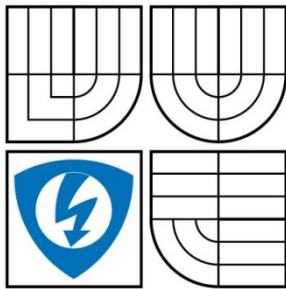


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKACNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

MULTIFUNKČNÍ KMITOČTOVÉ FILTRY S GCMÍ

MULTIFUNCTION FREQUENCY FILTERS USING GCMÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

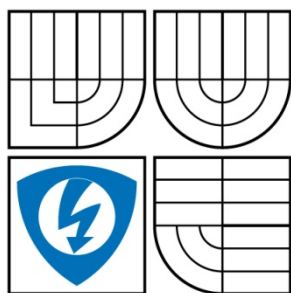
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

LADISLAV VORÁČ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. JAN JEŘÁBEK

BRNO 2008



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Teleinformatika

Student: Voráč Ladislav
Ročník: 3

ID: 78373
Akademický rok: 2007/2008

NÁZEV TÉMATU:

Multifunkční kmitočtové filtry s GCMI

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte problematiku analogových kmitočtových filtrů v literatuře [1], [2], včetně neznámějších návrhových metod. Zaměřte se na vytipování nových zapojení realizujících více než jednu filtrační funkci druhého řádu (tzv. multifunkční filtry). Jako aktivní prvek uvažujte zejména více-výstupový obecný proudový sledovač (GCMI = Generalized Current Mirror and Inverter). Alternativně použijte i další proudové aktivní prvky vhodné pro stavbu kmitočtových filtrů v proudovém módu, jako jsou proudový operační zesilovač (COA = Current Operational Amplifier), diferenční transkonduktanční operační zesilovač (CDTA - Current Differencing Transconductance Amplifier), jejich říditelné varianty, případně i jiné funkčně příbuzné stavební bloky [3]. Počet aktivních prvků v jednom obvodu omezte na maximálně čtyři. Vlastnosti navržených zapojení ověřte simulacemi v dostupném software.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Filka, M. a kol.: Diplomní semináře - telekomunikace, Skriptum FEI VUT v Brně, Ediční středisko VUT v Brně, 1989, 301 stran.
- [2] Chen, W-K: The circuits and filters handbook (second edition), CRC Press LLC, USA, 2003, 2961 stran.
- [3] Birolek, D., Gubek, T.: Nové obvodové prvky pro zpracování signálů v proudovém módu, Časopis Elektrověda, č. 28, 2004. Dostupné na adrese <http://www.elektrověda.cz/clanky/04028/index.html>.

Termín zadání: 11.2 2008
Vedoucí práce: Ing. Jan Jeřábek

Termín odevzdání: 4.6 2008

prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom 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.

LICENČNÍ SMLOUVA POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Ladislav Voráč
Bytem: Rozstání 39
Narozen/a (datum a místo): 25. 2 1986, Prostějov

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
se sídlem Údolní 244/53, 602 00, Brno
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.
(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- disertační práce
 - diplomová práce
 - bakalářská práce
 - jiná práce, jejíž druh je specifikován jako
- (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Multifunkční kmitočtové filtry s GCMÍ
Vedoucí/ školitel VŠKP: Ing. Jan Jeřábek
Ústav: telekomunikací
Datum obhajoby VŠKP:

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v*:

- tištěné formě – počet exemplářů 1
- elektronické formě – počet exemplářů 1

* hodící se zaškrtněte

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ihned po uzavření této smlouvy
 - 1 rok po uzavření této smlouvy
 - 3 roky po uzavření této smlouvy
 - 5 let po uzavření této smlouvy
 - 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne:

.....
Nabyvatel

.....
Autor

ANOTACE

V úvodu práce je pojednáno o možnostech kmitočtových filtrů a jejich využití. Následně jsou uvedeny základní teoretické vlastnosti filtrů, jejich popis pomocí přenosových funkcí, nastíněny přenosové filtrační funkce druhého řádu a další možné dělení filtrů na aktivní či pasivní. V druhé kapitole se nejprve obeznámíme s proudovým módem, jeho využitím a důvody proč se k němu přistupuje. Poté jsou vypsány jednotlivé aktivní proudové prvky, které budou užity při stavbě kmitočtových filtrů druhého řádu. Nejvíce využívaným prvkem pro aplikaci v čisté proudové módu je GCMI, který můžeme volně přeložit jako zobecněná proudová zrcadla a invertory. Už z názvu jsou zřejmé jeho možnosti při návrhu, což je zrcadlení proudu a také jeho invertování. Samotnou návrhovou metodou autonomního obvodu se zabývá další kapitola, kde v jednotlivých blocích najdeme postup návrhu kmitočtových filtrů. Další čtyři kapitoly jsou zaměřeny na samotný detailní návrh kmitočtových filtrů se všemi aktivními prvky, které byly uvedeny v úvodu práce a simulacemi těchto navržených obvodů. V závěru byl vybrán jeden z obvodů pro praktickou realizaci s následným porovnáním měřených a simulovaných přenosových charakteristik.

KLÍČOVÁ SLOVA

multifunkční kmitočtový filtr, autonomní obvod, proudový mód, přenosová funkce, GCMI

ABSTRACT

At the beginning of my work are the frequency filter possibilities and their use discussed. I continue with the basic theoretical filter characters, their description through the use of the transfer functions, the transfer filter function of the second rank and further possible filter diversification on active and pasive ones. In the next chapter, there is a current mode introduced with its use and reasons why to pick it up. As next are several active current items desriped, that will be used for construction of the frequency filter of the second rank. The most used item for the application in the pure current mode is GMCI, which easily means Generalized Current Mirrors and Inventors. It is obvious already from its name what does it do, mirror reflecting and inverting. The next chapter talks about the concept method of the autonomous circuit, where in several blocks is the process of the frequency filter concept to be found. Last four chapters are focused on the detailed frequency filters concept, with all its active elements and their simulations. One of the circuit was choosen for the practical realization and at the conclusion it shows the comparison of the measured and simulated transfer parameters.

KEYWORDS

multifunction frequency filter, autonomous circuit, current mode, transfer function, GCMI

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Multifunkční kmitočtové filtry s GCMI 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 uvedeného semestrálního projektu dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením tohoto projektu 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, doktorandu Ústavu telekomunikací, za velmi užitečnou metodickou pomoc a cenné rady při zpracování bakalářské práce.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 : Filtr jako lineární dvojbran	15
Obr. 2 : Aktivní prvek CMI.....	20
Obr. 3 : Prvek MCMi jako rozšíření prvku CMI	20
Obr. 4 : Prvek GCMi s nastavitelnými přenosy	21
Obr. 5 : Konvektor UCC-N1B realizující MCMi (s uzemněnými napěťovými vstupy)	21
Obr. 6 : Schematická značka transkondutačního zesilovače OTA.....	22
Obr. 7 : Schematická značka prvku BOTA.....	23
Obr. 8 : Schematická značka prvku CDTA s diferenčními výstupy	23
Obr. 9 : Zkoumaný obvod 1 odvozený z úplné admitanční sítě.....	26
Obr. 10 : Zkoumaný obvod 1 jako multifunkční kmitočtový filtr	28
Obr. 11 : Charakteristiky zkoumaného obvodu 1 v proudovém módu s prvky UCCN1B, model první úrovně	32
Obr. 13 : Charakteristiky zkoumaného obvodu 1 v proudovém módu s prvky UCCN1B, model třetí úrovně	34
Obr. 14 : Zkoumaný obvod 2 zapojený jako autonomní obvod.....	34
Obr. 15 : Zkoumaný obvod 2 zapojen pomocí pasivních prvků	36
Obr. 16 : Charakteristiky zkoumaného obvodu 2 v proudovém módu s prvky UCCN1B, model první úrovně	41
Obr. 17 : Charakteristiky zkoumaného obvodu 2 v proudovém módu s prvky UCCN1B, model druhé úrovně.....	41
Obr. 18 : Charakteristiky zkoumaného obvodu 2 v proudovém módu s prvky UCCN1B, model třetí úrovně	42
Obr. 19 : Zkoumaný obvod 3 zapojený jako autonomní obvod.....	43
Obr. 20 : Zkoumaný obvod 3 s pasivními prvky.....	44
Obr. 21 : Přenosové charakteristiky zkoumaného obvodu 3 simulované s modelem UCC-N1B třetí úrovně	46
Obr. 22 : Zkoumaný obvod 4 zapojený jako autonomní obvod.....	47
Obr. 23 : Zkoumaný obvod 4 zapojený pomocí pasivních prvků	49
Obr. 24 : Přenosové charakteristiky zkoumaného obvodu 4 s modelem UCC-N1B druhé úrovně.....	51

Obr. 25 : Přenosové charakteristiky zkoumaného obvodu 4 s modelem UCC-N1B třetí úrovně	52
Obr. 26 : Autonomní obvod zkoumaného zapojení 5	53
Obr. 27 : Zkoumaný obvod 5 zapojen s konkrétními pasivními prvky.....	55
Obr. 28 : Zkoumaný obvod 6 zapojen jako autonomní obvod.....	57
Obr. 29 : Zkoumaný obvod 6 zapojen pomocí pasivních prvků	58
Obr. 30 : Autonomní obvod zkoumaného obvodu 7	60
Obr. 31 : Zkoumaný obvod 7 zapojen pomocí pasivních prvků	61
Obr. 32 : Zkoumaný obvod 8 zapojen jako autonomní obvod.....	63
Obr. 33 : Zkoumaný obvod 8 zapojen pomocí pasivních prvků	64
Obr. 34 : Zkoumaný obvod 9 zapojený jako autonomní obvod.....	66
Obr. 35 : Zkoumaný obvod 9 s pasivními prvky.....	67
Obr. 36 : Zkoumaný obvod 10 zapojen jako autonomní obvod.....	69
Obr. 37 : Zkoumaný obvod 10 zapojen pomocí pasivních prvků	70
Obr. 38 : Zkoumaný obvod 4 zapojen pomocí integrovaného obvodu UCC-N1B 0520.....	72
Obr. 39 : Měřicí soustava pro proudový mód	73
Obr. 40 : Změřené kmitočtové charakteristiky zkoumaného obvodu 4	74

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 : Volba charakteristické rovnice zkoumaného obvodu 1	27
Tab. 2 : Možné varianty volby pasivních prvků zkoumaného obvodu 1	27
Tab. 3 : Čítelelé přenosových funkcí zkoumaného obvodu 1	28
Tab. 4 : Varianty přenosových koeficientů zkoumaného obvodu 2.....	35
Tab. 5 : Volba pasivních prvků zkoumaného obvodu 2.....	35
Tab. 6 : Čítelelé přenosových funkcí zkoumaného obvodu 2	37
Tab. 7 : Čítelelé přenosových funkcí zkoumaného obvodu 3	45
Tab. 8 : Možnosti volby charakteristické rovnice zkoumaného obvodu 4.....	48
Tab. 9 : Čítelelé přenosových funkcí zkoumaného obvodu 3	49
Tab. 10: Jednotlivé varianty volby proudových koeficientů zkoumaného obvodu 5	54
Tab. 11 : Čítelelé přenosových funkcí zkoumaného obvodu 5	55
Tab. 12 : Čítelelé přenosových funkcí zkoumaného obvodu 6.....	58
Tab. 13 : Čítelelé přenosových funkcí zkoumaného obvodu 7	61
Tab. 14 : Čítelelé přenosových funkcí zkoumaného obvodu 8.....	64
Tab. 15 : Čítelelé přenosových funkcí zkoumaného obvodu 9	67
Tab. 16 : Čítelelé přenosových funkcí zkoumaného obvodu 10.....	70

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

BOTA	operační transkonduktanční zesilovač s diferenčními výstupy (<i>Balanced Operational Transconductance Amplifier</i>)
C	kapacita
CDTA	operační transkonduktanční zesilovač s diferenčními výstupy (<i>Current Differencing Transconductance Amplifier</i>)
CMI	proudové zrcadlo a invertor (<i>Current Mirror and Inverter</i>)
$D, D(p)$	charakteristická rovnice
DCS	proudový rozdílový zdroj (<i>Current Differencing Source</i>)
DP	dolní propust
GCMC	zobecněná proudová zrcadla a invertory (<i>Generalized Current Mirrors and Inverters</i>)
G	vodivost
HP	horní propust
$K, K(p)$	přenosová funkce komplexní proměnné
K_I	přenos proudu
K_U	přenos napětí
MCMC	více-výstupní CMI (<i>Multi-output Current Mirror and Inverter</i>)
n	proudový přenosový koeficient
OZ	operační zesilovač (<i>Operational Amplifier</i>)
p	komplexní proměnná
PP	pásmová propust
Q	činitel jakosti
R	odpor
s	normovaná komplexní proměnná
ω	úhlový kmitočet
ω_m	úhlový mezní kmitočet
ω_p	kmitočet pólů
Ω	normovaný úhlový kmitočet

OBSAH

Úvod.....	14
1 Základní vlastnosti kmitočtových filtrů	15
1.1 Specifikace filtru	15
1.2 Přenosová funkce a její popis	15
1.3 Typy filtračních funkcí druhého řádu.....	17
1.4 Aktivní a pasivní filtry	19
2 Nové obvodové prvky.....	20
2.1 Aktivní proudový prvek CMI.....	20
2.2 Aktivní prvek OTA a BOTA.....	22
2.3 Aktivní prvek CDTA.....	23
3 Obecný návrh kmitočtových filtrů.....	24
3.1 Metoda autonomního obvodu.....	24
3.2 Postup návrhu.....	24
4 Návrh multifunkčních filtrů se dvěma prvky GCMI.....	26
4.1 Zkoumaný obvod 1.....	26
4.2 Zkoumaný obvod 2.....	34
4.3 Zkoumaný obvod 3.....	43
4.4 Zkoumaný obvod 4.....	47
5 Návrh multifunkčních filtrů se třemi prvky GCMI.....	53
5.1 Zkoumaný obvod 5.....	53
5.2 Zkoumaný obvod 6.....	57
6 Návrh multifunkčních filtrů se dvěma prvky BOTA.....	60
6.1 Zkoumaný obvod 7.....	60
6.2 Zkoumaný obvod 8.....	63
7 Návrh multifunkčních filtrů se dvěma prvky CDTA.....	66
7.1 Zkoumaný obvod 9.....	66
7.2 Zkoumaný obvod 10.....	69
8 Praktická realizace a měření.....	72
Závěr.....	76

Literatura	78
PŘÍLOHY	79
Příloha č. 1: Fotografie realizovaného multifunkčního filtru	80
Příloha č. 2: Deska plošného spoje generovaná programy Eagle a Pov Ray for Windows	81
Příloha č. 3: Kmitočtová charakteristika typu horní propust zachycená analyzátořem Agilent 4396A.....	82
Příloha č. 4: Kmitočtová charakteristika typu dolní propust zachycená analyzátořem Agilent 4396A.....	83
Příloha č. 5: Kmitočtová charakteristika typu pásmová propust zachycená analyzátořem Agilent 4396A.....	84
Příloha č. 6: Kmitočtová charakteristika typu pásmová zádrž zachycená analyzátořem Agilent 4396A.....	85

ÚVOD

Znalosti kmitočtových filtrů jsou v dnešní době neodmyslitelnou součástí elektroniky. Jejich uplatnění v různých oblastech přispívá k vývoji a rozšíření působnosti ve velice širokých mezích. Zpočátku byly kmitočtové filtry tvořeny pouze pasivními součástkami, se kterými jsme byli značně omezeni. Postupem času se začali objevovat nové prvky, které byly schopny rozšířit a zdokonalit funkce kmitočtových filtrů. Jedním z nich je operační zesilovač (OZ). Ten se postaral o rozmanité využití v elektronických obvodech a na trhu se zařadil k nejprodávanějším elektronickým součástkám. Dnes jsme už na takové úrovni, že jsme schopni vytvořit filtr číslicově. Možnosti analogových kmitočtových filtrů ale zdaleka nebyly vyčerpány. Dříve jsme se zaměřovali na napěťový mód, ve kterém nositelem informace bylo napětí. V dnešní době se ale začínají objevovat nové prvky pracující v módu proudovém. Důvodů, proč se používá proudový mód, je více. Jedním z nich je snižující se napájecí napětí, které způsobuje snižování odstupů signálu od šumu, či lepší kmitočtové vlastnosti.

Bakalářská práce je zaměřena na návrh multifunkčních kmitočtových filtrů pracujících v čistě proudovém módu s moderními aktivními prvky. Jako aktivní prvek bude nejprve uvažován více-výstupový obecný proudový sledovač (GCMI = Generalized Current Mirror and Inverter), který je vhodný pro stavbu kmitočtových filtrů pracujících v čistě proudovém módu. Následně se v obvodech užijí prvky BOTA a prvky CDTA. Poslední část je pak věnována praktické realizaci jednoho z navržených multifunkčních kmitočtových filtrů.

1 ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI KMITOČTOVÝCH FILTRŮ

1.1 Specifikace filtru

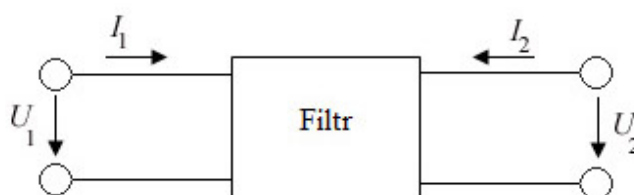
Kmitočtové filtry jsou lineární elektrické obvody, jejichž hlavním úkolem je změnit procházející signál dle kladených požadavků. Kmitočtové složky, které filtr propustí beze změny se nacházejí v takzvaném propustném pásmu. Druhé pásmo kde má být signál potlačen je označováno jako nepropustné pásmo neboli pásmo potlačení. S kmitočtovými filtry se dnes setkáváme téměř ve všech zařízeních, které mají co dočinění se zpracováním signálu. Namátkově můžeme jmenovat vstupní a výstupní obvody, antialiasingové filtry, reproduktorové výhybky či jiné části obvodu.

1.2 Přenosová funkce a její popis

Filtr můžeme popsat dle [1] jako lineární dvojbran obr. 1, který umožňuje kmitočtový výběr signálů. Popis chování lineárního dvojbranu vyjadřujeme za pomoci přenosových funkcí a to na vstupních a výstupních svorkách filtru. Jedná se o

- přenos napětí naprázdno $K_U = \frac{U_2}{U_1} | I_2 = 0$ a (1.1)

- přenos proudu nakrátko $K_I = \frac{I_2}{I_1} | U_2 = 0$. (1.2)



Obr. 1 : Filtr jako lineární dvojbran

Přenosovou funkci lze obecně definovat jako racionálně lomenou dle [1]

$$K(\mathbf{p}) = \frac{\sum_{k=0}^{m-1} a_k (\mathbf{p})^k}{\sum_{i=0}^{n-1} b_i (\mathbf{p})^i} = \frac{a_0 + a_1 \mathbf{p} + \dots + a_{m-1} \mathbf{p}^{m-1} + a_m \mathbf{p}^m}{b_0 + b_1 \mathbf{p} + \dots + b_{n-1} \mathbf{p}^{n-1} + b_n \mathbf{p}^n}, \quad (1.3)$$

kde je komplexní proměnná definována $\mathbf{p} = \sigma + j\omega$, a a b jsou reálné koeficienty, n udává řád funkce a platí pro ni $m \leq n$. Komplexní charakter přenosové funkce se ve většině případu značí jako \mathbf{K} nebo $K(\mathbf{p})$. Nejvyšší mocnina jmenovatele stanovuje řád funkce a tím i filtru. Komplexní proměnou uvažujeme konkrétněji (ve většině případů) ve tvaru $\mathbf{p} = j\omega$. Následně je vhodné komplexní proměnou \mathbf{p} normovat. Nejčastěji pak vzhledem k meznímu kmitočtu ω_m [2], [5]

$$\mathbf{s} = \frac{\mathbf{p}}{\omega_N} = \frac{\mathbf{p}}{\omega_m}, \quad \Omega = \frac{\omega}{\omega_N} = \frac{\omega}{\omega_m}. \quad (1.4)$$

Normovaný úhlový kmitočet se značí Ω a \mathbf{s} je normovaná kmitočtová proměnná. Úhlový kmitočet a mezní úhlový kmitočet jsou definovány jako

$$\omega_m = 2\pi f_m. \quad (1.5)$$

Přenosovou funkci lze určit dle literatury [2] jako poměr komplexních napětí

$$\mathbf{K}(\omega) = \frac{U_2(\omega)}{U_1(\omega)} = \frac{I_2(\omega)}{I_1(\omega)} = \text{Re}(\mathbf{K}) + j\text{Im}(\mathbf{K}) = K(\omega) e^{j\varphi(\omega)}. \quad (1.6)$$

Modulová (někdy také nazývaná amplitudová) charakteristika přenosové funkce je dána vztahem [2]

$$K(\omega) = |\mathbf{K}(\omega)| = \sqrt{(\text{Re}(\mathbf{K}))^2 + (\text{Im}(\mathbf{K}))^2}. \quad (1.7)$$

Modul přenosu je bezrozměrné číslo a pro lepší grafické vyjádření [2] se udává v logaritmické míře

$$k(\omega) = K_{dB}(\omega) = 20 \cdot \log K(\omega). \quad (1.8)$$

Argumentová (fázová) charakteristika má tvar [2]

$$\varphi(\omega) = \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{Im}(\mathbf{K})}{\operatorname{Re}(\mathbf{K})} . \quad (1.9)$$

Mezní úhlový kmitočet ω_m je důležitý parametr, který je definován [2] poklesem u modulové charakteristiky o -3dB

$$K(\omega_m) = \frac{K_0}{\sqrt{2}}, \text{ kde } K_0 = 1 \rightarrow K_{0\text{dB}}(\omega_m) = K_0 - 3 \text{ [dB]} . \quad (1.10)$$

1.3 Typy filtračních funkcí druhého řádu

Z rovnice (1.3) můžeme vyjádřit obecný tvar přenosové funkce druhého řádu

$$K(\mathbf{p}) = \frac{a_0 + a_1 \mathbf{p} + a_2 \mathbf{p}^2}{b_0 + b_1 \mathbf{p} + b_2 \mathbf{p}^2} . \quad (1.11)$$

V rovnici (1.11) je umocněna komplexní proměnná p nejvýše na druhou, proto se musí při realizaci filtru objevit v daném zapojení dva akumulární prvky, které umožňují realizaci všech základních filtračních funkcí. Ve jmenovateli přenosové funkce musí být všechny reálné koeficienty nenulové a tím přítomny všechny stupně komplexní proměnné p . Nejčastěji kmitočtové filtry dělíme z hlediska propustného a nepropustného pásma. Nazýváme je též jako selektivní filtry. Typ jednotlivých filtrů udává tedy čitatel přenosové funkce. Základní typy filtrů dle [2], [6] s přenosovou funkcí druhého řádu jsou:

- a) **Dolní propust (DP)**, propouští všechny kmitočty, které jsou menší než její mezní kmitočet a její obecný tvar lze zapsat jako

$$K(\mathbf{p}) = \frac{a_0}{b_0 + b_1 \mathbf{p} + b_2 \mathbf{p}^2} = \frac{K_0 \omega_p^2}{\mathbf{p}^2 + \mathbf{p} \frac{\omega_p}{Q_p} + \omega_p^2} . \quad (1.12)$$

- b) **Horní propust (HP)**, propouští všechny kmitočty, které jsou větší než její mezní kmitočet a její obecný tvar lze zapsat jako

$$K(p) = \frac{a_2 p^2}{b_0 + b_1 p + b_2 p^2} = \frac{K_0 p^2}{p^2 + p \frac{\omega_p}{Q_p} + \omega_p^2} . \quad (1.13)$$

- c) **Pásmová propust (PP)**, propouští všechny kmitočty, které jsou mezi jejím horním a dolním mezním kmitočtem a její obecný tvar lze zapsat jako

$$K(p) = \frac{a_1 p}{b_0 + b_1 p + b_2 p^2} = \frac{K_0 p \frac{\omega_p}{Q_p}}{p^2 + p \frac{\omega_p}{Q_p} + \omega_p^2} . \quad (1.14)$$

- d) **Pásmová zádrž (PZ)**, zadržuje všechny kmitočty, které jsou mezi jejím horním a dolním mezním kmitočtem a její obecný tvar lze zapsat jako

$$K(p) = \frac{a_0 + a_2 p^2}{b_0 + b_1 p + b_2 p^2} = \frac{K_0 (p^2 + \omega_p^2)}{p^2 + p \frac{\omega_p}{Q_p} + \omega_p^2} . \quad (1.15)$$

- e) **Fázovací článek (FČ)**, propouští všechny kmitočty se stejným konstantním přenosem a mění fázový posuv v závislosti na kmitočtu, proto jej řadíme mezi fázovací (zpožďovací) obvody. Obecný zápis je možný ve tvaru

$$K(p) = \frac{a_0 - a_1 p + a_2 p^2}{b_0 + b_1 p + b_2 p^2} = \frac{p^2 - p \frac{\omega_p}{Q_p} + \omega_p^2}{p^2 + p \frac{\omega_p}{Q_p} + \omega_p^2} . \quad (1.16)$$

V předcházejících rovnicích se vyskytují nové parametry a to kmitočet pólů ω_p a Q_p určující kvalitu pólů nazývaný činitel jakosti.

1.4 Aktivní a pasivní filtry

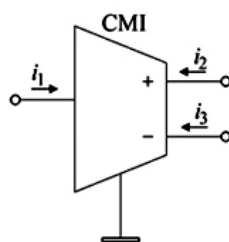
Jak již bylo zmíněno výše, tak filtry druhého řádu musí obsahovat dva akumulární prvky. Nejčastěji pracujeme s kapacitami, které mají řadu výhod oproti induktorům. Pokud se v obvodu budou vyskytovat pouze prvky R a C, pak nejsme schopni pomocí pouze těchto prvků vytvořit všechny filtrační funkce a to jen dolní a horní propust. Proto se musí do obvodu zařadit i induktor, se kterým je možné realizovat všechny uvedené filtrační funkce. Obvody realizované danými pasivními prvky pak nazýváme pasivní filtry. Díky řadě nevýhod induktoru jakými jsou například: velké rozměry, cena, náklady na výrobu, rozměry, velké ztráty a mnoho dalších se snažíme tyto prvky nahradit. Proto do obvodu zařazujeme takový prvek, kterým můžeme cívku substituovat a nahradit ji tak s lepšími vlastnostmi. Těmto prvkům říkáme aktivní. Nejvíce doposud používané prvky jsou operační zesilovače, pracující v napěťovém módu, kde je nositelem informace napětí. Dnes se ale velmi často objevují prvky, u nichž je nositelem informace proud, v takovém případě mluvíme o proudovém módu.

2 NOVÉ OBVODOVÉ PRVKY

2.1 Aktivní proudový prvek CMI

Filtrační obvody byly dříve provozovány pouze v napěťovém módu. Díky novým technologiím a stálému výzkumu, vývoji a zdokonalování dílčích oblastí analogové techniky byl využíván mód, kde se pracovalo jak s napětím, tak i s proudem. Takový mód nazýváme smíšeným. S plynoucím časem jsou na elektronické součástky kladeny stále náročnější požadavky, jakými jsou například menší napájecí napětí, širší zpracovávané pásmo kmitočtů či větší odstup signálu od šumu. Nový aktivní prvek využívající čistě proudového módu [3], [4] CMI (Current Mirror and Inverter) je zobrazen na obr. 2. Tento prvek má jednu svorku vstupní (i_1), dvě svorky výstupní (i_2, i_3) a svorku zemnicí. Ze svorky i_2 odebíráme zrcadlený vstupní proud a ze svorky i_3 odebíráme proud invertovaný vůči vstupnímu. Předcházející slovní vyjádření lze zapsat

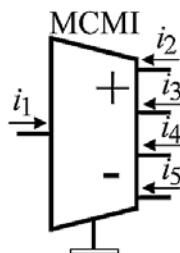
$$i_2 = i_1 \quad \text{a} \quad i_3 = -i_1 . \quad (2.1)$$



Obr. 2 : Aktivní prvek CMI

Prvek CMI můžeme na výstupu rozšířit o další dvě svorky. Tím dostaneme obvod označovaný jako MCMI (Multiple-output Current Mirror and Inverter). Schématická značka je znázorněna na obr. 3. Na výstupu prvku definujeme proudy

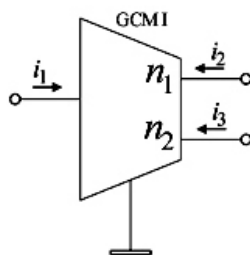
$$i_2 = i_3 = i_1 \quad \text{a} \quad i_4 = i_5 = -i_1 . \quad (2.2)$$



Obr. 3 : Prvek MCMI jako rozšíření prvku CMI

Zmíněný prvek MCMI jsme schopni realizovat obecněji a to prvkem GCMÍ znázorněném na obr. 4. Tento elektronický obvod jsme schopni nastavit pomocí obecných proudových přenosů n_1 a n_2 , čímž nastavíme výstupní proudy. Obecné proudové přenosy n_1 a n_2 jsou rovny 1 nebo -1. Což můžeme zapsat jako

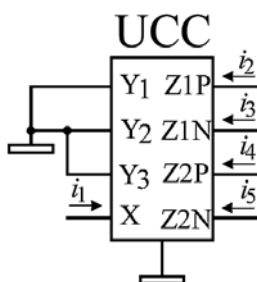
$$i_2 = n_1 i_1 \quad \text{a} \quad i_3 = n_2 i_1 . \quad (2.3)$$



Obr. 4 : Prvek GCMÍ s nastavitelnými přenosy

Protože uvedené proudové aktivní prvky jsou stále ve vývoji, musíme nahradit tyto prvky téměř ekvivalentním a již existujícím integrovaným obvodem UCC-N1B, který je zachycen na obr. 5. Tento univerzální proudový konvektor má navíc tři vstupní svorky představující vstupní napěťové brány Y_1 - Y_3 , které je potřeba připojit na zem, abychom získali prvek MCMI. Polarita výstupních proudových bran je značena pomocí anglických zkratk. P odpovídající *positive* čili kladná polarita a N jako *negative* tedy záporná polarita. Výstupní proudy lze opět definovat

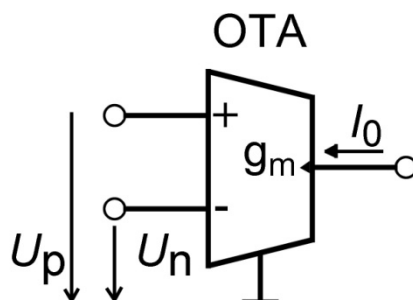
$$i_2 = i_4 = i_1 \quad \text{a} \quad i_3 = i_5 = -i_1 . \quad (2.4)$$



Obr. 5 : Konvektor UCC-N1B realizující MCMI (s uzemněnými napěťovými vstupy)

2.2 Aktivní prvek OTA a BOTA

Pokud v obvodu uvažujeme pasivní prvky jako rezistory a kapacitory, ke kterým je připojujeme v proudovém módu, ale i jiných módech, v definovaných bodech s nízkými úrovněmi napětí a z transkodutačních zesilovačů, které převádějí právě tyto napětí zpět na proudy. Transkodutační zesilovač s jedním výstupem (OTA - *Operational Transconductance Amplifier*) je zachycen na obr. 6.



Obr. 6 : Schematická značka transkodutačního zesilovače OTA

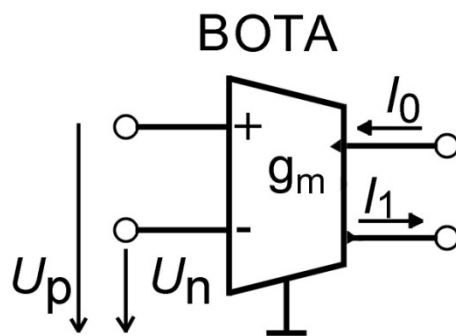
Ideální aktivní prvek OTA se dá popsat [9] jako zdroj proudu řízený rozdílovým napětím, má kmitočtově nezávislou transkondutanci g_m , vstupní a výstupní svorky jsou teoreticky nekonečně velké. Jeho charakteristická vlastnost je přenosová vodivost neboli také nazývána transkondutance g_m . Uvedené slovní vyjádření lze popsat rovnicí

$$I_0 = -g_m (U_p - U_n) . \quad (2.5)$$

Napětí U_p a U_n je vzato mezi neinvertující a inverující svorkou a zemí. Jestli-že pracujeme s tímto prvkem při návrzích kmitočtových filtrů a to především u jejich přeladitelných variant je vhodné pracovat s nastavitelnou transkondutancí a to zapomoci další svorky, která slouží k přesnému nastavení transkondutance.

Rozšířením OTA o další výstupní svorkou získáme dvojici proudových výstupů. Tento prvek, s diferenčními výstupy nazýváme BOTA, který je uveden na obr. 7 (*Balanced Operational Transconductance Amplifier*). Jedna výstupní svorka má kladný výstupní proud a druhá záporný výstupní proud. Můžeme to tedy zapsat jako

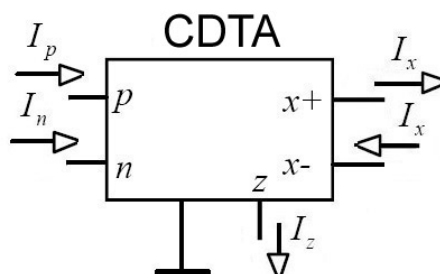
$$I_1 = -I_0 = g_m (U_p - U_n) . \quad (2.6)$$



Obr. 7 : Schematická značka prvku BOTA

2.3 Aktivní prvek CDTA

Při zkoumání prvku OTA s dalším prvkem DCS (*Current Differencing Source*) vznikl jejich syntézou nový aktivní prvek CDTA (*Current Differencing Transconductance Amplifier*), který je uveden na obr 8. Tento nově navržený prvek má dvojici proudových diferenčních nízko impedančních vstupů p a n a dva proudové souhlasné nebo diferenční výstupy. Rozdíl proudů vytéká ze svorky z do vnější zátěže. Prvek OTA zde slouží pro převod napětí ze svorky z pomocí transkonduktance g_m na proud. Velikost transkonduktance je opět možné řídit pomocnou svorkou. Dalším parametrem toho prvku je zisk interního zdroje proudu označovaný jako b s implicitním nastavením $b = 1$. Při návrhu filtrů s těmito prvky musíme ošetřit vstupní a výstupní svorky. Nepoužité vstupní svorky se nechají ve stavu vysoké impedance tedy naprázdno a nepoužité výstupní ve stavu nízké impedance, lze je tedy připojit na zem nebo je zatížit zkratem. Podrobnější informace je se možné dočíst v [10] a v [11].



Obr. 8 : Schematická značka prvku CDTA s diferenčními výstupy

3 OBECNÝ NÁVRH KMITOČTOVÝCH FITLRŮ

3.1 Metoda autonomního obvodu

Pro návrh multifunkčních kmitočtových filtrů existuje více metod návrhu. Nejvíce používané metody jsou například [8] : metoda autonomního obvodu, metoda přidruženého obvodu a metoda založená na syntetických prvcích s imitacemi vyšších řádů a grafy signálových toků. Jednotlivé multifunkční kmitočtové filtry jsou navrženy metodou autonomního obvodu v čistě proudovém módu. Za autonomní obvod [8] považujeme takový, který nemá vstupní a výstupní svorky. Tento obvod je charakterizován tzv. charakteristikou rovnicí. Ta bývá zapsána ve tvaru součtů součinů obecných admitancí a značí se D nebo $D(p)$. Charakteristická rovnice je rovna jmenovateli přenosové funkce a pokládáme ji rovnu nule. Abychom zachovali původní charakteristickou rovnici, musíme v proudovém módu proudové vstupy připojit do uzlů a proudové výstupy odebírat ze smyček daného obvodu. Z hlediska buzení obvodu a jeho snímání na výstupu můžeme rozlišit opět tři módy a to mód: proudový, smíšený a napěťový. Pro návrh budeme opět užívat čistě proudový mód, kde je obvod buzen a snímán proudem.

Z důvodu stability obvodu musíme dodržet určité podmínky. V případě filtrů druhého řádu musí v charakteristické rovnici být všechny členy kladné a také se v ní musí objevit všechny stupně mocniny komplexní proměnné p , až do řádu navrhovaného filtru.

3.2 Postup návrhu

V návrhu vycházíme z úplné admitanční sítě, kterou můžeme najít v literatuře [3] a [4]. V jednotlivých krocích pak postupujeme následovně:

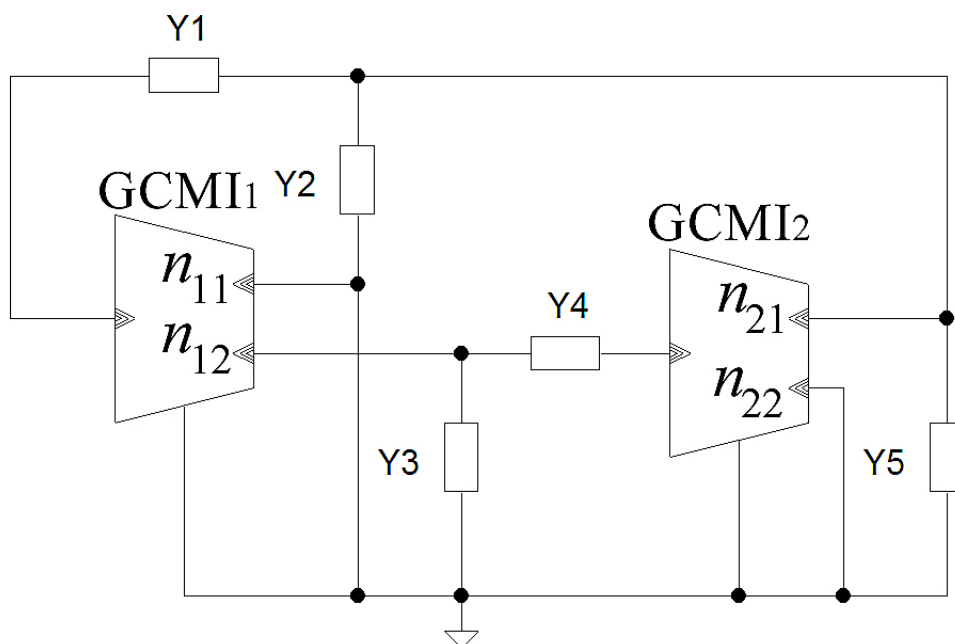
- připojíme úplnou admitanční síť k aktivním prvkům a nalezneme autonomní obvod pro stanovený počet pasivních prvků (proudové přenosy n_i necháme zapsané obecně a pasivní prvky označíme obecně jako admitance Y_i)
- zjistíme obecnou charakteristickou rovnici vytvořeného autonomního obvodu, můžeme využít program SNAP

- vhodně zvolíme jednotlivé proudové přenosy tak, abychom co nejvíce zjednodušili charakteristikou rovnici, ale současně aby byli dodrženy podmínky stability obvodu
- následná konkretizace obecných admitancí Y_i za konkrétní pasivní součástky, které splní podmínky stability obvodu
- nalezení jednotlivých filtračních funkcí pomocí proudových vstupů a výstupů, přitom dodržujeme podmínky zachování původní charakteristické rovnice

4 NÁVRH MULTIFUNKČNÍCH FILTRŮ SE DVĚMA PRVKY GCMI

4.1 Zkoumaný obvod 1

Pro nalezení více filtračních funkcí druhého řádu, které vytvářejí multifunkční kmitočtový obvod, užitíme dvou aktivních proudových prvků GCMI. V návrhu budeme postupovat dle kapitoly 3.2. Vycházíme z úplné admitanční sítě (viz literatura [3] a [4]), první odvozený autonomní obvod (č. 1) je zapojen na obr. 9.



Obr. 9 : Zkoumaný obvod 1 odvozený z úplné admitanční sítě

Charakteristickou rovnicí autonomního obvodu 1 můžeme odvodit pomocí programu SNAP ve tvaru

$$D_1 = Y_1 Y_3 + Y_1 Y_4 - Y_1 Y_4 n_{12} n_{21} + Y_3 Y_5 + Y_3 Y_2 + Y_4 Y_5 + Y_4 Y_2. \quad (4.1)$$

V rovnici (4.1) je nyní potřebné vhodně zvolit přenosové koeficienty n_{12} a n_{21} tak, abychom rovnici co nejvíce zjednodušili, ale současně v ní zůstali všechny součiny admitancí kladné a navíc abychom poté byli schopni realizovat všechny mocniny komplexní proměnné p .

Tyto podmínky splníme čtyřmi možnými způsoby uvedenými v tab. 1. Z tabulky zvolme variantu 1 a pokračujme v návrhu dále. Volba zbylých přenosových koeficientů nám neovlivní charakteristickou rovnici, ale ovlivní čítenel přenosové funkce, proto je můžeme nechat vyjádřeny obecně.

Tab. 1 : Volba charakteristické rovnice zkoumaného obvodu 1

Varianta	přenosové koeficienty		charakteristická rovnice
	n_{12}	n_{21}	D_1
1	1	1	$Y_1 Y_3 + Y_3 Y_5 + Y_3 Y_2 + Y_4 Y_5 + Y_4 Y_2$
2	-1	-1	$Y_1 Y_3 + Y_3 Y_5 + Y_3 Y_2 + Y_4 Y_5 + Y_4 Y_2$
3	1	-1	$Y_1 Y_3 + 2Y_1 Y_4 + Y_3 Y_5 + Y_3 Y_2 + Y_4 Y_5 + Y_4 Y_2$
4	-1	1	$Y_1 Y_3 + 2Y_1 Y_4 + Y_3 Y_5 + Y_3 Y_2 + Y_4 Y_5 + Y_4 Y_2$

Rovnici (4.1) můžeme nyní vyjádřit jako

$$D_1 = Y_1 Y_3 + Y_3 Y_5 + Y_3 Y_2 + Y_4 Y_5 + Y_4 Y_2. \quad (4.2)$$

Následně vhodně zvolíme za jednotlivé admitance pasivní součástky a to tak, aby se v rovnici (4.2) objevili všechny mocniny komplexní proměnné. Tato podmínka může být splněna pěti možnými způsoby dle tab. 2.

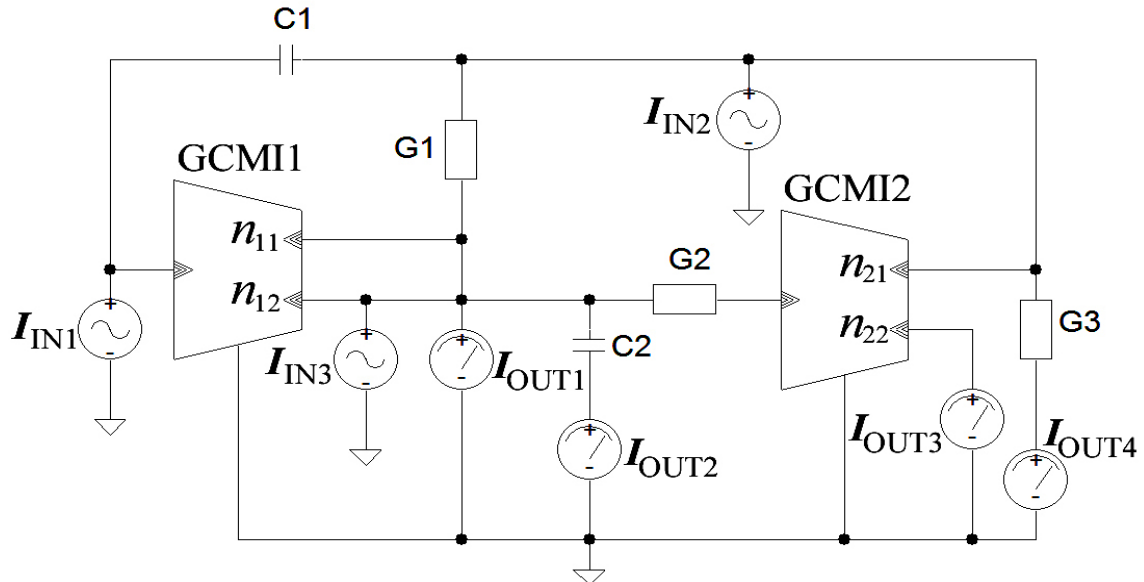
Tab. 2 : Možné varianty volby pasivních prvků zkoumaného obvodu 1

Varianta	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5
a	pC_1	G_1	pC_2	G_2	G_3
b	G_1	G_2	pC_1	G_2	pC_2
c	G_1	pC_1	pC_2	G_2	G_3
d	G_1	G_2	G_3	pC_1	pC_2
e	G_1	pC_1	G_2	pC_2	G_3

Zvolíme první variantu a. Do rovnice (1.22) dosadíme pasivní prvky a rovnice přejde do tvaru

$$D_1 = G_2 G_3 + G_1 G_2 + p(C_2 G_3 + C_2 G_1) + p^2(C_1 C_2). \quad (4.3)$$

Ve zkoumaném obvodu 1 dle obr. 9 nahradíme impedance pasivními prvky dle varianty a z tab. 1. Obvod na obr. 10 je nyní zapojen pomocí pasivních prvků a můžeme začít zkoumat jednotlivé filtrační funkce. Proudové vstupy připojujeme do uzlů a proudové výstupy odebíráme ze smyček obvodu.



Obr. 10 : Zkoumaný obvod 1 jako multifunkční kmitočtový filtr

Z obr. 10 je zřejmé, že přenosových funkcí bude hodně, ale ne u všech bude v jejich čitateli přenosová funkce, taková, která byla definována v kapitole 1.3.

Tab. 3 : Čítele přenosových funkcí zkoumaného obvodu 1

		proudové vstupy		
		I_{IN1}	I_{IN2}	I_{IN3}
proudové výstupy	I_{OUT1}	$G_2G_3n_{11}-G_2G_1+G_2G_1n_{11}$	$-G_2G_1$	G_2G_1
		$+p(G_3C_2n_{11}+G_2C_1n_{11}+G_1C_2n_{11})$	$-p(C_2G_1-C_1G_2n_{11})$	$-p(C_1G_2n_{11})$
		$+p^2(C_1C_2n_{11})$	$+p^2(C_1C_2n_{11})$	
	I_{OUT2}	$p(C_2G_1+C_2G_3)$		$-p(G_3C_1+G_2C_1)$
		$+p^2(C_1C_2)$	$p^2(C_1C_2)$	$-p^2(C_1C_2)$
	I_{OUT3}	$-G_2G_1n_{22}-G_2G_3n_{22}$		$G_2G_3n_{22}+G_2G_1n_{22}$
		$-p(C_1G_2n_{22})$	$-p(C_1G_2n_{22})$	$+p(C_1G_2)$
	I_{OUT4}	$-G_2G_3$	$-G_2G_3$	G_2G_3
			$-p(C_2G_3)$	

Proto je dobré si vyjádřit čitatele přenosových funkcí do tab. 3 a porovnávat jestli právě tento čítec tvoří některou přenosovou funkci či nikoliv. Pro lepší orientaci jsou mocniny číteců přenosových funkcí vypsány na jednotlivých řádcích. Zvolme přenosové koeficienty $n_{11} = n_{22} = 1$.

Proudové přenosy, které vytváří filtrační funkce druhého řádu, jsou následující

$$K_{DP1} = \frac{I_{OUT4}}{I_{IN1}} = -\frac{G_2 G_3}{D_1}, \quad K_{DP2} = \frac{I_{OUT4}}{I_{IN3}} = \frac{G_2 G_3}{D_1}, \quad (4.4a, 4.4b)$$

$$K_{DP3} = \frac{I_{OUT1} + I_{OUT3}}{I_{IN3}} = \frac{G_2 G_3 + 2 G_2 G_1}{D_1}, \quad (4.4c)$$

$$K_{HP} = \frac{I_{IN2}}{I_{OUT2}} = \frac{p^2 C_1 C_2}{D_1}, \quad K_{PP} = \frac{I_{IN2}}{I_{OUT3}} = -\frac{p C_1 G_2}{D_1}. \quad (4.4d, 4.4e)$$

Z rovnic (4.4) je patrné, že zkoumaný obvod 1 vytváří pět filtračních funkcí. Jednotlivé filtrační funkce v porovnání s rovnicemi v kapitole 1.3 jsou: K_{DP1} - invertující dolní propust (rovnice 1.12), K_{DP2} - dolní propust (rovnice 1.12), K_{DP3} - dolní propust (rovnice 1.12), K_{HP} - horní propust (rovnice 1.13) a K_{PP} - invertující pásmovou propust (rovnice 1.15).

Pro výpočet hodnot konkrétních pasivních prvků zkoumaného obvodu 1 byl zvolen mezní kmitočet $f_m = 1$ MHz a aproximace dle Butterwortha jejíž koeficienty přenosové funkce (1.11) dle literatury [5] jsou $b_0 = 1$, $b_1 = \sqrt{2}$ a $b_2 = 1$. Nejprve ale musíme rovnici (4.3) upravit do vhodného tvaru tak, abychom byli schopni dopočítat pasivní prvky. Dle kapitoly 3.2 charakteristická rovnice představuje jmenovatel obvodu rovný nule

$$G_2 G_3 + G_1 G_2 + p(C_2 G_3 + C_2 G_1) + p^2(C_1 C_2) = 0. \quad (4.5)$$

Tuto rovnici (4.5) upravíme tak, abychom u členu s nejvyšší mocninou komplexní proměnné p dostali koeficient $b_2 = 1$. Vydělením celé rovnice (4.5) výrazem $C_1 C_2$ dostáváme rovnici ve tvaru

$$\frac{G_2 G_3 + G_1 G_2}{C_1 C_2} + p \frac{G_3 + G_1}{C_1} + p^2 = 0. \quad (4.6)$$

Následně komplexní proměnou p normujeme vzhledem k meznímu kmitočtu ω_m neboli dosadíme $p = s \cdot \omega_m$ a rovnici (4.6) vydělíme výrazem ω_m^2 tak, abychom u členu s nejvyšší mocninou normované komplexní proměnné s dostali koeficient $b_2 = 1$ což zapíšeme jako

$$\frac{G_2 G_3 + G_1 G_2}{\omega_m^2 C_1 C_2} + s \frac{G_3 + G_1}{\omega_m C_1} + s^2 = 0 . \quad (4.7)$$

Při porovnání rovnice (4.7) se zvolenými koeficienty pomocí Butterwortovy aproximace dostaneme tři rovnice

$$\frac{G_2 G_3 + G_1 G_2}{\omega_m^2 C_1 C_2} = 1 , \quad \frac{G_3 + G_1}{\omega_m C_1} = \sqrt{2} \quad \text{a} \quad 1 = 1 . \quad (4.8a, 4.8b, 4.8c)$$

První dvě rovnice (4.8) obsahují pět neznámých, proto si musíme vhodně zvolit tři pasivní prvky a zbylé dva dopočítat. Volba těchto prvků není jednodušá. Chceme-li, aby nám hodnoty součástek vycházeli v „rozumných“ mezích a přiblížili jsme se přenosu v propustném pásmu $K_0 = 1$ což je $K_0 = 0$ dB. Proto si musíme např. vhodně upravit jednu z rovnic (4.4) tak, abychom jsme si mohli vyjádřit přenos K_0 . Následně jsme schopni hodnoty dopočítat jako kompromis mezi K_0 a hodnotami pasivních součástek. Přenos K_{DP2} rovnice (4.4b) si vyjádříme tak, abychom si vyjádřili K_0 a to tak, že do rovnice (4.4b) výrazu K_{DP2} dosadíme do jmenovatele rovnici (4.3). Následně ji rozšíříme výrazem tak, abychom u nejvyšší komplexní proměnné p jmenovatele dostali jedničku a mohli K_0 vyjádřit. Rovnici pak zapíšeme jako

$$\frac{K_0 \omega_p^2}{p^2 + p \frac{\omega_p}{Q_p} + \omega_p^2} = \frac{\frac{G_2 G_3}{C_1 C_2}}{\frac{G_2 G_3 + G_1 G_2}{C_1 C_2} + p \frac{G_3 + G_1}{C_1} + p^2} . \quad (4.9)$$

Je zřejmé, že

$$K_0 = \frac{G_2 G_3}{C_1 C_2 \omega_p^2} = \frac{G_2 G_3}{C_1 C_2 \frac{G_2 G_3 + G_1 G_2}{C_1 C_2}} = \frac{G_2 G_3}{G_2 G_3 + G_1 G_2} . \quad (4.10)$$

Nejprve zvolíme kapacity kapacitorů $C_1 = C_2 = 68 \text{ pF}$ a vodivost neboli převrácenou hodnotu odporu $R_3 = \frac{1}{G_3} = 1670 \text{ } \Omega$. Dále si vyjádříme vodivost G_1 z rovnice (4.8b) a vypočteme ji jako

$$G_1 = \sqrt{2} C_1 \omega_m - G_3 = \sqrt{2} \cdot 68 \cdot 10^{-12} \cdot 2\pi \cdot 1 \cdot 10^6 - \frac{1}{1670} = 5,4297 \cdot 10^{-6} \text{ S} , \quad (4.11)$$

po převedení na odpor $R_1 = \frac{1}{G_1} = \frac{1}{5,4297 \cdot 10^{-6}} = 184 \text{ k}\Omega$.

Nakonec vyjádříme a dopočítáme vodivost G_2 z rovnice (4.8a) :

$$G_2 = \frac{C_1 C_2 \omega_m^2}{G_1 + G_3} = \frac{68 \cdot 10^{-12} \cdot 68 \cdot 10^{-12} \cdot (2\pi \cdot 1 \cdot 10^6)^2}{5,4297 \cdot 10^{-6} + 0,0005988} = 0,0003021 \text{ S} , \quad (4.12)$$

po převedení na odpor $R_2 = \frac{1}{G_2} = \frac{1}{0,0003021} = 3,3 \text{ k}\Omega$.

Jestliže máme všechny prvky dopočítány, pak jsme schopni vypočítat přenos K_0 propustného pásma dolní propusti z rovnice (1.30)

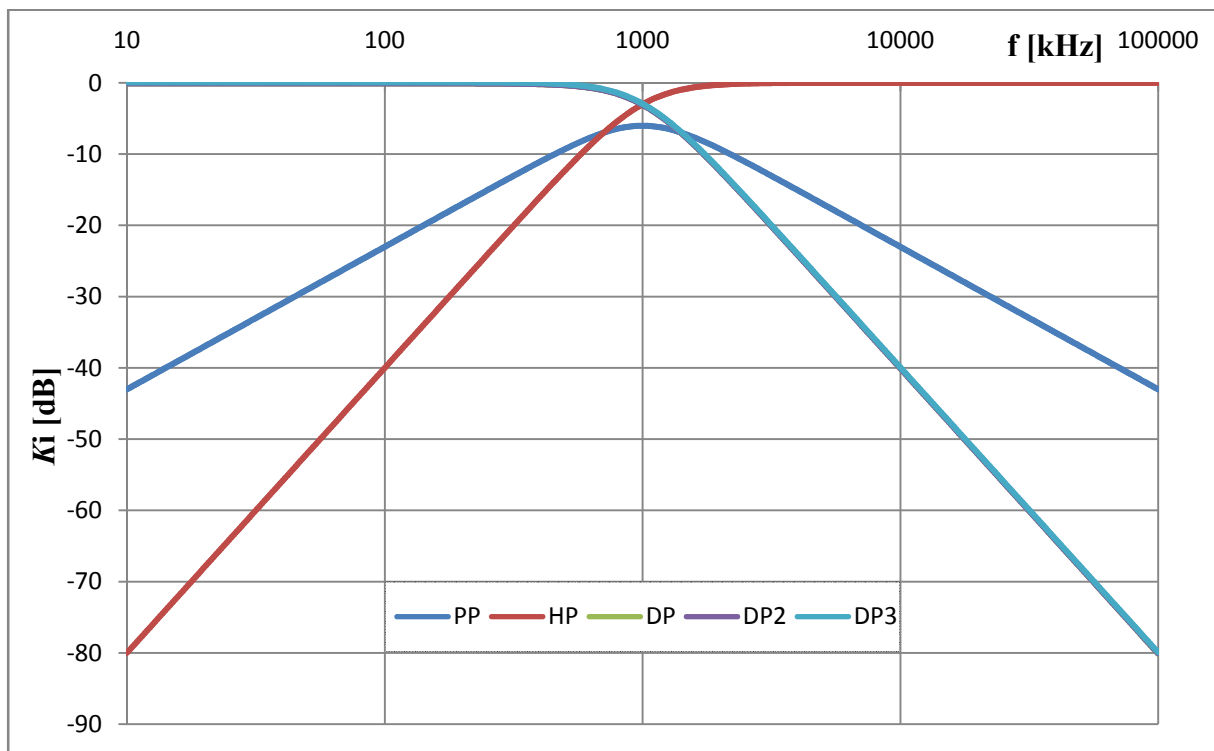
$$K_0 = \frac{G_2 G_3}{G_2 G_3 + G_1 G_2} = \frac{0,0003021 \cdot 0,0005988}{0,0003021 \cdot 0,0005988 + 5,4297 \cdot 10^{-6} \cdot 0,0005988} = 0,991 , \quad (4.13)$$

po vyjádření v decibelech

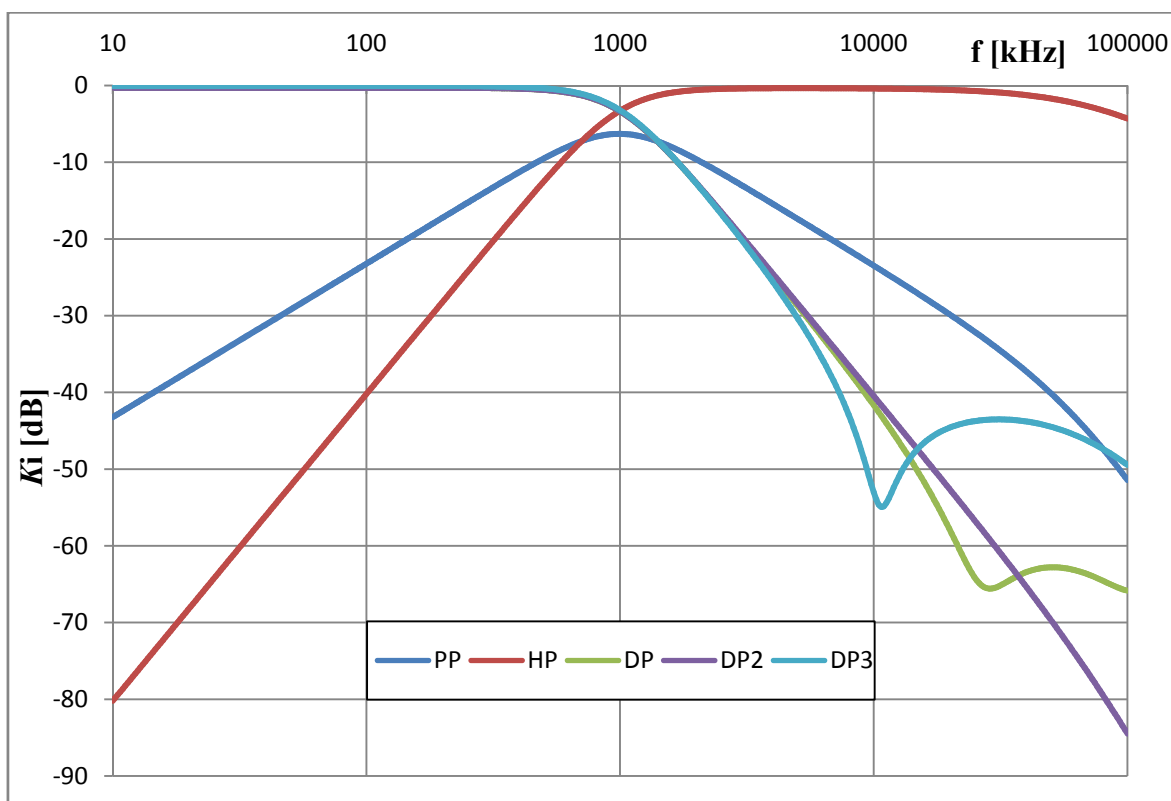
$$K_0 [\text{dB}] = 20 \log(K_0) = 20 \log(0,991) = -0,079 \text{ dB} . \quad (4.14)$$

Zkoumaný obvod 1 byl následně simulován v programu SNAP, kde jednotlivé přenosové funkce vycházeli na základě teoretických předpokladů. Pro realističtější přiblížení tohoto multifunkčního filtru byly v zapojení zkoumaného obvodu 1 nahrazeny prvky GCMI

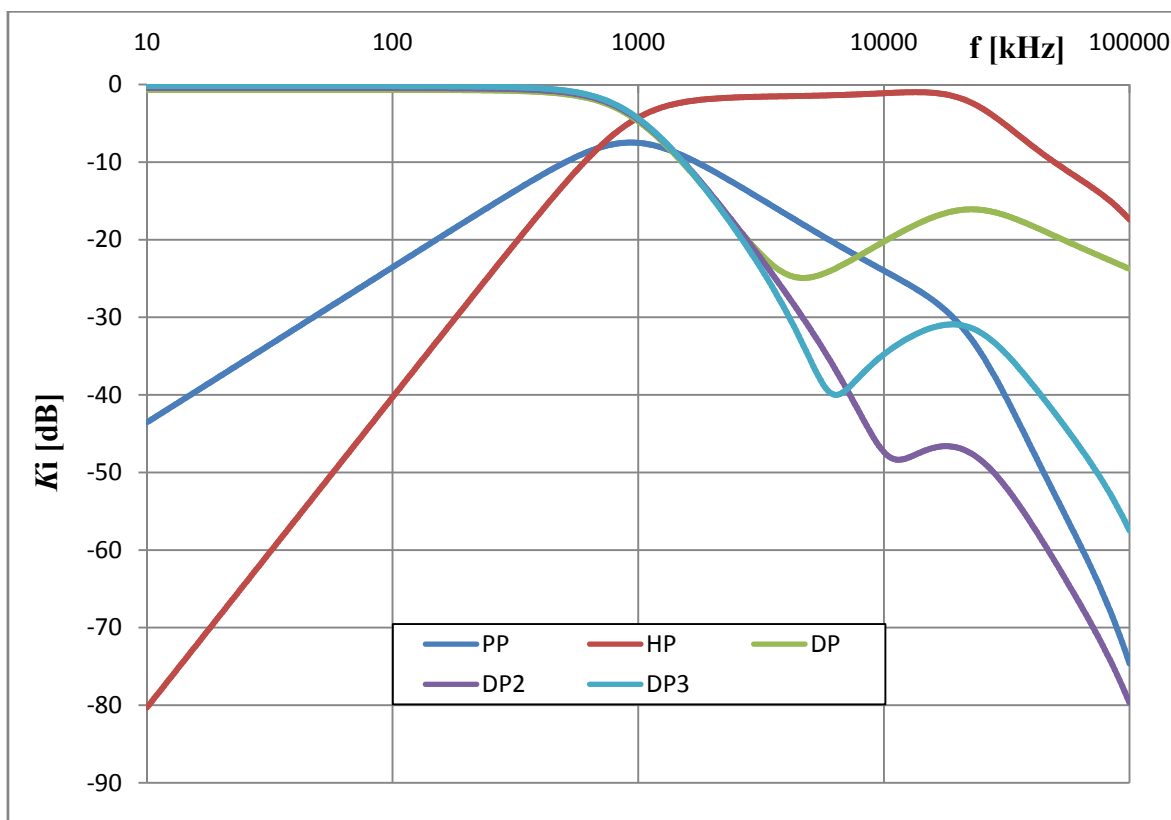
za integrované obvody UCC-N1B [7], konkrétně modelu první (obr. 11), druhé (obr. 12) a třetí (obr. 13) úrovně a simulovány v programu OrCAD. Předpoklad nejméně zkreslených charakteristik je evidentní na obr. 11. Přenosové charakteristiky dolních propustí DP, DP2 a DP3 se vzájemně překrývají a ostatní charakteristiky jsou shodné v porovnání s teoretickými předpoklady. V obr. 12 je už zřejmý vliv druhé úrovně prvku UCC-N1B, kde můžeme pozorovat vliv na více přenosových charakteristikách. Charakteristika HP se začíná přibližně od 30 MHz opět utlumovat a přenos není ideálních 0 dB. Podobně i charakteristiky DP a DP2 nyní můžeme pozorovat jednotlivě a navíc charakteristika DP od kmitočtu 35 MHz nedodrží pokles 40 dB na dekádu a od útlumu 65 dB její zisk roste. Podobné vlastnosti můžeme pozorovat i u charakteristiky DP3. U modelu třetího úrovně prvku UCC-N1B na obr. 13 lze na všech charakteristikách pozorovat změny. Charakteristika HP se utlumuje strměji. Charakteristika DP2, která u předchozí generace dodržovala stálý pokles, nyní od útlumu 48 dB začíná její zisk růst. U charakteristiky DP3 tento jev nastává od útlumu 40 dB a u charakteristiky DP je pozorovatelný již od útlumu 25 dB a zisk roste až k -17 dB následně opět klesá. U charakteristiky PP v okolí útlumu 30 dB pozorovat druhý bod zlomu a její následný strmější pokles.



Obr. 11 : Charakteristiky zkoumaného obvodu 1 v proudovém módu s prvky UCCN1B, model první úrovně



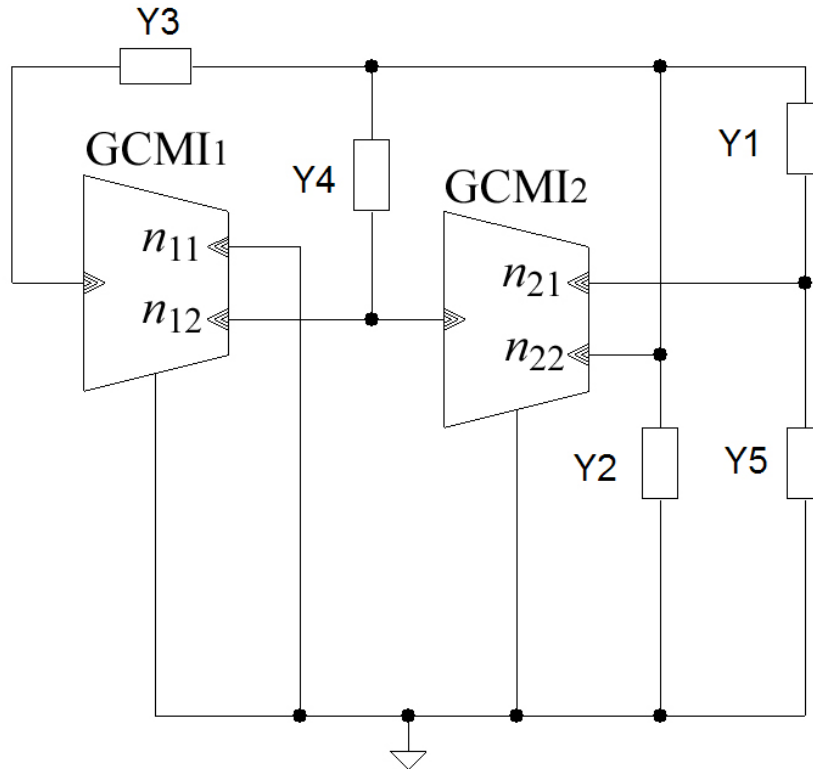
Obr. 12 : Charakteristiky zkoumaného obvodu 1 v proudovém módu s prvky UCCN1B, model druhé úrovně



Obr. 13 : Charakteristiky zkoumaného obvodu 1 v proudovém módu s prvky UCCN1B, model třetí úrovně

4.2 Zkoumaný obvod 2

Postupujeme opět dle kapitoly 3.2. Nalezený autonomní obvod, který v našem případě budeme nyní označovat jako zkoumaný obvod 2, je znázorněn na obr. 14.



Obr. 14 : Zkoumaný obvod 2 zapojený jako autonomní obvod

Charakteristickou rovnicí zkoumaného obvodu 2 můžeme zapsat jako

$$\begin{aligned}
 D_2 = & Y_1 Y_4 + Y_1 Y_4 n_{21} + Y_1 Y_4 n_{22} + Y_1 Y_3 - Y_1 Y_3 n_{12} n_{21} - Y_1 Y_3 n_{12} n_{22} + Y_1 Y_2 + Y_1 Y_5 + Y_4 Y_5 + \\
 & + Y_4 Y_5 n_{22} + Y_3 Y_5 - Y_3 Y_5 n_{12} n_{22} + Y_2 Y_5 = 0 \quad . \quad (4.15)
 \end{aligned}$$

V rovnici (4.15) je nyní potřebné vhodně zvolit přenosové koeficienty n_{12} , n_{21} a n_{22} tak, abychom rovnici co nejvíce zjednodušili, ale současně v ní zůstali všechny součiny admitancí kladné a navíc abychom poté byli schopni realizovat všechny mocniny komplexní proměnné p . Tyto podmínky dodržíme pouze dvěma možnými způsoby uvedenými v tabulce

4. Zvolíme variantu **5**, která zjednoduší charakteristickou rovnici (4.15) na pět součtů součinů admitanci a varianta **6** pak na sedm. Přenosový koeficient n_{11} necháme zapsaný obecně a jeho volbu provedeme až v průběhu návrhu abychom dosáhli požadovaných číselných přenosových funkcí.

Tab. 4 : Varianty přenosových koeficientů zkoumaného obvodu 2

varianta	n_{12}	n_{21}	n_{22}	splníme podmínky stability
1	1	1	1	ne
2	1	1	-1	ne
3	1	-1	-1	ne
4	1	-1	1	ne
5	-1	1	-1	ano
6	-1	1	1	ano
7	-1	-1	-1	ne
8	-1	-1	1	ne

Po volbě varianty 5 nám přejde charakteristická rovnice (4.15) ve tvar

$$D_2 = Y_5 Y_1 + Y_5 Y_2 + Y_1 Y_3 + Y_1 Y_4 + Y_1 Y_2 \quad . \quad (4.16)$$

Následně vhodně zvolíme za jednotlivé admitance pasivní součástky a to tak, aby se v rovnici (4.16) objevili všechny mocniny komplexní proměnné. Tato podmínka může být splněna pěti možnými způsoby dle tab. 5.

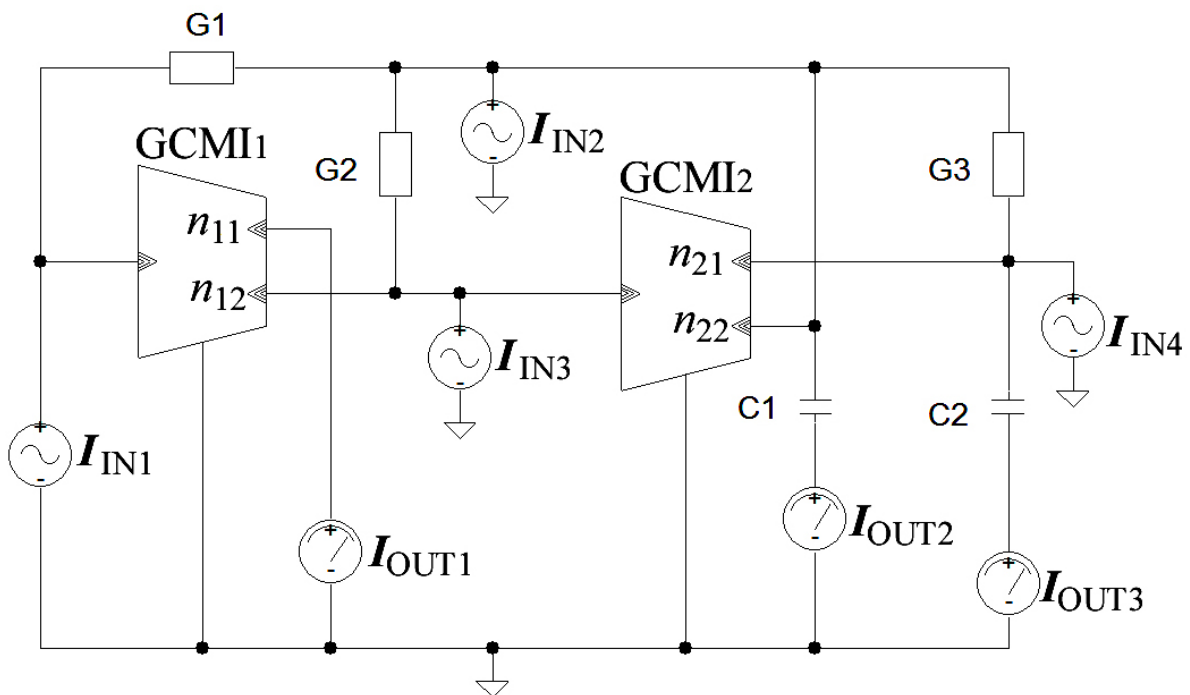
Tab. 5 : Volba pasivních prvků zkoumaného obvodu 2

Varianta	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5
a	pC_1	G_1	G_2	G_3	pC_2
b	G_3	pC_1	G_1	G_2	pC_2
c	pC_1	G_1	pC_2	G_2	G_3
d	pC_1	G_1	G_2	pC_2	G_3
e	pC_1	pC_2	G_1	G_2	G_3

Zvolíme variantu b a charakteristickou rovnicí (4.16) zapíšeme jako

$$D_2 = G_1 G_3 + G_2 G_3 + p(C_2 G_3 + C_1 G_3) + p^2(C_1 C_2) . \quad (4.17)$$

Ve zkoumaném obvodu 2 obr. 11 nahradíme impedance prvky dle varianty b z tab. 5. Obvod na obr. 15 je nyní zapojen pomocí pasivních prvků a můžeme začít zkoumat jednotlivé filtrační funkce. Proudové vstupy připojujeme do uzlů a proudové výstupy odebíráme ze smyček obvodu.



Obr. 15 : Zkoumaný obvod 2 zapojen pomocí pasivních prvků

Z obr. 15 je zřejmé, že přenosových funkcí bude dostatek, ale ne u všech bude v jejich čitateli přenosová funkce taková, která byla definována v kapitole 1.3. Proto je dobré si vyjádřit čitatele přenosových funkcí do tab. 6 a porovnávat jestli právě tento čítatel tvoří některou přenosovou funkci či nikoliv. Pro lepší orientaci jsou mocniny čitatelů přenosových funkcí vypsány na jednotlivých řádcích, kde lze vidět u některých členů přenosový koeficient

n_{11} . Jeho volbou můžeme změnit některé čitatele na kladné nebo záporné. Zvolíme tedy $n_{11} = 1$.

Tab. 6 : Čitatele přenosových funkcí zkoumaného obvodu 2

		proudové vstupy			
		I_{IN1}	I_{IN2}	I_{IN3}	I_{IN4}
proudové výstupy	I_{OUT1}	$G_1G_3n_{11}+G_2G_3n_{11}$	$G_1G_3n_{11}$		$G_1G_3n_{11}$
		$+pn_{11}(G_1C_2+G_3C_2+G_3C_1)$	$+p(G_1C_2n_{11})$	$p(G_1C_2n_{11})$	
		$+p^2(C_1C_2n_{11})$			
	I_{OUT2}		$-p(G_3C_1)$		$-p(G_3C_1)$
		$-p^2(C_1C_2)$	$-p^2(C_1C_2)$	$-p^2(C_1C_2)$	
	I_{OUT3}	$p(G_1C_2+G_2C_2)$	$p(G_1C_2+G_2C_2-G_3C_2)$	$p(G_1C_2+G_2C_2)$	$-p(G_3C_2)$
		$+p^2(C_1C_2)$		$+p^2(C_1C_2)$	$-p^2(C_1C_2)$

Některé podíly mezi proudovými výstupy a vstupy vytváří proudové přenosy, které zapíšeme jako filtrační funkce druhého řádu

$$K_{HP} = \frac{I_{OUT2}}{I_{IN1}} = \frac{I_{OUT2}}{I_{IN3}} = -\frac{p^2(C_1C_2)}{D_2}, \quad (4.18a)$$

$$K_{PP1} = \frac{I_{OUT2} + I_{OUT3}}{I_{IN1}} = \frac{I_{OUT2} + I_{OUT3}}{I_{IN3}} = \frac{p(G_1C_2 + G_2C_2)}{D_2}, \quad (4.18b)$$

$$K_{PP3} = \frac{I_{OUT1}}{I_{IN3}} = \frac{p(G_1C_2)}{D_2}, \quad (4.18c)$$

$$K_{PP4} = \frac{I_{OUT2}}{I_{IN4}} = -\frac{p(G_3C_1)}{D_2}, \quad (4.18d)$$

$$K_{DP} = \frac{I_{OUT1}}{I_{IN4}} = \frac{G_1G_3}{D_2}, \quad (4.18e)$$

$$K_{PP2} = \frac{I_{OUT3}}{I_{IN2}} = p \frac{G_1C_2 + G_2C_2 - G_3C_2}{D_2}. \quad (4.18f)$$

Z rovnic (4.18) je patrné, že zkoumaný obvod 2 vytváří pět filtračních funkcí. Jednotlivé filtrační funkce v porovnání s rovnicemi v kapitole 1.3 jsou: K_{HP} – invertující horní propust (rovnice 1.13), K_{PP} , K_{PP2} a K_{PP3} - pásmová propust (rovnice 1.15), K_{PP4} – invertující pásmová propust (rovnice 1.15), K_{DP} - dolní propust (rovnice 1.12)

Pro výpočet konkrétních pasivních prvků zkoumaného obvodu 2 byl zvolen mezní kmitočet $f_m = 1$ MHz a aproximace dle Butterwortha [5] s činitelem jakosti $Q = 0,7071$. Nejprve ale musíme rovnici (4.15) upravit do vhodného tvaru tak, abychom byli schopni dopočítat pasivní prvky. Dle kapitoly 3.2 charakteristická rovnice představuje jmenovatel obvodu rovný nule

$$D_2 = G_1 G_3 + G_2 G_3 + p(C_2 G_3 + C_1 G_3) + p^2(C_1 C_2) = 0 \quad (4.19)$$

Tuto rovnici upravíme tak, abychom u členu bez komplexní proměnné p dostali koeficient $b_0 = 1$. Vydělením celé rovnice (1.39) výrazem $G_1 G_3 + G_2 G_3$ dostáváme rovnici ve tvaru

$$1 + \frac{p(C_2 G_3 + C_1 G_3)}{G_1 G_3 + G_2 G_3} + \frac{p^2(C_1 C_2)}{G_1 G_3 + G_2 G_3} = 0 \quad (4.20)$$

Následně můžeme mezní úhlový kmitočet vypočítat dle vztahu [2]

$$\omega_p = \sqrt{\frac{b_0}{b_2}} \Rightarrow \omega_p^2 = \frac{b_0}{b_2} = \frac{1}{\frac{C_1 C_2}{G_1 G_3 + G_2 G_3}} = \frac{G_3(G_1 + G_2)}{C_1 C_2} \quad (4.21)$$

kde $\omega_m = 2\pi f_m$ a činitel jakosti [2] je roven

$$Q_p = \sqrt{\frac{b_0 b_2}{b_1^2}} \Rightarrow Q_p^2 = \frac{b_0 b_2}{b_1^2} = \frac{\frac{C_1 C_2}{G_3(G_1 + G_2)}}{\frac{(C_2 + C_1)^2}{(G_1 + G_2)^2}} = \frac{C_1 C_2 (G_1 + G_2)}{G_3 (C_2 + C_1)^2} \quad (4.22)$$

Z rovnic (4.21) a (4.22) dostáváme dvě rovnice o pěti neznámých, proto musíme tři vhodně zvolit a zbylé dvě dopočítat. Pasivní prvky volíme opět s ohledem na přenos v propustném pásmu K_0 . Volbu budeme zohledňovat k přenosu v propustném pásmu pro dolní propust rovnice (4.22). Nejprve si vyjádříme vodivost G_3 z rovnice (4.21) a dosadíme ji do rovnice (4.22). Činitel jakosti je tedy roven

$$Q_p^2 = \frac{C_1 C_2 (G_1 + G_2)}{\frac{\omega_p^2 C_1 C_2}{G_1 + G_2} (C_2 + C_1)^2} = \frac{(G_1 + G_2)^2}{\omega_p^2 (C_2 + C_1)^2} \Rightarrow |Q_p| = \left| \frac{G_1 + G_2}{\omega_p (C_2 + C_1)} \right|. \quad (4.23)$$

Z rovnice (4.23) vyjádříme neznámou vodivost G_1 , zvolíme $C_1 = 68$ pF, $C_2 = 68$ pF a $G_2 = 1,22 \cdot 10^{-5}$ S neboli $R_2 = 82$ k Ω a dopočítáme ji jako

$$\begin{aligned} G_1 = Q_p \omega_p (C_1 + C_2) - G_2 &= 0,7071 \cdot 2\pi \cdot 1 \cdot 10^6 \cdot (68 \cdot 10^{-12} + 68 \cdot 10^{-12}) - 1,22 \cdot 10^{-5} = \\ &= 0,000592 \text{ S} \Rightarrow R_1 = \frac{1}{G_1} = \frac{1}{0,000592} = 1689 \text{ } \Omega . \end{aligned} \quad (4.24)$$

V dalším kroku vyjádříme vodivost G_3 z rovnice (4.21) a dopočítáme ji jako

$$G_3 = \frac{\omega_0^2 C_1 C_2}{G_1 + G_2} = \frac{4\pi^2 \cdot 1 \cdot 10^{12} \cdot 68 \cdot 10^{-12} \cdot 68 \cdot 10^{-12}}{0,000592 + 1,22 \cdot 10^{-5}} = 0,0003021 \text{ S} \Rightarrow R_3 = 3310 \text{ } \Omega. \quad (4.25)$$

Jestliže máme všechny prvky dopočítány, pak jsme schopni vypočítat přenos K_0 propustného pásma dolní propusti z rovnice (1.12). Dosadíme tedy rovnici (1.35) do pravé strany rovnice (1.38e) a do její levé strany pak pravou část rovnice (1.12). Po těchto úkonech pak ještě tuto rovnici upravíme tak, abychom mohli porovnat levé a pravé strany této rovnice. Rovnici pak zapíšeme

$$\frac{K_0 \omega_p^2}{p^2 + p \frac{\omega_p}{Q_p} + \omega_p^2} = \frac{\frac{G_1 G_3}{C_1 C_2}}{\frac{G_1 G_3}{C_1 C_2} + \frac{G_2 G_3}{C_1 C_2} + p \frac{C_2 G_3 + C_1 G_3}{C_1 C_2} + p^2}. \quad (4.26)$$

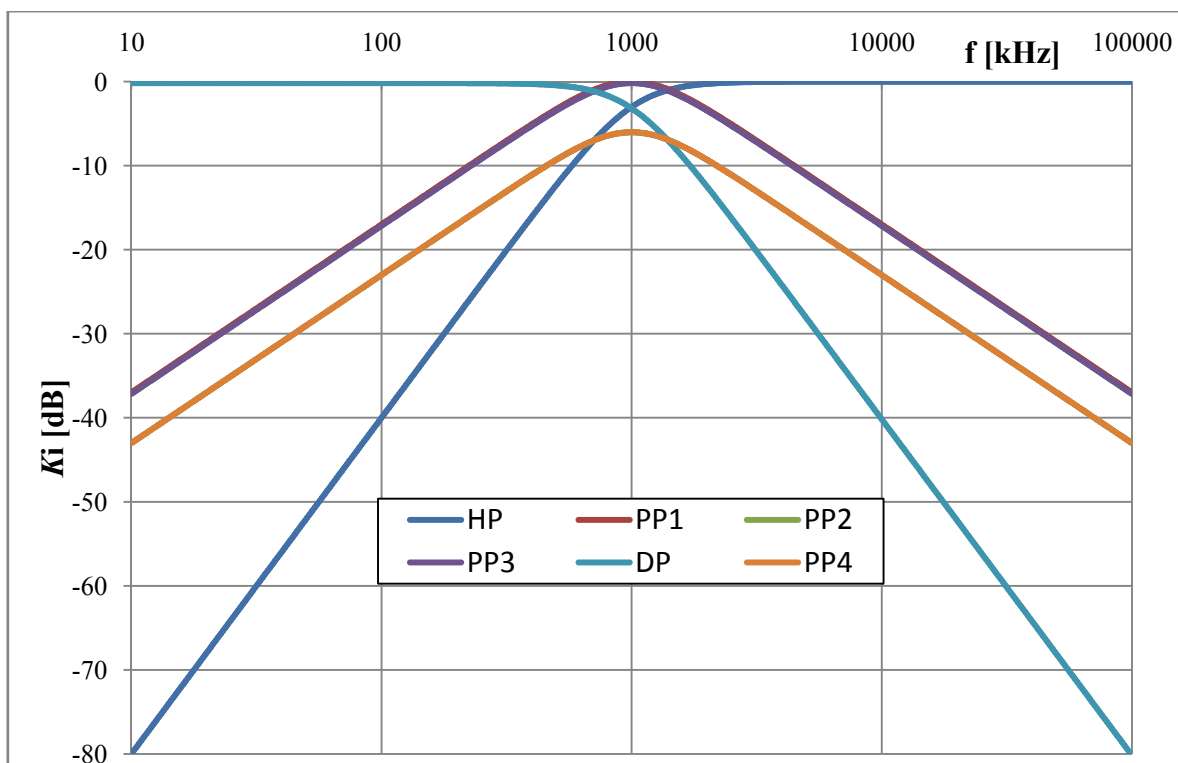
V posledním kroku výpočtu vyjádříme přenos v propustném pásmu

$$K_0 = \frac{G_1 G_3}{\omega_p^2 \cdot C_1 C_2} = \frac{0,000592 \cdot 0,0003021}{4\pi^2 \cdot 1 \cdot 10^{12} \cdot 68 \cdot 10^{-12} \cdot 68 \cdot 10^{-12}} = 0,979 \quad , \quad (4.27)$$

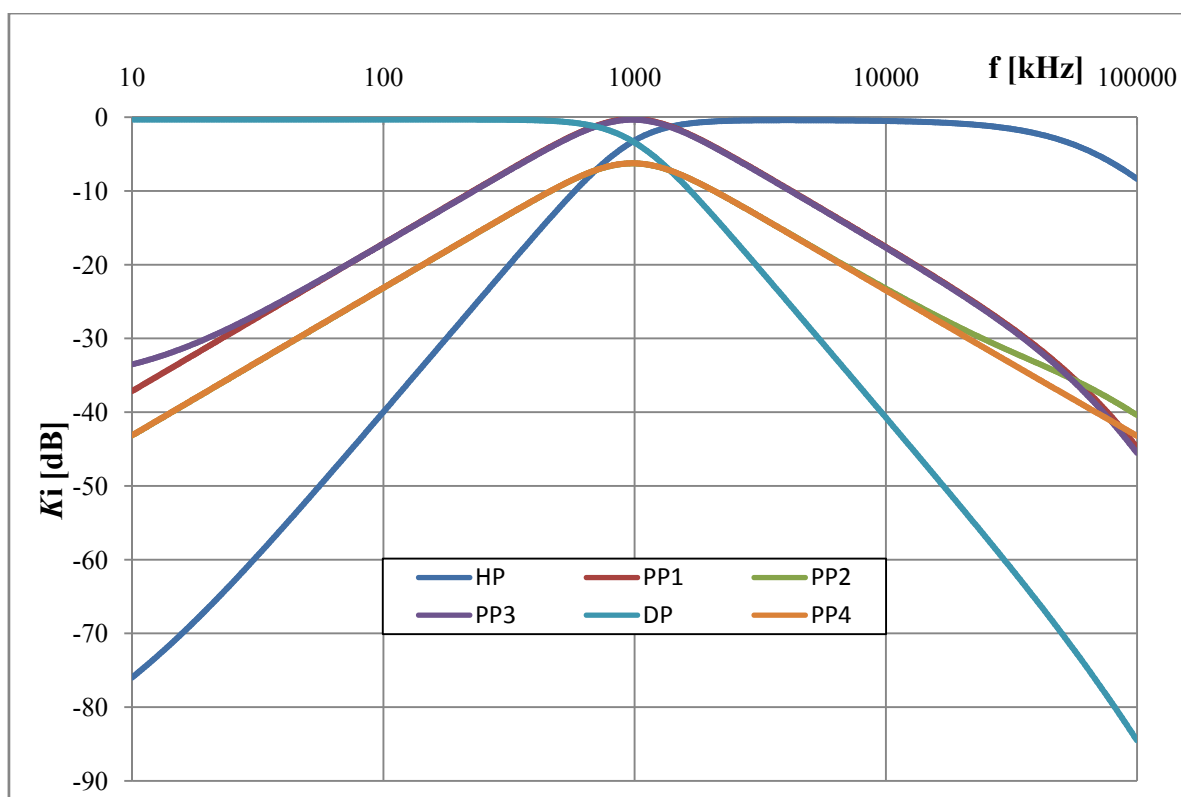
po přepočtu do logaritmické míry pak

$$K_0 [\text{dB}] = 20 \log(K_0) = 20 \log(0,979) = -0,177 \text{ dB} \quad . \quad (4.28)$$

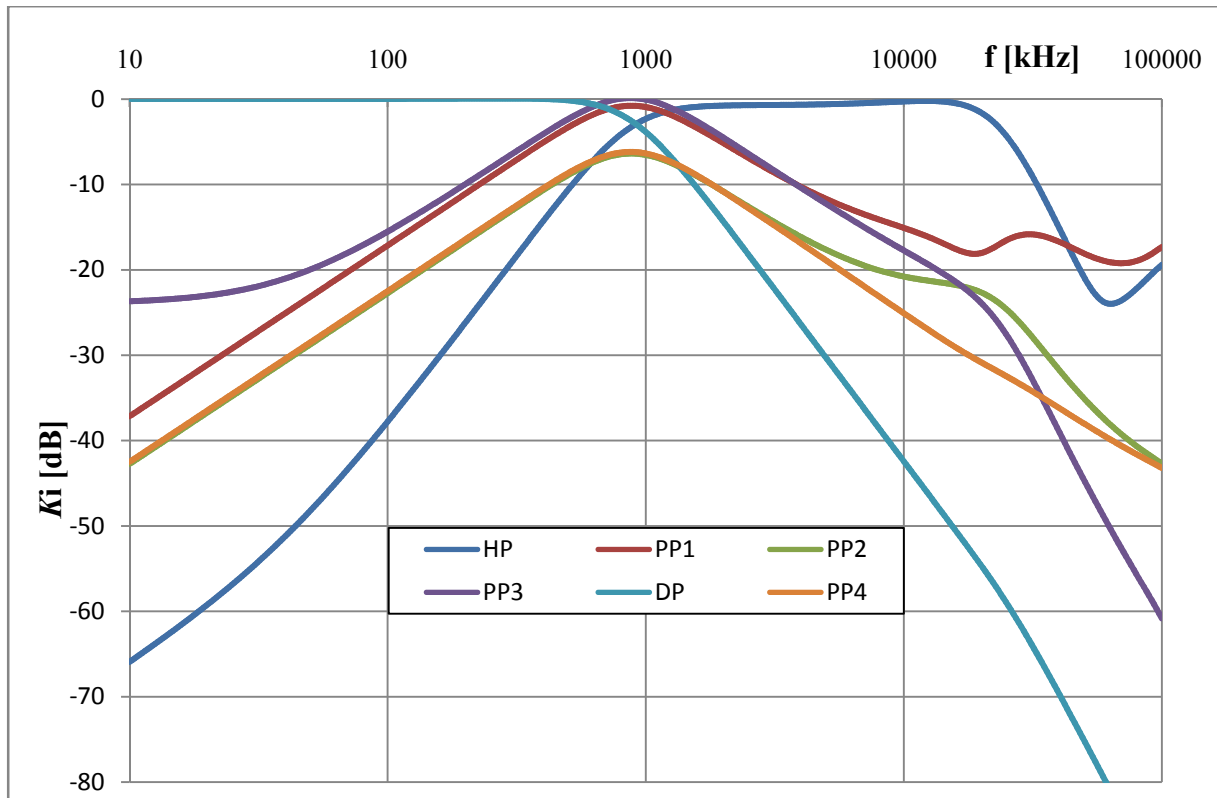
Zkoumaný obvod 2 byl následně simulován v programu SNAP, kde jednotlivé přenosové funkce vycházeli na základě teoretických předpokladů. Pro realističtější přiblížení tohoto multifunkčního filtru byly v zapojení zkoumaného obvodu 2 nahrazeny prvky GCMÍ za integrované obvody UCC-N1B [7], konkrétně modelu první (obr. 16), druhé (obr. 17) a třetí (obr. 18) úrovně a simulovány v programu OrCAD. Model první úrovně v porovnání s programem SNAP vykazují shodné charakteristiky. Na obr. 16 můžeme pozorovat překrývání charakteristik pásmových propustí PP1 s PP3 a PP2 s PP4. Charakteristiky dolní propusti DP a horní propusti HP vykazují téměř ideální průběhy, což můžeme dokázat jejich složením od útlumu 3 dB, kde nám vznikne pásmová propust s útlumem 40 dB/dekádu. Na obr. 17 si lze všimnout opět téměř ideální dolní propusti DP. Horní propust HP nám začíná vykazovat pozvolný útlum od kmitočtu 4 MHz. Menší odchylky již můžeme při větších útlumech vidět i u velmi podobných charakteristik pásmových propustí PP1 s PP3 a PP2 s PP4. Předpokládaný největší vliv na všechny simulované charakteristiky má model třetí úrovně zachycené na obr. 18. Stále dobré výsledky po simulaci vykazují průběhy dolní propusti DP a pásmové propusti PP4. Charakteristika pásmové propusti PP2 má v levé části průběhu téměř stejné výsledky jako pásmová propust PP4 ale v pravé části nedodrží mezi kmitočty 20 MHz a 80 MHz požadovaný pokles na dekádu. Charakteristika pásmové propusti PP1 již nemá v mezním kmitočtu nulový útlum a také její průběh od kmitočtu 20 MHz je zvlněný a neklesající. Charakteristika pásmové propusti PP3 má dobré výsledky po celém kmitočtovém spektru. Menší pokles lze vidět u nízkých kmitočtů a u vyšších pak přibližně v kmitočtu 20 MHz druhý bod zlomu a následný vyšší pokles na dekádu. Charakteristika horní propusti HP má dobré výsledky do kmitočtu 20MHz od tohoto bodu začíná velice utlumovat až k 24 dB.



Obr. 16 : Charakteristiky zkoumaného obvodu 2 v proudovém módu s prvky UCCN1B, model první úrovně



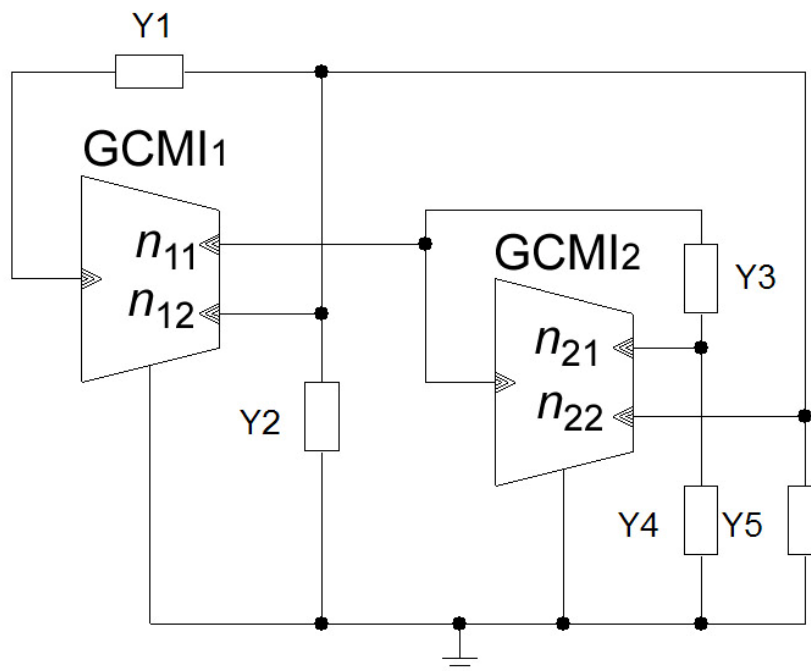
Obr. 17 : Charakteristiky zkoumaného obvodu 2 v proudovém módu s prvky UCCN1B, model druhé úrovně



Obr. 18 : Charakteristiky zkoumaného obvodu 2 v proudovém módu s prvky UCCN1B, model třetí úrovně

4.3 Zkoumaný obvod 3

Další z navržených obvodů je zachycen na obr. 19. Tento autonomní obvod má dvě admitance Y_1 a Y_3 plovoucí, jinak řečeno nejsou ani jedním vodičem přímo uzemněny. Zbývající admitance Y_2 , Y_4 a Y_5 jsou jedním vývodem uzemněny, což nám umožňuje v proudovém módu mezi admitancí a zemí připojit výstupní obvod.



Obr. 19 : Zkoumaný obvod 3 zapojený jako autonomní obvod

Z obr. 19 je vidět, že žádný z výstupů proudových prvků není přímo uzemněn. Což ale není příliš vhodné, z toho důvodu, že nebudeme mít později možnost v přenosových funkcích nahradit obecný proudový koeficient n_{xx} za 1 nebo -1 a tím třeba vytvořit tím jednu z přenosových funkcí definovaných v kapitole 1.2. Charakteristickou rovnicí toho obvodu lze pomocí programu SNAP zapsat jako

$$D_3 = Y_4 Y_5 + Y_4 Y_1 - n_{11} n_{22} Y_4 Y_1 + n_{12} Y_4 Y_1 + Y_4 Y_2 + Y_5 Y_3 + n_{21} Y_5 Y_3 + Y_1 Y_3 + n_{21} Y_1 Y_3 - n_{11} n_{22} Y_1 Y_3 + n_{12} Y_1 Y_3 + n_{12} n_{21} Y_1 Y_3 + Y_3 Y_2 + n_{21} Y_3 Y_2 . \quad (4.29)$$

V rovnici (4.29) je opět potřebné vhodně zvolit všechny proudové přenosové koeficienty a tak, abychom rovnici co nejvíce zjednodušili, ale současně v ní zůstali všechny součiny admitancí kladné a navíc abychom poté byli schopni realizovat všechny mocniny

komplexní proměnné p . V rovnici jsou čtyři proměnné, které můžeme nahradit buď 1, nebo -1, což nám dává 32 možností.

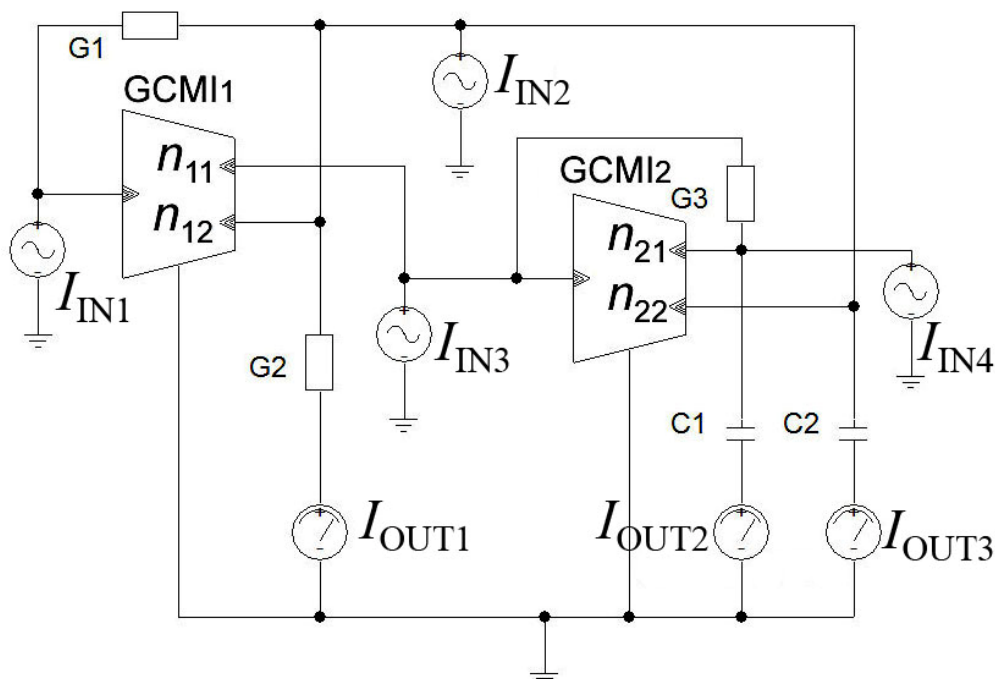
Pokud zvolíme $n_{11} = -1$, $n_{12} = -1$, $n_{21} = -1$ a $n_{22} = 1$ přejde rovnice (4.29) do tvaru

$$D_3 = Y_4 Y_5 + Y_4 Y_1 + Y_4 Y_2 + Y_1 Y_3 . \quad (4.30)$$

Dále v rovnici (4.30) zvolíme za admitance konkrétní pasivní prvky tak, abychom měli v rovnici obsaženy všechny stupně komplexní proměnné do řádu filtru. Zvolit můžeme ze čtyř možností, ale jen dvě nám vytvoří potřebnou rovnici. Pokud zvolíme za admitance Y_3 a Y_1 kapacity, tak po simulaci dostaneme pouze dvě přenosové funkce, které tvoří pásmovou a dolní propust. Po zvolení za admitance Y_2 a Y_4 nebo Y_4 a Y_5 se navýší počet použitelných přenosových funkcí o jednu více a to horní propust. Poslední zbývající možnost volby za Y_4 a Y_1 je nepoužitelná jelikož se v rovnici nevyskytne člen s nejnižším stupněm komplexní proměnné. Po náhradě $Y_4 = pC_1$, $Y_5 = pC_2$, $Y_1 = pG_1$, $Y_2 = pG_2$ a $Y_3 = G_3$ přejde rovnice 4.30 na tvar

$$D_3 = G_1 G_3 + p(G_1 C_1 + C_1 G_2) + p^2(C_1 C_2) . \quad (4.31)$$

Zapojení pomocí pasivních prvků a s naznačenými třemi budícími zdroji a třemi výstupními branami je vyobrazeno na obr. 20.



Obr. 20 : Zkoumaný obvod 3 s pasivními prvky

Pro lepší orientaci uvádím v tab. 7 přenosové funkce zkoumaného obvodu 3 v proudovém módu.

Tab. 7 : Čitatele přenosových funkcí zkoumaného obvodu 3

		proudové vstupy			
		I_{OUT1}	I_{OUT2}	I_{OUT3}	I_{OUT4}
proudové výstupy	I_{IN1}	$G_3 G_2$	$-p C_1 G_2$	$G_2 G_3$ $p C_1 G_2$	$G_2 G_3$
	I_{IN2}	$-p(C_1 G_1 + C_1 G_2)$ $-p^2(C_1 C_2)$	$-p C_1 G_1$	$-p C_1 G_2$ $-p^2(C_1 C_2)$	$-p(C_1 G_1 + C_1 G_2)$ $-p^2(C_1 C_2)$
	I_{IN3}	$p(C_2 G_3)$	$p^2 C_1 C_2$	$p C_2 G_3$ $p^2(C_1 C_2)$	$p(C_2 G_3)$

V tab. 7 můžeme nalézt pět různých přenosových funkcí vytvářející funkce filtrační. Můžeme je zapsat jako

$$K_{DP} = \frac{I_{OUT1}}{I_{IN1}} = \frac{G_3 G_2}{D_3}, \quad K_{PP1} = \frac{I_{OUT3}}{I_{IN1}} = \frac{p C_2 G_3}{D_3} \quad (4.32a, 4.32b)$$

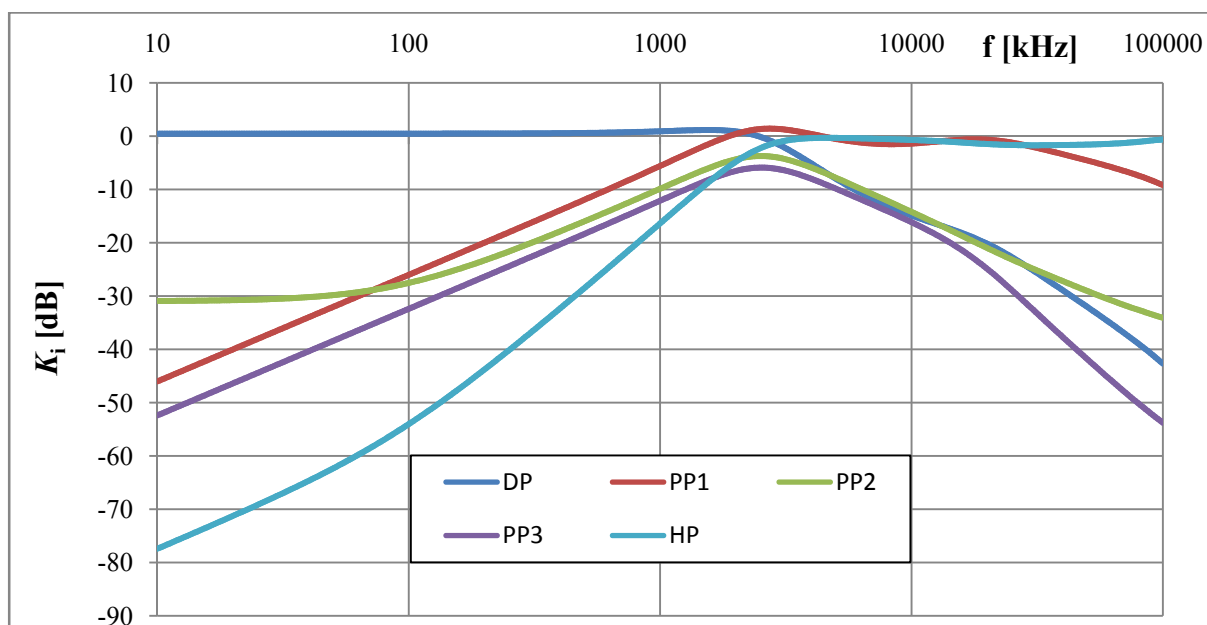
$$K_{PP2} = \frac{I_{OUT1}}{I_{IN2}} = \frac{-p C_1 G_2}{D_3}, \quad K_{PP3} = \frac{I_{OUT2}}{I_{IN2}} = \frac{-p G_1 C_2}{D_3} \quad (4.32c, 4.32d)$$

$$K_{PP3} = \frac{I_{OUT2}}{I_{IN2}} = \frac{-p G_1 C_2}{D_3}, \quad K_{HP} = \frac{I_{OUT2}}{I_{IN2}} = \frac{-p^2 C_1 C_2}{D_3} \quad (4.32e, 4.32f)$$

Následným porovnáním přenosových funkcí rovnic 4.32 s funkcemi v kapitole 1.3 lze vidět, že rovnice 4.32a tvoří dolní propust, rovnice 4.32b - 4.32e pásmovou a invertující pásmovou propust a rovnice 4.32f horní propust.

Pro výpočet hodnot konkrétních pasivních prvků zkoumaného obvodu 3 byl zvolen mezní kmitočet $f_m = 3$ MHz a aproximace dle Butterwortha jejíž koeficienty přenosové funkce (1.11) dle literatury [5] jsou $b_0 = 1$, $b_1 = \sqrt{2}$ a $b_2 = 1$. Nejprve ale musíme rovnici (4.31) upravit do vhodného tvaru tak, abychom byli schopni dopočítat pasivní prvky. Při výpočtu můžeme postupovat dle detailního rozpisu u zkoumaného obvodu 1 nebo 2. Zvolme $C_1 = 27$ pF, $C_2 = 47$ pF, $G_1 = 0,625$ mS neboli $R_1 = 1600 \Omega$ a dopočteme (poté volíme z řady E24) $G_2 =$

0.6279 mS tedy $R_2 = 1593 \Omega \doteq 1,6 \text{ k}\Omega$ a $G_3 = 0.7214 \text{ mS}$ tedy $R_3 = 1386 \Omega \doteq 1.3 \text{ k}\Omega$. Volba kapacitorů a vodivosti G_1 byla zohledňována vzhledem k přenosu v propustném pásmu dolní propusti (rovnice 4.32a) jejíž hodnota je $K_0 = 0,04 \text{ dB}$. Pro reálné přiblížení tento obvod odsimulují pouze s modelem třetí úrovně integrovaného obvodu UCC-N1B [7] v programu OrCAD. Přenosové charakteristiky zkoumaného obvodu 3 jsou zobrazeny na obr. 21.

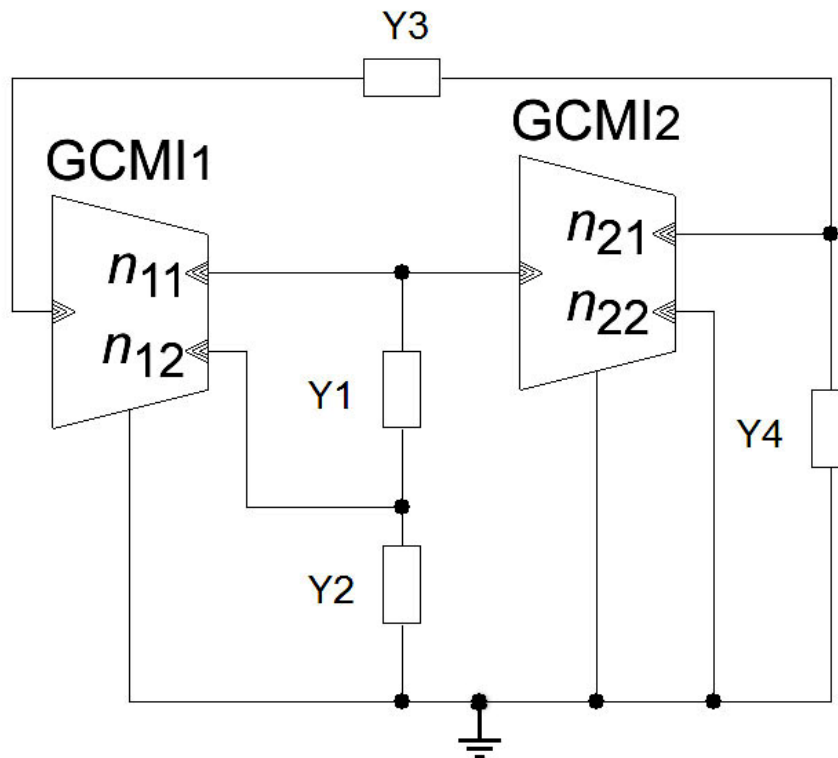


Obr. 21 : Přenosové charakteristiky zkoumaného obvodu 3 simulované s modelem UCC-N1B třetí úrovně

Z obr. 21 lze vyčíst, že z pásmových propustí se po simulaci nejvíce blíží teoretické představě charakteristika označená PP3. Dále je to PP2, která má na nižších kmitočtech vykazuje stálý pokles -30 dB. Nejhorší průběh má charakteristika označována PP1, která se chová od kmitočtu zlomu jako horní propust s následným poklesem na vyšších kmitočtech. Dolní propust má téměř ideální průběh v propustném pásmu, v nepropustném pásmu si udržuje stálý pokles 20 dB/dek až po -25 dB od něj má strmější pokles. Horní propust má charakteristiku mírně zkreslenou na nižších kmitočtech a od mezního kmitočtu dodrží v propustném pásmu útlum 0 dB, ale s narůstajícím kmitočtem je průběh utlumen s největším poklesem v této oblasti $K_{HPmin} = -1,7 \text{ dB}$.

4.4 Zkoumaný obvod 4

Poslední z navržených obvodů se dvěma prvky GCMÍ je zobrazen na obr. 19. Tento autonomní obvod má dvě admitance Y_1 a Y_3 plovoucí, jinak řečeno nejsou ani jedním vodičem přímo uzemněny. Zbývající admitance Y_2 a jsou jedním vývodem uzemněny, což nám umožňuje v proudovém módu mezi admitancí a zemí připojit výstupní obvod.



Obr. 22 : Zkoumaný obvod 4 zapojený jako autonomní obvod

Uvedený autonomní obvod má výstup n_{22} z prvku GCMÍ2 ihned uzemněn, čehož lze využít při hledání přenosových funkcí. Tento proudový přenosový koeficient se objeví v některých čitatelích přenosových funkcí a budeme ho moci zaměnit za 1 nebo -1 čímž možná zvětšíme počet přenosových funkcí.

V programu SNAP si lze vypsát charakteristickou rovnici, jejíž tvar je

$$D_4 = Y_4 Y_1 + Y_4 Y_2 + Y_3 Y_1 - n_{11} n_{21} Y_3 Y_1 - n_{12} n_{21} Y_3 Y_1 + Y_3 Y_2 - n_{11} n_{21} Y_3 Y_2. \quad (4.33)$$

V této charakteristické rovnici je možné dosáhnout toho, aby u každé komplexní proměnné byl pouze jeden součin admitancí. Tato možnost je příznivá z důvodu lepší manipulace s jednotlivými přenosovými funkcemi, jejich méně rozsáhlým vyjádřením a proto i možností vytvářet pomocí součtu jednotlivých přenosových funkcí další přenosové funkce. Proto je v rovnici (4.33) důležité zvolit proudové přenosové koeficienty n_{11} , n_{12} a n_{21} tak, abychom rovnici co nejvíce zjednodušili, ale současně v ní zůstali všechny součiny admitancí kladné a navíc abychom poté byli schopni realizovat všechny mocniny komplexní proměnné p . V rovnici jsou tři proměnné, které můžeme nahradit buď 1, nebo -1, což nám dává 8 možností, které jsou uvedeny v tabulce 8.

Tab. 8 : Možnosti volby charakteristické rovnice zkoumaného obvodu 4

Varianta	přenosové koeficienty			charakteristická rovnice
	n_{11}	n_{12}	n_{21}	D_4
1	1	1	1	$Y_4Y_1 + Y_4Y_2 - Y_3Y_1$
2	1	1	-1	$Y_4Y_1 + Y_4Y_2 + 3Y_3Y_1 + 2Y_3Y_2$
3	1	-1	1	$Y_4Y_1 + Y_4Y_2 + Y_3Y_1$
4	1	-1	-1	$Y_4Y_1 + Y_4Y_2 + Y_3Y_1 + 2Y_3Y_2$
5	-1	1	1	$Y_4Y_1 + Y_4Y_2 + Y_3Y_1 + 2Y_3Y_2$
6	-1	1	-1	$Y_4Y_1 + Y_4Y_2 + Y_3Y_1$
7	-1	-1	1	$Y_4Y_1 + Y_4Y_2 + 3Y_3Y_1 + 2Y_3Y_2$
8	-1	-1	-1	$Y_4Y_1 + Y_4Y_2 - Y_3Y_1$

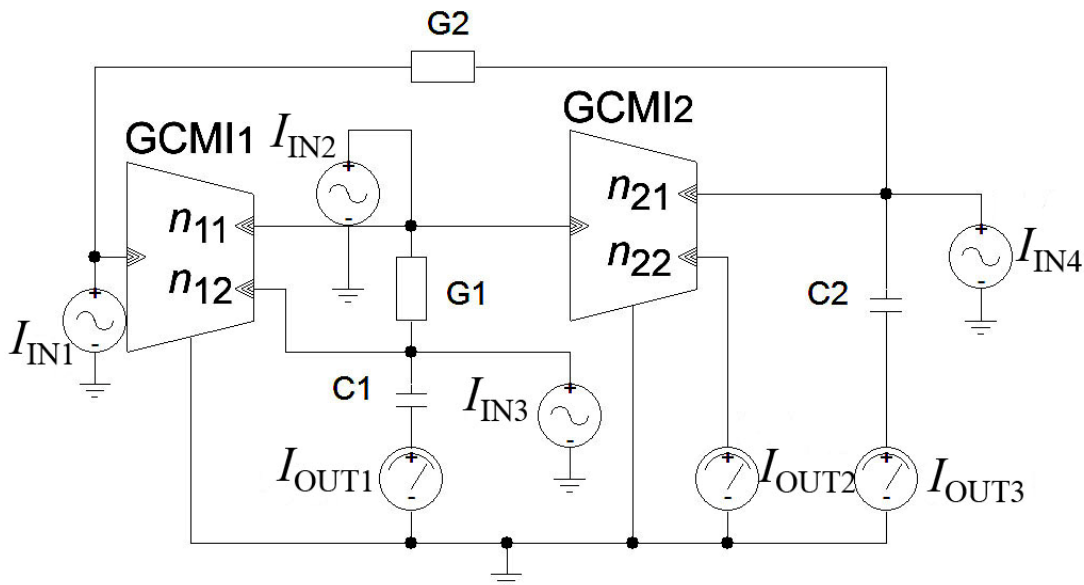
V tab. 8 lze nalézt dvě varianty, které mají tři kladné součty součinů admitancí. Jsou to varianty 3 a 6. Vyberme tedy možnost s variantou 3. Zvolíme $n_{11} = 1$, $n_{12} = -1$, $n_{21} = 1$ a $n_{22} = 1$, čímž se rovnice 4.33 redukuje na tvar

$$D_4 = Y_4Y_1 + Y_4Y_2 + Y_3Y_1. \quad (4.34)$$

V rovnici 4.34 je třeba nyní zvolit pasivní prvky, tak abychom získali rovnici, ve které se objeví všechny stupně komplexní proměnné až do nejvyššího řádu. Máme dvě možnosti jak tuto podmínku splnit a to zvolením kapacitorů za admitance Y_4 a Y_2 nebo za Y_3 a Y_1 . Zvolíme první možnost, u které jsou kapacitory uzemněny. V druhém případě by byli plovoucí, což není nejlepším řešením dobré a hůře se v tomto případě realizuje horní propust.

Pokud bychom nahradili kapacity za admitance Y_4 a Y_1 , pak by se v charakteristické rovnici neobjevili všechny stupně komplexní proměnné. Konkrétně by chyběl člen s^0 . Zvolíme tedy $Y_2 = pC_1$, $Y_4 = pC_2$, $Y_1 = G_1$, $Y_3 = G_2$ a $Y_5 = G_3$. Rovnici 4.34 po nahrazení admitancí za konkrétní pasivní prvky přejde na tento tvar

$$D_4 = G_1 G_2 + p(C_2 G_1) + p^2(C_1 C_2) . \tag{4.35}$$



Obr. 23 : Zkoumaný obvod 4 zapojený pomocí pasivních prvků

Tab. 9 : Čitatelé přenosových funkcí zkoumaného obvodu 3

		proudové vstupy		
		I_{OUT1}	I_{OUT2}	I_{OUT3}
proudové výstupy	I_{IN1}	$-pC_1G_2$	$-pn_{22}C_1G_2$	$-p^2C_1C_2$
		$-p^2C_1C_2$	$-p^2n_{22}C_1C_2$	
	I_{IN2}	pC_1G_2	$n_{22}G_1G_2$	
			$+pn_{22}(C_1G_2+C_2G_1)$	pC_1G_2
			$+p^2n_{22}C_1C_2$	$+p^2(C_1C_2)$
	I_{IN3}	$-p^2C_1C_2$	$n_{22}G_1G_2$	pC_2G_1
			$+pn_{22}C_2G_1$	
	I_{IN4}	$-pC_1G_2$	$-pn_{22}C_1G_2$	$-pC_2G_1$
				$-p^2C_1C_2$

Zapojení pomocí pasivních prvků a s naznačenými čtyřmi budícími zdroji a třemi výstupními branami je vyobrazeno na obr. 23.

Pro lepší orientaci uvádím v tab. 9 přenosové funkce zkoumaného obvodu 4 v proudovém módu. V tab. 9 můžeme nalézt čtyři odlišné přenosové funkce vytvářející funkce filtrační bez součtů více výstupů. Pokud budeme vytvářet filtrační funkce pomocí více součtů, pak jsme schopni rozšířit počet funkcí ještě o dvě, a to když zvolíme proudový přenosový koeficient $n_{22} = -1$. Všechny tyto filtrační funkce můžeme zapsat jako

$$K_{PP1} = \frac{I_{OUT3}}{I_{IN3}} = \frac{p G_1 C_2}{D_4}, \quad K_{PP2} = \frac{I_{OUT2}}{I_{IN1}} = \frac{I_{OUT1}}{I_{IN2}} = \frac{p C_1 G_2}{D_4} \quad (4.36a, 4.36b)$$

$$K_{PP3} = \frac{I_{OUT1}}{I_{IN1}} = -\frac{p C_1 G_2}{D_4}, \quad (4.36c)$$

$$K_{HP} = \frac{I_{OUT1}}{I_{IN3}} = \frac{I_{OUT3}}{I_{IN4}} - \frac{p^2 C_1 C_2}{D_4}, \quad (4.36d)$$

$$K_{PZ} = \frac{I_{OUT1} + I_{OUT2} + I_{OUT3}}{I_{IN3}} = -\frac{G_1 G_2 + p^2 C_1 C_2}{D_4}, \quad (4.36e)$$

$$K_{DP} = \frac{I_{OUT1} + I_{OUT2} + I_{OUT3}}{I_{IN2}} = \frac{I_{OUT2} + I_{OUT3}}{I_{IN3}} = -\frac{G_1 G_2}{D_4}. \quad (4.36f)$$

Následným porovnáním přenosových funkcí rovnic 4.36 s funkcemi v kapitole 1.3 lze vidět, že rovnice 4.36a a 4.36b tvoří pásmovou propust, rovnice 4.36c invertující pásmovou propust, rovnice 4.36d invertující horní propust, rovnice 4.36e invertující pásmovou zadrž a rovnice 4.36f invertující dolní propust.

Pro výpočet hodnot konkrétních pasivních prvků zkoumaného obvodu 4 byl zvolen mezní kmitočet $f_m = 1$ MHz a aproximace dle Butterwortha jejíž koeficienty přenosové funkce (1.11) dle literatury [5] jsou $b_0 = 1$, $b_1 = \sqrt{2}$ a $b_2 = 1$. Nejprve ale musíme rovnici (4.35) upravit do vhodného tvaru tak, abychom byli schopni dopočítat pasivní prvky. Při výpočtu můžeme postupovat dle detailního rozpisu u zkoumaného obvodu 1 nebo 2.

Vztah pro charakteristický kmitočet tohoto filtračního zapojení lze odvodit z charakteristické rovnice (4.35) a je roven

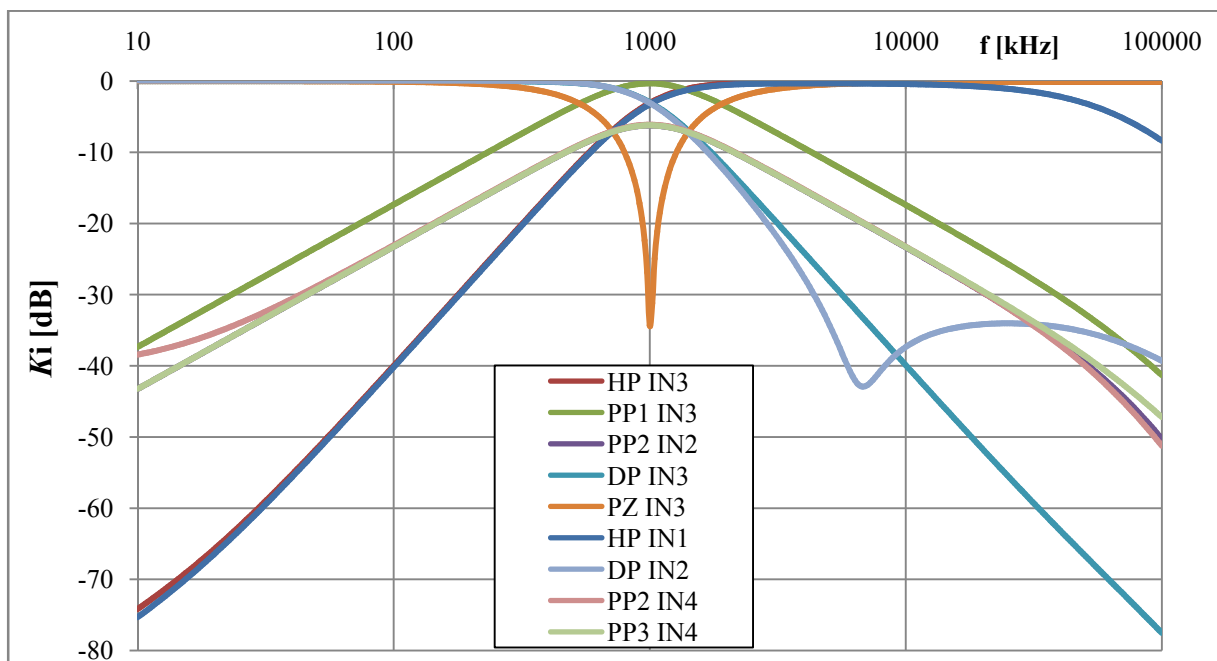
$$f_m = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{G_1 G_2}{C_1 C_2}}, \quad (4.37)$$

podobným způsobem lze vyjádřit i vztah pro činitel jakosti,

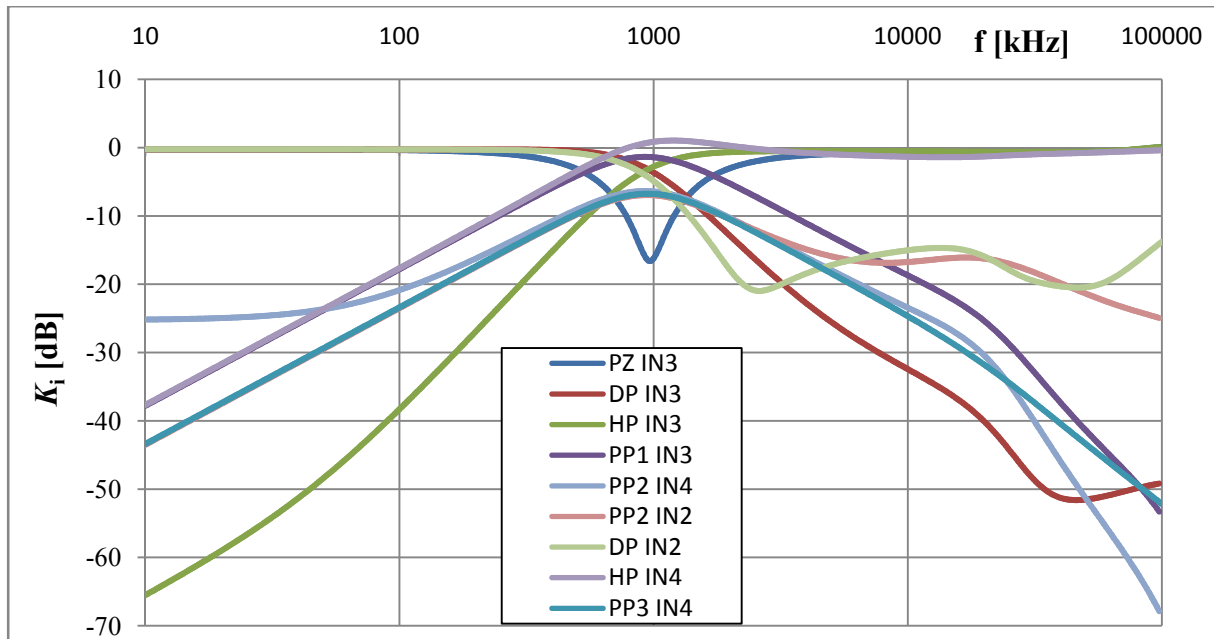
$$Q = \sqrt{\frac{C_1 G_2}{C_2 G_1}} = \frac{G_2}{C_2 \omega_m}. \quad (4.38)$$

Srovnáme-li oba předchozí vztahy, vidíme, že činitel jakosti Q lze nastavit nezávisle na hodnotě charakteristického kmitočtu f_m pomocí hodnoty vodivosti (rezistoru) G_2 a kapacitoru C_2 .

Zvolme $C_1 = 56 \text{ pF}$, $C_2 = 47 \text{ pF}$ a dopočteme (poté volíme z řady E24) $G_1 = 0,4976 \text{ mS}$ což je $R_1 = 2009 \text{ } \Omega \doteq 2 \text{ k}\Omega$ a $G_2 = 0,2088 \text{ mS}$ což je $R_2 = 4789 \text{ } \Omega \doteq 4,7 \text{ k}\Omega$. Volba kapacitorů byla zohledňována vzhledem k přenosu v propustném pásmu dolní propusti (rovnice 4.36f) jejíž hodnota je $K_0 = 0 \text{ dB}$ a při prvcích vzatých z řady E24 je $K_0 \text{ (E24)} = -0,2 \text{ dB}$. Mezní kmitočet se změní z původního navrženého $f_m = 1 \text{ MHz}$ na $f_m \text{ E24} = 1,0118 \text{ MHz}$. Pro realističtější přiblížení tento obvod simuluji s modelem druhé a třetí úrovně integrovaného obvodu UCC-N1B [7] v programu OrCAD. Přenosové charakteristiky zkoumaného obvodu 4 s použitím modelu UCC-N1B druhé úrovně jsou zobrazeny na obr. 24.



Obr. 24 : Přenosové charakteristiky zkoumaného obvodu 4 s modelem UCC-N1B druhé úrovně



Obr. 25 : Přenosové charakteristiky zkoumaného obvodu 4 s modelem UCC-N1B třetí úrovně

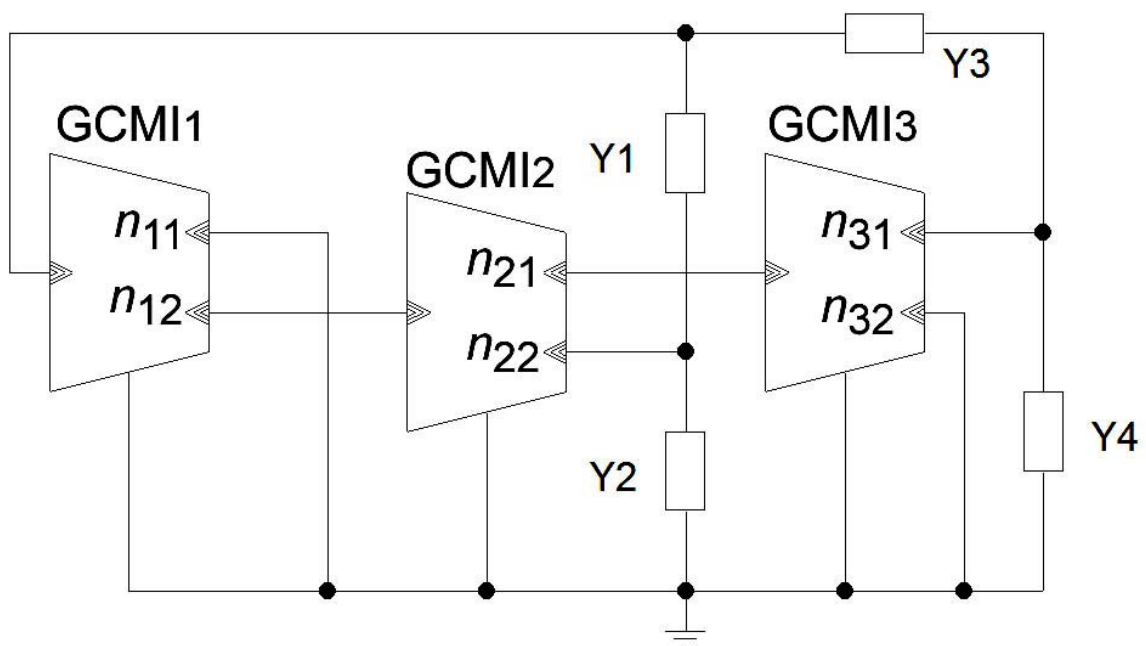
Z obr. 24 a obr. 25 lze pozorovat již u modelu UCC-N1B druhé úrovně přenosových charakteristik jisté změny oproti předpokládaným teoretickým průběhům. Simulovaná přenosová funkce PZ IN3 nemá v propustné oblasti žádné zkreslení, ale v nepropustném pásmu stálý pokles pouze do -35 dB a u modelu třetí úrovně již do -15 dB. Dolní propust DP IN3 má u modelu druhé úrovně stále teoretický průběh, což již neplatí u DP IN2, která je použitelná do kmitočtu 6,787 MHz, od něhož se její přenos zvyšuje a má obloukovitý charakter. U modelu třetí úrovně je přenosová charakteristika DP IN2, již zkreslena od kmitočtu 2,6 MHz a útlumu 22 dB. U přenosové charakteristiky DP IN3 lze podobné změny pozorovat až od kmitočtu 47 MHz. Přenosová funkce HP IN3 je u modelu druhé úrovně opět téměř ideální. U HP IN1 lze pozorovat pozvolný pokles v propustném pásmu od kmitočtu 50 MHz, kde je již zřetelný pokles od 3 dB. U modelu třetí úrovně je přenosová funkce HP IN3 zkreslena jen na nízkých kmitočtech. Za to HP IN4 má pouze útlum 20 dB na dekádu a v oblasti mezního kmitočtu má přenos v kladných hodnotách. Simulované pásmové propusti u modelu druhé úrovně mají podobný charakter průběhu kromě PP1 IN3, která má požadovaný přenos -3 dB na mezním kmitočtu, zbylé pásmové propusti mají na mezním kmitočtu přenos -6 dB. U modelu třetí úrovně se u pásmových propustí k těmto nedostatkům ještě přidají zkreslení na různých kmitočtech a nedodržení požadovaných útlumů na dekádu. Nejlépe vychází z pásmových propustí průběh PP IN3, která má větší útlum na vyšších kmitočtech než by bylo požadováno.

5 NÁVRH MULTIFUNKČNÍCH FILTRŮ SE TŘEMI PRVKY GCMÍ

Návrh multifunkční filtrů se třemi prvky GCMÍ bude opět vycházet z návrhové metody autonomního obvodu. Některý prvek GCMÍ se bude možná v zapojení jevit jako zbytečný, ale své opodstatnění zde má. Může to být z důvodu zpětné vazby, díky níž se rozšíří charakteristická rovnice, ve které bude větší možnost vhodného zvolení přenosových proudových koeficientů, a tak ji vhodně zredukovat na požadovaný tvar.

5.1 Zkoumaný obvod 5

První zkoumaný obvod se třemi prvky GCMÍ má dvě impedance Y_1 a Y_3 plovoucí. Zbývající impedance Y_2 a Y_4 jsou uzemněny a jsou zemnicími impedancemi pro plovoucí.



Obr. 26 : Autonomní obvod zkoumaného zapojení 5

V programu SNAP si lze vypsát charakteristickou rovnici, jejíž tvar je

$$D_5 = -Y_1 Y_3 + n_{12} n_{22} Y_1 Y_3 - n_{12} n_{22} n_{31} Y_1 Y_3 - Y_1 Y_4 + n_{12} n_{22} Y_1 Y_4 - Y_3 Y_2 - n_{12} n_{22} n_{31} Y_3 Y_2 - Y_4 Y_2. \quad (5.1)$$

V rovnici 5.1 jsou čtyři proudové koeficienty, které je možné zvolit tak aby se rovnice co nejvíce zjednodušila, ale aby v ní zůstali minimálně tři součty součinů admitancí. To z toho důvodu, aby se v rovnici mohli vyskytnout všechny členy komplexní proměnné až do nejvyššího stupně. Jednotlivé možnosti volby proudových koeficientů jsou vypsány v tabulce 10. V předposledním sloupci je vypsán počet součinů a v poslední pak jestli bude charakteristická rovnice kladná či záporná.

Tab. 10: Jednotlivé varianty volby proudových koeficientů zkoumaného obvodu 5

varianta	n_{12}	n_{21}	n_{22}	n_{31}	součinů	D
1	-1	-1	-1	-1	*	*
2	-1	-1	-1	1	3	+
3	-1	-1	1	-1	3	-
4	-1	-1	1	1	4	+
5	-1	1	-1	-1	3	+
6	-1	1	-1	1	*	*
7	-1	1	1	-1	4	+
8	-1	1	1	1	3	-
9	1	-1	-1	-1	4	+
10	1	-1	-1	1	3	-
11	1	-1	1	-1	3	+
12	1	-1	1	1	*	*
13	1	1	-1	-1	3	-
14	1	1	-1	1	4	-
15	1	1	1	-1	*	*
16	1	1	1	1	3	+

* v charakteristické rovnici jsou některé součiny admitancí záporné

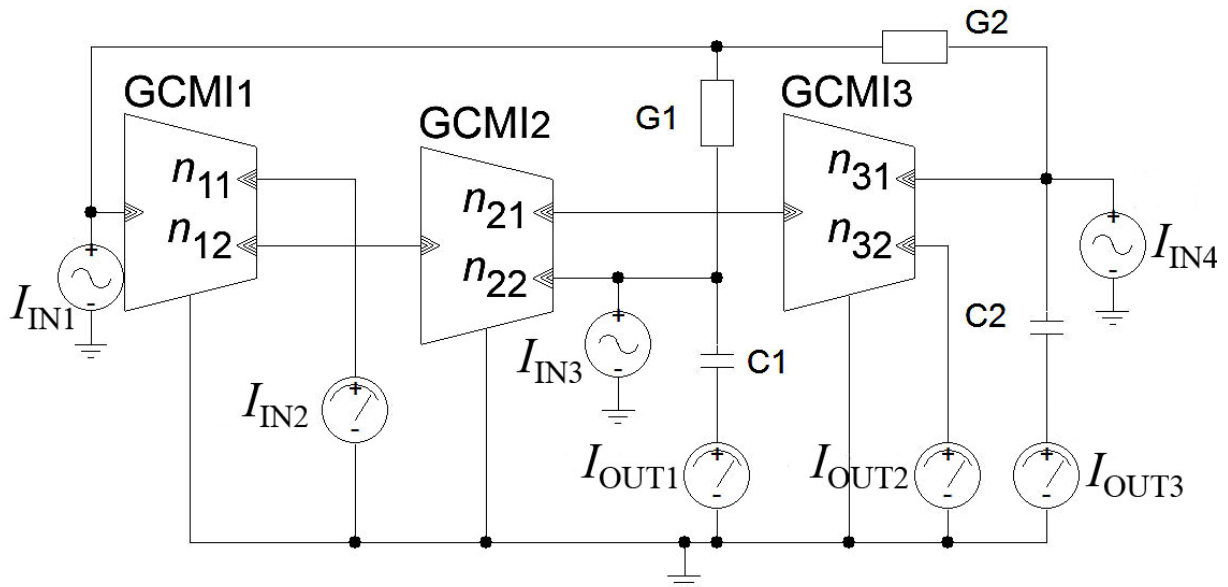
Zvolme variantu 11 a rovnice 5.1 přejde ve tvar

$$D_5 = Y_4 Y_2 + 2Y_2 Y_3 + Y_1 Y_3 . \quad (5.2)$$

V rovnici 5.2 můžeme zvolit ze dvou variant, tak abychom dosáhli všechny stupně komplexní proměnné. Vyberme si první dvojici Y_4 a Y_2 , za kterou dosadíme kapacitory a za zbylé admitance pak vodivosti. Zvolím tedy $Y_2 = pC_1$, $Y_4 = pC_2$, $Y_1 = G_1$ a $Y_3 = G_2$. Rovnici 5.2 pak zapíšeme jako

$$D_5 = G_1 G_2 + 2p(C_1 G_2) + p^2(C_1 C_2) . \quad (5.3)$$

Po volbě pasivních prvků, můžeme předcházející zapojení nahradit za zapojení na obr. 27, kde jsou již naznačeny vstupní a výstupní brány.



Obr. 27 : Zkoumaný obvod 5 zapojen s konkrétními pasivními prvky

Nyní můžeme přistoupit k buzení jednotlivých vstupů a odebrání proudů na výstupech. Poměr výstupních a vstupních proudů tvoří přenosové funkce, jejíž čitatele jsou vypsány v tabulce 11.

Tab. 11 : Čitatele přenosových funkcí zkoumaného obvodu 5

		proudové vstupy			
		I_{OUT1}	I_{OUT2}	I_{OUT3}	I_{OUT4}
proudové výstupy	I_{IN1}	$n_{11}G_1G_2$		$n_{32}G_1G_2$	
		$+pn_{11}(C_1G_2+C_2G_1)$	pC_1G_2	$+pn_{32}(C_1G_2+C_2G_1)$	pC_2G_1
		$+p^2n_{11}C_1C_2$	$+p^2C_1C_2$	$+p^2n_{32}C_1C_2$	$+p^2C_1C_2$
	I_{IN2}	$n_{11}G_1G_2$		$n_{32}G_1G_2$	
		$pn_{11}G_1G_2$	$2pC_1G_2$	$pn_{32}G_1C_2$	pC_2G_1
			$+p^2n_{22}C_1C_2$		
	I_{IN3}	$n_{11}G_1G_2$		$n_{32}G_1G_2$	pC_2G_1
		$+pn_{11}C_1G_2$	$+pC_1G_2$	$+pn_{32}C_1G_2$	$+p^2C_1C_2$

Z tab. 11 lze usoudit, že i když je v charakteristické rovnici téměř nejmenší počet členů u komplexních proměnných, tak nám to nezaručí, že se ihned objeví samostatné

přenosové funkce. Proto je volba jednotlivých proudových koeficientů namísto. Pokud zvolíme n_{11} kladné lze vytvořit dolní propust. Stejnou přenosovou funkci lze vytvořit zvolením n_{32} . Jednotlivé přenosové funkce zkoumaného obvodu 5 můžeme vypsát

$$K_{PP1} = \frac{I_{OUT2}}{I_{IN3}} = -\frac{p G_2 C_1}{D_5}, \quad K_{PP2} = \frac{I_{OUT4}}{I_{IN2}} = \frac{p C_2 G_1}{D_5} \quad (5.4a, 5.4b)$$

$$K_{HP} = \frac{I_{OUT4}}{I_{IN3}} = -\frac{p^2 C_1 C_2}{D_5}, \quad (5.4c)$$

$$K_{DP} = \frac{I_{OUT1} + I_{OUT2}}{I_{IN3}} = \frac{I_{OUT2} + I_{OUT3}}{I_{IN3}} = -\frac{G_1 G_2}{D_5}. \quad (5.4d)$$

Následným porovnáním přenosových funkcí rovnic 5.4 s funkcemi v kapitole 1.3 lze porovnat, že rovnice 5.4a a 5.4b tvoří pásmovou a invertující pásmovou propust, rovnice 5.4c invertující horní propust a rovnice 5.4d invertující horní propust.

Postup výpočtu konkrétních hodnot jednotlivých pasivních prvků lze nalézt v předchozích zkoumaných obvodech. Pro dané zapojení uvádím vztah pro charakteristický kmitočet, který lze odvodit z rovnice 5.3 a je roven

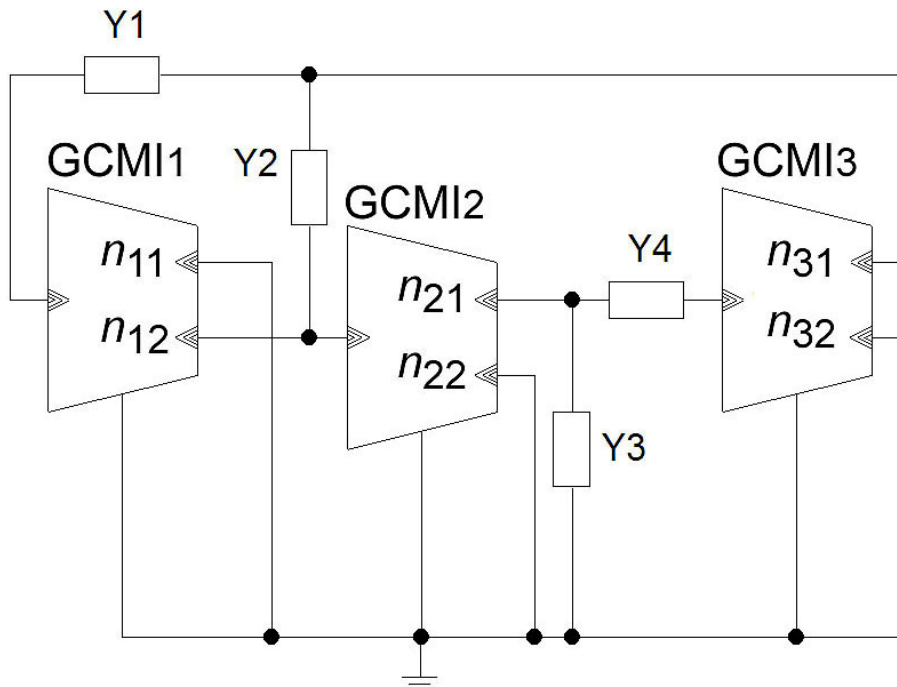
$$f_m = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{G_1 G_2}{C_1 C_2}}, \quad (5.4)$$

podobným způsobem lze vyjádřit i vztah pro činitel jakosti,

$$Q = 2 \sqrt{\frac{G_1 C_2}{G_2 C_1}} = 2 \frac{\omega_m C_2}{G_2}. \quad (5.5)$$

5.2 Zkoumaný obvod 6

Druhý obvod, který pracuje se třemi prvky GCMI je naznačen na obr. 28. Je zapojení je bez vstupních a výstupních obvodů, což značí, že se bude jednat o autonomní obvod. V uvedeném zapojení je každý z prvků GCMI jednou svorkou uzemněn, čehož se využije u vytváření dalších přenosových funkcí. V obvodě je zemněna pouze jedna impedance Y_3 , čímž se můžeme ochudit o další výstupy, ze kterých by mohla vzniknout další funkce.



Obr. 28 : Zkoumaný obvod 6 zapojen jako autonomní obvod

V programu SNAP si lze vypsát charakteristickou rovnici, jejíž tvar je

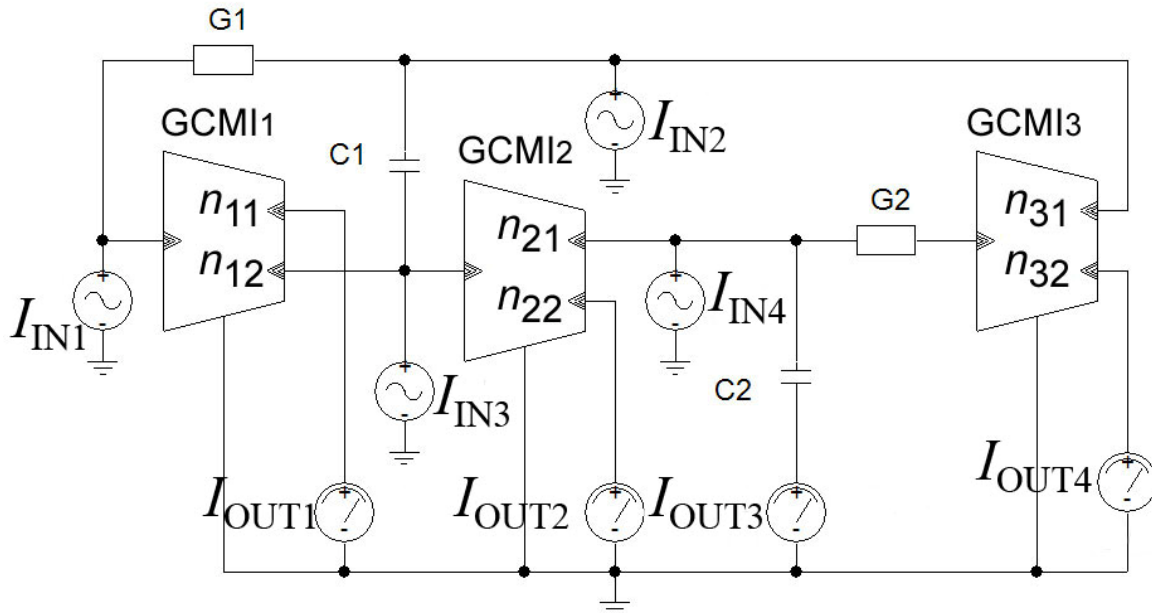
$$D_4 = -Y_1 Y_3 - Y_1 Y_4 - n_{12} n_{21} n_{31} Y_1 Y_3 - Y_2 Y_3 - Y_2 Y_4 + n_{21} n_{31} Y_2 Y_4. \quad (5.6)$$

Rovnice obsahuje tři proudové koeficienty, které můžeme libovolně zvolit mezi 1 nebo -1, tak abychom dosáhli potřebného tvaru. Celkový počet možných kombinací je tedy osm. Při vhodném zvolení za $n_{12} = 1$, $n_{21} = 1$ a $n_{31} = 1$ lze zredukovat rovnici 5.6 na tvar

$$D_6 = Y_1 Y_3 + 2Y_1 Y_4 + Y_2 Y_3. \quad (5.7)$$

V charakteristické rovnici 5.6 se nyní vyskytují všechny členy záporné. Abychom následně získali charakteristickou rovnici kladnou, je třeba vytknout -1 a rozšířit přenosovou funkci, tak aby se znaménko mínus dostalo do čitatele a jmenovatel byl kladný, což platí v rovnici 5.7.

Následně je potřeba zvolit pasívní prvky za admittance v rovnici 5.7. Vhodné nahrazení je možné dvěma způsoby. Prvním z nich je, že se nahradí admittance Y_1 a Y_4 za kapacitory. Druhou pak za admittance Y_2 a Y_3 . Druhá možnost, je příznivější, jelikož se zemní alespoň jeden kapacitor.



Obr. 29 : Zkoumaný obvod 6 zapojen pomocí pasívních prvků

Tab. 12 : Čítelele přenosových funkcí zkoumaného obvodu 6

		proudové vstupy			
		I_{OUT1}	I_{OUT2}	I_{OUT3}	I_{OUT4}
proudové výstupy	I_{IN1}	$n_{11}G_1G_2$	$n_{22}G_1G_2$		$n_{32}G_1G_2$
		$+pn_{11}C_2G_1$	$+pn_{22}(C_1G_2+C_2G_1)$	pC_2G_1	$+pn_{32}C_1G_2$
		$+p^2n_{11}C_1C_2$	$+p^2n_{22}C_1C_2$	$+p^2(C_1C_2)$	
	I_{IN2}	$n_{11}G_1G_2$	$n_{22}G_1G_2$		$-n_{32}G_1G_2$
		$+pn_{11}C_2G_1$	$-pn_{22}(C_1G_2-C_2G_1)$	pG_1C_2	$+pn_{32}C_1G_2$
			$-p^2n_{22}C_1C_2$	$-p^2(C_1C_2)$	
	I_{IN3}	$n_{11}G_1G_2$	$n_{22}G_1G_2$		$n_{32}G_1G_2$
			$pn_{22}(C_1G_2+C_2G_1)$	pC_2G_1	$+pn_{32}C_1G_2$
			$p^2n_{22}C_1C_2$	$+p^2(C_1C_2)$	
	I_{IN4}	$n_{11}G_1G_2$	$n_{22}G_1G_2$	pC_2G_1	$n_{32}G_1G_2$
			$+pn_{22}C_1G_2$	$+p^2(C_1C_2)$	$+pn_{32}C_1G_2$

V autonomním obvodu poté nahradíme admitance za konkrétní pasivní prvky a zařadíme do obvodu vstupní a výstupní brány. Takto upravené zapojení nalezneme na obr. 29. Zvolíme tedy $Y_2 = pC_1$, $Y_3 = pC_1$, $Y_1 = G_1$ a $Y_4 = G_2$ a rovnice 5.7 přejde ve tvar

$$D_6 = 2G_1G_2 + p(C_2G_1) + p^2(C_1C_2). \quad (5.8)$$

Nyní je třeba budít jednotlivé zdroje a odebírat proud na výstupech, čímž dostaneme přenosové funkce, jejichž čitatele jsou vypsány v tabulce 12. Jednotlivé přenosové funkce pak můžeme zapsat jako

$$K_{DP1} = \frac{I_{OUT1} + I_{OUT3}}{I_{IN1}} = \frac{I_{OUT1}}{I_{IN3}} = \frac{G_2 G_1}{D_6}, \quad K_{DP2} = \frac{I_{OUT1}}{I_{IN4}} = -\frac{G_2 G_1}{D_6} \quad (5.9a, 5.9b)$$

$$K_{DP3} = \frac{I_{OUT2} + I_{OUT4}}{I_{IN4}} = \frac{2G_2 G_1}{D_6}, \quad (5.9c)$$

$$K_{PP1} = \frac{I_{OUT1} + I_{OUT2}}{I_{IN4}} = \frac{I_{OUT1} + I_{OUT4}}{I_{IN3}} = -\frac{pG_2 C_1}{D_6}, \quad (5.9d)$$

$$K_{PP2} = \frac{I_{OUT1} + I_{OUT4}}{I_{IN4}} = \frac{pG_2 C_1}{D_6}, \quad K_{PZ} = \frac{I_{OUT1} + I_{OUT3}}{I_{IN2}} = \frac{G_2 G_1 + p^2 C_2 C_1}{D_6} \quad (5.9e, f)$$

Abychom dostali co nejvíce přenosových funkcí tvořících filtrační funkce, musíme zvolit zbývající proudové přenosové koeficienty. Zvolíme tedy $n_{11} = n_{22} = n_{32} = 1$.

Následným srovnáním přenosových funkcí rovnic 5.9 s funkcemi v kapitole 1.3 lze porovnat, že rovnice 5.9a, 5.9b a 5.9c tvoří dolní, invertující dolní a dolní propust, rovnice 5.9d a 5.9e invertující pásmovou a pásmovou propust a rovnice 5.9f pásmovou zádrž.

Postup výpočtu konkrétních hodnot jednotlivých pasivních prvků lze nalézt v předchozích zkoumaných obvodech. Pro dané zapojení uvádím vztah pro charakteristický kmitočet, který lze odvodit z rovnice 5.8 a je roven

$$f_m = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2G_1G_2}{C_1C_2}}, \quad (5.10)$$

podobným způsobem lze vyjádřit i vztah pro činitel jakosti,

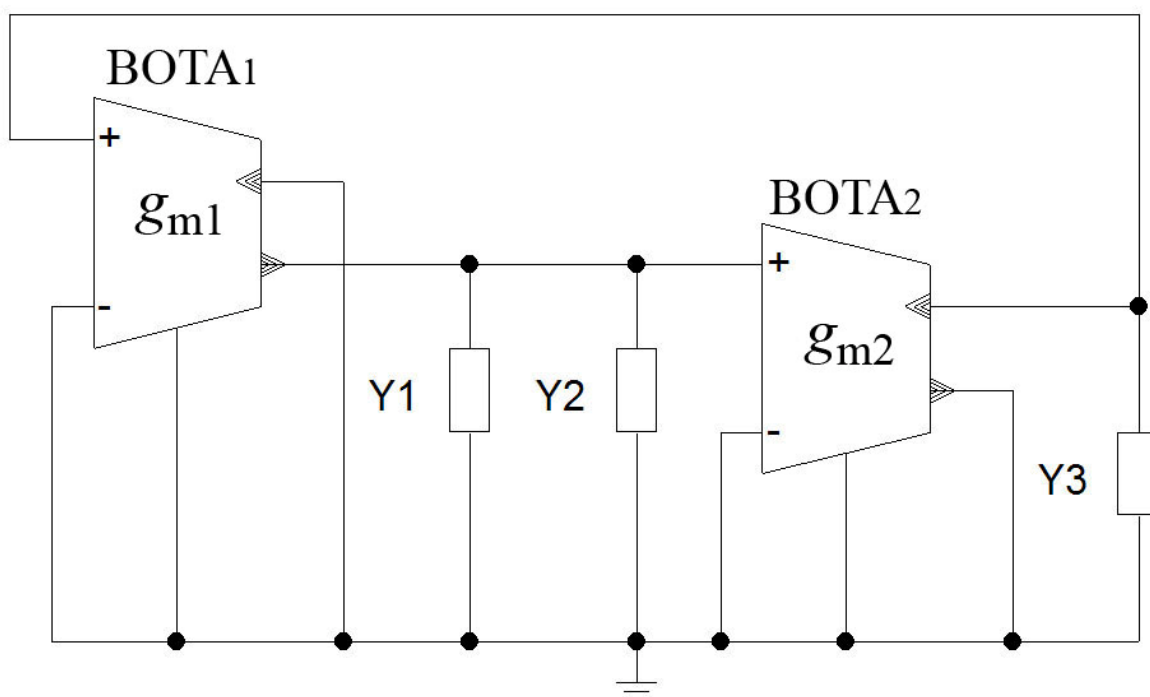
$$Q = \sqrt{\frac{2C_1G_2}{G_1C_2}} = \frac{\omega_m C_1}{G_1}. \quad (5.11)$$

6 NÁVRH MULTIFUNKČNÍCH FILTRŮ SE DVĚMA PRVKY BOTA

6.1 Zkoumaný obvod 7

Další prvek, se kterým můžeme pracovat v proudovém módu, je BOTA. Jedná se o rozšíření prvku OTA, což je transkonduktanční zesilovač. Podrobnější informace o tomto prvku lze nalézt v kapitole 2.2.

Autonomní obvod na obr. 30 je sestaven ze dvou prvků BOTA tří admitancí, které jsou uzemněny, což rozšiřuje možnosti získat další filtrační funkce. Prvky BOTA jsou označeny pomocí transkonduktancí g_m .

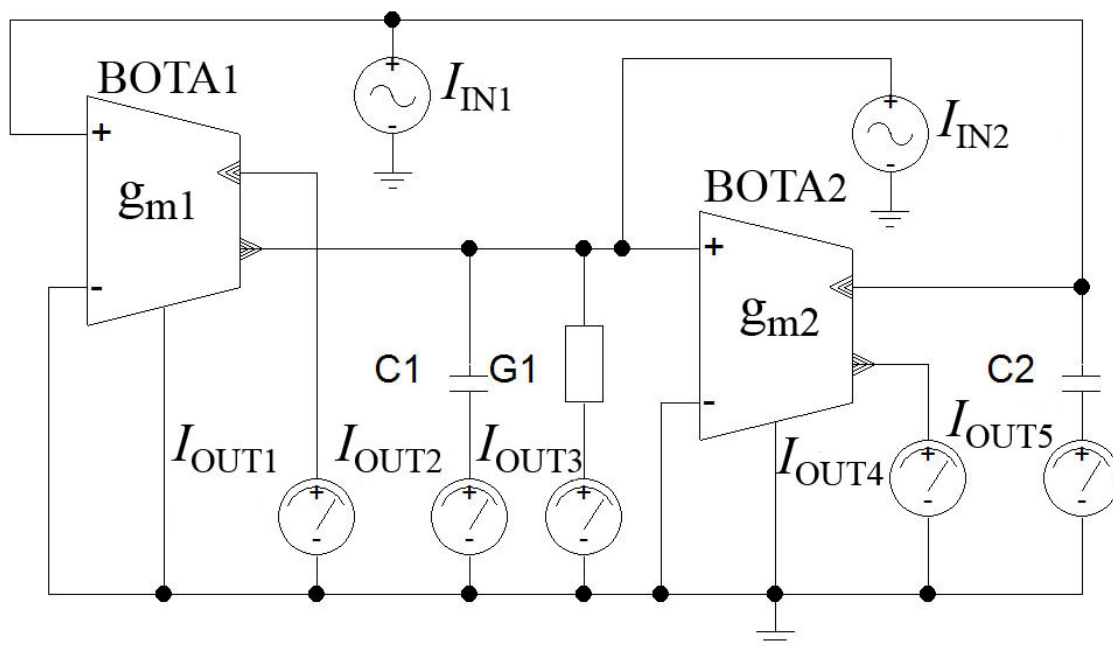


Obr. 30 : Autonomní obvod zkoumaného obvodu 7

Programem SNAP si lze následně vypsát charakteristickou rovnici daného obvodu a lze ji zapsat jako

$$D_7 = Y_2 Y_3 + Y_1 Y_3 + g_{m1} g_{m2} \cdot \quad (6.1)$$

Z rovnice 6.1 je vidět, že máme dvě možnosti, jak lze admitance nahradit pasivními prvky, tak aby nám vznikla rovnice se všemi stupni komplexní proměnné. První možností je, že se nahradí impedance Y_2 a Y_3 za kapacitory, nebo jako druhá možnost za impedance Y_1 a Y_3 . Použijeme druhou možnost a nahradíme $Y_1 = pC_1$, $Y_2 = G_1$ a $Y_3 = pC_2$. Nově vzniklý obvod s pasivními prvky je zachycen na obr. 31 a to se všemi možnými vstupními a výstupními branami.



Obr. 31 : Zkoumaný obvod 7 zapojen pomocí pasivních prvků

Tab. 13 : Čítelele přenosových funkcí zkoumaného obvodu 7

		proudové výstupy				
		I_{OUT1}	I_{OUT2}	I_{OUT3}	I_{OUT4}	I_{OUT5}
proudové vstupy	I_{IN1}	$-g_{m1}G_1$		$g_{m1}G_1$	$-g_{m1}g_{m2}$	
		$-pg_{m1}C_1$	$pg_{m1}C_1$			$-pG_1C_2$
						$-p^2C_1C_2$
	I_{IN2}	$-g_{m1}g_{m2}$				
				$-pG_1C_2$	$pg_{m2}C_2$	$-pg_{m2}C_2$
			$-p^2C_1C_2$			

Rovnice 6.1 přejde po náhradě za konkrétní prvky ve tvar

$$D_6 = g_{m1}g_{m2} + p(C_2G_1) + p^2(C_1C_2). \quad (6.2)$$

Následuje hledání takových přenosových funkcí z tab. 13, abychom získali filtrační funkce. V tab. 13 jsou vypsány pouze čitatele přenosových funkcí z dvou budících zdrojů, ale z každého z nich je možné odebírat pět různých výstupních proudů. Konkrétní přenosové funkce jsou následující

$$K_{DP1} = \frac{I_{OUT3}}{I_{IN1}} = \frac{g_{m1}G_1}{D_7}, K_{DP2} = \frac{I_{OUT3}}{I_{IN1}} = \frac{I_{OUT1}}{I_{IN2}} = -\frac{g_{m2}g_{m1}}{D_7}, \quad (6.3a,6.3b)$$

$$K_{DP3} = \frac{I_{OUT1} + I_{OUT1}}{I_{IN1}} = -\frac{g_{m1}G_1}{D_7}, K_{PP1} = \frac{I_{OUT2}}{I_{IN1}} = \frac{p g_{m1}C_1}{D_6}, \quad (6.3c,6.3d)$$

$$K_{PP2} = \frac{I_{OUT3}}{I_{IN2}} = -\frac{p G_1 C_2}{D_7}, K_{PP3} = \frac{I_{OUT4}}{I_{IN2}} = \frac{p g_{m2}C_2}{D_7}, \quad (6.3e,6.3f)$$

$$K_{PP4} = \frac{I_{OUT5}}{I_{IN2}} = -\frac{p g_{m2}C_2}{D_7}, K_{PP5} = \frac{I_{OUT1} + I_{OUT3}}{I_{IN1}} = -\frac{p g_{m1}C_1}{D_7}, \quad (6.3g,6.3h)$$

$$K_{HP} = \frac{I_{OUT2}}{I_{IN2}} = -\frac{p^2 C_2 C_1}{D_7}, K_{PZ} = \frac{I_{OUT1} + I_{OUT2}}{I_{IN2}} = \frac{-g_{m2}g_{m1} - p^2 C_2 C_1}{D_7}, \quad (6.3i,6.3j)$$

$$K_{FC} = \frac{I_{OUT1} + I_{OUT2} + I_{OUT4}}{I_{IN2}} = -\frac{g_{m2}g_{m1} - p C_2 g_{m2} + p^2 C_2 C_1}{D_7}, \text{ pokud } g_{m2} = G_1. \quad (6.3k)$$

Z předchozích rovnic 6.3 je zřejmé, že přenosových funkcí tvořících filtrační funkci je dostatek. Rovnice 6.3a, 6.3b a 6.3c tvoří dolní a invertující dolní propust, rovnice 6.3d až 6.3h pásmovou a invertující pásmovou propust, rovnice 6.3i invertující horní propust, 6.3j invertující pásmovou zádrž a pokud dodržíme, že $g_{m2} = G_1$ pak rovnice 6.3k tvoří invertující fázovací článek. Zkoumaný obvod 7 je schopen vytvořit všechny filtrační funkce uvedené v kapitole 1.3 a tím tento obvod vytváří univerzální filtr.

Postup výpočtu konkrétních hodnot jednotlivých pasivních prvků lze nalézt v předchozích zkoumaných obvodech. Pro dané zapojení uvádím vztah pro charakteristický kmitočet, který lze odvodit z rovnice 6.2 a je roven

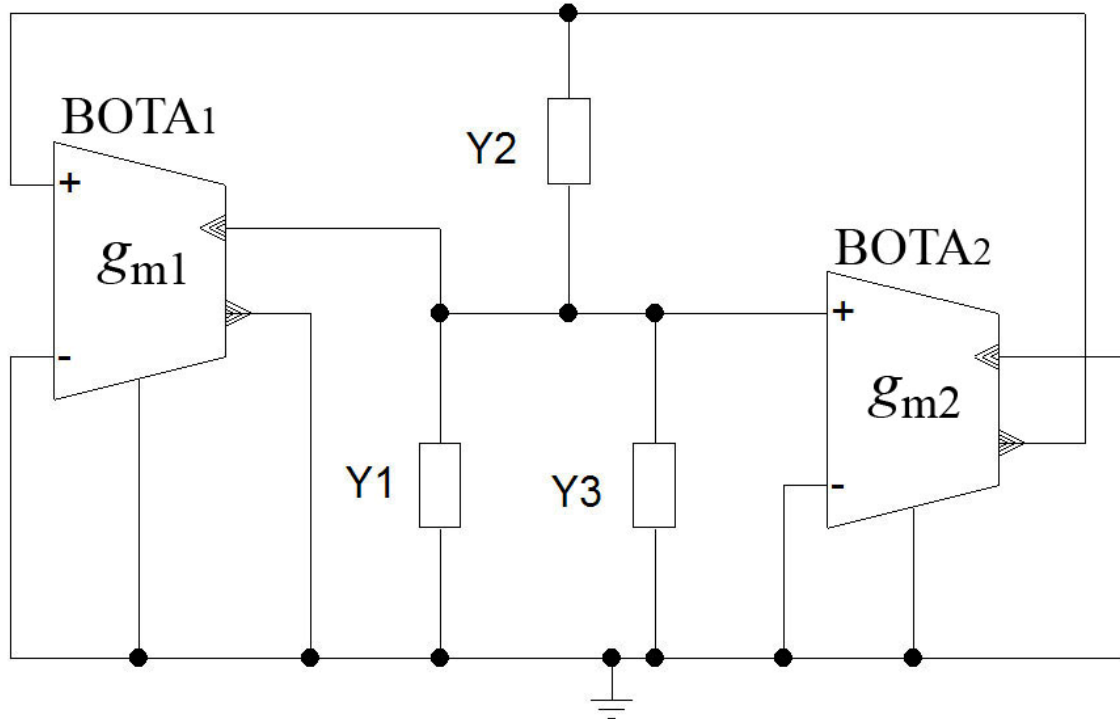
$$f_m = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g_{m1}g_{m2}}{C_1 C_2}}, \quad (6.4)$$

podobným způsobem lze vyjádřit i vztah pro činitel jakosti,

$$Q = \frac{1}{G_1} \sqrt{\frac{C_1 g_{m1} g_{m2}}{C_1} \frac{\omega_m C_1}{G_1}}. \quad (6.5)$$

6.2 Zkoumaný obvod 8

Autonomní obvod na obr. 32 je sestaven ze dvou prvků BOTA a tří admitancí, z nichž jsou dvě uzemněny, což rozšiřuje možnosti získat další filtrační funkce. Prvky BOTA jsou označeny jak pomocí transkondutancí g_m , tak i jednotlivými názvy.



Obr. 32 : Zkoumaný obvod 8 zapojen jako autonomní obvod

Charakteristickou rovnicí tohoto autonomního obvodu lze vypsát programem SNAP jako

$$D_8 = -Y_2 g_{m1} + Y_2 Y_3 + Y_2 g_{m2} + Y_2 Y_1 + g_{m1} g_{m2} . \quad (6.6)$$

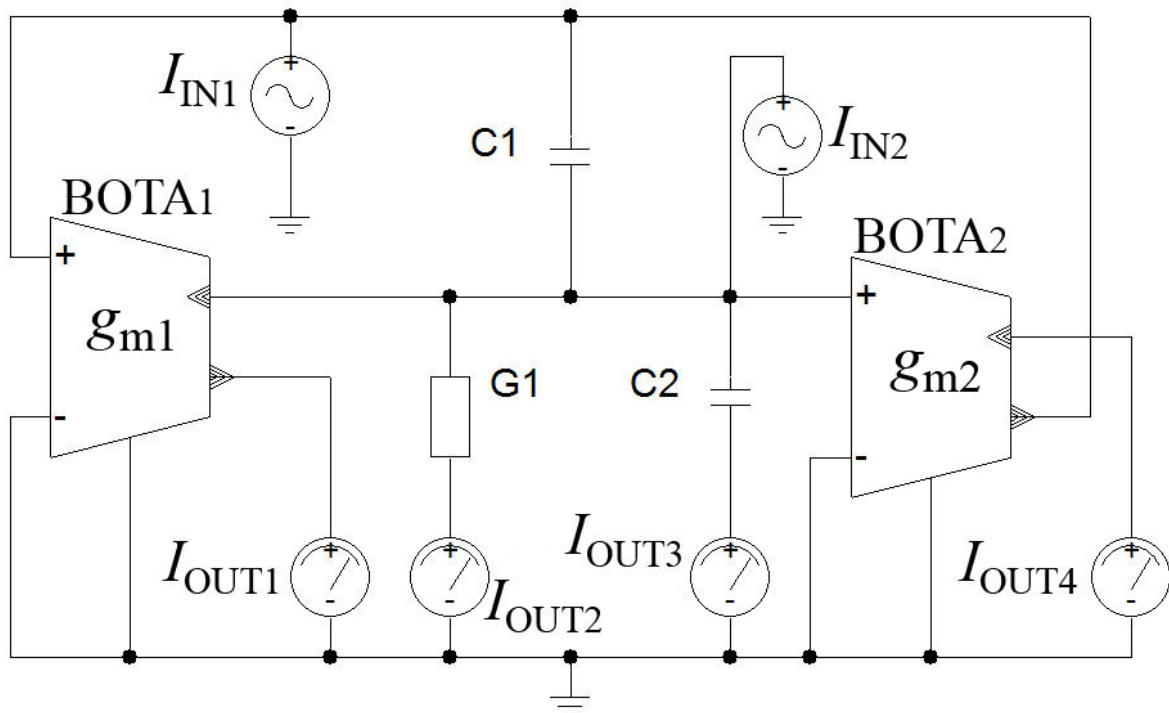
V rovnici 6.6 se vyskytuje vyšší počet součinnů admitancí než v předchozím zkoumaném obvodu. Abychom uvedenou rovnici co nejvíce zjednodušili, je třeba zvolit transkondutance g_{m1} a g_{m2} sobě rovny, tedy g_{m1} a g_{m2} musí mít stejnou hodnotu. Rovnice 6.6 po této úpravě přejde ve tvar

$$D_8 = Y_2 Y_3 + Y_2 Y_1 + g_{m1} g_{m2} . \quad (6.7)$$

Z rovnice 6.7 je zřejmé, že máme dvě možnosti, jak lze admitance nahradit pasivními prvky, tak aby nám vznikla rovnice se všemi stupni komplexní proměnné. První možností je,

že se nahradí impedance Y_2 a Y_3 za kapacitory, nebo jako druhá možnost za impedance Y_2 a Y_1 . Využijeme první možnosti a nahradíme $Y_1 = G_1$, $Y_2 = pC_1$ a $Y_3 = pC_2$. Nově vzniklý obvod s pasivními prvky je zachycen na obr. 33 a to se všemi možnými vstupními a výstupními branami. Dosazením za admitance konkrétními pasivními prvky získáme charakteristickou rovnici ve tvaru

$$D_6 = g_{m1}g_{m2} + p(C_1G_1) + p^2(C_1C_2) . \quad (6.8)$$



Obr. 33 : Zkoumaný obvod 8 zapojen pomocí pasivních prvků

Tab. 14 : Čitatele přenosových funkcí zkoumaného obvodu 8

		proudové výstupy			
		I_{OUT1}	I_{OUT2}	I_{OUT3}	I_{OUT4}
proudové vstupy	I_{IN1}	$g_{m1}G_1$	$-g_{m1}G_1$		$-g_{m1}g_{m2}$
		$+p(g_{m1}C_1+g_{m1}C_2)$	$-pG_1C_1$	$-pg_{m1}C_2$	$-pg_{m2}C_1$
				$-p^2C_1C_2$	
	I_{IN2}	$-g_{m1}g_{m2}$			
		$+pg_{m1}C_1$	$-pG_1C_1$		$-pg_{m2}C_1$
				$-p^2C_1C_2$	

Následuje hledání takových přenosových funkcí z tab. 14, abychom získali filtrační funkce. V tab. 14 jsou vypsány pouze čitatele přenosových funkcí z dvou budících zdrojů, ale z každého z nich je vždy možné odebrat čtyři různé výstupní proudy. Konkrétní přenosové funkce jsou následující

$$K_{DP} = \frac{I_{OUT1} + I_{OUT2}}{I_{IN2}} = -\frac{g_{m1}g_{m2}}{D_8}; \text{ pokud je } G_1 = g_{m1}, \quad (6.9a)$$

$$K_{PP1} = \frac{I_{OUT2}}{I_{IN2}} = -\frac{pG_1C_1}{D_8}, \quad K_{PP2} = \frac{I_{OUT4}}{I_{IN2}} = -\frac{pg_{m2}C_1}{D_8}, \quad (6.9b, 6.9c)$$

$$K_{HP} = \frac{I_{OUT3}}{I_{IN2}} = -\frac{p^2C_2C_1}{D_8}, \quad (6.9d)$$

$$K_{PZ} = \frac{I_{OUT1} + I_{OUT2} + I_{OUT3}}{I_{IN2}} = -\frac{g_{m2}g_{m1} + p^2C_2C_1}{D_8}; \text{ pokud je } G_1 = g_{m1}, \quad (6.9e)$$

$$K_{FC} = \frac{I_{OUT1} + I_{OUT2} + I_{OUT3}}{I_{IN2}} = -\frac{g_{m2}g_{m1} - pC_1G_1 + p^2C_2C_1}{D_8}, \text{ pokud } G_1 = g_{m1}. \quad (6.9f)$$

Z předchozích rovnic 6.9 je zřejmé, že přenosových funkcí, které tvoří filtrační funkci, je dosaženo pouze z budícího zdroje I_{IN2} . Rovnice 6.9a tvoří invertující dolní propust, rovnice 6.9b a 6.9c invertující pásmové propusti, rovnice 6.9d invertující horní propust, 6.9e invertující pásmovou zádrž a rovnice 6.9f pak tvoří invertující fázovací členek. Zkoumaný obvod 8 je schopen vytvořit všechny filtrační funkce uvedené v kapitole 1.3 a tím tento obvod vytváří univerzální filtr, ale za splnění podmínky, že $G_1 = g_{m1}$.

Postup výpočtu konkrétních hodnot jednotlivých pasivních prvků lze nalézt v předchozích zkoumaných obvodech. Pro dané zapojení uvádím vztah pro charakteristický kmitočet, který lze odvodit z rovnice 6.2 a je roven

$$f_m = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g_{m1}g_{m2}}{C_1C_2}}, \quad (6.10)$$

podobným způsobem lze vyjádřit i vztah pro činitel jakosti,

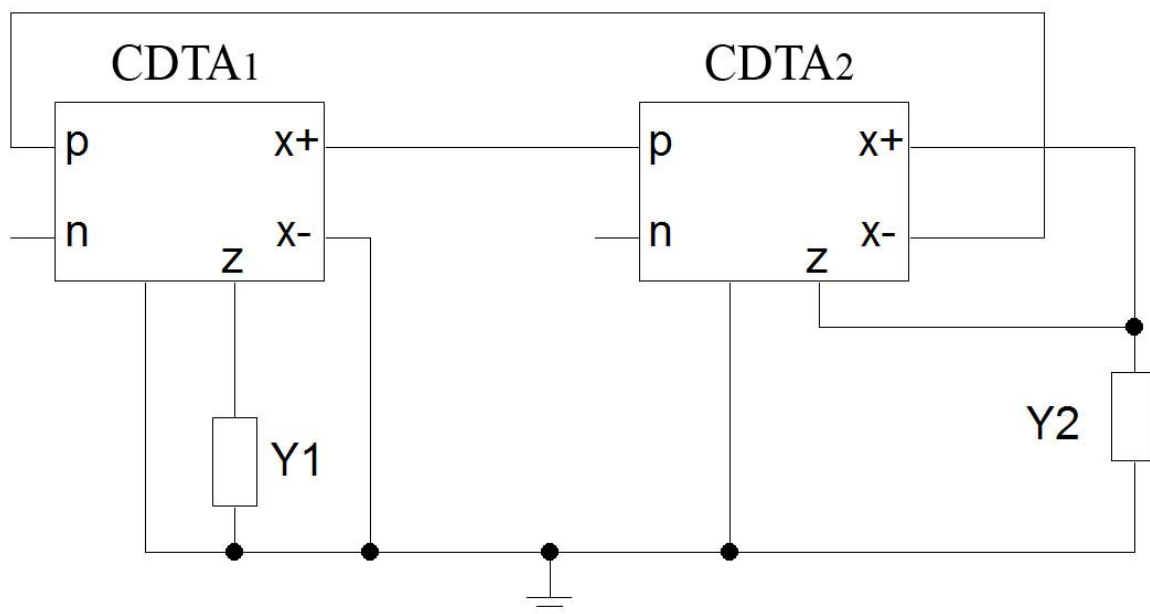
$$Q = \frac{1}{G_1} \sqrt{\frac{C_2g_{m1}g_{m2}}{C_1}} = \frac{\omega_m C_2}{G_1}. \quad (6.11)$$

7 NÁVRH MULTIFUNKČNÍCH FILTRŮ SE DVĚMA PRVKY CDTA

7.1 Zkoumaný obvod 9

Další prvek, se kterým můžeme pracovat v proudovém módu je CDTA. Jedná se o rozšíření prvku OTA prvkem DCS, což je proudový rozdílový prvek. Podrobnější informace o prvku CDTA lze nalézt v kapitole 2.3. Jednotlivé prvky CDTA jsou v rovnicích zastoupeny transkondutancemi g_{mx} . Nově se v rovnicích může, vyskytnou parametr b značící zisk interního zdroje, jehož implicitní nastavení je $b = 1$.

Autonomní obvod na obr. 34 je sestaven ze dvou prvků CDTA s diferenčními výstupy a dvou admitancí, které jsou uzemněny, což rozšiřuje možnosti získat další filtrační funkce.



Obr. 34 : Zkoumaný obvod 9 zapojený jako autonomní obvod

Charakteristickou rovnicí tohoto autonomního obvodu lze vypsát programem SNAP jako

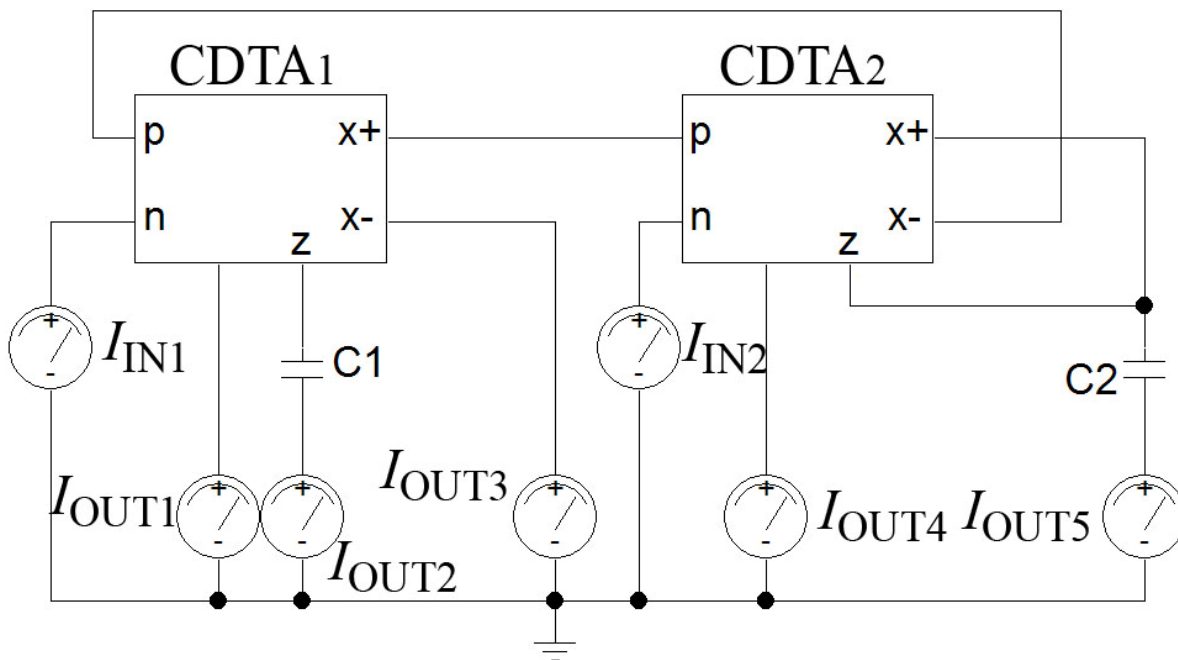
$$D_9 = Y_1 g_{m2} + Y_1 Y_2 + g_{m1} g_{m2} . \quad (7.1)$$

Abychom dostali v charakteristické rovnici všechny stupně komplexní proměnné, je nutné v rovnici zvolit obě admitance za kapacitory. To lze splnit dvěma způsoby, a to pokud

$Y_1 = C_1$ a $Y_2 = pC_2$ nebo $Y_1 = pC_2$ a $Y_2 = pC_1$. Zvolíme první možnost, která se liší pouze indexy a rovnice 7.1 přejde do tvaru

$$D_9 = g_{m1}g_{m2} + p(C_1g_{m2}) + p^2(C_1C_2). \tag{7.2}$$

Obvod s pasivními prvky je zachycen na obr. 35 a to se všemi možnými vstupními a výstupními branami.



Obr. 35 : Zkoumaný obvod 9 s pasivními prvky

Tab. 15 : Čitatele přenosových funkcí zkoumaného obvodu 9

		proudové výstupy				
		I_{OUT1}	I_{OUT2}	I_{OUT3}	I_{OUT4}	I_{OUT5}
proudové vstupy	I_{IN1}	$-p(g_{m2}C_1 - g_{m2}C_1)$	$-pg_{m2}b_1C_1$	$-pg_{m1}b_1C_1$	$+p(b_1C_2 - b_1b_2g_{m1}C_2)$	$pg_{m1}b_1b_2C_1$
		$-p^2(C_2C_1 - b_1C_2C_1)$	$-p^2b_1C_1C_2$			
I_{IN2}				$b_2b_1g_{m1}g_{m2}$	$-2b_2b_1g_{m1}g_{m2}$	
		$p(g_{m2}b_2C_1 - b_1b_2g_{m2}C_1)$	$pg_{m2}b_1b_2C_1$		$-p(g_{m2}b_2C_1 + g_{m2}C_1)$	
				$-p^2(b_2C_1C_2 - C_2C_1)$	$p^2b_2C_1C_2$	

V tab. 15 nalezneme čitatele přenosových funkcí, ve kterých se nově objevují zisky interních zdrojů prvků CDTA označené b_1 a b_2 jejichž hodnoty necháme implicitně rovny jedné a namísto jejich označení je již do přenosových funkcí vepíšeme v číselném tvaru. Přenosové funkce vytvářející funkce filtrační ve zkoumaném obvodu 9 zapíšeme jako

$$K_{DP} = \frac{I_{OUT3}}{I_{IN2}} = \frac{g_{m1}g_{m2}}{D_9}, \quad (7.3a)$$

$$K_{PP1} = \frac{I_{OUT5}}{I_{IN1}} = -\frac{p g_{m1} C_1}{D_9}, \quad K_{PP2} = \frac{I_{OUT2}}{I_{IN2}} = \frac{p g_{m2} C_1}{D_9}, \quad (7.3b, 7.4c)$$

$$K_{HP} = \frac{I_{OUT5}}{I_{IN2}} = \frac{p^2 C_2 C_1}{D_9}, \quad (7.3d)$$

$$K_{PZ} = \frac{I_{OUT3} + I_{OUT5}}{I_{IN2}} = \frac{g_{m2}g_{m1} + p^2 C_2 C_1}{D_9}, \quad (7.3e)$$

Z předchozích rovnic 7.3 je zřejmé, že přenosových funkcí, které tvoří filtrační funkci, je dosaženo jak z budícího zdroje I_{IN1} tak I_{IN2} . Rovnice 7.3a tvoří dolní propust, rovnice 7.3b a 7.3c invertující pásmovou a pásmovou propust, rovnice 7.3d horní propust a rovnice 7.3e pásmovou zádrž. Uvedený obvod není schopen vytvořit pouze filtrační funkci fázovací článek. Ostatní funkce je možné získat pouze buzením do vstupu I_{IN2} .

Postup výpočtu konkrétních hodnot jednotlivých pasivních prvků lze nalézt v předchozích zkoumaných obvodech. Pro dané zapojení uvádím vztah pro charakteristický kmitočet, který lze odvodit z rovnice 6.2 a je roven

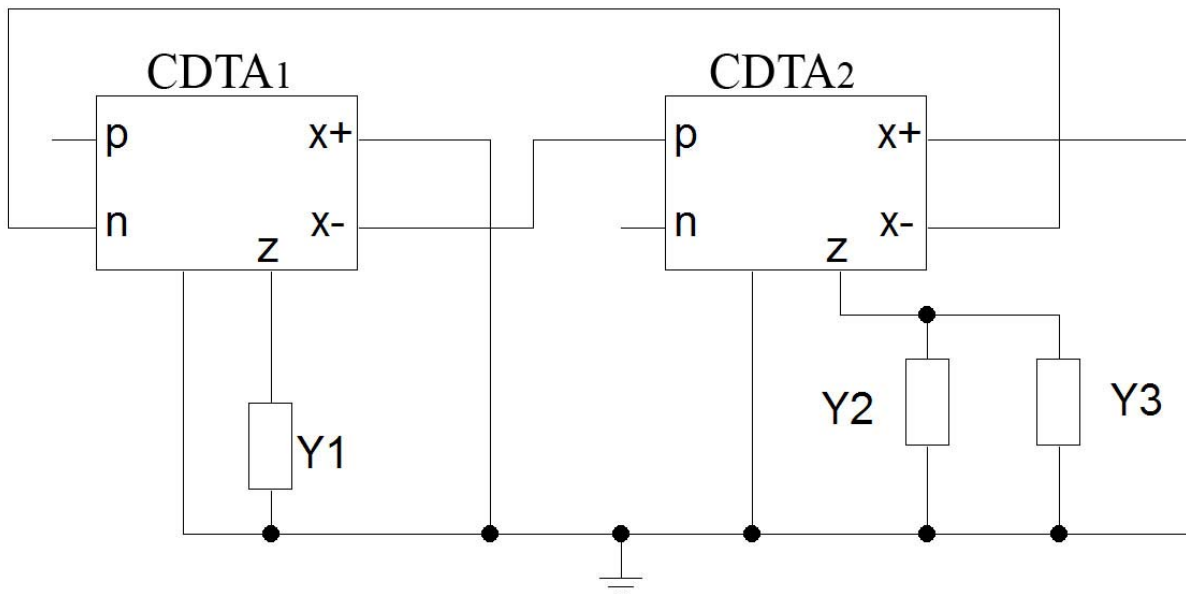
$$f_m = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g_{m1}g_{m2}}{C_1 C_2}}, \quad (7.4)$$

podobným způsobem lze vyjádřit i vztah pro činitel jakosti,

$$Q = \sqrt{\frac{g_{m1} C_2}{g_{m2} C_1}} = \frac{\omega_m C_2}{g_{m2}}. \quad (7.5)$$

7.2 Zkoumaný obvod 10

Druhým z obvodů využívající prvky CDTA zapojený bez vstupů, výstup a tím tedy jako autonomní obvod je naznačen na obr. 36. Obvod pracuje s diferenčními výstupními svorkami prvků CDTA. K těmto prvkům jsou připojeny tři admitance. Každá admitance je zvlášť vedena na zem, čímž rozšíříme počet výstupů.



Obr. 36 : Zkoumaný obvod 10 zapojen jako autonomní obvod

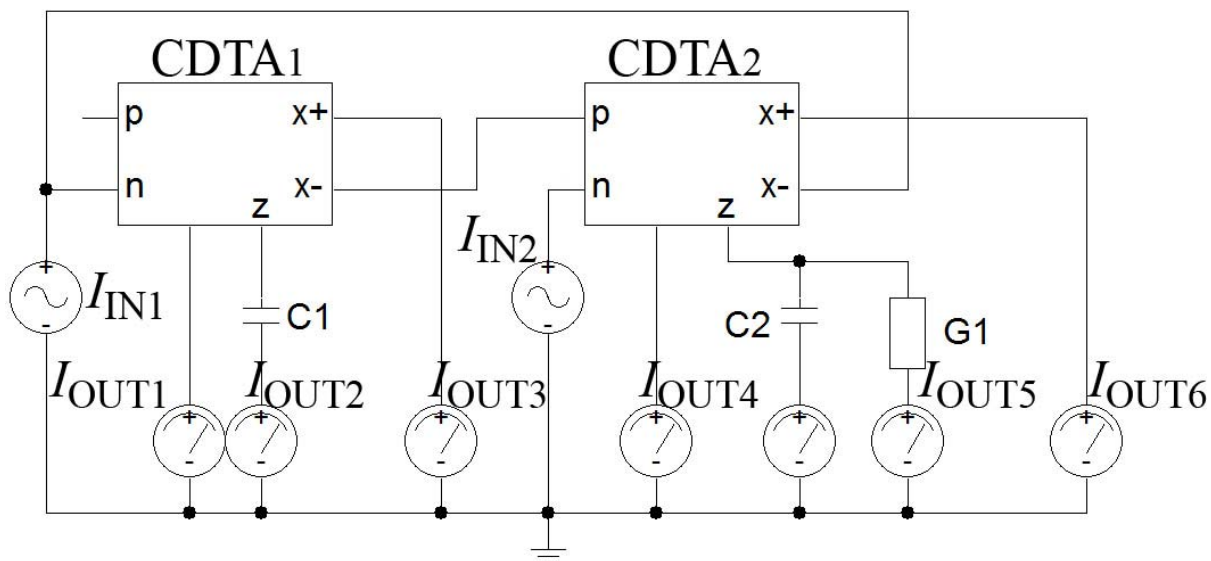
Charakteristickou rovnicí tohoto autonomního obvodu lze vypsát programem SNAP jako

$$D_{10} = Y_1 Y_2 + Y_1 Y_3 + g_{m1} g_{m2} . \quad (7.6)$$

Dalším bodem návrhu je náhrada admitancí konkrétními pasivními prvky. Z rovnice 7.6 vyplývá, že máme opět dvě možnosti. První z nich j, že nahradíme $Y_1 = pC_1$ a $Y_2 = pC_2$ nebo $Y_2 = pC_1$ a $Y_1 = pC_2$. Zvolíme první možnost, jelikož se jedná pouze o změnu indexů u jednotlivých prvků, čímž ale i tak změníme strukturu jednotlivých přenosových funkcí. Rovnice 7.6 přejde ve tvar

$$D_{10} = g_{m1} g_{m2} + p(C_1 g_{m2}) + p^2(C_1 C_2) . \quad (7.7)$$

Obvod s pasivními prvky je naznačen na obr. 37 s jednotlivými vstupními a výstupními branami.



Obr. 37 : Zkoumaný obvod 10 zapojen pomocí pasivních prvků

Tab. 16 : Čitatele přenosových funkcí zkoumaného obvodu 10

		proudové výstupy			
		I_{OUT1}	I_{OUT2}	I_{OUT3}	I_{OUT4}
proudové vstupy	I_{IN1}			$-b_1 g_{m1} G_1$	
		$-p(b_1 G_1 C_1 + G_1 C_1)$	$p C_1 b_1 C_1$	$-p g_{m1} b_1 C_1$	$+p(g_{m1} b_1 C_2 - b_1 b_2 g_{m1} C_2)$
		$-p^2(b_1 C_2 C_1 + C_2 C_1)$	$+p^2 b_1 C_1 C_2$		
	I_{IN2}			$b_2 b_1 g_{m1} g_{m2}$	$-2 b_2 b_1 g_{m1} g_{m2}$
		$+p(g_{m2} b_2 C_1 + b_1 g_{m2} C_1)$	$-p g_{m2} b_1 b_2 C_1$		$-p(2 g_{m2} b_2 C_1 + b_2 G_1 C_1 + G_1 C_1)$
					$-p^2(b_2 C_1 C_2 + C_2 C_1)$
		I_{OUT5}	I_{OUT6}	I_{OUT7}	
proudové vstupy	I_{IN1}		$b_2 b_1 g_{m1} G_1$	$-b_1 b_2 g_{m1} g_{m2}$	
		$p g_{m1} b_1 b_2 C_2$			
	I_{IN2}		$p G_1 b_2 C_1$	$-p g_{m2} b_2 C_1$	
		$p^2 b_2 C_1 C_2$			

V tab. 16 jsou vypsány čitatele přenosových funkcí, ve kterých se nově objevují zisky interních zdrojů prvků CDTA označené b_1 a b_2 jejichž hodnoty necháme implicitně rovny

jedné a namísto jejich označení je již do přenosových funkcí vepíšeme v číselném tvaru. Přenosové funkce vytvářející funkce filtrační ve zkoumaném obvodu 10 pak vepíšeme jako

$$\mathbf{K}_{DP1} = \frac{I_{OUT6}}{I_{IN1}} = \frac{g_{m1}G_1}{D_{10}}, \quad \mathbf{K}_{DP2} = \frac{I_{OUT7}}{I_{IN1}} = -\frac{g_{m1}g_{m2}}{D_{10}}, \quad (7.8a, 7.8b)$$

$$\mathbf{K}_{DP3} = \frac{I_{OUT3}}{I_{IN2}} = \frac{g_{m1}g_{m2}}{D_{10}}, \quad \mathbf{K}_{PP1} = \frac{I_{OUT5}}{I_{IN1}} = \frac{p g_{m1} C_2}{D_{10}}, \quad (7.8c, 7.8d)$$

$$\mathbf{K}_{PP2} = \frac{I_{OUT2}}{I_{IN2}} = \frac{I_{OUT7}}{I_{IN2}} = -\frac{p g_{m2} C_1}{D_{10}}, \quad \mathbf{K}_{PP3} = \frac{I_{OUT6}}{I_{IN2}} = \frac{p G_1 C_1}{D_{10}}, \quad (7.8e, 7.8f)$$

$$\mathbf{K}_{PP4} = \frac{I_{OUT1}}{I_{IN2}} = 2 \frac{p g_{m2} C_1}{D_{10}}, \quad \mathbf{K}_{HP} = \frac{I_{OUT5}}{I_{IN2}} = \frac{p^2 C_1 C_2}{D_{10}}, \quad (7.8g, 7.8h)$$

$$\mathbf{K}_{PZ} = \frac{I_{OUT3} + I_{OUT5}}{I_{IN2}} = \frac{g_{m1}g_{m2} + p^2 C_1 C_2}{D_{10}}, \quad (7.8i)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_{FC} &= \frac{I_{OUT2} + I_{OUT3} + I_{OUT5}}{I_{IN2}} = \frac{I_{OUT3} + I_{OUT5} + I_{OUT7}}{I_{IN2}} = \\ &= \frac{g_{m1}g_{m2} - p g_{m2} C_1 + p^2 C_1 C_2}{D_{10}}; \text{pokud } g_{m2} = G_1. \end{aligned} \quad (7.8j)$$

Z předchozích rovnic 7.8 je zřejmé, že přenosových funkcí, které tvoří filtrační funkci, je dosaženo jak z budícího zdroje I_{IN1} tak I_{IN2} . Rovnice 7.8a-c tvoří dolní a invertující propust, rovnice 7.8d-g pásmovou a invertující pásmovou propust, rovnice 7.8h horní propust, rovnice 7.8i pásmovou zádrž a rovnice 7.8i a 7.8j pak fázovací článek. Zkoumaný obvod 10 je schopen vytvořit všechny filtrační funkce uvedené v kapitole 1.3 a tím tento obvod vytváří multifunkční filtr, ale za splnění podmínky, že $G_1 = g_{m2}$.

Postup výpočtu konkrétních hodnot jednotlivých pasivních prvků lze nalézt v předchozích zkoumaných obvodech. Pro dané zapojení uvádím vztah pro charakteristický kmitočet, který lze odvodit z rovnice 6.2 a je roven

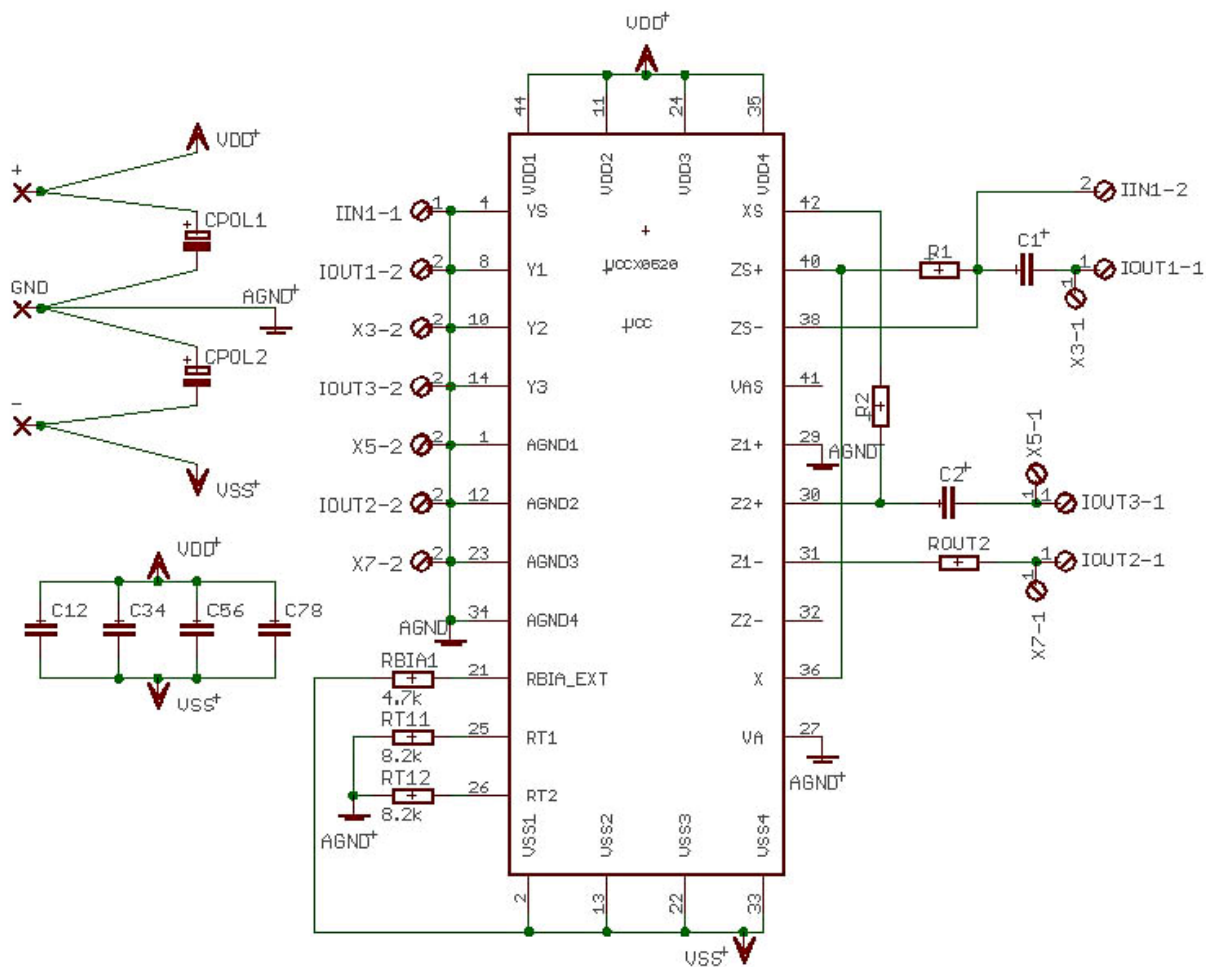
$$f_m = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g_{m1} g_{m2}}{C_1 C_2}}, \quad (7.9)$$

podobným způsobem lze vyjádřit i vztah pro činitel jakosti,

$$Q = G_1 \sqrt{\frac{C_2 g_{m1} g_{m2}}{C_1}} = \frac{\omega_m C_2}{G_1}. \quad (7.10)$$

8 PRAKTICKÁ REALIZACE A MĚŘENÍ

Pro praktickou realizaci a následné měření byl vybrán zkoumaný obvod 4, který byl schopen z jednoho proudového vstupu za použití dvou prvků GCMÍ realizovat 4 rozdílné přenosové funkce. Schéma zapojení tohoto obvodu pomocí pasivních prvků je naznačeno na obr. 23 a číselné přenosových funkcí pak v tab. 9. Jako ekvivalentní nahrazení aktivních prvků byl vybrán univerzální integrovaný obvod s označením 0520 UCC-N1B [7], který obsahuje proudový konvejer druhé generace CCII+/- a univerzální proudový konvejer UCC. Pomocí těchto dvou obvodů jsem schopni realizovat takové zapojení, které má proudové přenosové koeficienty u jednoho prvku GCMÍ jakékoliv a druhý musí mít vždy tyto koeficienty navzájem inverzní. Tuto podmínku zkoumaný obvod 4 splňuje také, proto použijeme pouze jeden obvod 0520 UCC-N1B. Pod slovem „jakékoliv“ se rozumí buď 1, nebo -1.



Obr. 38 : Zkoumaný obvod 4 zapojen pomocí integrovaného obvodu UCC-N1B 0520

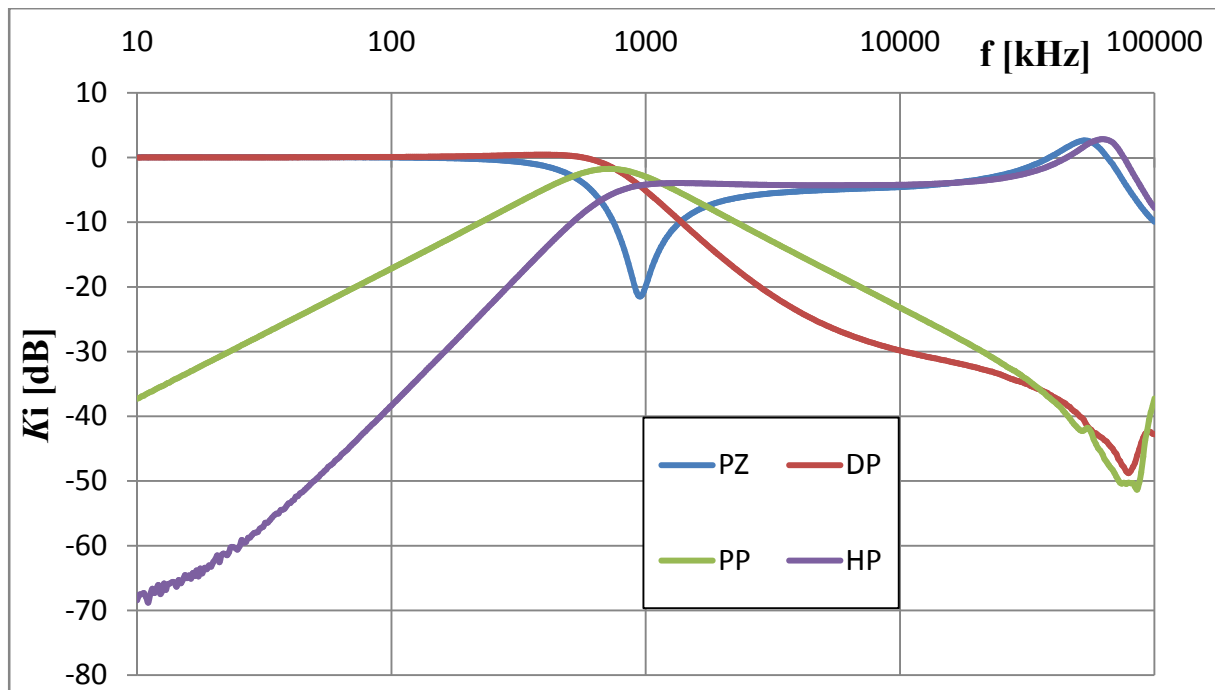
Zapojení pro experimentální měření lze pak pomocí integrovaného obvodu UCC-N1B 0520 nalézt na obr. 38. Pro nastavení klidového proudu slouží odpor R_{BIA1} o velikosti 4,7 k Ω . Čtyři dvojice paralelních blokovacích kondenzátorů C_{12} až C_{78} slouží pro rychlé dodání energie ze symetrického napájení $\pm 1,65$ V s doporučenou hodnotou 74 nF a 100 nF. Pro kompenzaci napěťového ofsetu svorky X slouží rezistory R_{T11} a R_{T12} o velikosti 8,2 k Ω . Kondenzátory C_{POL1} a C_{POL2} plní funkci blokování napájecího rozvodu u přívodních svorek. Ostatní pasivní součástky $R_1 = 2$ k Ω , $R_2 = 4,7$ k Ω , $R_{OUT} = 1$ k Ω , $C_1 = 56$ pF a $C_2 = 47$ pF tvoří multifunkční filtr. Osazenou desku plošné spoje, tak jak byla vyrobena, lze nalézt vyfocenou v příloze i s její možným graficky ztvárněním vytvořeným v programech Eagle za pomoci ULP a Pov Ray for Windows [12]. Práce na univerzálním proudovém konvejeru byla již započata v roce 2000. Použitý integrovaný obvod 0520 UCC-N1B byl vyroben společností AMI Semiconductor.

Jako generátor harmonického signálu a také jako měřicí přístroj byl použit obvodový analyzátor Agilent 4396A. Samotné měření pak bylo nutné ještě doplnit převodníky napětí na proud a to jak před vstupem filtru převodníkem U/I, tak následně za jeho výstupem převodníkem I/U. Jako základní část převodníku byl užit transkonduktanční zesilovač OPA860, jehož zapojení a kmitočtovou charakteristiku lze nalézt v [3] a blokové uspořádání při měření v proudovém módu pak na obr. 39.



Obr. 39 : Měřicí soustava pro proudový mód

Změřené přenosové charakteristiky zkoumaného obvodu 4 jsou zobrazeny na obr. 40. Měřené kmitočtové pásmo bylo od 10 kHz po 100 MHz s celkovým počtem 501 měřených bodů v tomto kmitočtovém rozmezí. Pro realističtější srovnání je vhodné tyto charakteristiky porovnávat se simulacemi zachycenými na obr. 25, kde byl užit model UCC-N1B třetí úrovně. Na prvním pohled je zřejmá změna mezního kmitočtu, který byl po zvolení součástek z řady E24 roven dle rovnice $f_{m E24} = 1,0118$ MHz, což je minimální zvýšení navrhovaného mezního kmitočtu. Předpoklad zvýšení mezního kmitočtu naměřených přenosových charakteristik ale nebyl správný. Přijatelný pokles mezního kmitočtu má charakteristika typu dolní propust, jejíž mezní kmitočet f_m poklesl na 0,855 MHz při přenosu $K_i = -3,068$ dB.



Obr. 40 : Změřené kmitočtové charakteristiky zkoumaného obvodu 4

Od třetí dekády kmitočtu do čtvrté dekády charakteristika vykazuje již menší zkreslení, které se pak plně projeví v další dekádě kmitočtu, kde od 8 MHz je vidět nárůst přenosu. Pásmová propust má posunut mezní kmitočet na hodnotu 0,720 MHz při přenosu $K_i = -1,757$ dB a ne předpokládaných 0 dB. V prvních třech dekádách kmitočtu dodržuje charakteristika stálý pokles 20 dB/dek. V posledním úseku je pak zřetelná podobnost s tvarem charakteristiky dolní propusti, která je právě vytvořená součtem proudových výstupů I_{OUT2} a I_{OUT3} (pásmová propust). Použitelnost charakteristiky pásmové propusti je tedy přibližně do kmitočtu 52 MHz neboli do útlumu 42 dB, kde je vidět mírné zvýšení přenosu. Charakter horní propusti je na nízkých kmitočtech zřejmě zkreslen parazitními kapacitami navrženého obvodu tj. díky reálnému rozložení součástek na desce. Charakteristika na kmitočtu 1 MHz vykazuje přenos -4,196 dB, ale po dosažení tohoto kmitočtu dále nesnižuje svůj přenos na očekávanou 1. Nejvyšší přenos -4,291 je dosažen na kmitočtu 5 MHz, proto musí mezní kmitočet zohlednit právě k této hodnotě a odečíst jej při přenosu -7,29, čímž se mezní kmitočet horní propusti zmenší přibližně na 0,63 MHz. V poslední měřené dekádě je pozorovatelný téměř obloukovitý nárůst přenosu při maximálním přenosu 2,826 dB na kmitočtu 625 MHz s následným snižováním útlumu. Posledním měřeným typem přenosové charakteristiky je pásmová zádrž, která byla dosažena součtem z proudových výstupů s označením I_{OUT1} , I_{OUT2} a I_{OUT3} . Její průběh je do mezního kmitočtu téměř shodný s průběh dosaženým při simulaci. Nejnižší přenos má kmitočtu 0,951 MHz, při němž vykazuje útlum

21,49 dB. Ve zbývajících dvou dekádách lze opět pozorovat shodný tvar průběhu s charakteristikou horní propusti, čímž tedy není dosaženo v propustném pásmu požadovaných 0 dB. Detailnější rozbor průběhu byl popsán již u horní propusti.

Z jednotlivých průběhu měřených modulových charakteristik multifunkčního kmitočtového filtru v proudovém módu je filtr možné používat přibližně do 10MHz, od něhož jsou charaktery přenosových funkcí značně zkresleny. Důvodu, proč jsou změřené charakteristiky značně zkresleny, může být více. V úvahu přichází parazitní kapacity a indukčnosti vyskytující se na desce plošného spoje ovlivňující vlastní hodnoty pasivních součástek nebo také nevhodně navržený autonomní obvod a deska plošného spoje.

ZÁVĚR

Bakalářská práce byla zaměřena na návrh multifunkčních kmitočtových filtrů druhého řádu pracujících v proudovém módu. Práce v čistě proudovém módu je idealizací. Tak jako nelze oddělit například magnetické a elektrické pole, tak ani nemůžeme počítat jen se samotnou proudovou složkou, ale musíme pamatovat i na určitou složku napěťovou. Důvodů, proč se přistupuje k proudovému módu, je více a to například menší napájecí napětí, širší zpracovávané pásmo kmitočtů, či větší odstup signálu od šumu.

V úvodní části práce jsou popsány základní vlastnosti kmitočtových filtrů, jejich zápis a bližší specifikace. Hlavní části navrhovaných multifunkčních kmitočtových filtrů je aktivní prvek. Nejvíce využívaným prvkem byl GCMI, který zpracuje vstupní proud tak, že ho z výstupu odebíráme jako opakovaný nebo invertovaný. Dalšími obvody použitými při stavbě multifunkčních kmitočtových filtrů byli BOTA a CDTA, jejichž funkce jsou popsány taktéž v druhé kapitole této práce.

Pro návrh kmitočtových filtrů byla použita metoda autonomního obvodu vycházející z úplné impedanční sítě. Nejčastěji byly sestavovány obvody se dvěma aktivními prvky, maximálně pak se třemi aktivními prvky. Praktický postup návrhu je naznačen v třetí kapitole. Počet pasivních prvků je omezen ve většině případů na čtyři až pět. Podrobný návrh multifunkčního filtru druhého řádu je popsán v prvních dvou zkoumaných obvodech. V dalších navrhovaných obvodech je pak převzat postup z prvních dvou při výpočtu hodnot jednotlivých konkrétních pasivních prvků. Pro návrh multifunkčního filtru je nejdůležitější vhodné zapojení autonomního obvodu, ze kterého se pak vychází při dalších bodech návrhu.

V prvních šesti navržených obvodech je užito zobecněných aktivních prvků GCMI. Jako dobrým krokem se při návrhu ukázalo zemnit vždy minimálně jeden výstup aktivního prvku, a to buď přímo na zem či přes pasivní prvek a nevytvářet v tomto místě uzel s dalším rozvodem vodičů do jiných míst autonomního obvodu, čímž získáme možnost volby proudového přenosového koeficientu z tohoto výstupu v číselných přenosových funkcích, ale za cenu toho že se nám tento přenosový koeficient neobjeví v charakteristické rovnici a nebudeme jej moci využít při zjednodušení na požadovaný tvar. Je tedy na zvážení do jaké míry se tímto postupem řídit. Za kompromis považuji užít tohoto postupu jen na jednu výstupní svorku. Vhodná úprava charakteristické rovnice je také důležitá a to převážně v případech, kdy se sčítá více přenosových funkcí. Pokud je možné docílit toho, aby se u každého stupně komplexní proměnné vyskytoval pouze jeden součin admitancí a ne více, pak

je větší pravděpodobnost dosáhnout více filtračních funkcí při buzení jednoho umístění budícího zdroje. Toto tvrzení dokazuje zkoumaný obvod 4, který je schopen z jednoho budícího zdroje dosáhnout čtyř odlišných filtračních funkcí s tím, že se vyskytuje u každé komplexní proměnné pouze jeden součin admitancí.

V sedmém až desátém zkoumaném obvodu je namísto aktivního prvku GCMI užít aktivní prvek BOTA nebo CDTA s maximálním počtem třech pasivních prvků. Výhodou tohoto prvku a prvků, které ho ke své stavbě využívají, kterým je i CDTA, je jeho vlastní transkonduktance, která se objevuje v charakteristické rovnici. Z tohoto důvodu nemusí zařazovat do obvodu tolik pasivních prvků, čímž se zjednoduší charakteristická rovnice na vhodný tvar a bude mít možnost dosáhnout více filtračních funkcí. Při návrhu multifunkčních filtrů s těmito aktivními prvky bylo dosaženo všech typů přenosových funkcí, čímž se některé filtry staly univerzálními.

Při návrhu multifunkčních kmitočtových filtrů máme možnost v analýze programu SNAP simulovat modulové kmitočtové charakteristiky navrhovaných obvodů, které vycházejí dle teoretických předpokladů a jsou shodné s charakteristikami simulovanými v programu OrCad za použití integrovaných obvodů UCC-N1B modelu první úrovně. Simulace s modely druhé a třetí úrovně se projevují reálnějšími průběhy jednotlivých charakteristik. Simulace s modely druhé a třetí úrovně byly provedeny pouze na prvních čtyřech zkoumaných obvodech a na zbývajících již prováděny nebyly. Pro simulaci zbývajících zkoumaných obvodů jsou připravena jednotlivá zapojení s naznačenými budícími zdroji a proudovými výstupy a tyto simulace je tedy možné provést obdobným způsobem jako u prvních čtyř zkoumaných obvodů.

Poslední část práce je zaměřena na praktickou realizaci a odměření jednoho ze zkoumaných obvodů. K praktickému návrhu byl vybrán zkoumaný obvod 4 se dvěma aktivními prvky GCMI, které je možné při praktické realizaci nahradit integrovaným obvodem s označením UCC-N1B 0520, který v sobě obsahuje konvektor druhé generace CCII+/- a univerzální proudový konvektor UCC. Srovnání simulovaných a naměřených charakteristik poskytují kapitoly 4.4 a 8. Měření lze hodnotit jako uspokojivé s ohledem na průběhy jednotlivých charakteristik, dodržení mezního kmitočtu a zkreslením na vyšších kmitočtech.

LITERATURA

- [1] HÁJEK, Karel, SEDLÁČEK, Jiří. Kmitočtové filtry. 1. vyd. Praha: BEN, 2002. 536 s. ISBN 80-7300-023-7.
- [2] DOSTÁL, Tomáš, AXMAN, Vladimír. Elektrické filtry. Brno: FEKT VUT, 2002. 343 s. ISBN REL 002.
- [3] JEŘÁBEK, Jan. Kmitočtové filtry s proudovými aktivními prvky. [s. l.], 2007. 70 s. Vedoucí diplomové práce Kamil Vrba.
- [4] JEŘÁBEK, Jan, KOTON, Jaroslav, VRBA, Kamil. Zobecněná metoda návrhu multifunkčních kmitočtových filtrů. Elektrevue [online]. 2007, roč. 8, č. 41 [cit. 2007-12-02], s. 41-10. Dostupný z WWW: <<http://www.elektrevue.cz/cz/download/zobecnena-metoda-navrhu-multifunkcnich-kmitoctovych-filtru/>>. ISSN 1213-1539.
- [5] FILKA, Miloslav, et al. Diplomní semináře – telekomunikace. 1989. vyd. Brno: Skriptum FEI VUT, 1989. 301 s. ISBN 80-214-1020-5.
- [6] GHAUSI, M. S., LAKER, K R.. Modern Filter Design – Active RC and Switched Capacitor. [s. l.] : Noble Publishing Corporation, 2003. 546 s. ISBN 1-884932-38-X.
- [7] ŠPONAR, Radek, VRBA, Kamil. Measurements and Behavioral Modeling of Modern Conveyors. International Journal of Computer Science and Network Security [online]. 2006, vol. 6, no. 3A [cit. 2008-05-20], s. 57-65. Dostupný z WWW: <http://paper.ijcsns.org/07_book/200603/200603A08.pdf>. ISSN 1738-7906.
- [8] VRBA, Kamil, KOTON, Jaroslav. Method for Designing Frequency Filters using Universal Current Conveyors. In BAE, K. E., KIM, S. B., LEE, S. Y. International Transaction on Computer Science and Engineering. 2005th edition. [s. l.] : [s. n.], 2005. s. 144-154. ISBN 89-953729-5-8. ISSN 1738-6438.
- [9] HERENCŠÁR, Norbert, VRBA, Kamil. Obecný přístup k návrhu kmitočtových filtrů pomocí autonomních obvodů. Elektrevue [online]. 2006, roč. 7, č. 40 [cit. 2008-05-20], s. 1-17. Dostupný z WWW: <<http://www.elektrevue.cz/cz/download/obecnypriustup-k-navrhu-kmitoctovych-filtru-pomoci-autonomnich-obvodu/>>. ISSN 1213-1539.
- [10] BIOLEK, Dalibor, TOMÁŠ, Grubek. Nové obvodové prvky pro zpracování signálů v proudovém módu. Elektrevue [online]. 2004, roč. 5, č. 28 [cit. 2008-05-20], s. 1-11. Dostupný z WWW: <<http://www.elektrevue.cz/clanky/04028/index.html>>.
- [11] BIOLEK, Dalibor. Nová knihovna modelů volně šířitelného programu SNAP 2.6x pro analýzu obvodů (nejen) v proudovém módu. Elektrevue [online]. 2004, roč. 5, č. 44 [cit. 2008-05-20], s. 1-24. Dostupný z WWW: <<http://www.elektrevue.cz/clanky/04028/index.html>>.
- [12] WEI, Mat. Www.matwei.de [online]. 2006, 2006/01/28 16:30 [cit. 2008-05-20]. Anglický. Dostupný z WWW: <<http://www.matwei.de/doku.php?id=en:home>>.

PŘÍLOHY

Příloha č. 1: Fotografie realizovaného multifunkčního filtru

Příloha č. 2: Deska plošného spoje generovaná programy Eagle a Pov Ray for Windows

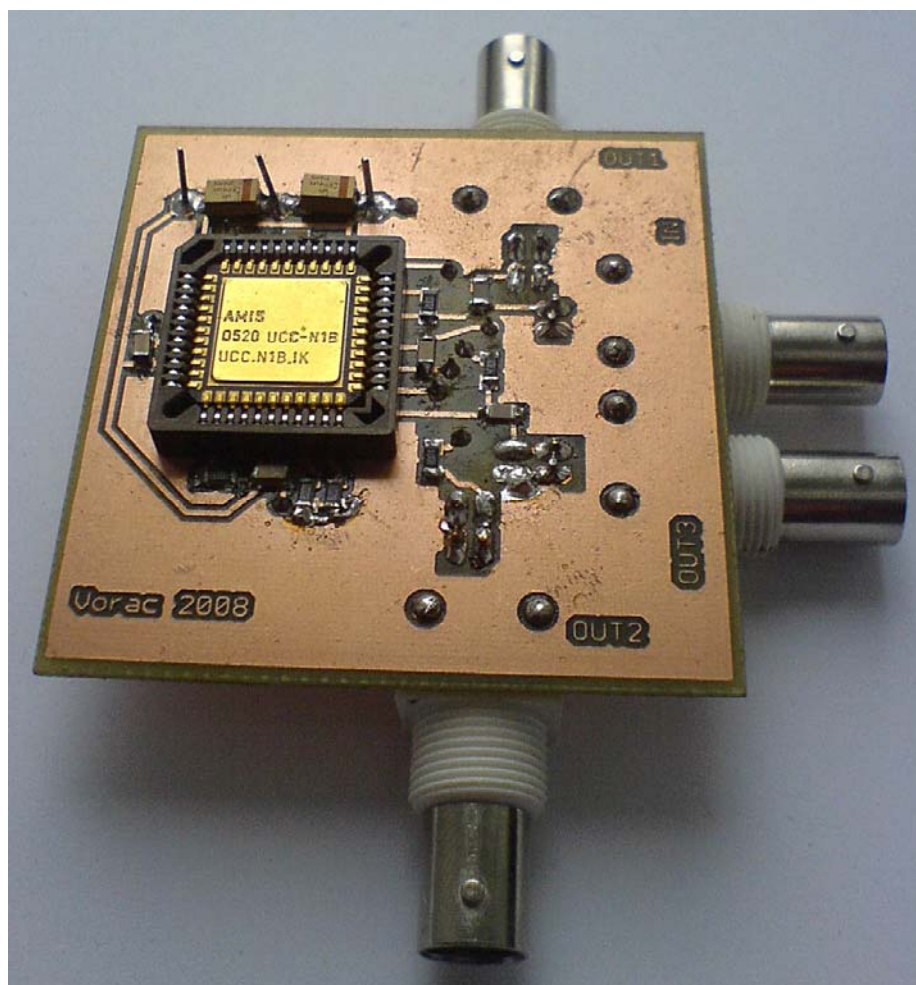
Příloha č. 3: Kmitočtová charakteristika typu horní propust zachycená analyzátozem Agilent 4396A

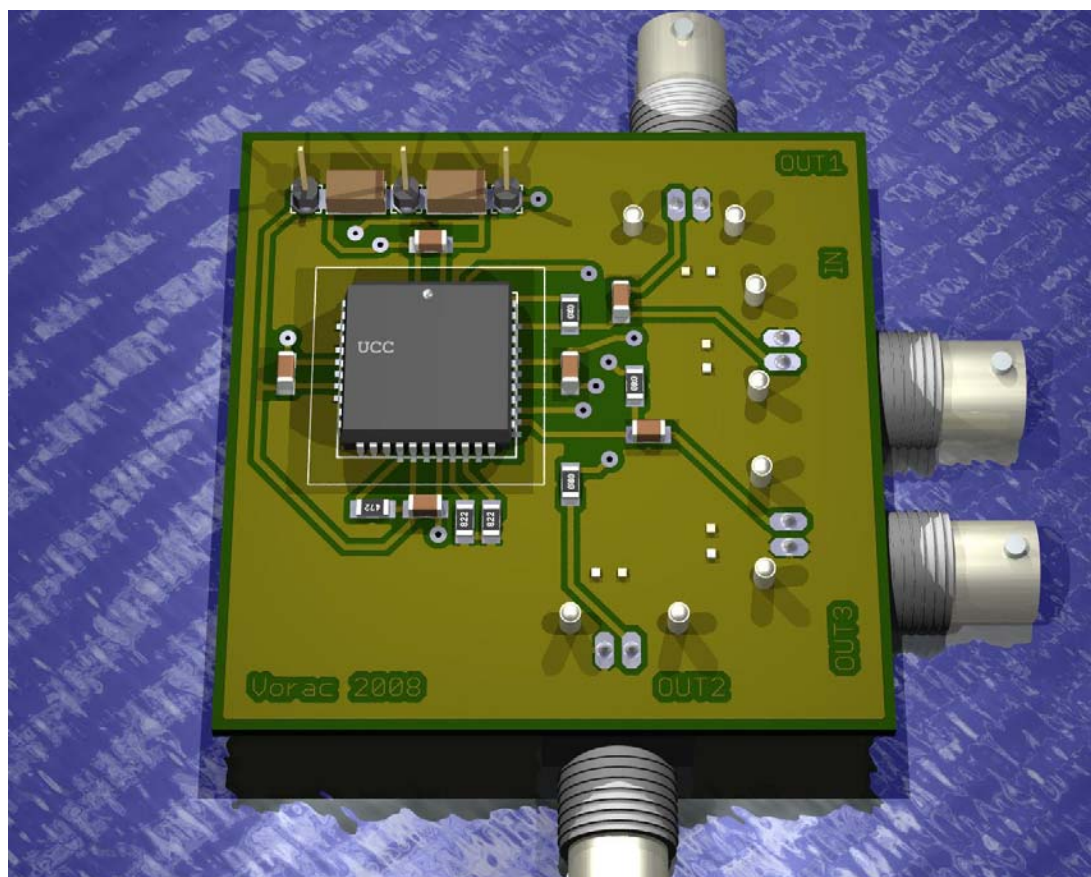
Příloha č. 4: Kmitočtová charakteristika typu dolní propust zachycená analyzátozem Agilent 4396A

Příloha č. 5: Kmitočtová charakteristika typu pásmová propust zachycená analyzátozem Agilent 4396A

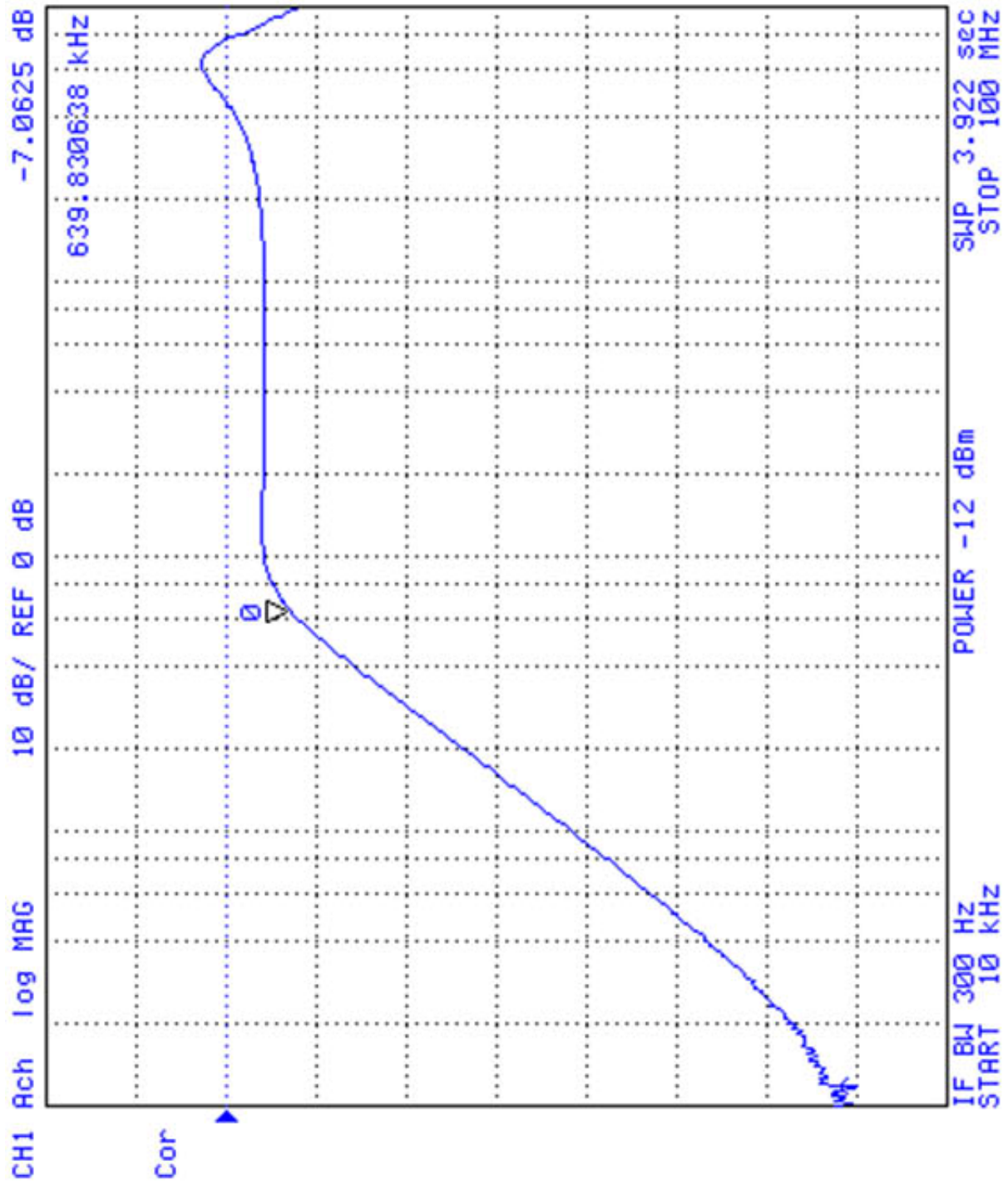
Příloha č. 6: Kmitočtová charakteristika typu pásmová zádrž zachycená analyzátozem Agilent 4396A

Příloha č. 1: Fotografie realizovaného multifunkčního filtru

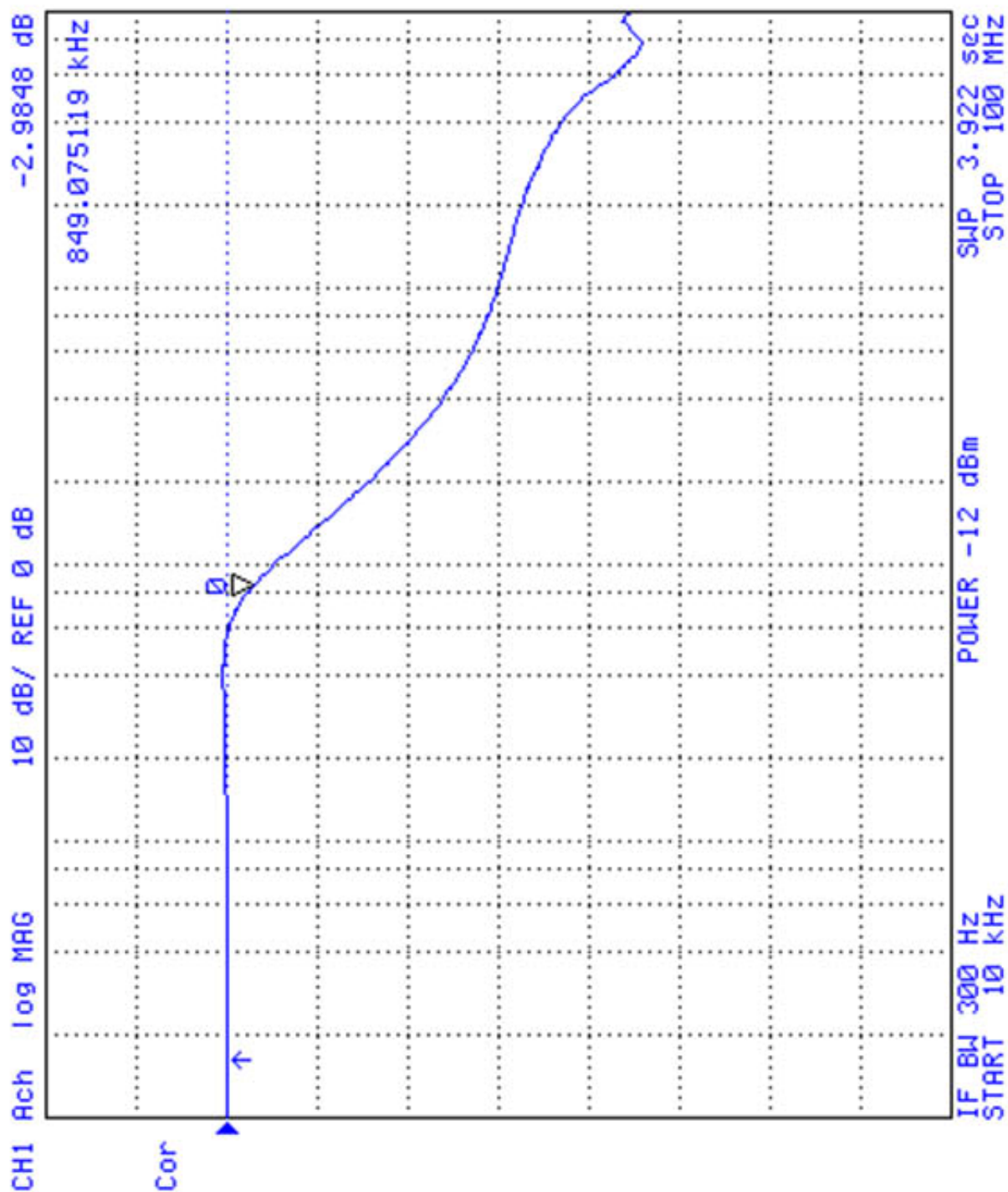


Příloha č. 2: Deska plošného spoje generovaná programy Eagle a Pov Ray for Windows

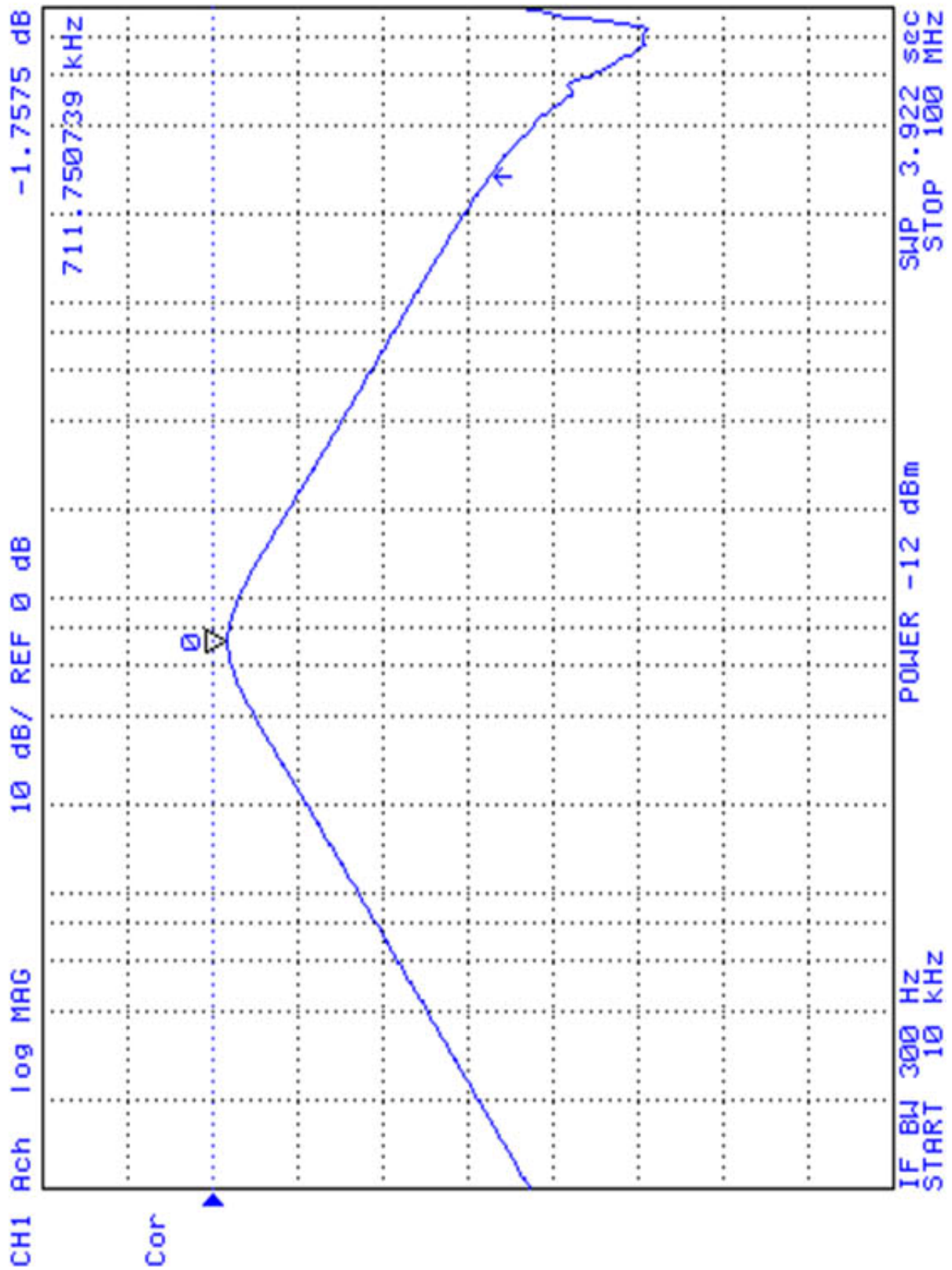
Příloha č. 3: Kmitočtová charakteristika typu horní propust zachycená analyzátozem Agilent 4396A



Příloha č. 4: Kmitočtová charakteristika typu dolní propust zachycená analyzátozem Agilent 4396A



Příloha č. 5: Kmitočtová charakteristika typu pásmová propust zachycená analyzátozem Agilent 4396A



Příloha č. 6: Kmitočtová charakteristika typu pásmová zadrž zachycená analyzátozem Agilent 4396A

