	pC_2	G_3
D	G_1	G_2	pC_1	G_3	pC_2
E	G_1	pC_1	pC_2	G_2	G_3

Z tab. 4.9 jsem zvolil variantu B, přičemž jsem přihlédl ke skutečnosti, že při variantách A, B by byly připojeny kondenzátory do proudových vstupů DCCA a to má v praxi většinou negativní důsledky na kmitočtovou charakteristiku. Charakteristická rovnice má tvar:

$$D = 3G_1 G_2 + G_2 G_3 + p(C_1 G_1 + 2C_2 G_2) + p^2(C_1 C_2), \quad (4.24)$$

Výsledné zapojení bude vypadat tak, jak naznačeno na obr. 4.18.



Obr. 4.18: Výsledné zapojení čtvrtého obvodu se dvěma DCCA

V tomto případě se jedná o multifunkční filtr, který podle zapojení proudových vstupů a výstupů může pracovat jako DP (4.25), PP (4.26) i HP (4.27).

$$\frac{I_{O1}}{I_{I1}} = \frac{G_2(G_1+G_3)}{D}, \quad (4.25)$$

$$\frac{I_{O2}}{I_{I2}} = \frac{-pC_2G_2}{D}, \quad (4.26)$$

$$\frac{I_{O2}}{I_{I3}} = \frac{p^2(C_1C_2)}{D}, \quad (4.27)$$

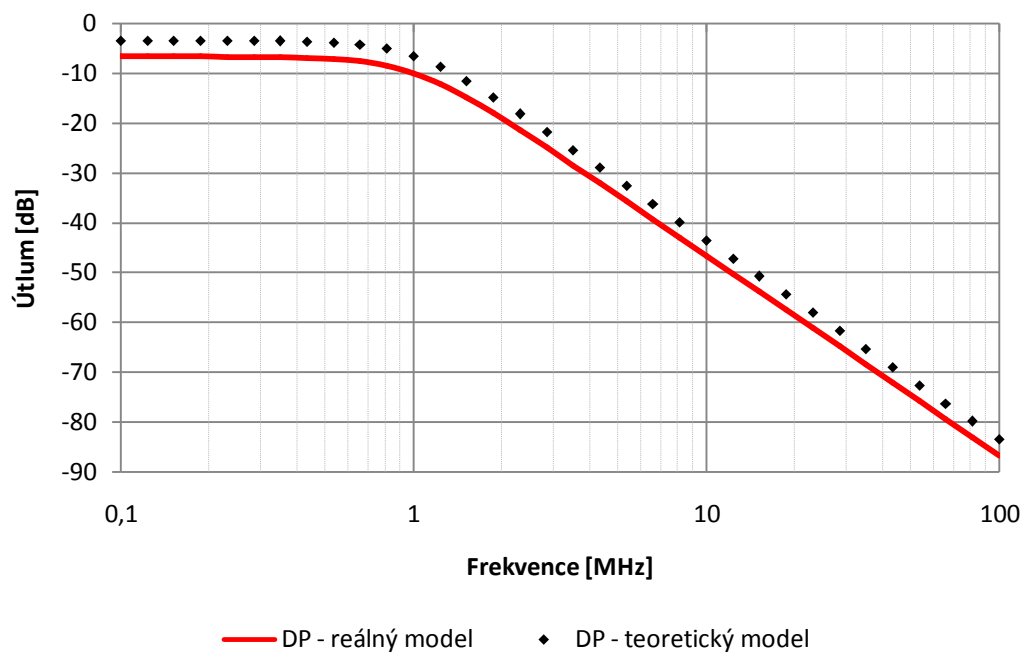
kde I_{O1} , I_{O2} , I_{I1} , I_{I2} , I_{I3} jsou výstupní a vstupní snímané proudy.

K dokončení návrhu je nezbytné vypočítat velikosti pasivních součástí pro zvolený mezní kmitočet a kvalitu jakosti filtru, jejichž velikosti jsou v tab. 4.10. V tomto případě jsem, oproti ostatním zapojením, zvolil hodnoty rezistorů respektive vodivostí $G_1 = 1677\mu\text{S}$, $G_2 = 200\mu\text{S}$, $G_3 = 5000\mu\text{S}$, přičemž ty byly zvoleny tak, abych dospěl k co možná největší shodě mezi teoretickou a reálnou charakteristikou filtru.

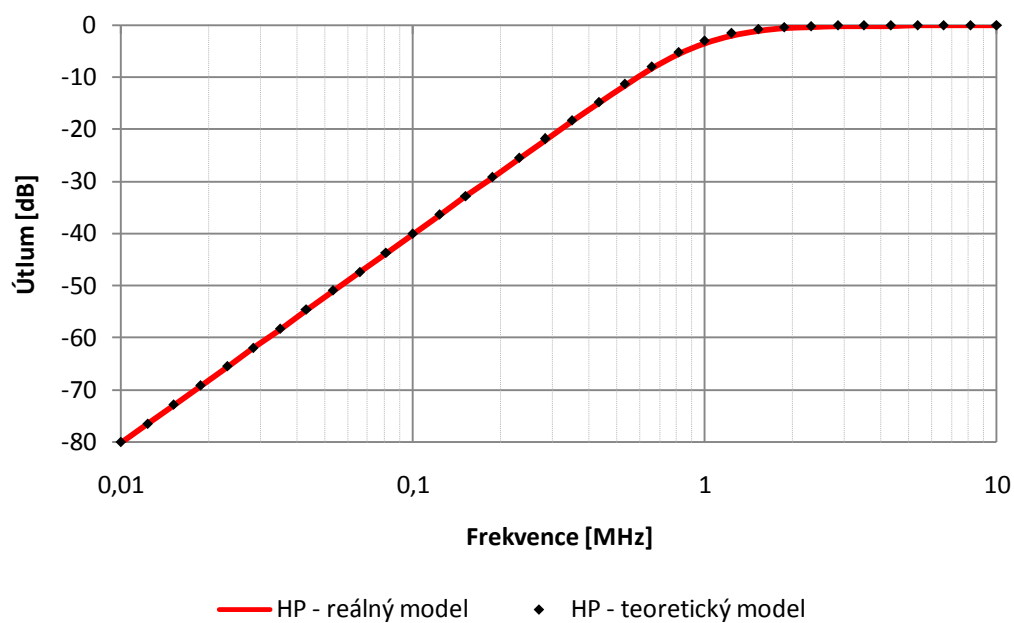
Tab. 4.10: Přehled hodnot pasivních prvků čtvrtého obvodu se dvěma DCCA

G_1 [μS]	G_2 [μS]	G_3 [μS]	f_0 [MHz]	Q [-]
1677	200	5000	1	0,707
R_1 [k Ω]	R_2 [k Ω]	R_3 [k Ω]	C_1 [pF]	C_2 [pF]
0,6	5	0,2	213	238

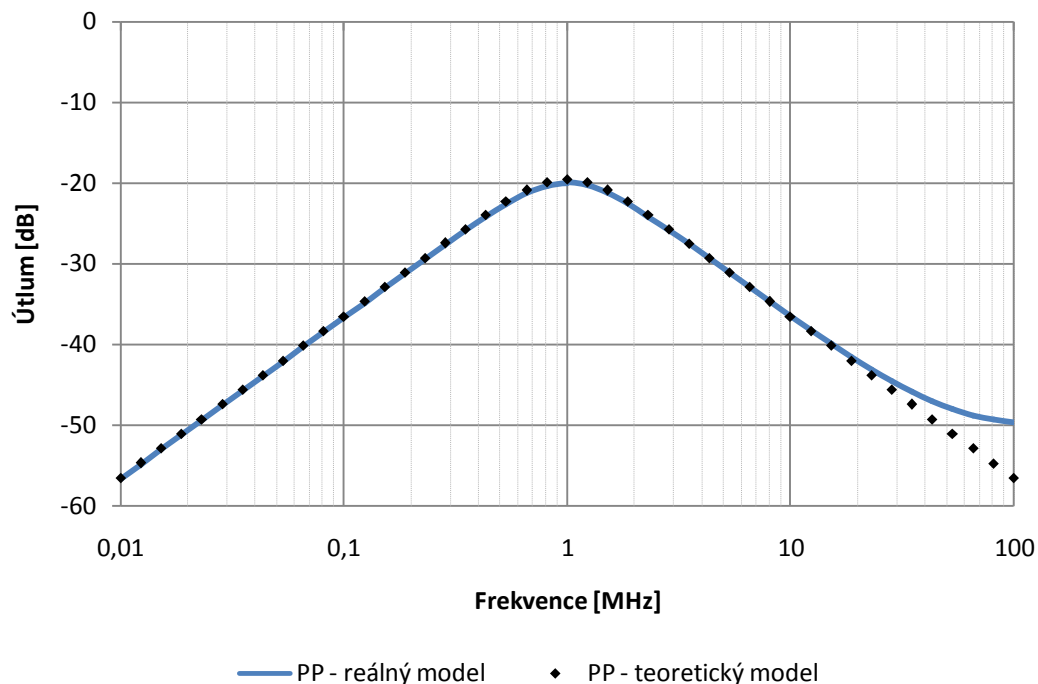
Výsledný charakteristiky jsou znázorněny na obr. 4.19, 4.20, 4.21.



Obr. 4.19: Graf DP čtvrtého obvodu se dvěma DCCA



Obr. 4.20: Graf HP čtvrtého obvodu se dvěma DCCA



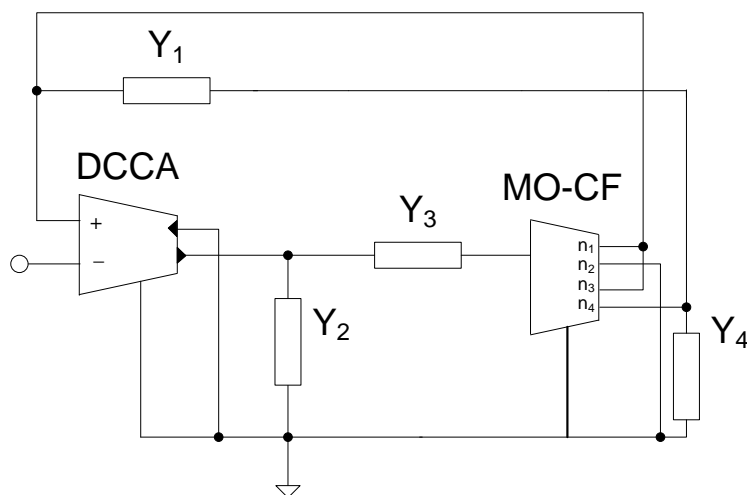
Obr. 4.21: Graf PP čtvrtého obvodu se dvěma DCCA

Podíváme-li se na DP, zjistíme, že hodnoty reálné charakteristiky oproti teoretické jsou o 3dB nižší. Abych dosáhl požadovaného mezního kmitočtu, upravím hodnotu $C_1 = 300\text{pF}$, poté je její hodnota 1,06MHz. Útlum na dekádu je 40dB. U HP znovu doladím hodnotu $C_1 = 300\text{pF}$, abych dosáhl požadované mezní frekvence. S touto úpravou je 1,05MHz a pokles na dekádu 39,6dB. V tomto zapojení je reálný průběh téměř shodný s teoretickým. Abych dosáhl požadované mezní frekvence u reálného modelu PP, musím poupravit hodnotu kondenzátoru $C_1 = 300\text{pF}$. Poté je mezní kmitočet přesně 1MHz. Útlum na dekádu je 19,8dB. Na velmi vysokých frekvencích se objevila odchylka od teoretického průběhu, která je zapříčiněna reálnou impedancí neinvertovaného výstupu DCCA 1. Bohužel je tato propust velmi špatně použitelná, jelikož její charakteristika je posunuta o -20dB.

4.3 Kmitočtový filtr s kombinací dvou aktivních prvků

4.3.1 První obvod s kombinací prvků DCCA a MO-CF

Další analyzované obvody využívají znovu dvou aktivních prvků, tentokrát ale kombinaci DCCA s vícevýstupovým proudovým sledovačem MO-CF. První zapojení je naznačeno na obr. 4.22.



Obr. 4.22: Autonomní obvod s prvky DCCA a MO-CF

Charakteristická rovnice tohoto obvodu je:

$$D = Y_1 Y_2 + Y_1 Y_3 + Y_1 Y_3 A n_1 + Y_1 Y_3 A n_3 + Y_1 Y_3 A n_4 + Y_2 Y_4 + Y_3 Y_4 + Y_3 Y_4 A n_1 + Y_3 Y_4 A n_3 = 0, \quad (4.28)$$

kde n_1, n_3, n_4 jsou koeficienty přenosu.

Nyní zvolíme koeficienty vícevýstupového proudového sledovače n_1, n_3, n_4 a tím dosáhneme záporného či kladného přenosu na jeho výstupech a velikost zesilovacího činitele A . Zvolením $n_1 = -1, n_2 = -1, n_3 = 1, n_4 = 1$ a velikosti zesilovacího činitele $A = 1$ bude charakteristická rovnice vypadat takto:

$$D = Y_1 Y_2 + Y_2 Y_4 + Y_3 Y_4 + 2 Y_1 Y_3 = 0, \quad (4.29)$$

Nyní nahradíme obecné admittance reálnými pasivními prvky. Máme více možností, jak dosáhnout filtru druhého řádu, viz tab. 4.11.

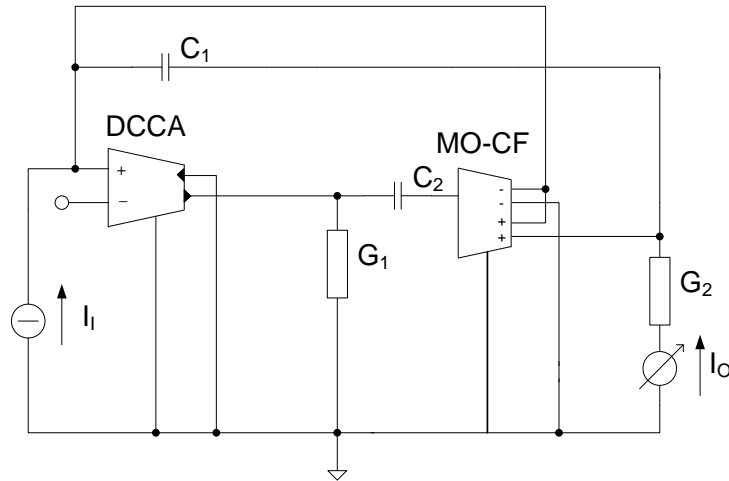
Tab. 4.11: Přehled variant voleb pasivních prvků prvního obvodu s DCCA a MO-CF

VARIANTA	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4
A	G_1	G_2	pC_1	pC_2
B	pC_1	pC_2	G_1	G_2
C	G_1	pC_1	G_2	pC_2
D	pC_1	G_1	pC_2	G_2

Zvolím variantu D, která je jediná řešitelná s přihlédnutím na reálné možnosti velikostí kondenzátorů a rezistorů a výsledná charakteristická rovnice bude:

$$D = G_1 G_2 + p(C_1 G_1 + C_2 G_2) + p^2 2C_1 C_2, \quad (4.30)$$

Výsledné zapojení je znázorněno na obr. 4.23.



Obr. 4.23: Výsledné zapojení prvního obvodu s DCCA a MO-CF

V tomto případě nejde o multifunkční filtr, ovšem zapojení dokáže realizovat jen pásmovou propust.

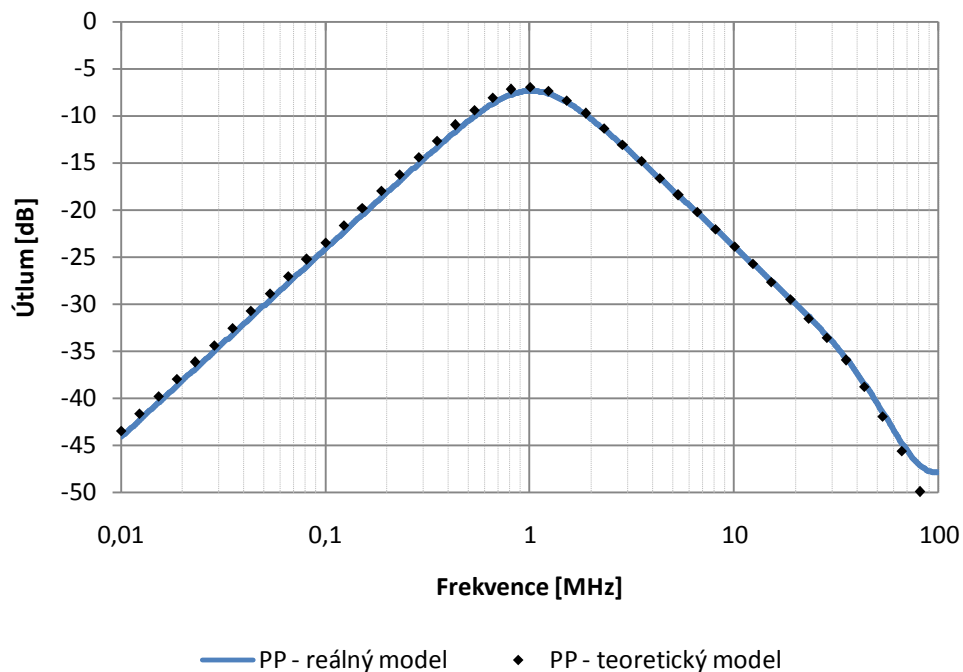
$$\frac{I_O}{I_I} = \frac{p(C_2 G_2)}{D}, \quad (4.31)$$

Posledním bodem pro návrh obvodu je určení hodnot jednotlivých součástí pasivních prvků, abychom následně mohli simulovat jeho vlastnosti. Hodnoty vypočteme pomocí vzorců 1.9 a 1.10 a výsledky jsou uvedeny v tab. 4.12. Jako výchozí byl zvolen mezní kmitočet $f_0 = 1\text{MHz}$, kvalita jakosti $Q = 0,707$ a hodnoty vodivosti $G_1 = 1000\text{pF}$ a $G_2 = 200\text{pF}$.

Tab. 4.12: Přehled hodnot pasivních prvků prvního obvodu s DCCA a MO-CF

C_1 [pF]	C_2 [pF]	G_1 [μS]	R_1 [k Ω]	G_2 [μS]	R_2 [k Ω]	f_0 [MHz]	Q [-]
22,9	111	1000	1	200	5	1	0,707

Výsledná charakteristika pásmové propusti je znázorněna na obr. 4.24.

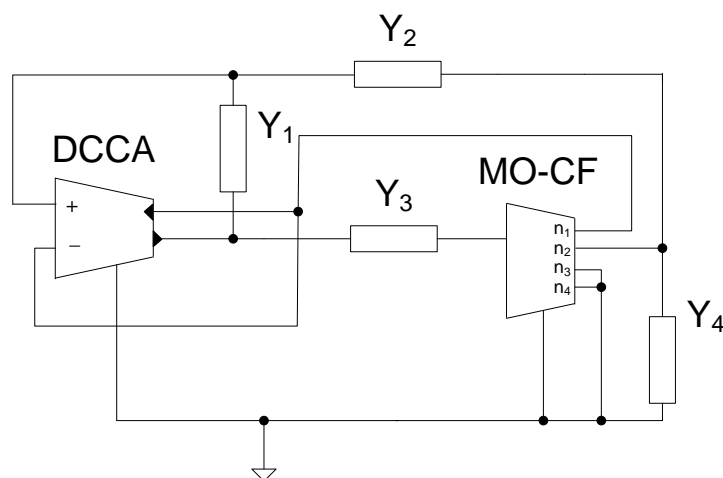


Obr. 4.24: Graf PP prvního obvodu s DCCA a MO-CF

První filtr s kombinací DCCA a MO-CF funguje jako pásmová propust. Mezní frekvence odečtená z grafu je 1 MHz, útlum na dekádu je 19,6 dB. To vše odpovídá teoretickým předpokladům. Nevýhodou tohoto kmitočtového filtru je funkčnost pouze jako PP.

4.3.2 Druhý obvod s kombinací prvků DCCA a MO-CF

Druhý obvod s kombinací prvků DCCA a MO-CF. Zapojení autonomního obvodu je znázorněno na obr. 4.25.



Obr. 4.25: Druhý autonomní obvod s prvky DCCA a MO-CF

Jeho charakteristickou rovnicí je:

$$\mathbf{D} = -\mathbf{Y}_1\mathbf{Y}_2 + 2\mathbf{Y}_1\mathbf{Y}_2A - \mathbf{Y}_1\mathbf{Y}_4 + 2\mathbf{Y}_1\mathbf{Y}_4A - \mathbf{Y}_2\mathbf{Y}_3 + \mathbf{Y}_2\mathbf{Y}_3A + \mathbf{Y}_2\mathbf{Y}_3An_1 - \mathbf{Y}_2\mathbf{Y}_3An_2 - \mathbf{Y}_3\mathbf{Y}_4 + \mathbf{Y}_3\mathbf{Y}_4A + \mathbf{Y}_3\mathbf{Y}_4An_1 = 0, \quad (4.32)$$

kde n_1, n_2 jsou koeficienty přenosu.

Pro zjednodušení charakteristické rovnice 4.32 určíme kladný a záporný přenos vícevýstupového sledovače. Zvolením $n_1 = 1$ a $n_2 = 1$ a zesílení u DCCA $A = 1$, nám vznikne rovnice 4.33.

$$\mathbf{D} = \mathbf{Y}_1\mathbf{Y}_2 + \mathbf{Y}_1\mathbf{Y}_4 + \mathbf{Y}_3\mathbf{Y}_4 = 0, \quad (4.33)$$

Následně zvolíme pasivní prvky (tab. 4.13) za obecné admitance s přihlédnutím k realizovatelnosti filtru druhého řádu.

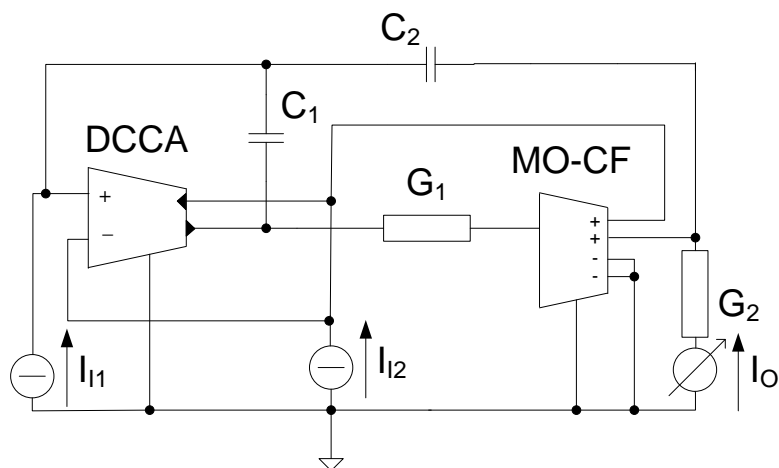
Tab. 4.13: Přehled variant voleb pasivních prvků druhého obvodu s DCCA a MO-CF

VARIANTA	\mathbf{Y}_1	\mathbf{Y}_2	\mathbf{Y}_3	\mathbf{Y}_4
A	G_1	G_2	pC_1	pC_2
B	pC_1	pC_2	G_1	G_2

Z tabulky 4.13 jsem zvolil variantu B, přičemž jsem přihlédl ke skutečnosti, že v druhém případě by byly připojeny kondenzátory do proudového vstupu MO-CF a to má v praxi většinou negativní důsledky na kmitočtovou charakteristiku.

Charakteristická rovnice má tvar:

$$\mathbf{D} = G_1G_2 + p(C_1G_2) + p^2C_1C_2, \quad (4.34)$$



Obr. 4.26: Výsledné zapojení druhého obvodu s DCCA a MO-CF

Budící proud zdroje může být zapojen do invertovaného nebo neinvertovaného vstupu prvku DCCA. V tomto případě však nejde o multifunkční filtr a zapojení dokáže realizovat jen DP.

$$\frac{I_O}{I_{I1}} = \frac{-G_1 G_2}{D}, \quad (4.35)$$

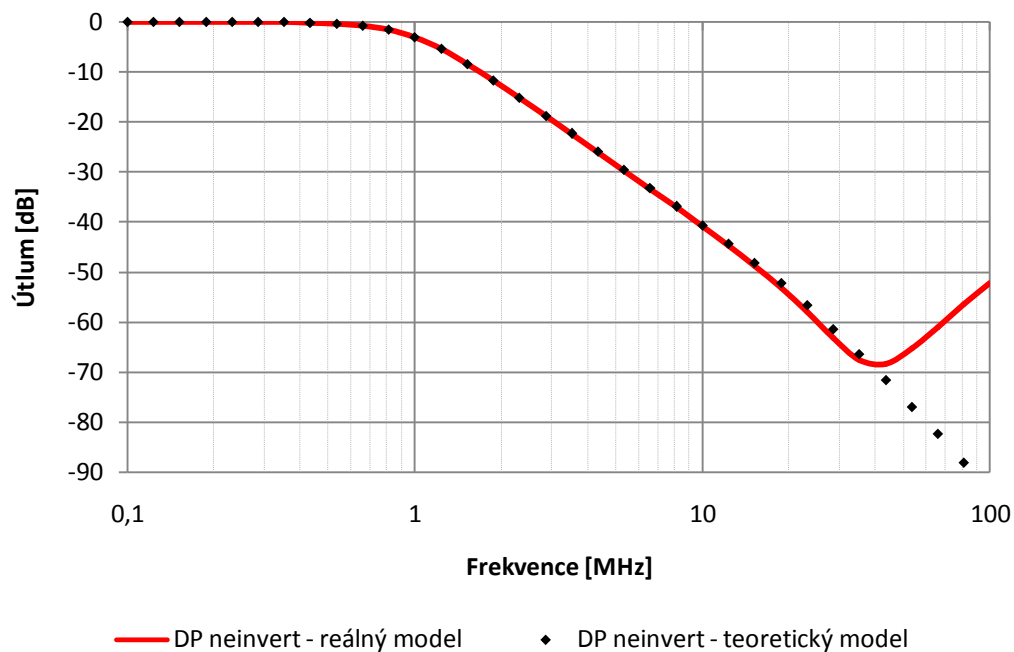
$$\frac{I_O}{I_{I2}} = \frac{G_1 G_2}{D}, \quad (4.36)$$

Předposledním bodem pro návrh obvodu je určení hodnot jednotlivých součástek pasivních prvků, abychom následně mohli simulovat jeho vlastnosti. Hodnoty jsou shrnuty v tab. 4.4. Jako výchozí byl zvolen mezní kmitočet $f_0 = 1\text{MHz}$, kvalita jakosti $Q = 0,707$ a hodnoty kondenzátorů $C_1 = C_2 = 200\text{pF}$.

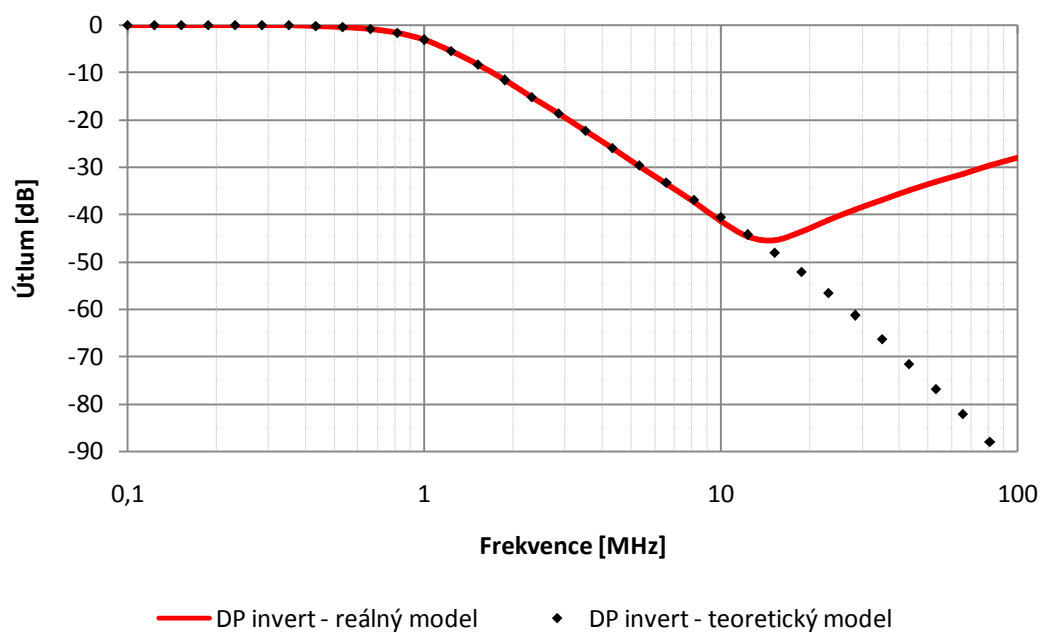
Tab. 4.14: Přehled hodnot pasivních prvků druhého obvodu s DCCA a MO-CF

C_1 [pF]	C_2 [pF]	G_1 [μS]	R_1 [k Ω]	G_2 [μS]	R_2 [k Ω]	f_0 [MHz]	Q [-]
200	200	1777	1,126	888	0,563	1	0,707

Výsledné charakteristiky simulovaného obvodu jsou na obr. 4.27, 4.28.



Obr. 4.27: Graf neinvertované DP druhého obvodu s DCCA a MO-CF



Obr. 4.28: Graf invertované DP druhého obvodu s DCCA a MO-CF

Poslední analyzovaný kmitočtový filtr, druhý s kombinací DCCA a MO-CF, funguje jako dolní propust. V neinvertovaném zapojení je mezní frekvence 983kHz, útlum na dekádu 40,3dB. Zhruba na 40MHz se začíná charakteristika zvedat, tudíž

útlum zmenšovat. Nicméně kvalitu filtru by to nemělo nijak výrazně ohrozit, jelikož se jedná o velmi vysoké frekvence v nepropustném pásmu. Je to zapříčiněno reálnou impedancí invertovaného vstupu prvku DCCA. Invertované zapojení se chová velmi podobně. Mezní kmitočet 982kHz. Útlum na dekádu je 39,1dB. Ovšem útlum se začíná zmenšovat již od 13MHz, což je zapříčiněno vlivem reálné impedance neinvertovaného vstupu prvku DCCA.

5 ZÁVĚR

V této bakalářské práci jsem měl prozkoumat kmitočtové filtry s říditelným proudovým zesilovačem DCCA a vícevýstupovým proudovým sledovačem MO-CF. Obvody jsem navrhnul pomocí metody autonomních obvodů, vypočítal charakteristické rovnice v programu SNAP a poté simuloval jednotlivé propusti v programu OrCad a to jak s teoretickým, tak reálným modelem.

Celkem se podařilo navrhnout sedm kmitočtových filtrů. Jeden s jedním aktivním prvkem DCCA, čtyři se dvěma aktivními říditelnými zesilovači a dva filtry, které využívaly kombinace říditelného proudového zesilovače s proudovým sledovačem. U všech filtrů bylo použito říditelné zesílení DCCA pro zjednodušení charakteristických rovnic. V práci jsem omezil počet pasivních prvků na čtyři až pět, z důvodu jednodušších výpočtů charakteristických rovnic. Ze sedmi navržených filtrů bylo šest se čtyřmi pasivními prvky a jeden s pěti. Na těchto zapojeních byl ukázán celý proces návrhu vedoucí až k multifunkčním filtrům druhého řádu.

Z navržených kmitočtových filtrů bych jako dolní propust využil druhý obvod, který je tvořen kombinací prvků DCCA a MO-CF a to v neinvertovaném zapojení (kap. 4.3.2). Tento se vyznačuje nejlepší shodou reálných vlastností s teoretickými předpoklady platnými pro dolní propust. Pro použití filtru jako horní propust se nejvíce hodí obvod s pěti pasivními prvky využívající dva říditelné proudové zesilovače (kap. 4.2.4). Reálná charakteristika byla téměř shodná s teoretickými předpoklady až po upravení hodnoty kondenzátoru $C_1 = 300\text{pF}$. Pro realizaci pásmové propusti můžeme uvažovat dvě zapojení, která vykazují velmi podobné kvality. Těmito filtry jsou první navržený s jedním DCCA (kap. 4.1) a druhý filtr se dvěma DCCA (kap. 4.2.2). Oba se vyznačují přesnou mezní frekvencí a poklesem na dekádu 19,6dB respektive 19,2dB.

LITERATURA

- [1] FILKA a kol.: *Diplomní semináře – telekomunikace*. Skriptum FEI VUT v Brně, Ediční středisko VUT v Brně, 1989, 301 stran.
- [2] VRBA, K. *Analogová technika - skriptum VUT v Brně*, 2002, 105 s.
- [3] KUBÁNEK, D.; VRBA, K. State-Variable Higher-Order Filters with Differential Input/Output Current Followers. *International Transaction on Computer Science and Engineering*, 2008, Vol. 49, No. 1, s. 186-196. ISSN: 1738-6438.
- [4] HERENCŠÁR, N., VRBA, K. Obecný přístup k návrhu kmitočtových filtrů pomocí autonomních obvodů. *Internetový časopis Elektorevue* [online]. 2006 [cit. 2008-12-12]. Dostupný z WWW: <www.elektorevue.cz>.
- [5] JEŘÁBEK, J., VRBA, K. Řiditelný univerzální filtr s vícevýstupovými proudovými sledovači. *Internetový časopis Elektorevue* [online]. 2008 [cit. 2008-12-12]. Dostupný z WWW: <www.elektorevue.cz>.
- [6] KOTON, J., VRBA, K. Zobecněné metody návrhu kmitočtových filtrů. *Internetový časopis Elektorevue* [online]. 2008 [cit. 2008-12-12]. Dostupný z WWW: <www.elektorevue.cz>.
- [7] KOLKA, Z.: Uživatelská příručka programu SNAP verze 3.02, elektronická příručka programu, FEKT VUT v Brně, 2006.
- [8] JEŘÁBEK, J.: *Kmitočtové filtry s proudovými aktivními prvky*. Diplomová práce. FEKT VUT v Brně, 2007.
- [9] H. A. Alzaher, M. Ismail, *Current-mode universal filter using unity gain cells*, *Electronics Letters*, Vol. 35, No. 25, pp.2198-2200, December 1999.
- [10] Ghausi, M. S., Laker, K. R. *Modern Filter Design, Active RC and Switched Capacitor*, Noble Publishing 2003, ISBN 188493238X.
- [11] Hájek, K., Sedláček, J. *Kmitočtové filtry*, BEN, 2002, ISBN 8073000237.
- [12] Koton, J.; Vrba, K.; Ushakov, P.; Mišurec, J. Designing Electronically Tunable Frequency Filters Using the Signal Flow Graph Theory. In *Proceedings of the 31th International Conference TSP 2008*. Budapest 2008. s. 1-3.

SEZNAM POUŽITÝCH VELIČIN, SYMBOLŮ A ZKRATEK

Veličiny a symboly

A_I	[-]	proudové zesílení
b_i	[-]	koeficient jmenovatele přenosové funkce
C	[F]	elektrická kapacita
D	[-]	charakteristická rovnice
D_i	[-]	nastavitelné bity
f_0	[Hz]	mezní frekvence
G	[S]	elektrická vodivost
H	[-]	přenos filtru
$H(p)$	[-]	přenosová funkce filtru
I_{in}	[V]	vstupní proud
I_{out}	[V]	výstupní proud
L	[H]	elektrická indukčnost
p	[Hz]	komplexní proměnná
Q	[-]	činitel jakosti
R	[Ω]	elektrický odpor
U_{in}	[V]	vstupní napětí
U_{out}	[V]	výstupní napětí
X	[-]	vstup
Y	[S]	admittance
Z	[Ω]	impedance
π	[-]	Ludolfovo číslo
$\varphi(p)$	[-]	argumentovaná charakteristika
ω_0	[-]	mezní úhlový kmitočet
ω_{0d}	[-]	dolní mezní úhlový kmitočet
ω_{0h}	[-]	horní mezní úhlový kmitočet

Zkratky

DCCA	řiditelný proudový zesilovač (D igitally C ontrolled C urrent A mplifier)
DP	D olní P ropust
FČ	F ázovací Č lánek
HP	H orní P ropust
MCFI	universální proudový invertor a zrcadlo (M ulti-output C urrent M irror and I nverter)
MO – CF	vícévýstupový proudový sledovač (M ultiple O utput C urrent F ollower)
PP	P ásmová P ropust
PZ	P ásmová Z ádrž
UCC	univerzální proudový konvektor (U niversal C urrent C onveyor)

SEZNAM PŘÍLOH

A. DVD – Obsah

PŘÍLOHA A – Obsah DVD

- elektronická verze bakalářské práce (ve formátu pdf)
- složka OrCad - soubory simulovaných obvodů v programu OrCad (názvy podsložek dle názvů filtrů)
- složka SNAP - soubory simulovaných obvodů v programu SNAP (názvy podsložek dle názvů filtrů)