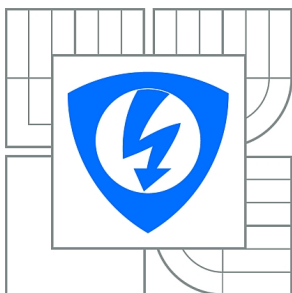


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

ŘIDITELNÉ KMITOČTOVÉ FILTRY S MODERNÍMI AKTIVNÍMI PRVKY

CONTROLLABLE FREQUENCY FILTERS WITH MODERN ACTIVE ELEMENTS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

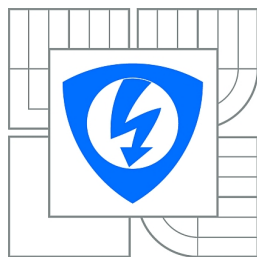
Bc. MILAN PRECLÍK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JAROSLAV KOTON, Ph.D.

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Telekomunikační a informační technika

Student: Bc. Milan Preclík

ID: 78421

Ročník: 2

Akademický rok: 2009/2010

NÁZEV TÉMATU:

Řiditelné kmitočtové filtry s moderními aktivními prvky

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Popište předpoklady pro řízení některých ze základních parametrů aktivních kmitočtových filtrů pomocí aktivních prvků. Využitím teorie syntetických prvků naleznete vhodné transformační články, které zapojením do struktury kmitočtově závislých děličů umožní řídit mezní kmitočet výsledného kmitočtového filtru. Při samotném návrhu pracujte s proudovými, napěťovými konvejory a proudovými aktivními prvky DO-CF (Double Output Current Follower) a jejich variacemi. Na simulacích názorně ukažte funkčnost nalezených obvodových řešení. Diskutujte také možnost řízení některého ze základních parametrů kmitočtového filtru pomocí pasivních prvků.

Využitím dostupných aktivních prvků vybrané zapojení experimentálně ověřte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Deliyannis, T., Sun, Y., Fiedler, J. K.: Continuous-time active filter design, CRC Press, 1999, ISBN 0849325730

[2] Mohan, P. V. A. Current-mode VLSI analog filters, Birkhauser, 2003, ISBN 0817642773.

Termín zadání: 29.1.2010

Termín odevzdání: 26.5.2010

Vedoucí práce: Ing. Jaroslav Koton, Ph.D.

prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Práce se zabývá návrhem transformačních článků vhodných k realizaci kmitočtových filtrů vyšších řádů dovolující změnu mezního kmitočtu. Nejprve zde jsou obecně popsány kmitočtové filtry a aktivní prvky v podobě proudových a napěťových konvektorů. Dále jsou definovány předpoklady pro řízení mezního kmitočtu filtru, kde výsledkem je vhodná podoba charakteristické rovnice. Jako další v pořadí se text zaměřuje na filozofii při návrhu syntetických prvků *DP*, *EP*, *DS*, *ES* i včetně možnosti změny mezního kmitočtu. Využitím teorie syntetických prvků jsou hledána nová obvodová zapojení transformačních článků. Práce pokračuje výběrem vhodných struktur těchto článků pro výsledná obvodová řešení filtrů s možností řízení jejich mezního kmitočtu využitím přenosových koeficientů aktivních prvků, nebo pomocí pasivních prvků. V závěru práce jsou uvedeny výsledky simulací v programu OrCAD a experimentálním ověřením funkčnosti vybraného zapojení.

KLÍČOVÁ SLOVA

Kmitočtový filtr, proudový konvektor, napěťový konvektor, transformační článek, syntetický prvek, mezní kmitočet.

ABSTRACT

The work deals with design of transformation cells suitable for realization of higher orders frequency filters with possibility of cutoff frequency control. At first, there is a common description of frequency filters and active elements like current and voltage conveyors. Furthermore assumptions of cutoff frequency control are defined which result in a convenient characteristic equation. Philosophy of synthetic elements *DP*, *EP*, *DS*, *ES* including a possibility of change of cutoff frequency is next in line. By exploitation of synthetic elements theory new circuit's schemes of transformation cells are searched. The work continues with the choice of appropriate transformation cells for resulting circuit's solutions of frequency filters with possibility of cutoff frequency control by using transfer coefficients of active elements or with help of passive elements. The work concludes with verification of its proper function based on a simulation executed in OrCAD and with practical implementation of choosen circuit's solution.

KEYWORDS

Frequency filter, current conveyor, voltage conveyor, transformation cell, synthetic element, cutoff frequency.

PRECLÍK, M. *Říditelné kmitočtové filtry s moderními aktivními prvky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 64 s.

Vedoucí semestrální práce Ing. Jaroslav Koton, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma Říditelné kmitočtové filtry s moderními aktivními prvky jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a 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 diplomové práce Ing. Jaroslavu Kotonovi, Ph.D. za velmi účinnou metodickou pomoc a cenné rady při zpracování diplomové práce.

V Brně dne

.....
(podpis autora)

OBSAH

OBSAH	7
SEZNAM OBRÁZKŮ	9
SEZNAM TABULEK	10
ÚVOD	11
1 KMITOČTOVÉ FILTRY	12
1.1 Obecný pohled na kmitočtové filtry	12
1.2 Základní matematický aparát z oblasti kmitočtových filtrů	13
1.3 Přenosové funkce jednotlivých typů kmitočtových filtrů	13
2 AKTIVNÍ PRVKY	15
2.1 Proudový konvektor	15
2.1.1 Zobecněný proudový konvektor	15
2.1.2 Univerzální proudový konvektor	16
2.2 Napěťový konvektor	17
2.2.1 Zobecněný napěťový konvektor	18
2.2.2 Univerzální napěťový konvektor	19
3 NÁVRH KMITOČTOVÝCH FILTRŮ	21
3.1 Syntetické prvky	21
3.2 Transformační články	22
3.3 Řízení parametrů kmitočtových filtrů	23
3.4 Předpoklady pro změnu mezního kmitočtu	24
3.5 Filozofie při návrhu DP a EP	26
3.6 Filozofie při návrhu DS a ES	27
4 VLASTNÍ NÁVRH OBVODOVÝCH STRUKTUR	29
4.1 Struktury transformačních článků	29
4.2 Návrh kmitočtového filtru 4. řádu s proudovými konvektory	30
4.2.1 Numerický návrh dolní a horní propusti	31
4.3 Návrh kmitočtového filtru 4. řádu s proudovými a napěťovými konvektory	33
4.3.1 Numerický návrh dolní a horní propusti	34
4.4 Obvod s proudovými konvektory se změnou f_m pomocí pasivních prvků	35
4.4.1 Numerický návrh dolní propusti	36
4.5 Tři zapojení se změnou f_m pomocí pasivních prvků	37
4.5.1 Návrh zapojení č.1	38
4.5.2 Návrh zapojení č.2	39
4.5.3 Návrh zapojení č.3	39
5 SIMULACE VYBRANÝCH OBVODŮ	41
5.1 Simulace kmitočtového filtru 4. řádu s proudovými konvektory	41
5.1.1 Dolní propust	41
5.1.2 Horní propust	43
5.1.3 Další přenosové funkce	44
5.2 Simulace kmit. filtru 4. řádu s proudovými a napěťovými konvektory	46
5.3 Simulace kmit. filtru 4. řádu s GCC se změnou f_m pomocí pasivních prvků	48
5.4 Simulace tří zapojení se změnou f_m pomocí pasivních prvků	49
6 PRAKTICKÁ REALIZACE	52
6.1 Vyhotovení obvodu č.1	52
6.2 Simulace vytvořeného kmitočtového filtru	52

7	ZÁVĚR	55
	REFERENCE.....	56
	SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK	59
	SEZNAM PŘÍLOH.....	61

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1: Schematická značka GCC.....	16
Obr. 2.2: Schematická značka UCC.....	16
Obr. 2.3: Schematická značka GVC	18
Obr. 2.4: Schematická značka UVC	19
Obr. 3.1: Syntetické prvky vyšších řádů a) <i>DP</i> , b) <i>EP</i> , c) <i>DS</i> a d) <i>ES</i>	22
Obr. 3.2: Možnosti zapojení syntetických prvků vyšších řádů	23
Obr. 3.3: Obvodové zapojení a) děliče napětí, b) děliče proudu.....	23
Obr. 3.4: První krok navýšení řádu.....	26
Obr. 3.5: Druhý krok navýšení řádu	26
Obr. 3.6: Třetí krok navýšení řádu.....	27
Obr. 3.7: Třetí fáze navýšování řádu.....	28
Obr. 4.1: Transformační články s GCC a) obvod č.1, b) obvod č.2, c) obvod č.3.....	29
Obr. 4.2: Transformační článek s GVC	29
Obr. 4.3: Obecný kmitočtový filtr čtvrtého řádu s GCC.....	31
Obr. 4.4: Obecný kmitočtový filtr čtvrtého řádu s GCC a GVC.....	33
Obr. 4.5: Transformace uzemněné imitance na plovoucí pomocí DVCC.....	33
Obr. 4.6: Tři obvody – zapojení a) č.1, b) č.2, c) č.3.....	37
Obr. 4.7: Zapojení č.1	38
Obr. 4.8: Zapojení č.2.....	39
Obr. 4.9: Zapojení č.3.....	40
Obr. 5.1: Obvodová realizace filtru s GCC a) dolní propusti, b) horní propusti.....	41
Obr. 5.2: Dolní propusti dle struktury (obr. 5.1a) pro jednotlivá <i>a</i>	42
Obr. 5.3: Optimalizované přenosové charakteristiky dolní propusti pro jednotlivá <i>a</i>	42
Obr. 5.4: Horní propusti dle struktury (obr. 5.1b) pro jednotlivá <i>a</i>	43
Obr. 5.5: Optimalizované přenosové charakteristiky horní propusti pro jednotlivá <i>a</i>	44
Obr. 5.6: Pásmové propusti dle struktury (4.1a).....	45
Obr. 5.7: Pásmové propusti dle struktury (4.1b).....	46
Obr. 5.8: Obvodová realizace filtru s GCC i GVC a) dolní propusti, b) horní propusti	46
Obr. 5.9: Přenosová charakteristika dolní propusti.....	47
Obr. 5.10: Přenosová charakteristika horní propusti.....	47
Obr. 5.11: Obvodová realizace filtru s GCC se změnou f_m pomocí pasivních prvků	48
Obr. 5.12: Přenosová charakteristika dolní propusti.....	49
Obr. 5.13: Přenosová charakteristika dolní propusti – Zapojení č.1	50
Obr. 5.14: Přenosová charakteristika dolní propusti – Zapojení č.2	50
Obr. 5.15: Přenosová charakteristika dolní propusti – Zapojení č.3	51
Obr. 6.1: Schéma zapojení kmitočtového filtru 2. řádu	52
Obr. 6.2: Přenosová charakteristika dolní propusti – napěťový mód.....	53
Obr. 6.3: Přenosová charakteristika dolní propusti – proudový mód.....	54
Obr. A.1: Rozmístění součástek na desce	62
Obr. B.1: Deska s plošnými spoji - TOP.....	63
Obr. B.2: Deska s plošnými spoji - BOTTOM	63
Obr. C.1: Realizace kmitočtového filtru	64

SEZNAM TABULEK

Tab. 1.1: Koeficienty přenosové funkce filtru druhého řádu	14
Tab. 2.1: Možnosti realizace proudových konvektorů s použitím UCC	17
Tab. 2.2: Význam koeficientů GVC z pohledu varianty VC	18
Tab. 2.3: Možnosti realizace napěťových konvektorů s použitím UVC	20
Tab. 3.1: Přehled elementárních „dvojpolů“ [24]	22
Tab. 3.2: Zákonitosti při návrhu DP a EP	26
Tab. 3.3: Zákonitosti při návrhu DS a ES	27
Tab. 4.1: Navržené struktury transformačních článků	30
Tab. 4.2: Závislost charakteristického kmitočtu na řídicím koeficientu a	32
Tab. 4.3: Závislost charakteristického kmitočtu na řídicím koeficientu a	35
Tab. 4.4: Závislost charakteristického kmitočtu na řídicím koeficientu $G [S]$	36
Tab. 4.5: Realizace změny mezního kmitočtu	38

ÚVOD

V dnešní době se zpracování signálů děje především v digitální podobě. I přesto je však stále nutné, především na vstupech a výstupech, používat analogové bloky. Do této skupiny přístrojů určitě patří zesilovače signálu a nebo právě kmitočtové filtry. Jelikož každým dnem jde vývoj stále kupředu a to nejen přímo v oblasti elektrotechniky, jsou na zařízení všeho typu kladeny stále vyšší a vyšší požadavky. U kmitočtových filtrů můžeme jmenovat například snižování napájecího napětí, nebo potřebu co nejširšího kmitočtového pásma zpracovávaného signálu při zachování dostatečného odstupu signálu od šumu.

Kmitočtové filtry jsou lineární funkční bloky, sloužící k úpravě spektra zpracovávaného signálu. Ten je pak předán k dalšímu analogovému nebo digitálnímu zpracování. Kmitočtové filtry se dle sledovaných parametrů či vlastností dají rozčlenit do mnoha kategorií. To nejobecnější možné rozdělení je zcela jistě na pasivní a aktivní struktury.

V současné době je jasně patrná tendence nasazování aktivních prvků na úkor pasivních. Důvod je zřejmý – snadnější realizace těchto obvodových struktur v mikroelektronické podobě včetně možnosti snadné přeladitelnosti i přesto, že je nutné obvody napájet. Samozřejmostí je také existence různých typů kmitočtových filtrů podle zpracovávaného kmitočtového pásma a to dolní, horní a pásmová propust, pásmová zádrž nebo fázovací články.

V této diplomové práci bude popsána možnost řízení mezní frekvence kmitočtových filtrů včetně jejich návrhu pomocí metody syntetických prvků za předpokladu nalezení vhodných transformačních článků, které zapojením do struktury kmitočtově závislých děličů umožní mezní kmitočet výsledného filtru měnit a to buď využitím přenosových koeficientů použitých aktivních prvků a nebo pomocí pasivních prvků. Předpokládá se použití aktivních prvků v podobě proudových (CC) a napětíových (VC) konvektorů a jejich variací.

V první části práce lze nalézt obecný popis kmitočtových filtrů, včetně jejich rozdělení, typů, základních vztahů a možnosti aplikací. V závěru dané kapitoly je čtenář přehledně seznámen s přenosovými funkcemi kmitočtových filtrů druhého řádu. Dále jsou popsány aktivní prvky v podobě proudových a napětíových konvektorů včetně jejich univerzálních a zobecněných variant a informace ohledně jejich vývoje. Je popsána metoda návrhu pomocí syntetických prvků a předpoklady pro řízení mezní frekvence kmitočtového filtru. Jsou prezentovány postupy při návrhu syntetických prvků typu DP, EP, DS a ES včetně vhodných struktur transformačních článků. Je navrženo několik obvodů s možností změny jejich mezních kmitočetů. Chování takto navržených kmitočtových filtrů je otestováno simulacemi v programu OrCAD a funkčnost vybraného zapojení je experimentálně ověřena.

1 KMITOČTOVÉ FILTRY

Dnes a denně se setkáváme s širokým využitím kmitočtových filtrů [21] v oblastech elektrotechnického průmyslu.

1.1 Obecný pohled na kmitočtové filtry

Problematika kmitočtových filtrů je dnes již tak obsáhlá, že existují stovky a tisíce různých publikací a návodů. Je téměř nemožné obsáhnout kompletně celou oblast kmitočtových filtrů včetně problematiky jejich návrhu. I to je důkaz, jak je v dnešní době nasazení kmitočtových filtrů v elektrotechnickém průmyslu důležité.

Jak již bylo naznačeno v úvodu, kmitočtové filtry slouží k úpravě spektra zpracovávaného signálu. Jejich asi nejdůležitější vlastností je selektivita. Jednoduše řečeno, určitou část nebo částí spektra utlumí (tzv. nepropustné pásmo), jiné propustí k dalšímu zpracování (analogicky propustné pásmo). Tyto vlastnosti jsou interpretovány pomocí modulové (amplitudové) kmitočtové charakteristiky (závislost modulu přenosu na kmitočtu). Při průchodu signálu kmitočtovým filtrem nedochází jen ke změně modulu přenosu, ale také k určitému zpoždění. Tuto vlastnost lze pozorovat na fázové kmitočtové charakteristice.

Mezi hlavní oblasti aplikace kmitočtových filtrů bezesporu patří elektroakustika (mj. například výhybky v reproduktorových systémech, korekční filtry nebo také vytváření zvukových efektů), A/D převodníky (antialiasingové filtry), měřicí technika (selektivní voltmetry) a nebo silnoproudá elektrotechnika, kde asi nejznámějším zástupcem jsou odrušovací filtry (50 Hz), které najdeme téměř ve všech zařízeních používajících klasické napájení z rozvodné sítě.

Je mnoho způsobů jak v praxi realizovat kmitočtový filtr. Jedno z nejpoužívanějších je zcela jistě realizace číslicovými filtry (například v programu Matlab utility FDATool a FVTool [26]). Jedná se o matematické modelování vlastností filtrů. Je zde ale jisté omezení plynoucí z možnosti zpracování pouze číslicových signálů a navíc, ve velké míře záleží také na výpočetním výkonu počítače.

Kmitočtový filtr můžeme zkonstruovat i za pomoci elektrotechnických součástek jako jsou rezistory, cívky či kondenzátory. Toto řešení je velice variabilní, umožňuje každému zvolit si vhodné rozmístění a propojení těchto prvků s cílem dosáhnout požadovaných vlastností.

Jako další oblíbená možnost realizace je v podobě integrovaného obvodu (IO). Výhody jsou zřejmé, co do velikosti rozhodně menší provedení, lépe zpracované a často levnější díky sériové výrobě. Mnohdy je ale problémem nemožnost jakékoli modifikace.

1.2 Základní matematický aparát z oblasti kmitočtových filtrů

Veškeré principy z oblasti kmitočtových filtrů jsou založeny na základních matematických vztazích. Pro návrh jakéhokoli kmitočtového filtru je zapotřebí alespoň znalost těch základních, mezi které patří modul napěťového přenosu K_U (1.1), argument přenosu φ (1.2) a obecná přenosová funkce ve tvaru racionální lomené funkce $K_U(j\omega)$ respektive $K_U(p)$ (1.3).

$$K_U(dB) = 20 \log \frac{U_2}{U_1}, \quad (1.1)$$

$$\varphi = \varphi_2 - \varphi_1, \quad (1.2)$$

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

U obecné přenosové funkce kmitočtového filtru [21] musí platit $m \leq n$. Nejvyšší mocnina n určuje řád přenosové funkce. Čím větší je řád přenosové funkce, tím je větší strmost v přechodovém pásmu a tím více se blížíme k vlastnostem ideálního kmitočtového filtru.

1.3 Přenosové funkce jednotlivých typů kmitočtových filtrů

Jak již bylo naznačeno v úvodu, jsou k dispozici typy filtrů podle různé selektivity spektra zpracovávaného signálu a to dolní propusti (DP), horní propusti (HP) a pásmové propusti (PP), pásmové zádrže (PZ) a fázovací články (FČ). Pro konkrétnější podobu přenosových funkcí jednotlivých typů filtrů je v následujícím textu uvažován řád přenosové funkce kmitočtového filtru $n = 2$. Obecná přenosová funkce kmitočtového filtru druhého řádu ve tvaru racionální lomené funkce je

$$K(p) = \frac{a_{22}p^2 + a_{21}p + a_{20}}{b_{22}p^2 + b_{21}p + b_{20}}. \quad (1.4)$$

Koeficienty této přenosové funkce mohou podle typu kmitočtového filtru nabývat hodnot podle tab. 1.1.

Tab. 1.1: Koeficienty přenosové funkce filtru druhého řádu

Typ filtru	Koeficienty přenosové funkce					
	a_{22}	a_{21}	a_{20}	b_{22}	b_{21}	b_{20}
DP	0	0	ω_0^2	1	ω_0/Q	ω_0^2
HP	1	0	0	1	ω_0/Q	ω_0^2
PP	0	ω_0/Q	0	1	ω_0/Q	ω_0^2
PZ	1	0	ω_0^2	1	ω_0/Q	ω_0^2
FČ	1	$-\omega_0/Q$	ω_0^2	1	ω_0/Q	ω_0^2

Podrobnější popis jednotlivých typů kmitočtových filtrů lze nalézt např. v [21].

2 AKTIVNÍ PRVKY

V souvislosti s rychlým vývojem a hlavně s náročnějšími požadavky na kmitočtové filtry jako je nízké napájecí napětí a nebo zpracování signálů ve vyšších kmitočtových oblastech se dnes čím dál více používají nejen klasické aktivní prvky, ale i ty netradiční v podobě proudových (CC) a napětových (VC) konvektorů.

2.1 Proudový konvektor

Tento aktivní prvek byl poprvé prezentován v roce 1968 v podobě proudového konvektoru první generace (CCI) [22]. Z počátku ale o tyto nové netradiční aktivní prvky nebyl takový zájem a to hlavně z důvodu, že jejich výhody nebyly ještě známy, a proto se stále používaly výhradně operační zesilovače. O pár let později přicházejí stejní autoři s proudovým konvektorem druhé generace (CCII) [23] a ukazují další uplatnění tohoto typu aktivních prvků. Uvedením této druhé generace se prvek začínal dostávat do popředí zájmu. Jako poslední v roce 1995 představil Fabre proudový konvektor třetí generace (CCIII) [10].

Kromě proudového konvektoru CCII+ (OPA860 [15] a OPA861 [16]) a VCI+ (AD844 [14]) se žádný jiný typ komerčně nevyrábí. Přesto se tyto prvky využívají jako součásti větších stavebních bloků, především operačního zesilovače s proudovou zpětnou vazbou (CFA).

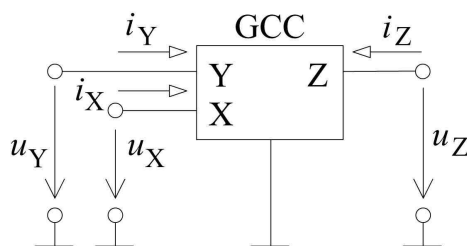
Při návrhu obvodů a při experimentálním ověřování jejich vlastností byli autoři omezeni počtem typů proudových konvektorů. Vznikla tak potřeba univerzálnějšího řešení umožňující realizovat konkrétní typ aktivního prvku. Výsledkem bylo vytvoření univerzálního proudového konvektoru (UCC) [2], [13]. Za pomoci UCC je možno realizovat mnoho typů proudových konvektorů s jednou bránou X, viz kapitola 2.1.2.

2.1.1 Zobecněný proudový konvektor

Grafické značení zobecněného proudového konvektoru (GCC) [6, 9] je na obr. 2.1. Písmena X, Y a Z označují proudovou, napětovou a výstupní bránu. Chování tohoto typu konvektoru lze popsat maticí (2.1) s koeficienty a, b, c . Koeficient a může nabývat hodnot z množiny $\{-1;1\}$, koeficient b $\{-1;0;1\}$ a konečně koeficient c $\{-1;1\}$. Jak plyne z matice (2.1), člen c značí přenos proudu ze svorky X na svorku Z. Analogicky členy a a b značí přenos napětí z Y na X a přenos proudu z X na Y.

$$\begin{bmatrix} u_X \\ i_Y \\ i_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & a & 0 \\ b & 0 & 0 \\ c & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_X \\ u_Y \\ u_Z \end{bmatrix}. \quad (2.1)$$

Možnost volit z těchto hodnot nám poskytuje široké možnosti při návrhu konkrétního obvodového řešení. V případě, že koeficient $b = 1$, jde o proudový konvektor první generace xCCI_Ix, pro $b = 0$ se jedná o druhou generaci xCCI_{II}x a pro $b = -1$ je výsledná struktura xCCI_{III}x třetí generace. Koeficient a určuje zda jde o invertující ($a = -1$) nebo neinvertující ($a = 1$) zapojení a koeficient c značí kladný ($c = 1$) nebo záporný ($c = -1$) proudový přenos.

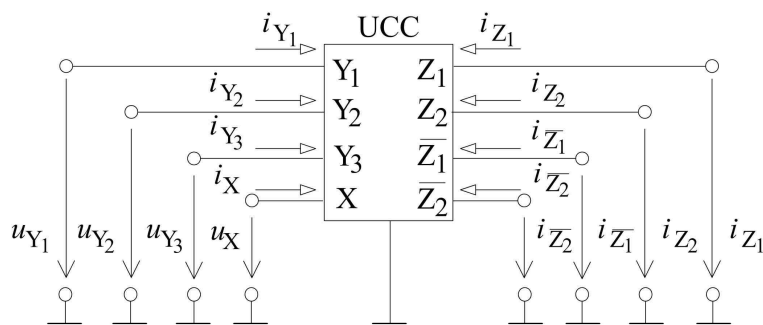


Obr. 2.1: Schematická značka GCC

$$\begin{bmatrix} u_X \\ i_Y \\ i_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & a & 0 \\ b & 0 & 0 \\ c & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_X \\ u_Y \\ u_Z \end{bmatrix}. \quad (2.1)$$

2.1.2 Univerzální proudový konvektor

Jak již bylo naznačeno výše, tento prvek, vytvořený na pracovišti ÚTKO FEKT VUT v Brně [2], umožňuje mj. realizovat všechny typy proudových konvektorů (tab. 2.1) vycházejících z definice GCC v kap. 2.1.1. Jeho schematická značka je uvedena na obrázku 2.2. Je to osmibran, který má tři vysokoimpedanční napět'ové vstupy Y_1 , Y_2 a Y_3 z čehož Y_1 a Y_2 jsou rozdílové a Y_1 a Y_3 součtové, jeden nízkoimpedanční proudový vstup X a jako poslední, čtyři proudové výstupy Z_1 , $\overline{Z_1}$, Z_2 , $\overline{Z_2}$. Proudové výstupy $\overline{Z_1}$ a $\overline{Z_2}$ mají oproti Z_1 a Z_2 záporný přenos proudu ze svorky X . Chování tohoto obvodu jasně vyplývá z matice (2.2). Vhodným propojením vstupů a výstupů UCC můžeme realizovat různé varianty a typy proudových konvektorů [2].



Obr. 2.2: Schematická značka UCC

$$\begin{bmatrix} i_{Y_1} \\ i_{Y_2} \\ i_{Y_3} \\ u_X \\ i_{Z_1} \\ i_{Z_2} \\ i_{\overline{Z_1}} \\ i_{\overline{Z_2}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{Y_1} \\ u_{Y_2} \\ u_{Y_3} \\ i_X \\ u_{Z_1} \\ u_{Z_2} \\ u_{\overline{Z_1}} \\ u_{\overline{Z_2}} \end{bmatrix}. \quad (2.2)$$

Tab. 2.1: Možnosti realizace proudových konvektorů s použitím UCC

Typ	Vstup	Výstup	Propojit	Uzemnit
CCI+	Y_1	Z_2	$Y_1 - Z_1$	$Y_2, Y_3, \overline{Z_1}, \overline{Z_2}$
CCI-	Y_1	$\overline{Z_1}$	$Y_1 - Z_1$	$Y_2, Y_3, Z_2, \overline{Z_2}$
CCI+/-	Y_1	$Z_2, \overline{Z_1}$	$Y_1 - Z_1$	$Y_2, Y_3, \overline{Z_2}$
CCII+	Y_1	Z_1	-	$Y_2, Y_3, Z_2, \overline{Z_1}, \overline{Z_2}$
CCII-	Y_1	$\overline{Z_1}$	-	$Y_2, Y_3, Z_1, Z_2, \overline{Z_2}$
CCII+/-	Y_1	$Z_1, \overline{Z_1}$	-	$Y_2, Y_3, Z_2, \overline{Z_2}$
CCIII+	Y_1	Z_1	$Y_1 - \overline{Z_1}$	$Y_2, Y_3, Z_2, \overline{Z_2}$
CCIII-	Y_1	$\overline{Z_2}$	$Y_1 - \overline{Z_1}$	Y_2, Y_3, Z_1, Z_2
CCIII+/-	Y_1	$Z_1, \overline{Z_2}$	$Y_1 - \overline{Z_1}$	Y_2, Y_3, Z_2
ICCI+	Y_2	Z_2	$Y_2 - Z_1$	$Y_1, Y_3, \overline{Z_1}, \overline{Z_2}$
ICCI-	Y_2	$\overline{Z_1}$	$Y_2 - Z_1$	$Y_1, Y_3, Z_2, \overline{Z_2}$
ICCI+/-	Y_2	$Z_2, \overline{Z_1}$	$Y_2 - Z_1$	$Y_1, Y_3, \overline{Z_2}$
ICCI+	Y_2	Z_1	-	$Y_1, Y_3, Z_2, \overline{Z_1}, \overline{Z_2}$
ICCI-	Y_2	$\overline{Z_1}$	-	$Y_1, Y_3, Z_1, Z_2, \overline{Z_2}$
ICCI+/-	Y_2	$Z_1, \overline{Z_1}$	-	$Y_1, Y_3, Z_2, \overline{Z_2}$
ICCI+	Y_2	Z_1	$Y_2 - \overline{Z_1}$	$Y_1, Y_3, Z_2, \overline{Z_2}$
ICCI-	Y_2	$\overline{Z_2}$	$Y_2 - \overline{Z_1}$	Y_1, Y_3, Z_1, Z_2
ICCI+/-	Y_2	$Z_1, \overline{Z_2}$	$Y_2 - \overline{Z_1}$	Y_1, Y_3, Z_2

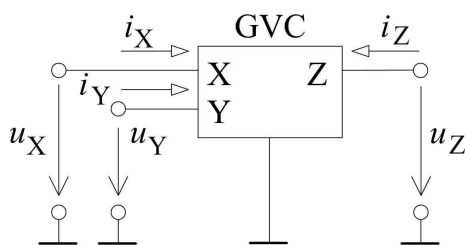
2.2 Napěťový konvektor

Na principu duality byl v roce 1982 popsán napěťový konvektor (VC) [3, 9]. Na základě předchozích výsledků [2] byl realizován univerzální napěťový konvektor (UVC) [28] jako

ekvivalentní protějšek k univerzálnímu proudovému konveju a to včetně zobecněného napětového konveju GVC.

2.2.1 Zobecněný napětový konveju

U tohoto aktivního prvku (GVC) je zjevná analogie k zobecněnému proudovému konveju (GCC) a univerzálnímu proudovému konveju (UCC) z kap. 2.1. Schematická značka GVC je znázorněna na obr. 2.3. Je vidět zjevná podobnost se značkou GCC z obr. 2.1. Rozdíl mezi těmito prvky je patrný až z matice (2.3) popisující chování GVC. Z přenosových koeficientů a, b, c lze vyčíst generaci a typ použitého proudového konveju jak je vidět z tab. 2.2.



Obr. 2.3: Schematická značka GVC

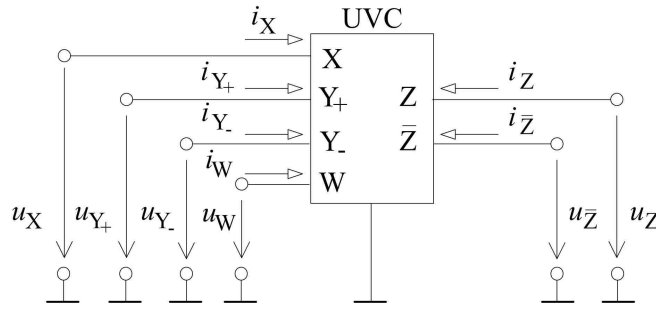
$$\begin{bmatrix} i_X \\ u_Y \\ u_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & a & 0 \\ b & 0 & 0 \\ c & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_X \\ i_Y \\ i_Z \end{bmatrix}. \quad (2.3)$$

Tab. 2.2: Význam koeficientů GVC z pohledu varianty VC

Hodnota koeficientu	Jednotlivé koeficienty z matice (2.3)		
	a	b	c
1	Neinvertující napětový konveju	I. generace	Kladný napětový přenos
0	-	II. generace	-
-1	Invertující napětový konveju	III. generace	Záporný napětový přenos

2.2.2 Univerzální napěťový konvektor

Tento prvek (UVC), duální k univerzálnímu proudovému konveктору (UCC), vznikl na základě potřeby univerzálnějšího řešení, které by umožňovalo realizaci napěťových konvektorů různých typů a generací vhodným propojením jeho vstupních a výstupních svorek (tab. 2.3). Matice (2.4) ukazuje chování prvku a schematická značka je na obr. 2.4.



Obr. 2.4: Schematická značka UVC

$$\begin{bmatrix} i_X \\ u_{Y+} \\ u_{Y-} \\ i_W \\ u_Z \\ u_{\bar{Z}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_X \\ i_{Y+} \\ i_{Y-} \\ u_W \\ i_Z \\ i_{\bar{Z}} \end{bmatrix}. \quad (2.4)$$

Tab. 2.3: Možnosti realizace napěťových konvektorů s použitím UVC

Typ	Vstup	Výstup	Propojit	Uzemnit
VCI+	Y_+	Z	$W - Z$	–
VCI–	Y_+	$\bar{Z}$	$W - Z$	–
VCI+/-	Y_+	$Z, \bar{Z}$	$W - Z$	–
VCII+	Y_+	Z	–	W
VCII–	Y_+	$\bar{Z}$	–	W
VCII+/-	Y_+	$Z, \bar{Z}$	–	W
VCIII+	Y_+	Z	$W - \bar{Z}$	–
VCIII–	Y_+	$\bar{Z}$	$W - \bar{Z}$	–
VCIII+/-	Y_+	$Z, \bar{Z}$	$W - \bar{Z}$	–
IVCI+	Y_-	Z	$W - Z$	–
IVCI–	Y_-	$\bar{Z}$	$W - Z$	–
IVCI+/-	Y_-	$Z, \bar{Z}$	$W - Z$	–
IVCII+	Y_-	Z	–	W
IVCII–	Y_-	$\bar{Z}$	–	W
IVCII+/-	Y_-	$Z, \bar{Z}$	–	W
IVCIII+	Y_-	Z	$W - \bar{Z}$	–
IVCIII–	Y_-	$\bar{Z}$	$W - \bar{Z}$	–
IVCIII+/-	Y_-	$Z, \bar{Z}$	$W - \bar{Z}$	–

V roce 1999 se objevil nový aktivní prvek CDBA [1], což je vlastně DCVC, který řadíme také do skupiny napěťových konvektorů. Na principu duality lze odvodit jeho protějšek v podobě DVCC [25].

3 NÁVRH KMITOČTOVÝCH FILTRŮ

V této kapitole se práce věnuje především metodice návrhu kmitočtových filtrů při zadaných podmínkách závislých na konkrétních požadavcích. Existuje mnoho způsobů návrhu založených na syntéze lineárních obvodů.

Jedna z možných metod je návrh pomocí grafů signálových toků. Tuto metodiku návrhu objevil a zveřejnil Mason v roce 1953, kterou pak publikoval v [18]. Později přispěl i svými grafy Coates [5]. V teorii elektrických obvodů se nejčastěji používá jejich kombinace tj. M-C (Masonovy-Coatesovy) grafy. Graf signálových toků se skládá z uzlů a větví. Každý uzel reprezentuje nějakou proměnnou a každá větev definuje vztah mezi těmito proměnnými. Tímto způsobem lze poměrně jednoduše znázornit a určit například přenosové funkce i dosti složitých obvodů.

Další často používanou metodou je návrh pomocí úplné admitanční sítě. Tato metoda vychází z teorie zobecněných autonomních obvodů, popsané již v [7], kde se po vytvoření úplné admitanční sítě postupně zjednodušuje obvod vypouštěním pasivních prvků, které nemají na činnost obvodu vliv. Výsledkem je mnohdy celá řada vhodných zapojení, u kterých z jejich charakteristické rovnice (determinant matice) lehce poznáme, zda s takovým obvodem bude možné realizovat některý z typů kmitočtového filtru a v tom případě i jeho řád.

Návrh a využití vhodných typů syntetických prvků je také často diskutovanou metodou při návrhu kmitočtových filtrů [19, 24, 27, 29]. Této problematice se věnuje diplomová práce, která si klade za cíl návrh takových syntetických prvků, které bude možné vhodně použít při realizaci říditelných kmitočtových filtrů vyšších řádů.

3.1 Syntetické prvky

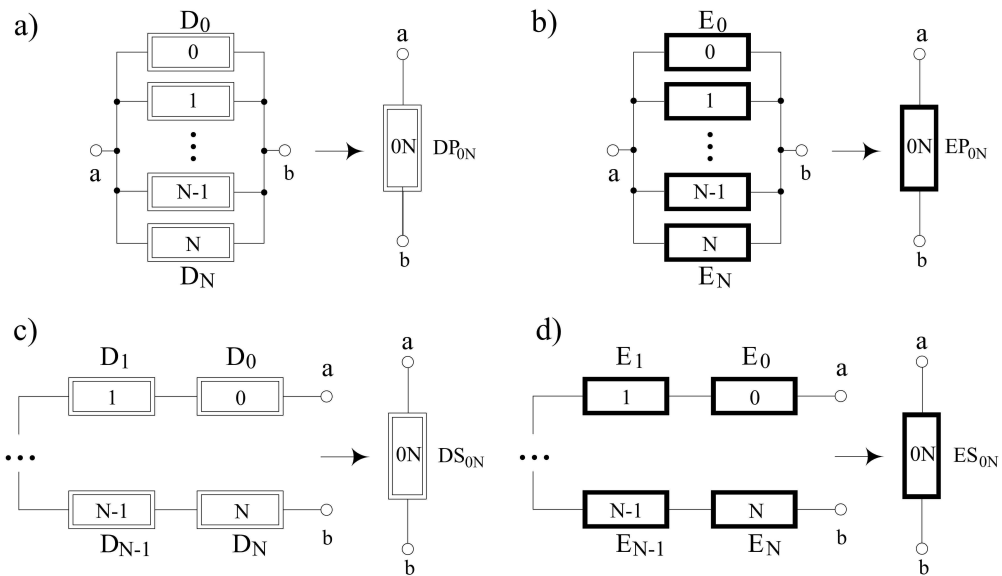
Z počátku se teorie syntetických prvků [4, 17, 8] využívala hlavně na náhradu induktorů. Ty, které jsou využívány pro zpracování nízkofrekvenčních signálů, jsou rozměrné, výrobně náročné a drahé. V dnešní době integrovaných obvodů (IO) je realizace stále problematická, a v takovém případě lze efektivně využít syntetické prvky.

Syntetický prvek lze popsat jako elementární dvojpól a to buď typu D nebo E [4]. Prvek typu D má vlastnosti obecného kapacitoru a představuje admitanci na rozdíl od prvku E , který se chová jako obecný induktor a představuje impedanci. Přehled elementárních dvojpólů typu D a E je uveden v tabulce 3.1.

Tab. 3.1: Přehled elementárních „dvojpolů“ [24]

Typ	Řád	Název	Imitance
D	0	konduktor	$Y(j\omega) = G$
E	0	rezistor	$Z(j\omega) = R$
D	1	kapacitor	$Y(j\omega) = j\omega C$
E	1	induktor	$Z(j\omega) = j\omega L$
D	2	„dvojný“ kapacitor	$Y(j\omega) = -\omega^2 D_2$
E	2	„dvojný“ induktor	$Z(j\omega) = -\omega^2 E_2$
D	n	obecný kapacitor	$Y(j\omega) = (j\omega)^{N_D} D_{N_D}$
E	n	obecný induktor	$Z(j\omega) = (j\omega)^{N_E} E_{N_E}$

Syntetické prvky vyšších řádů jsou tvořeny sériovým nebo paralelním zapojením elementárních dvojpolů typu D nebo E . Existují čtyři typy těchto struktur s imitancemi vyšších řádů, tj. DP , EP , DS a ES , které jsou znázorněny na obr. 3.1.

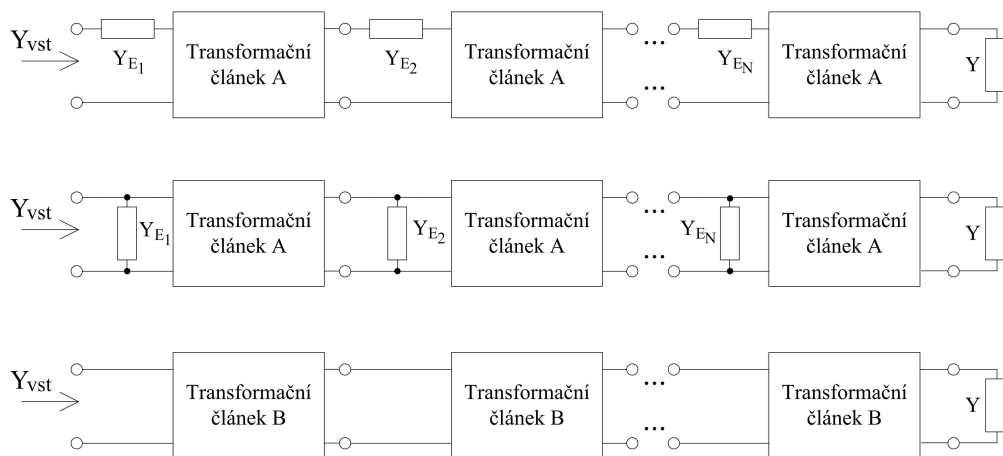


Obr. 3.1: Syntetické prvky vyšších řádů a) DP , b) EP , c) DS a d) ES

Aby bylo možné zkonstruovat stabilní kmitočtové filtry, je nutná v každém syntetickém prvku přítomnost elementárních dvojpolů typu D respektive E všech řádů od nejnižšího po nejvyšší [24].

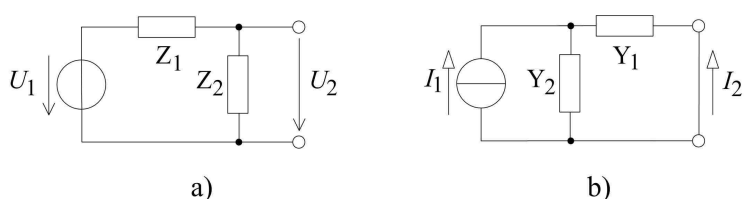
3.2 Transformační články

Při sestavování obvodu, metodou návrhu s použitím syntetických prvků, se využívá tzv. transformačních článků [24], kde každý navyšuje řád imitance dalšímu v pořadí (obr. 3.2).



Obr. 3.2: Možnosti zapojení syntetických prvků vyšších řádů

Při konkrétním návrhu zapojujeme transformační články a případně pasivní prvky na místo obecných imitančních prvků v obvodech jako jsou například kmitočtově závislý dělič napětí či dělič proudu na obr. 3.3 s přenosovými funkcemi (3.1) a (3.2).



Obr. 3.3: Obvodové zapojení a) děliče napětí, b) děliče proudu

$$K_U(p) = \frac{U_2}{U_1} = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}, \quad (3.1)$$

$$K_I(p) = \frac{I_2}{I_1} = -\frac{Y_2}{Y_1 + Y_2}. \quad (3.2)$$

3.3 Řízení parametrů kmitočtových filtrů

Často je požadována možnost změny některého ze základních parametrů filtru, mezi které patří činitel jakosti Q , zesílení K_0 a nebo charakteristický kmitočet ω_0 resp. f_0 . V případě návrhu filtrů vyššího řádu se omezujeme na změnu ω_0 . Zesílení K_0 lze potom měnit jednoduše přidáním vhodného členu (zesilovače) na vstup nebo výstup filtru. Přenosová funkce kmitočtového filtru druhého řádu (1.4) je speciální případ, kdy lze z jmenovatele přímo definovat charakteristický kmitočet f_0 resp. ω_0 a činitel jakosti Q . V případě kmitočtových filtrů vyšších řádů lze definovat z jmenovatele přenosové funkce pouze ω_0 . Zvláště u DP a HP je důležité měnit ω_0 . Právě tato možnost řízení mezního kmitočtu

výsledného kmitočtového filtru je pro praktické využití velice zajímavá a bude jí nadále věnována pozornost.

3.4 Předpoklady pro změnu mezního kmitočtu

Aby byl splněn požadavek na možnost řízení mezního kmitočtu výsledného kmitočtového filtru, je nutné stanovit řídicí koeficient a , který bude tuto změnu realizovat. Charakteristická rovnice D z přenosové funkce kmitočtového filtru např. druhého řádu (1.4) je

$$D = b_{22}p^2 + b_{21}p + b_{20}. \quad (3.3)$$

Determinant admitanční matice D filtru druhého řádu lze také zapsat ve tvaru

$$D = s^2c_{22} + sc_{21} + 1, \quad (3.4)$$

kde c_{22} a c_{21} jsou koeficienty nekaskádní syntézy podle [12] a $s = \frac{p}{\omega_0}$ je normovaný operátor. Jak bude následně dokázáno tvar charakteristické rovnice s řídicím koeficientem a musí být

$$D = b_{22}p^2a^2 + b_{21}pa + b_{20}, \quad (3.5a)$$

nebo

$$D = b_{22}p^2 + b_{21}pa + b_{20}a^2. \quad (3.5b)$$

Úpravou rovnic (3.5a) a (3.5b) do podoby (3.4) dostáváme

$$D = \frac{b_{22}p^2a^2}{b_{20}} + \frac{b_{21}pa}{b_{20}} + 1, \quad D = \frac{b_{22}p^2}{b_{20}a^2} + \frac{b_{21}p}{b_{20}a} + 1 \quad (3.6a,b)$$

a po nahrazení Laplaceova operátoru p normovaným operátorem s platí

$$D = \frac{b_{22}s^2\omega_0^2a^2}{b_{20}} + \frac{b_{21}s\omega_0a}{b_{20}} + 1, \quad D = \frac{b_{22}s^2\omega_0^2}{b_{20}a^2} + \frac{b_{21}s\omega_0}{b_{20}a} + 1. \quad (3.7a,b)$$

Srovnáním výrazů (3.7a) a (3.7b) s rovnicí (3.4) pro jednotlivé mocniny operátoru s dostáváme

$$\frac{c_{22}b_{20}}{b_{22}} = \omega_0^2 a^2 \text{ a } \frac{c_{21}b_{20}}{b_{21}} = \omega_0 a, \quad (3.8a,b)$$

$$\frac{c_{22}b_{20}}{b_{22}} = \frac{\omega_0^2}{a^2} \text{ a } \frac{c_{21}b_{20}}{b_{21}} = \frac{\omega_0}{a}. \quad (3.9a,b)$$

Při pohledu na tyto čtyři rovnice zjistíme, že jejich levé strany jsou konstantní a proto je z pravých stran těchto rovnic jasně definována závislost mezi charakteristickým kmitočtem f_0 a řídicím koeficientem a . Obecně tedy platí, že charakteristická rovnice D z obecné přenosové funkce kmitočtového filtru (1.3) musí vypadat jako

$$D = a^n b_{nn} p^n + a^{n-1} b_{n(n-1)} p^{n-1} + \dots + a^2 b_{n2} p^2 + a b_{n1} p + b_{n0}, \quad (3.10a)$$

nebo

$$D = b_{nn} p^n + a b_{n(n-1)} p^{n-1} + \dots + a^{n-2} b_{n2} p^2 + a^{n-1} b_{n1} p + a^n b_{n0}, \quad (3.10b)$$

kde b_{nn} zastupuje soustavu pasivních prvků, a reprezentuje řídicí koeficient, jak již bylo zmíněno výše, jehož změnou docílíme řízení mezního kmitočtu filtru, což bude prezentováno později v kapitole 3.8.1 a kapitole 4. Na základě požadavků na transformační články [17] zde jsou popsány nutné tvary vstupních imitancí takových transformačních článků, které při následném návrhu kmitočtových filtrů dovolí změnu mezního kmitočtu. V případě návrhu transformačního článku typu A je nutné, aby vstupní admitance tohoto článku byla ve tvaru

$$Y_A = \frac{Y_K Y_L}{a Y_M}. \quad (3.11)$$

Navýšení řádu tohoto syntetického dvojpólu se docílí nahrazením admitance Y_K nebo Y_L transformačním článkem se vstupní admitancí (3.11). Pro realizaci transformačního článku typu B je v případě návrhu syntetických prvků DP a EP vstupní admitance rovna

$$Y_B = \frac{Y_K Y_L}{a Y_M} + Y_K. \quad (3.12)$$

Navýšení řádu syntetického dvojpólu dosáhneme opakovanou náhradou admitance Y_L transformačním článkem se vstupní admitancí dle (3.12). V případě realizace syntetických prvků DS a ES musí být vstupní admitance transformačního článku B rovna

$$Y_B = \frac{Y_K Y_L}{a Y_M + Y_L}. \quad (3.13)$$

Zde se nahrazuje admitance Y_M pomocí vstupní admitance (3.12) a nebo admitance Y_L pomocí vstupní admitance (3.13).

Při splnění výše uvedených podmínek lze navrhnout kmitočtové filtry vyšších řádů s použitím syntetických prvků a s možností řízení mezního kmitočtu těchto filtrů.

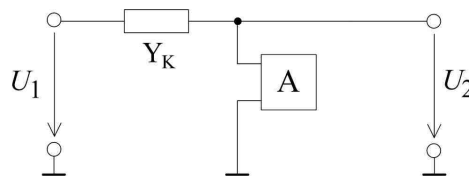
3.5 Filozofie při návrhu DP a EP

Vychází se z poznatků uvedených v kapitole 3.4, které jsou shrnuty v tabulce 3.2. Vstupní admitance obou transformačních článků tedy formálně odpovídají (3.11) respektive (3.12).

Tab. 3.2: Zákonitosti při návrhu DP a EP

Transformační článek	Vstupní admitance	Náhrada
A	$Y_A = \frac{Y_1 Y_2}{a Y_3}$	Y_1
B	$Y_B = \frac{Y_{11} Y_{21}}{a Y_{31}} + Y_{11}$	Y_{21}

Transformační články typu A a B zapojujeme do děličů napětí nebo proudu uvedených v kap. 3.2. První část z celého obecného návrhu je uvedena na obr. 3.4.

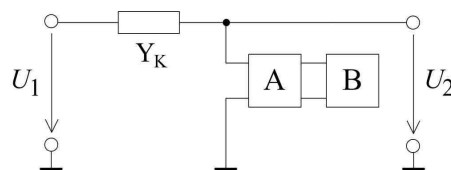


Obr. 3.4: První krok navýšení řádu

Napěťový přenos tohoto obvodu je

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{a Y_2 Y_K}{Y_1 Y_3 + a Y_2 Y_K}. \quad (3.14)$$

Jako další krok v návrhu je navýšení řádu přidáním transformačního článku B jak je vidět na obr. 3.5.



Obr. 3.5: Druhý krok navýšení řádu

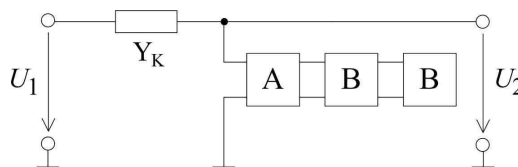
Vstupní admitance zapojení transformačních článků A a B v napěťovém děliči tzn. náhrada admitance Y_1 transformačního článku A vstupní admitancí transformačního článku B, je rovna

$$Y_{AB} = \frac{a^2 Y_2 Y_3 Y_K + a Y_1 Y_3 Y_4 + Y_1 Y_4 Y_5}{a Y_1 Y_3 Y_4 Y_K}, \quad (3.15)$$

a proto přenosová funkce obvodu z obr. 3.5 je

$$K_U = \frac{a^2 Y_2 Y_3 Y_K}{Y_1 Y_4 Y_5 + a Y_1 Y_3 Y_4 + a^2 Y_2 Y_3 Y_K}. \quad (3.16)$$

Následným přidáním dalšího transformačního článku B je zapojení na obr. 3.6 a přenosová funkce tohoto obvodu (3.17).



Obr. 3.6: Třetí krok navýšení řádu

$$K_U = \frac{a^3 Y_2 Y_3 Y_5 Y_K}{Y_1 Y_4 Y_6 Y_7 + a Y_1 Y_4 Y_5 Y_6 + a^2 Y_1 Y_3 Y_4 Y_5 + a^3 Y_2 Y_3 Y_5 Y_K}. \quad (3.17)$$

Takto lze s nahrazováním pokračovat a tím navyšovat výsledný řád filtru. Je vidět, že charakteristická rovnice formálně odpovídá (3.10). Podoba této přenosové funkce (3.17) je vhodná pro návrh kmitočtového filtru typu dolní i horní propust (závisí na konkrétní volbě pasivních prvků).

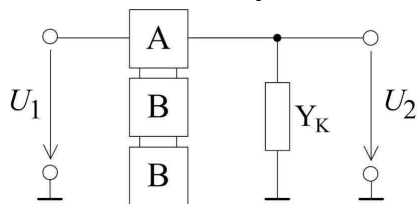
3.6 Filozofie při návrhu DS a ES

Vychází se opět z předpokladů uvedených v kap. 3.4 a shrnutých v tab. 3.3. Rovnice odpovídají obecným vstupním admitancím (3.11) resp. (3.13).

Tab. 3.3: Zákonitosti při návrhu DS a ES

Transformační článek	Vstupní admitance	Náhrada
A	$Y_A = \frac{Y_1 Y_2}{a Y_3}$	Y_1
B	$Y_B = \frac{Y_{11} Y_{21}}{a Y_{31} + Y_{21}}$	Y_{21}

Postup při návrhu je velice podobný jako v případě DP a EP a proto zde nebude popisován do podrobností. Na obr. 3.7 je vidět třetí fáze navyšování řádu syntetického prvku (ABB).



Obr. 3.7: Třetí fáze navyšování řádu

Výsledná přenosová funkce obvodu se třemi použitými transformačními články (obr. 3.7) je

$$K_U = \frac{Y_1 Y_3 Y_5 Y_7}{Y_1 Y_3 Y_5 Y_7 + a Y_2 Y_5 Y_7 Y_K + a^2 Y_2 Y_4 Y_7 Y_K + a^3 Y_2 Y_4 Y_6 Y_K}. \quad (3.18)$$

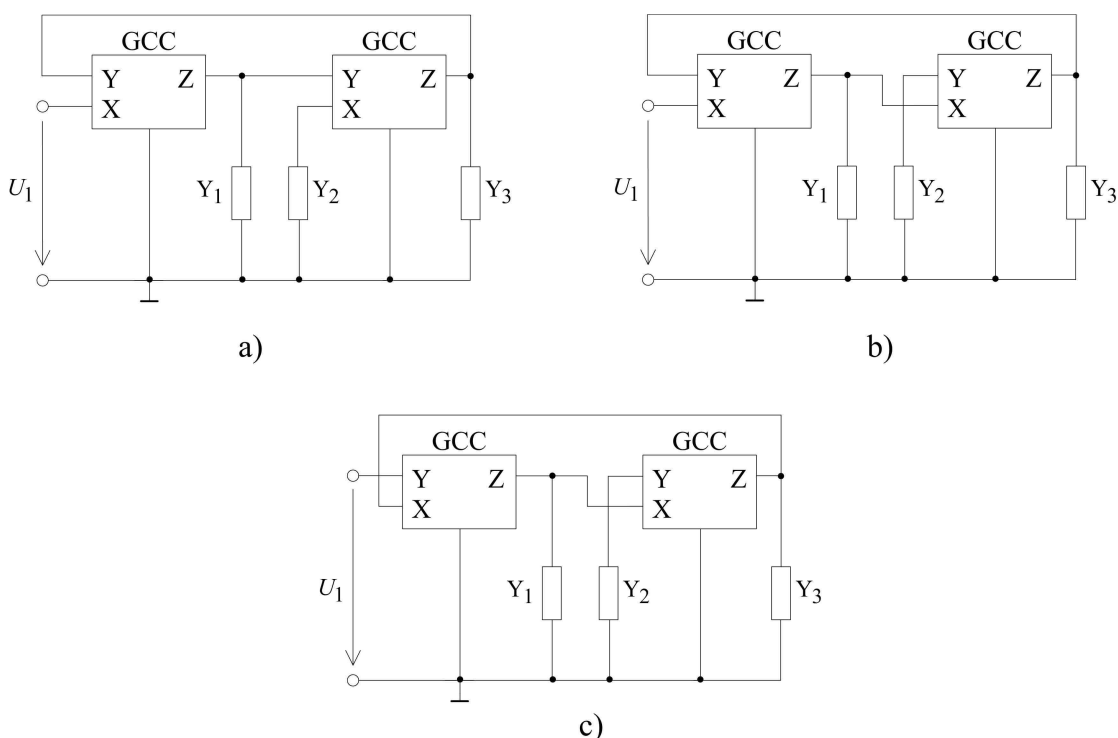
Při důkladnější analýze této rovnice lze zjistit, že struktura je vhodná pro kmitočtové filtry typu dolní a horní propust. Charakteristická rovnice odpovídá (3.10) tzn. umožňuje změnu f_m . Dle naznačeného způsobu lze kaskádně zapojovat další transformační články vhodného typu a tak realizovat filtry vyšších řádů.

4 VLASTNÍ NÁVRH OBVODOVÝCH STRUKTUR

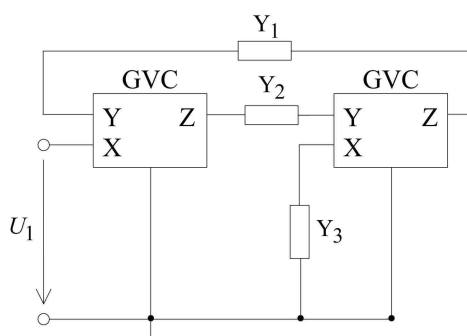
Kapitola se zabývá návrhem obvodových struktur s využitím poznatků z předešlé kapitoly ohledně změny mezního kmitočtu a problematiky syntetických prvků.

4.1 Struktury transformačních článků

Využitím teoretických poznatků popsaných v kap. 3.4 a 3.5 byly navrženy vhodné struktury transformačních článků (Obr. 4.1).



Obr. 4.1: Transformační články s GCC a) obvod č.1, b) obvod č.2, c) obvod č.3



Obr. 4.2: Transformační článek s GVC

Obvody z tab. 4.1 obsahují tři pasivní prvky a dva aktivní v podobě proudových a napěťových konvektorů. Z důvodu vyššího počtu nízkoimpedančních bran u napěťového konvektoru než je tomu u proudového konvektoru vzniká ve strukturách s napěťovými

konvejory větší množství plovoucích pasivních prvků, což způsobuje i obtížnější návrh těchto struktur.

Zapojení transformačních článků s proudovými konvejory je vhodné využít pro realizaci syntetických prvků typu DP a EP a v případě transformačního článku s napěťovými konvejory k realizaci syntetických prvků typu DS a ES. Problematiku vhodné volby přenosových koeficientů použitých aktivních prvků jsem již uváděl v [20].

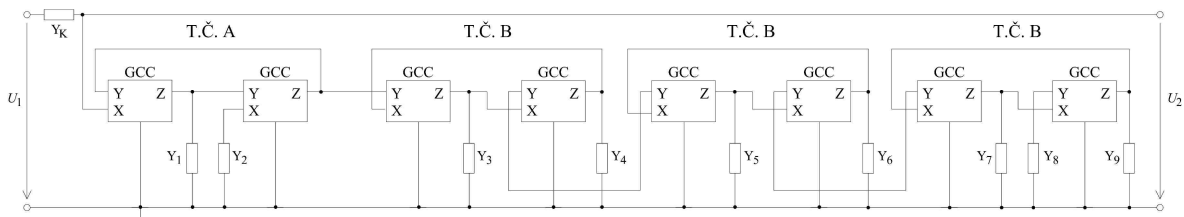
Tab. 4.1: Navržené struktury transformačních článků

č.	Schéma zapojení	Transformační článek	Vstupní admitance	Změna f_m	Přenosové koef. konvejořů
1	Obr. 4.1a	A	$Y_{VST} = \frac{Y_1 Y_3}{a_1 Y_2}$	a_1	$a_2 = -1, b_1 = b_2 = 0$ $c_1 = c_2 = 1.$
2	Obr. 4.1b	B	$Y_{VST} = \frac{a_2 Y_1 Y_3 + Y_2 Y_3}{a_2 Y_1}$	a_2	$a_1 = b_2 = -1,$ $b_1 = c_1 = c_2 = 1.$
3	Obr. 4.1c	B	$Y_{VST} = \frac{a_2 Y_1 Y_3 + Y_2 Y_3}{a_2 Y_1}$	a_2	$a_1 = c_1 = c_2 = 1,$ $b_1 = b_2 = -1.$
4	Obr. 4.2	B	$Y_{VST} = \frac{a_2 Y_1 Y_3 + Y_2 Y_3}{a_2 Y_1}$	b_2, c_2	$a_1 = a_2 = -1,$ $b_1 = c_1 = 1.$

Na první pohled by se mohlo zdát, že je obtížné a možná i zbytečné realizovat změnu mezní frekvence kmitočtového filtru pomocí dvou přenosových koeficientů napěťového konvejořu. Dá se ale využít skutečnosti, že se oba zmíněné koeficienty nachází fyzicky v jednom aktivním prvku a tedy k realizaci postačuje jeden zesilovač zapojený na výstupní svorku Z a jeho výstup přivedený na napěťový vstup W.

4.2 Návrh kmitočtového filtru 4. řádu s proudovými konvejory

K samotnému návrhu kmitočtového filtru 4. řádu s proudovými konvejory byl vybrán transformační článek č. 3 jako typ B a transformační článek č. 1 jako typ A. Zapojení obvodu, skládajícího se pouze z aktivních prvků v podobě proudových konvejořů, principiálně odpovídá postupu při návrhu syntetických prvků DP EP. První proudový konvejoř v transformačním článku A je typu CCII+ a druhý ICCII+. Řídícím koeficientem je $a_1 = a$. V případě transformačního článku B jsou oba použité kovejory typu CCIII+ s řídícím koeficientem $a_2 = a$. Kompletní zapojení celé soustavy kmitočtového filtru čtvrtého řádu je nakresleno na obrázku 4.3.



Obr. 4.3: Obecný kmitočtový filtr čtvrtého řádu s GCC

Jak již bylo řečeno v kap. 3.5, tato struktura se při vhodné volbě pasivních prvků chová jako dolní nebo horní propust. Obecná přenosová funkce obvodu na obr. 4.3 je (4.1). Charakteristická rovnice odpovídá formálně (3.10).

$$K_U = \frac{a^4 Y_2 Y_3 Y_5 Y_7 Y_K}{Y_1 Y_4 Y_6 Y_8 Y_9 + a Y_1 Y_4 Y_6 Y_7 Y_9 + a^2 Y_1 Y_4 Y_5 Y_6 Y_7 + a^3 Y_1 Y_3 Y_4 Y_5 Y_7 + a^4 Y_2 Y_3 Y_5 Y_7 Y_K} \cdot \quad (4.1)$$

4.2.1 Numerický návrh dolní a horní propusti

Vhodným nahrazením obecných admitancí v rovnici (4.1) se dostane přenosová funkce pro dolní (4.2a) a horní (4.2b) propust.

$$K_{U_DP} = \frac{G_2 G_3 G_5 G_7 G_K a^4}{CE_{DP}(p)}, \quad K_{U_HP} = \frac{p^4 G_K C_1 C_2 C_3 C_4 a^4}{CE_{HP}(p)}, \quad (4.2a,b)$$

kde

$$CE_{DP}(p) = p^4 C_1 C_2 C_3 C_4 G_1 + a p^3 C_1 C_2 C_4 G_1 G_7 + a^2 p^2 C_1 C_2 G_1 G_5 G_7 + a^3 p C_1 G_1 G_3 G_5 G_7 + a^4 G_2 G_3 G_5 G_7 G_K, \quad (4.3)$$

$$CE_{HP}(p) = G_1 G_2 G_3 G_4 G_5 + a p C_4 G_1 G_2 G_3 G_5 + a^2 p^2 C_3 C_4 G_1 G_2 G_3 + a^3 p^3 C_2 C_3 C_4 G_1 G_2 + a^4 p^4 C_1 C_2 C_3 C_4 G_K \quad (4.4)$$

jsou charakteristické rovnice obou obvodů. Tyto výrazy lze zapsat také jako

$$CE(p) = s^4 c_{44} + s^3 c_{43} + s^2 c_{42} + s c_{41} + 1 = 0. \quad (4.5)$$

Porovnáním charakteristických rovnic navrhovaných propustí a výrazu (4.5) lze numericky určit hodnoty všech pasivních prvků. Je použita Butterworthova aproximace, pro kterou platí $c_{41} = 2,6131$, $c_{42} = 3,4142$, $c_{43} = 2,6131$ a $c_{44} = 1$ [11]. Pro dolní propust se odpory volí $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$ a $R_2 = R_3 = R_5 = R_7 = R_K = 4,7 \text{ k}\Omega$. Pro horní propust $R_1 = R_2 = 1,2 \text{ k}\Omega$,

$R_3 = 1 \text{ k}\Omega$, $R_4 = 4,7 \text{ k}\Omega$, $R_5 = 1,5 \text{ k}\Omega$ a $R_K = 4,7 \text{ k}\Omega$. Všechny hodnoty kapacit jsou voleny z řady E6 a hodnoty uváděných odporů z řady E12 a byly vypočteny pro dolní propust jako

$$C_1 = \frac{c_{41} R_1}{R_2 R_K} \cdot K = 2,2 \text{ nF}, \quad (4.6a)$$

$$C_2 = \frac{c_{42} R_1}{C_1 R_2 R_3 R_K} \cdot K^2 = 4,7 \text{ nF}, \quad (4.6b)$$

$$C_3 = \frac{c_{44} R_1}{C_1 C_2 C_4 R_2 R_3 R_5 R_7 R_K} \cdot K^4 = 1,5 \text{ nF}, \quad (4.6c)$$

$$C_4 = \frac{c_{43} R_1}{C_1 C_2 R_2 R_3 R_5 R_K} \cdot K^3 = 2,2 \text{ nF} \quad (4.6d)$$

a pro horní propust

$$C_1 = \frac{c_{44} R_4}{K^4 C_2 C_3 C_4 R_1 R_2 R_3 R_4 R_5} = 2,2 \text{ nF}, \quad (4.7a)$$

$$C_2 = \frac{c_{43}}{K^3 C_3 C_4 R_3 R_4 R_5} = 1 \text{ nF}, \quad (4.7b)$$

$$C_3 = \frac{c_{42}}{K^2 C_4 R_4 R_5} = 1,5 \text{ nF}, \quad (4.7c)$$

$$C_4 = \frac{c_{41}}{K R_4} = 1 \text{ nF}. \quad (4.7d)$$

Koeficient K z předchozích rovnic je konstantní a v případě dolní propusti pro něj platí

$$K = a/\omega_0 = a/2\pi f_0 \quad (4.8)$$

a v případě propusti horní

$$K = a\omega_0 = a2\pi f_0. \quad (4.9)$$

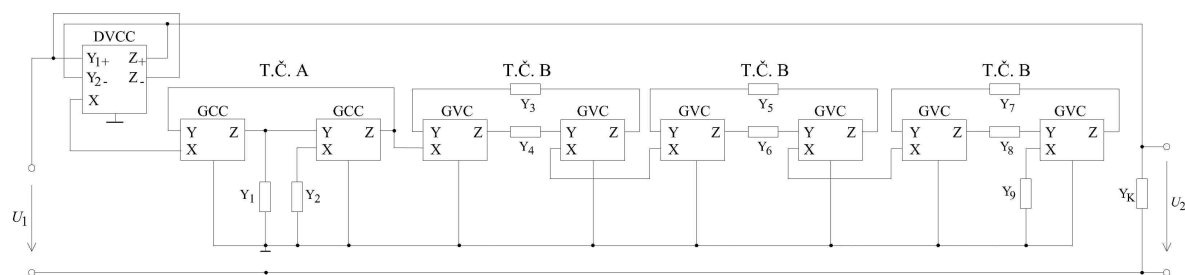
Konstanta K vyjadřuje vztah mezi řídicím koeficientem a a charakteristickým kmitočtem f_0 navrhovaného kmitočtového filtru jak je vidět z tabulky 4.2.

Tab. 4.2: Závislost charakteristického kmitočtu na řídicím koeficientu a

Dolní propust			Horní propust		
$a[-]$	$f_0[\text{kHz}]$	$K[\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}]$	$a[-]$	$f_0[\text{kHz}]$	$K[\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}]$
100	1000	$1,59 \cdot 10^{-5}$	0,1	1000	628318,5307
10	100		1	100	
1	10		10	10	
0,1	1		100	1	

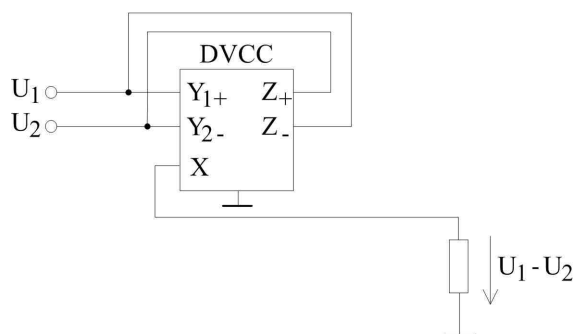
4.3 Návrh kmitočtového filtru 4. řádu s proudovými a napět'ovými konvejory

Pro návrh kmitočtového filtru 4. řádu s proudovými i napět'ovými konvejory byl využit transformační článek č.1 jako typ A a také transformační článek č. 4 jako typ B. Princip návrhu filtru odpovídá filozofii návrhu syntetických prvků DS a ES z kap. 3.6. Transformační článek využívá konvejory CCII+ a ICCII+. Pro řídicí koeficient platí $a_1 = a$. Transformační článek B obsahuje pouze konvejory typu IVCI+ a řídicími koeficienty jsou $b_2 = c_2 = a$. Kompletní zapojení kmitočtového filtru s proudovými a napět'ovými konvejory je na obr. 4.4.



Obr. 4.4: Obecný kmitočtový filtr čtvrtého řádu s GCC a GVC

Struktura kmitočtového filtru čtvrtého řádu s GCC a GVC z obrázku 4.4 se při vhodné volbě pasivních prvků chová jako dolní nebo horní propust. Protože se jedná DS ES syntetické prvky, je potřeba zapojit jednotlivé transformační články jako plovoucí. K tomu je vhodné použít zapojení s DVCC (lze jednoduše vytvořit z UCC) na obr. 4.5.



Obr. 4.5: Transformace uzemněné imitance na plovoucí pomocí DVCC

Obecná přenosová funkce obvodu z obr. 4.5 je

$$K_U = \frac{Y_1 Y_3 Y_5 Y_7 Y_9}{Y_1 Y_3 Y_5 Y_7 Y_9 + a Y_2 Y_5 Y_7 Y_9 Y_K + a^2 Y_2 Y_4 Y_7 Y_9 Y_K + a^3 Y_2 Y_4 Y_6 Y_9 Y_K + a^4 Y_2 Y_4 Y_6 Y_8 Y_K} \cdot \quad (4.10)$$

4.3.1 Numerický návrh dolní a horní propusti

Nahrazení admitancí v rovnici 4.10 vhodnými pasivními prvky se získá přenosová funkce pro dolní a horní propust.

$$K_{U_DP} = \frac{G_1 G_3 G_5 G_7 G_9}{CE_{DP}(p)}, \quad K_{U_HP} = \frac{p^4 G_3 C_5 C_7 C_9 G_1}{CE_{HP}(p)}, \quad (4.11a,b)$$

kde $CE_{DP}(p)$ a $CE_{HP}(p)$ jsou charakteristické rovnice obou obvodů.

$$CE_{DP}(p) = p^4 C_2 C_4 C_6 C_8 G_K a^4 + p^3 C_2 C_4 C_6 G_9 G_K a^3 + \\ + p^2 C_2 C_4 G_7 G_9 G_K a^2 + p C_2 G_5 G_7 G_9 G_K a + G_1 G_3 G_5 G_7 G_9. \quad (4.12)$$

$$CE_{HP}(p) = G_2 G_4 G_6 G_8 G_K a^4 + p C_9 G_2 G_4 G_6 G_K a^3 + \\ + p^2 C_7 C_9 G_2 G_4 G_K a^2 + p^3 C_5 C_7 C_9 G_2 G_K a + p^4 C_3 C_5 C_7 C_9 G_1. \quad (4.13)$$

Tyto výrazy odpovídají formálně vztahu 3.10 a srovnáním těchto rovnic lze numericky určit hodnoty pasivních prvků použitých v analyzovaném filtru. Je zvolena Butterworthova aproximace stejně jako u předchozího obvodu. Odpory pro dolní propust jsou voleny $R_1 = R_3 = 1 \text{ k}\Omega$, $R_K = 5100 \Omega$, $R_5 = 1300 \Omega$, $R_7 = 2700 \Omega$ a $R_9 = 1800 \Omega$ a pro horní propust $R_2 = R_4 = R_6 = R_8 = R_K = 4,7 \text{ k}\Omega$ a $R_1 = 1500 \Omega$. Hodnoty odporů jsou voleny z řady E12 a E24. Následně jsou dopočítány hodnoty kondenzátorů (řada E6) a to pro dolní propust

$$C_2 = \frac{c_{41} R_K}{R_1 R_3 K} = 22 \text{ nF}, \quad (4.14a)$$

$$C_4 = \frac{c_{42} R_K}{C_2 R_1 R_3 R_5 K^2} = 1,5 \text{ nF}, \quad (4.14b)$$

$$C_6 = \frac{c_{43} R_K}{C_2 C_4 R_1 R_3 R_5 R_7 K^3} = 470 \text{ pF}, \quad (4.14c)$$

$$C_8 = \frac{c_{44} R_K}{C_2 C_4 C_6 R_1 R_3 R_5 R_7 R_9 K^4} = 330 \text{ pF} \quad (4.14d)$$

a pro horní propust

$$C_9 = \frac{c_{41} K}{R_8} = 10 \text{ nF}. \quad (4.15a)$$

$$C_7 = \frac{c_{42} K^2}{C_9 R_6 R_8} = 4,7 \text{ nF}, \quad (4.15b)$$

$$C_5 = \frac{c_{43} K^3}{C_7 C_9 R_4 R_6 R_8} = 2,2 \text{ nF}, \quad (4.15c)$$

$$C_3 = \frac{c_{44} R_1 K^4}{C_5 C_7 C_9 R_2 R_4 R_6 R_8 R_K} = 470 \text{ pF}. \quad (4.15d)$$

Konstanta K opět vyjadřuje vztah mezi řídicím koeficientem a a charakteristickým kmitočtem f_0 navrhovaného kmitočtového filtru a to způsobem uvedeným v tabulce 4.3

Tab. 4.3: Závislost charakteristického kmitočtu na řídicím koeficientu a

Dolní propust			Horní propust		
$a[-]$	$f_0[\text{kHz}]$	$K[\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}]$	$a[-]$	$f_0[\text{kHz}]$	$K[\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}]$
1	100	628318,5307	10	100	$1,59 \cdot 10^{-5}$
3,33	30		30	300	
10	10		100	1000	

4.4 Obvod s proudovými konvejory se změnou f_m pomocí pasivních prvků

Kapitola pojednává o kmitočtovém filtru 4. řádu s proudovými konvejory navrženém v kap. 4.2 s tím rozdílem, že změna mezního kmitočtu filtru již nebude realizována pomocí změny přenosových koeficientů dílčích aktivních prvků, ale za pomoci pasivních prvků zapojených ve struktuře obvodu.

Jak již bylo zmíněno výše, v této kapitole se tedy změna mezního kmitočtu pomocí pasivních prvků aplikuje na obvod kmitočtového filtru 4. řádu s proudovými konvejory navrženém v kap. 4.2. Vychází se tedy ze zapojení filtru 4. řádu z obr. 4.3. Přenosová funkce obvodu ještě s uvedeným řídicím koeficientem v podobě přenosových koeficientů aktivních prvků je

$$K_U = \frac{a^4 Y_2 Y_3 Y_5 Y_7 Y_K}{Y_1 Y_4 Y_6 Y_8 Y_9 + a Y_1 Y_4 Y_6 Y_7 Y_9 + a^2 Y_1 Y_4 Y_5 Y_6 Y_7 + a^3 Y_1 Y_3 Y_4 Y_5 Y_7 + a^4 Y_2 Y_3 Y_5 Y_7 Y_K}. \quad (4.16)$$

V našem případě ale uvažujeme řídicí koeficient reprezentovaný pasivními prvky a rovnice tedy nabývá tvaru

$$K_U = \frac{Y_2 Y_3 Y_5 Y_7 Y_K}{Y_1 Y_4 Y_6 Y_8 Y_9 + Y_1 Y_4 Y_6 Y_7 Y_9 + Y_1 Y_4 Y_5 Y_6 Y_7 + Y_1 Y_3 Y_4 Y_5 Y_7 + Y_2 Y_3 Y_5 Y_7 Y_K}, \quad (4.17)$$

kde jsou řídicím koeficientem admitance Y_2 , Y_3 , Y_5 a Y_7 , přičemž rovnice stále formálně odpovídá obecné přenosové funkci 4.16.

4.4.1 Numerický návrh dolní propusti

Nadále je uvažován pouze návrh dolní propusti. V případě horní propusti by byl postup návrhu obdobný. Po volbě pasivních prvků dostáváme přenosovou funkci

$$K_{U_DP} = \frac{G_2 G_3 G_5 G_7 G_K}{CE_{DP}(p)}, \quad (4.18)$$

kde

$$CE_{DP}(p) = p^4 C_1 C_2 C_3 C_4 G_1 + p^3 C_1 C_2 C_4 G_1 G_7 + p^2 C_1 C_2 G_1 G_5 G_7 + p C_1 G_1 G_3 G_5 G_7 + G_2 G_3 G_5 G_7 G_K \quad (4.19)$$

je charakteristická rovnice obvodu. Jak již bylo zmíněno výše, pro vodivosti platí $G_2 = G_3 = G_5 = G_7 = G$ [Siemens]. Po srovnání charakteristické rovnice dolní propusti s výrazem 4.5 lze numericky určit hodnoty pasivních prvků použitých v analyzovaném obvodu. Je zvolena Butterworthova aproximace a hodnoty rezistorů $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$ a $R_K = 4700 \Omega$. Zbylé hodnoty pasivních prvků jsou dopočítané dle

$$C_1 = \frac{c_{41} R_1}{R_K} \cdot K = 1,5 \text{ nF}, \quad (4.20a)$$

$$C_2 = \frac{c_{42} R_1}{C_1 R_K} \cdot K^2 = 3,3 \text{ nF}, \quad (4.20b)$$

$$C_3 = \frac{c_{44} R_1}{C_1 C_2 C_4 R_K} \cdot K^4 = 1 \text{ nF}, \quad (4.20c)$$

$$C_4 = \frac{c_{43} R_1}{C_1 C_2 R_K} \cdot K^3 = 2,2 \text{ nF} \quad (4.20d)$$

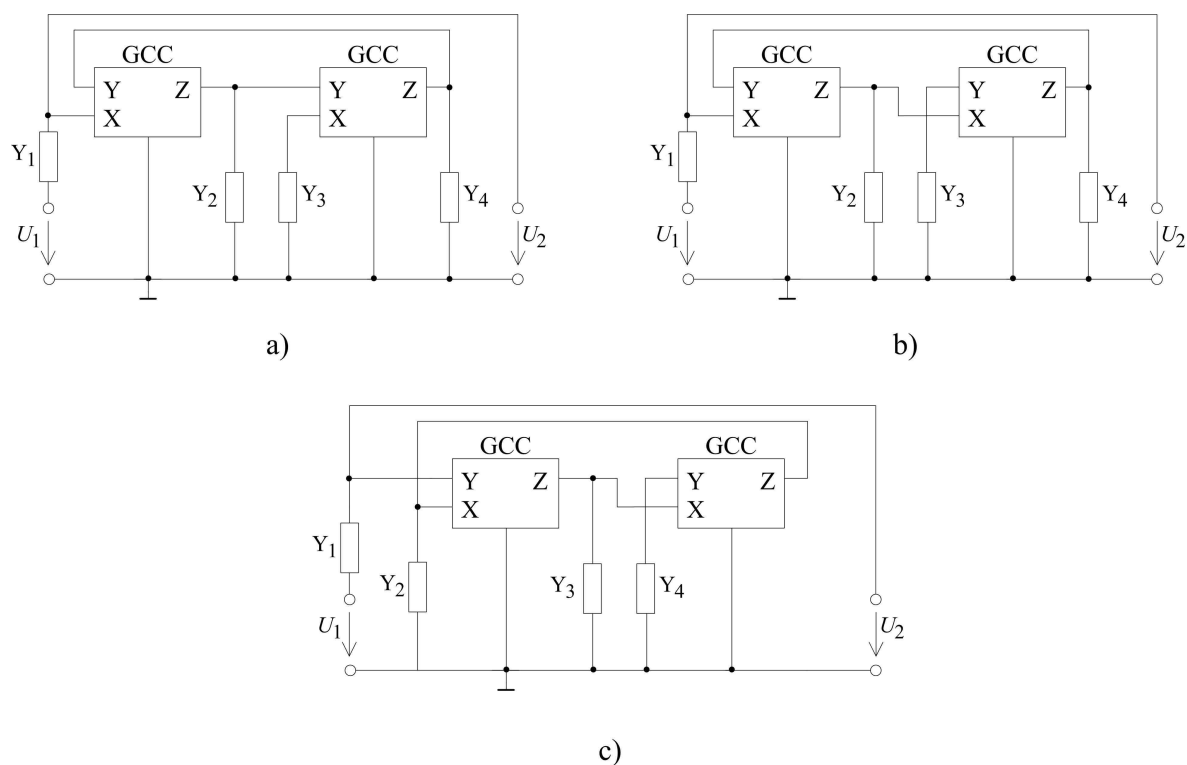
kde $c_{41} = 2,6131$, $c_{42} = 3,4142$, $c_{43} = 2,6131$, $c_{44} = 1$ a $K = G/\omega_0 = G/2\pi f_0$. Konstanta K vyjadřuje vztah mezi řídicí admitancí G [Siemens] a charakteristickým kmitočtem f_0 navrhovaného kmitočtového filtru a to způsobem uvedeným v tabulce 4.4.

Tab. 4.4: Závislost charakteristického kmitočtu na řídicím koeficientu G [S]

G [S]	f_0 [kHz]	K [rad · s ⁻¹]
$\frac{1}{4700}$	10	$3,38628 \cdot 10^{-9}$
$\frac{1}{1500}$	30	
$\frac{1}{470}$	100	

4.5 Tři zapojení se změnou fm pomocí pasivních prvků

Zapojení všech tří obvodů, skládajících se pouze z aktivních prvků v podobě proudových konvektorů, principiálně odpovídá syntetickým prvkům typu DP EP. Syntetické prvky v obvodech reprezentují kapacitor a dvojný kapacitor dle tab. 3.1. Všechny tři zapojení jsou znázorněny na obr. 4.6. Jedná se o kmitočtové filtry 2. řádu pracující jako dolní propust.



Obr. 4.6: Tři obvody – zapojení a) č.1, b) č.2, c) č.3

Odpovídající obecné přenosové funkce všech tří zapojení jsou

$$K_{U_{-1}} = \frac{Y_1 Y_3}{Y_1 Y_3 + Y_3 Y_4 + Y_2 Y_4}, \quad (4.21a)$$

$$K_{U_{-2}} = \frac{Y_1 Y_2}{Y_1 Y_2 + Y_2 Y_4 + Y_3 Y_4}, \quad (4.21b)$$

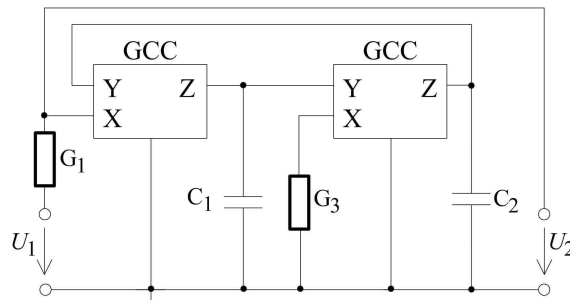
$$K_{U_{-3}} = \frac{Y_1 Y_3}{Y_1 Y_3 + Y_2 Y_3 + Y_2 Y_4}. \quad (4.21c)$$

4.5.1 Návrh zapojení č.1

Vychází se z obvodu č.1 znázorněného na obr. 4.6a s obecnou přenosovou funkcí 4.21a. Při konkrétní volbě pasivních prvků dostáváme zapojení na obr. 4.7 pracující jako dolní propust s přenosovou funkcí

$$K_{U_1} = \frac{G_1 G_3}{p^2 C_1 C_2 + p C_2 G_3 + G_1 G_3} . \quad (4.22)$$

kde pro vodivosti G_1 a G_3 platí $G_1 = G_3 = G$. Koeficientem G měníme mezní frekvenci kmitočtového filtru.



Obr. 4.7: Zapojení č.1

První proudový konvektor je typu CCII+ a druhý ICCI-. Je použita Butterworthova aproximace a pro hodnoty pasivních prvků platí

$$C_1 = c_{22} \frac{K^2}{C_2} = 2,2 \text{ nF} , \quad (4.23a)$$

$$C_2 = c_{21} K = 4,7 \text{ nF} , \quad (4.23b)$$

kde $K = G/\omega_0 = G/2\pi f_0$, $c_{21} = 1,4141$ a $c_{22} = 1$. Mezní kmitočet filtru je nastavován pomocí G podle tab. 4.5.

Tab. 4.5: Realizace změny mezního kmitočtu

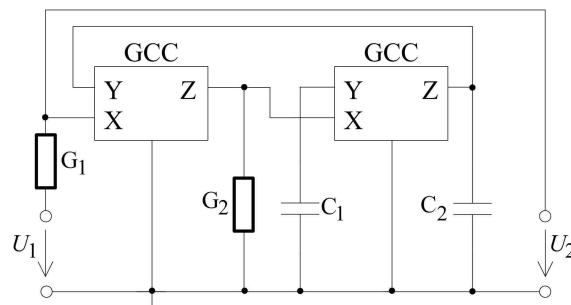
$G[\text{S}]$	$f_0[\text{kHz}]$	$K[\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}]$
$\frac{1}{4700}$	10	$3,38628 \cdot 10^{-9}$
$\frac{1}{1500}$	30	
$\frac{1}{470}$	100	

4.5.2 Návrh zapojení č.2

Jedná se o obvod č.2 znázorněný na obr. 4.6b s obecnou přenosovou funkcí 4.21b. Při konkrétní volbě pasivních prvků dostáváme kmitočtový filtr 2. řádu (obr. 4.8) pracující jako dolní propust s přenosovou funkcí

$$K_{U,2} = \frac{G_1 G_2}{p^2 C_1 C_2 + p C_2 G_2 + G_1 G_2} . \quad (4.24)$$

kde pro vodivosti G_1 a G_2 platí $G_1 = G_2 = G$. Koeficientem G měníme mezní frekvenci kmitočtového filtru.



Obr. 4.8: Zapojení č.2

První proudový konvektor je typu CCIII- a druhý CCIII+. Je použita Butterworthova aproximace a pro hodnoty pasivních prvků platí

$$C_1 = c_{22} \frac{K^2}{C_2} = 2,2 \text{ nF} , \quad (4.25a)$$

$$C_2 = c_{21} K = 4,7 \text{ nF} , \quad (4.25b)$$

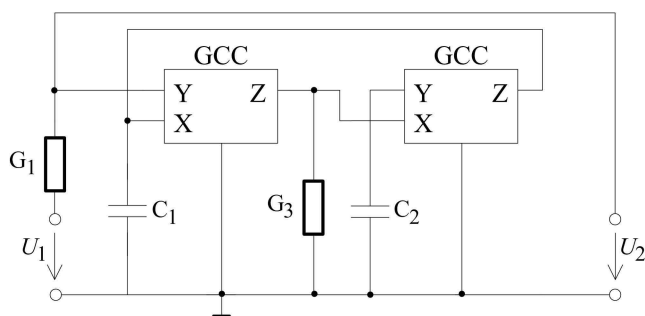
kde $K = G/\omega_0 = G/2\pi f_0$. Změna mezního kmitočtu filtru je zřejmá dle již výše uvedené tabulky. 4.5.

4.5.3 Návrh zapojení č.3

Jedná se o obvod č.3 znázorněný na obr. 4.6c s obecnou přenosovou funkcí 4.21c. Při konkrétní volbě pasivních prvků dostáváme kmitočtový filtr 2. řádu (obr. 4.9) pracující jako dolní propust s přenosovou funkcí

$$K_{U,3} = \frac{G_1 G_3}{p^2 C_1 C_2 + p C_1 G_3 + G_1 G_3} , \quad (4.26)$$

kde pro vodivosti G_1 a G_3 platí $G_1 = G_3 = G$. Koeficientem a měníme mezní frekvenci kmitočtového filtru.



Obr. 4.9: Zapojení č.3

První proudový konvektor je typu CCIII+ a druhý ICCI+. Je použita Butterworthova aproximace a pro hodnoty pasivních prvků platí

$$C_1 = c_{21} K = 4,7 \text{ nF}, \quad (4.27a)$$

$$C_2 = c_{22} \frac{K^2}{C_2} = 2,2 \text{ nF}, \quad (4.27b)$$

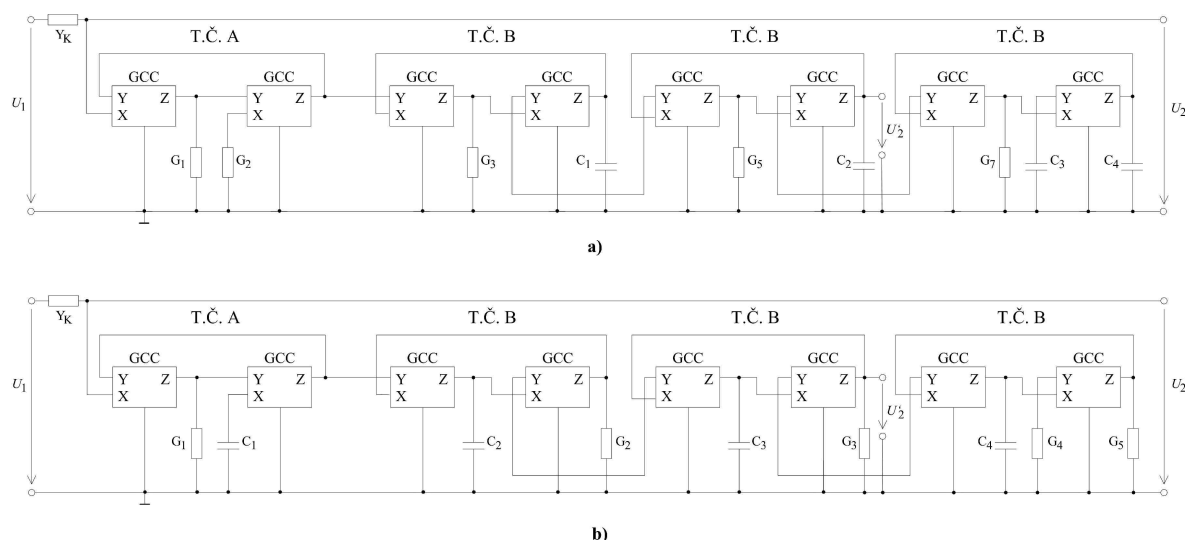
kde $K = G/\omega_0 = G/2\pi f_0$. Změna mezního kmitočtu filtru odpovídá tabulce 4.5.

5 SIMULACE VYBRANÝCH OBVODŮ

Přenosové funkce obvodů z předchozí kapitoly věnované návrhu obvodových zapojení kmitočtových filtrů jsou získány pomocí programu SNAP. Tento však nedovoluje simulace s modely reálných aktivních prvků. Proto byl pro další potřeby použit program OrCAD Pspice, který do svých výpočtů dovoluje zahrnout celou řadu reálných faktorů působících při běžné činnosti obvodu.

5.1 Simulace kmitočtového filtru 4. řádu s proudovými konvejory

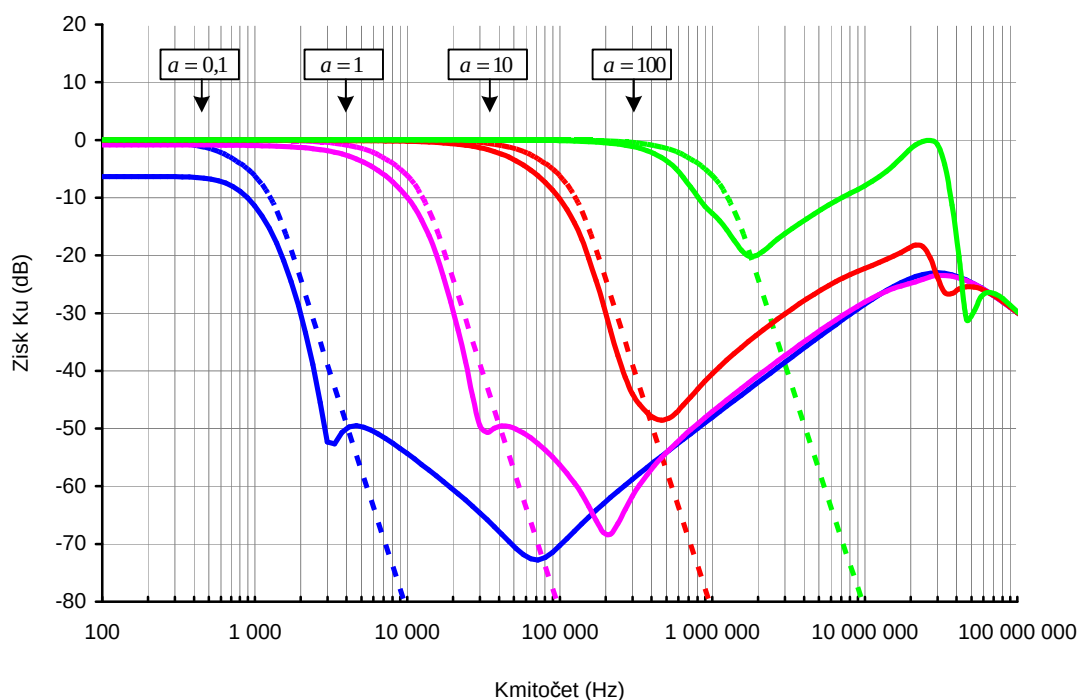
Přenosové funkce (4.2a) a (4.2b) v kapitole 4.2.1 jsou získány pomocí programu SNAP. Struktura z obr. 4.3 se při vhodné volbě pasivních prvků chová jako dolní propust (obr. 5.1a) nebo horní propust (obr. 5.1b).



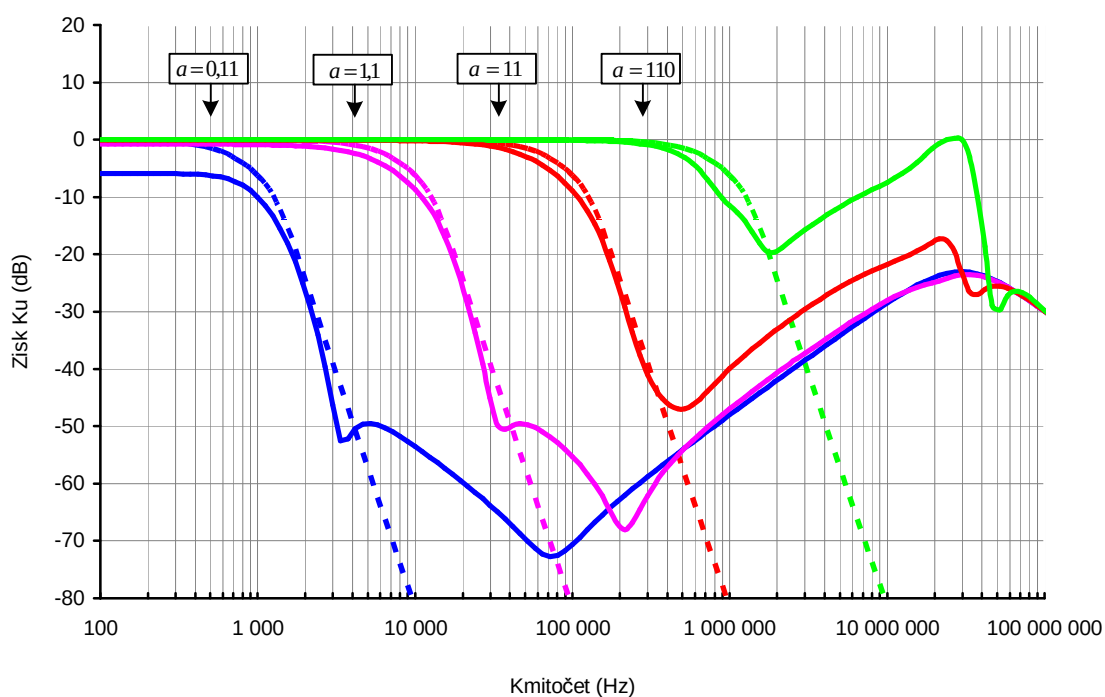
Obr. 5.1: Obvodová realizace filtru s GCC a) dolní propusti, b) horní propusti

5.1.1 Dolní propust

Přenosová funkce odpovídá (4.2a). Kompletní struktura filtru typu dolní propust je znázorněna na obr. 5.1a. Ve výsledných přenosových funkcích (obr. 5.2 a obr. 5.3) jsou čárkovanou čarou znázorněny ideální průběhy a plnou reálné pro čtyři možnosti nastavení řídicího koeficientu $a \in \{0,1; 1; 10; 100\}$ odpovídající tabulce 4.2. Dá se pozorovat, že reálné průběhy plně neodpovídají ideálním, respektive přesně nesouhlasí mezní kmitočty reálných a ideálních průběhů, což je způsobeno tím, že c proudového konvejeje není přesně 1 nebo -1 . Přesnější výsledky lze dosáhnout optimalizací řídicího koeficientu a a to na hodnoty $a \in \{0,15; 1,1; 11; 103\}$. Na obr. 5.2 jsou uvedeny výsledky simulací pro dané hodnoty řídicího koeficientu. Na obr. 5.3 jsou přenosové charakteristiky pro optimalizované hodnoty řídicího koeficientu a .



Obr. 5.2: Dolní propusti dle struktury (obr. 5.1a) pro jednotlivá a



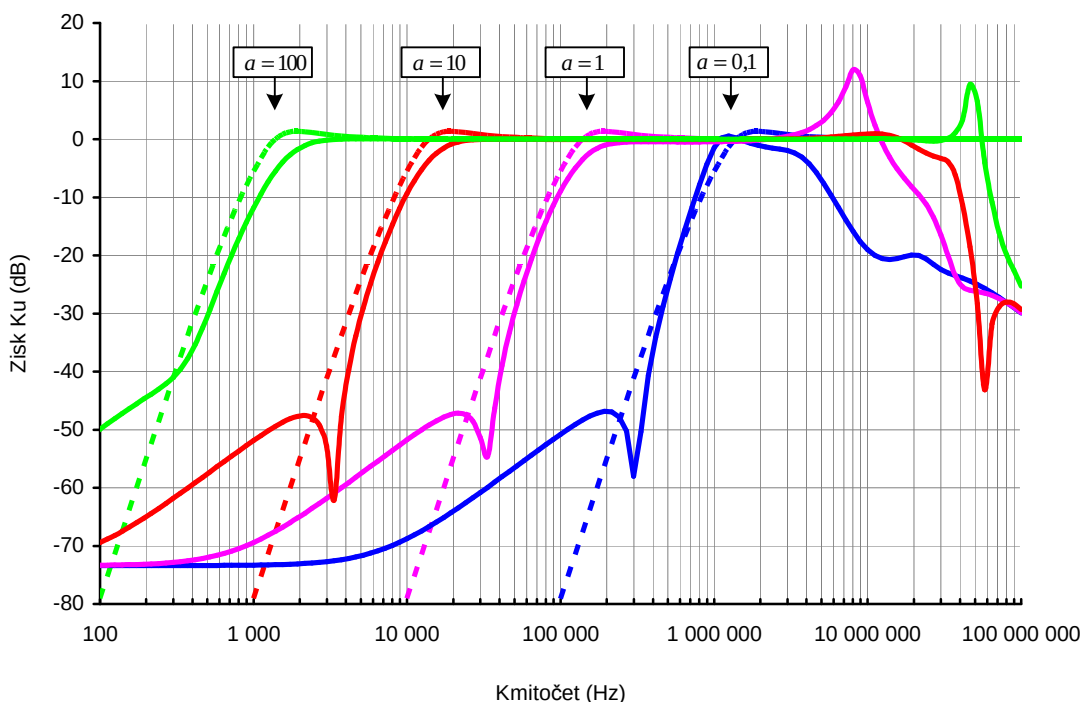
Obr. 5.3: Optimalizované přenosové charakteristiky dolní propusti pro jednotlivá a

Při porovnání průběhů na obr. 5.2 s charakteristikami z obr. 5.3 je zřejmé, že za pomoci elektronického řízení koeficientu a lze dosáhnout „donastavení“ přenosových charakteristik na požadované mezní kmitočty a tím se značně přiblížit k ideálním

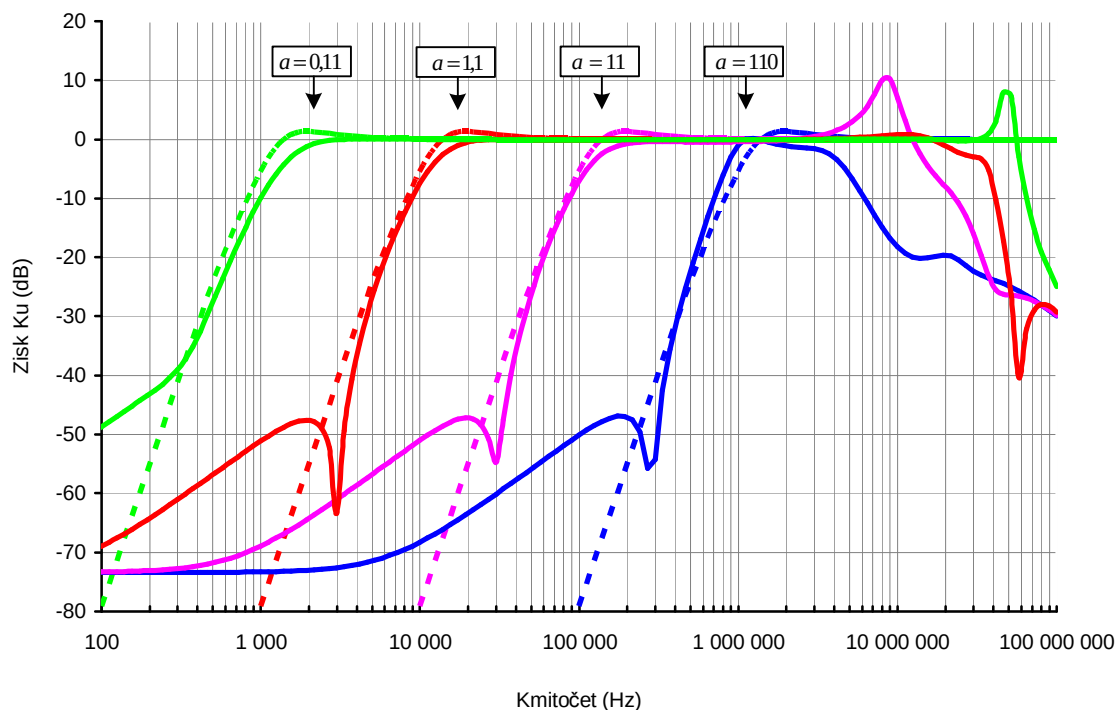
průběhům. Na přenosových charakteristikách dolní propusti je vidět zvlnění v oblasti kmitočtu 10 MHz a výše. To je způsobeno reálnými vlastnostmi proudových konvektorů. Použité modely jsou schopny simulovat chování obvodu do nekonečných kmitočtů, ale jako proudový konvektor se obvod chová do cca 25 MHz. Jak je vidět, na přenosových funkcích dolní propusti vznikají parazitní nuly v přenosu, které jsou způsobeny charakterem nízkoimpedančních bran aktivního prvku. Jsou pro nás nežádoucí, a proto se je snažíme cíleným numerickým návrhem posunout do oblasti vyšších kmitočtů. V případě dolní propusti se útlum v nepropustném pásmu rychle snižuje. To je způsobeno právě charakterem nízkoimpedančních bran, kde v oblasti kolem 1 MHz a výše se impedance těchto bran zvyšuje, užitečný signál již tedy nevstupuje do konvektoru, ale pokračuje na výstup obvodu. Přenosové charakteristiky dolní propusti jsou velice podobné předpokládaným ideálním průběhům.

5.1.2 Horní propust

Struktura obvodu, chovajícího se jako horní propust, je znázorněna na obr. 5.1b a přenosová funkce odpovídá (4.2b). Plná čára opět odpovídá reálným průběhům a čárkovaně jsou vykresleny ideální přenosové charakteristiky pro čtyři možné hodnoty řídicího koeficientu $a \{100; 10; 1; 0,1\}$. Nastává zde stejná situace jako v případě dolní propusti a to vzájemně posunuté mezní kmitočty pro reálné a ideální průběhy. Přesnějších výsledků lze dosáhnout optimalizací řídicího koeficientu a a to na hodnoty $a \in \{0,15; 1; 11; 103\}$. Na obr. 5.4 a obr. 5.5 jsou uvedeny výsledky simulací pro dané hodnoty řídicího koeficientu.



Obr. 5.4: Horní propusti dle struktury (obr. 5.1b) pro jednotlivá a



Obr. 5.5: Optimalizované přenosové charakteristiky horní propusti pro jednotlivá a

U obvodů horní propusti je situace velice podobná. Při porovnání průběhů na obr. 5.4 a obr. 5.5 je zřejmá možnost řídicím koeficientem a dosáhnout „donastavení“ přenosových charakteristik na požadované mezní kmitočty a tím se opět značně přiblížit k ideálním průběhům. Na přenosových charakteristikách horní propusti je vidět zvlnění v oblasti kmitočtu 10 MHz a výše. To je způsobeno reálnými vlastnostmi proudových konvektorů. Jako proudový konvektor se aktivní prvek chová do cca 25 MHz.

Jak je vidět, na všech přenosových funkcích horní propusti vznikají parazitní nuly v přenosu, které jsou způsobeny charakterem nízkoimpedančních bran aktivního prvku. Jsou pro nás ale nežádoucí a proto se je snažíme cíleným numerickým návrhem posunout v případě horní propusti do oblasti nižších kmitočtů. V případě horní propusti je útlum v nepropustném pásmu konstantní. To je způsobeno nízkou impedancí vysokoimpedančních bran. Přenosové charakteristiky dolní propusti jsou velice podobné předpokládaným ideálním průběhům.

5.1.3 Další přenosové funkce

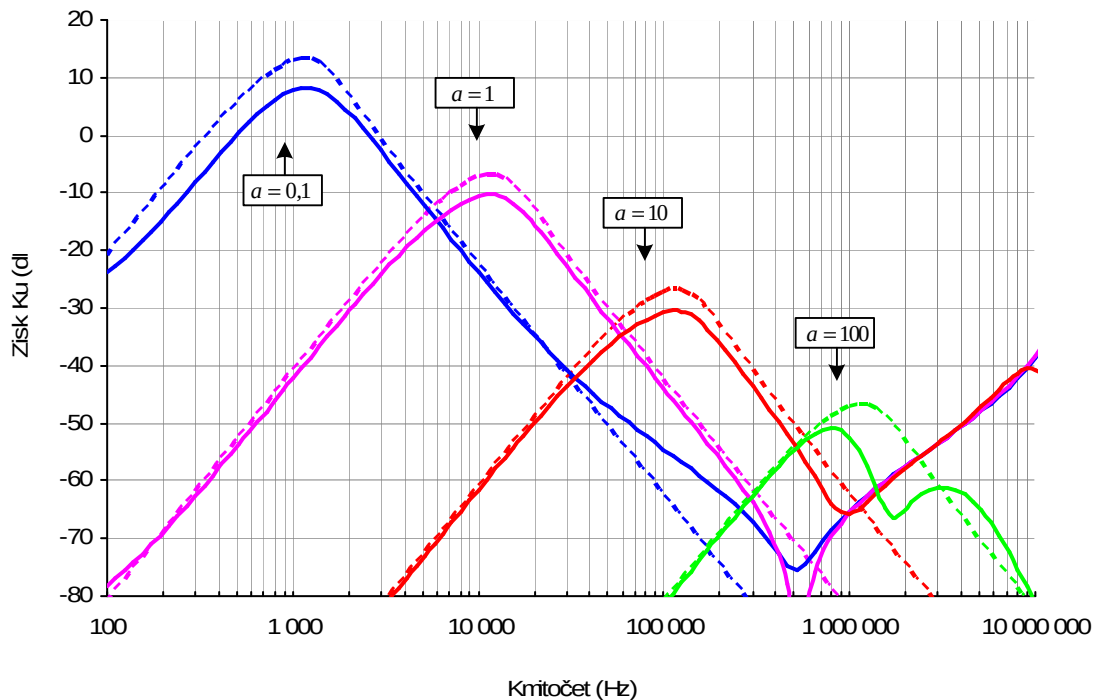
Přestože původním záměrem při návrhu struktury na obr. 4.3 byla realizace dolní propusti, lze tento filtr také využít jako pásmovou propust s přenosovou funkcí

$$K_{U_PP} = \frac{pG_2G_5G_7G_KC_1a^2}{CE_{DP}(p)}, \quad (5.1)$$

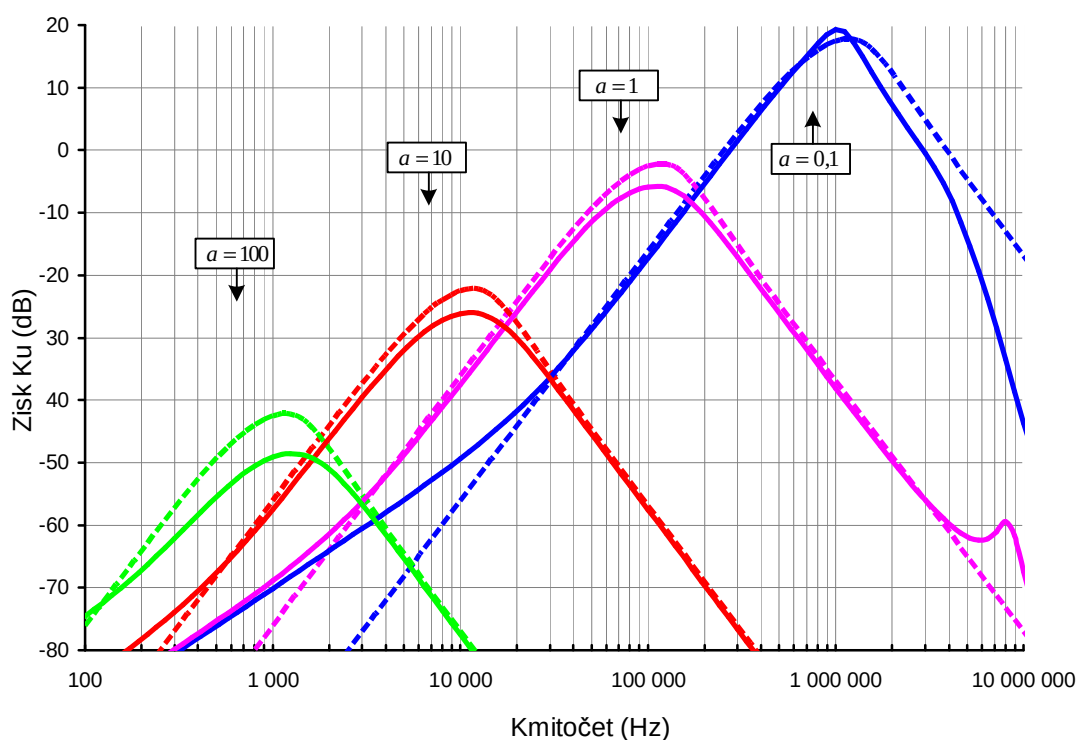
kde charakteristická rovnice $CE_{DP}(p)$ odpovídá (4.3). Odezva obvodu je snímána za třetím transformačním článkem, jak je patrné z obr. 5.1. Výsledky simulací jsou na obr. 5.6. Je zde vidět, že změnou koeficientu a dochází ke změně nejen charakteristického kmitočtu, ale také přenosu v pásmu propustnosti, což je patrné i z přenosové funkce. Odezva obvodu je snímána na výstupu třetího transformačního článku. Přenosová funkce pásmové propusti obvodu realizující primárně horní propust je

$$K_{U_PP} = \frac{p^3C_1C_3C_4G_KG_2a^2}{CE_{HP}(p)}, \quad (5.2)$$

kde charakteristická rovnice $CE_{HP}(p)$ odpovídá (4.4). Odezva obvodu je opět snímána za třetím transformačním článkem. Výsledek simulace tohoto obvodu je na obr. 5.7. Jak je vidět, změnou koeficientu a se mění nejen charakteristický kmitočet ale také hodnota přenosu v propustném pásmu. Reálné průběhy jsou velice podobné ideálním přenosovým charakteristikám. Jelikož je napěťová odezva snímána uvnitř syntetického prvku, nelze proto realizovat filtr pracující v proudovém módu.



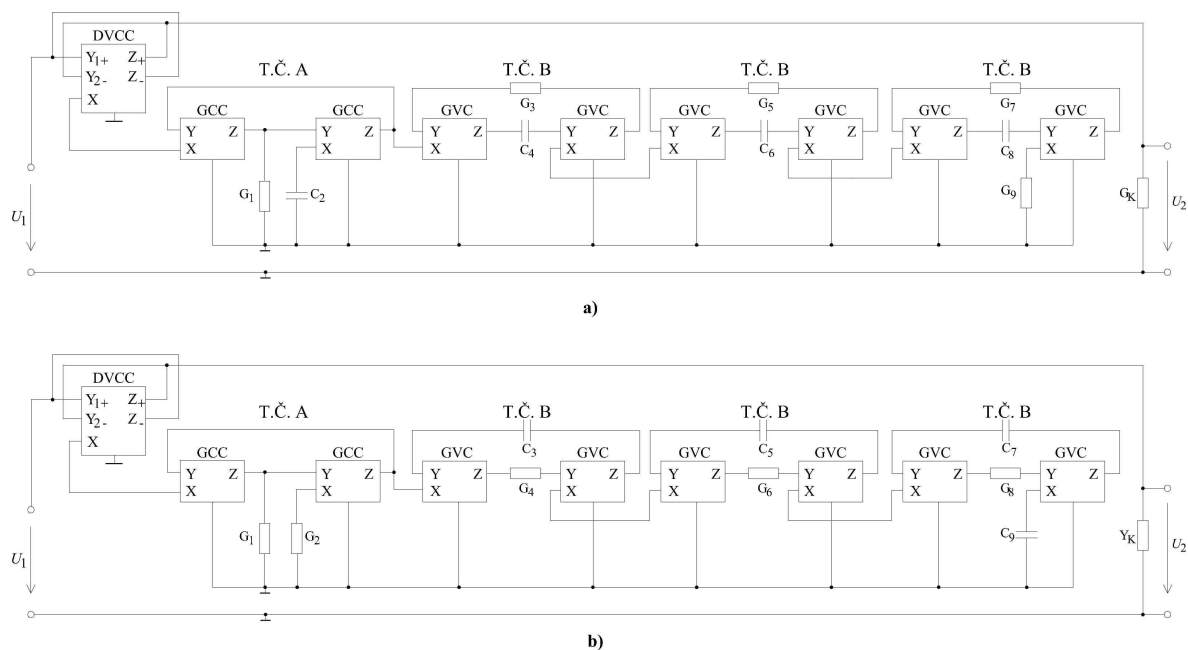
Obr. 5.6: Pásmové propusti dle struktury (4.1a)



Obr. 5.7: Pásmové propusti dle struktury (4.1b)

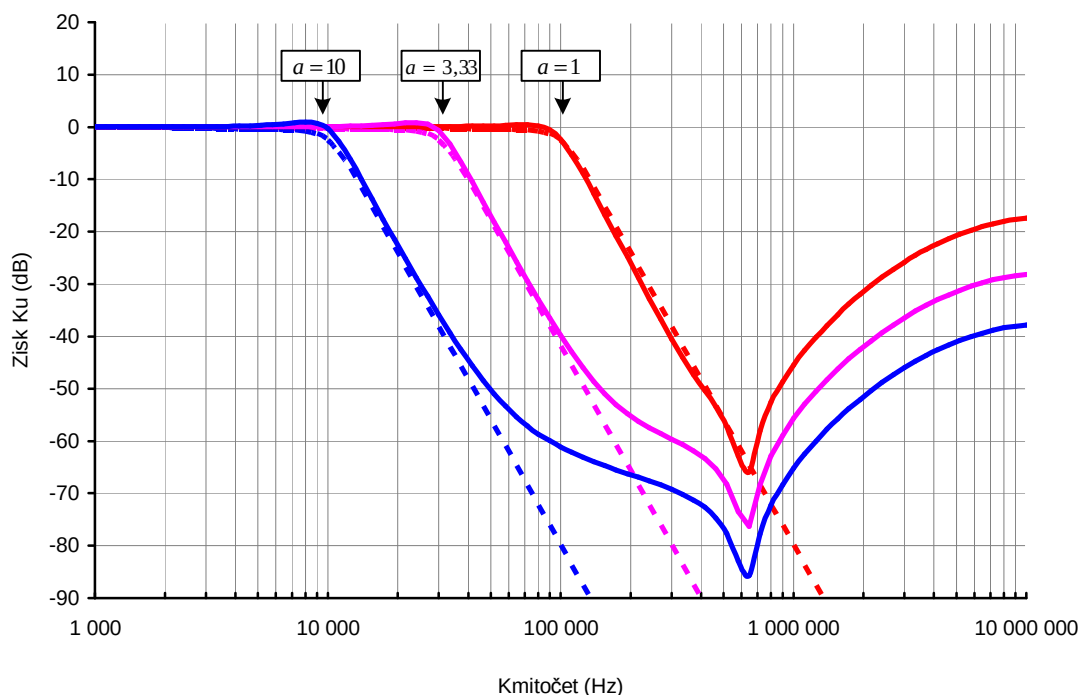
5.2 Simulace kmit. filtru 4. řádu s proudovými a napět'ovými konvejory

Přenosové funkce (4.11) z předchozí kapitoly 4 jsou získány pomocí programu SNAP. Struktura z obr. 4.4 se při vhodné volbě pasivních prvků chová jako dolní propust (obr. 5.8a) nebo horní propust (obr. 5.8b).

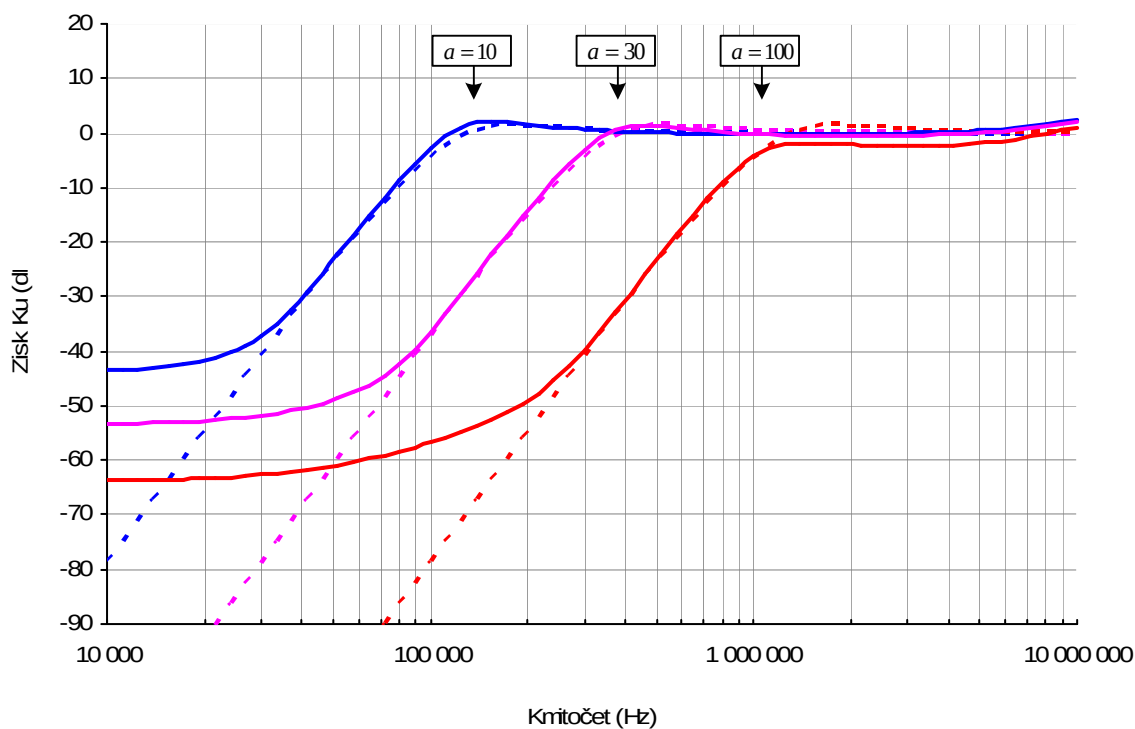


Obr. 5.8: Obvodová realizace filtru s GCC i GVC a) dolní propusti, b) horní propusti

Výsledky simulací těchto obvodů jsou na obr. 5.9 a obr. 5.10. Jak je vidět, změnou koeficientu a dosáhneme změny mezního kmitočtu na hodnoty 10kHz, 30kHz a nebo 100kHz v případě dolní propusti a mezi hodnotami 100kHz, 300kHz a 1MHz v případě horní propusti. Na obr. 5.9 je znázorněna přenosová charakteristika dolní propusti, na obr. 5.10 je vidět přenosová charakteristika horní propusti.



Obr. 5.9: Přenosová charakteristika dolní propusti



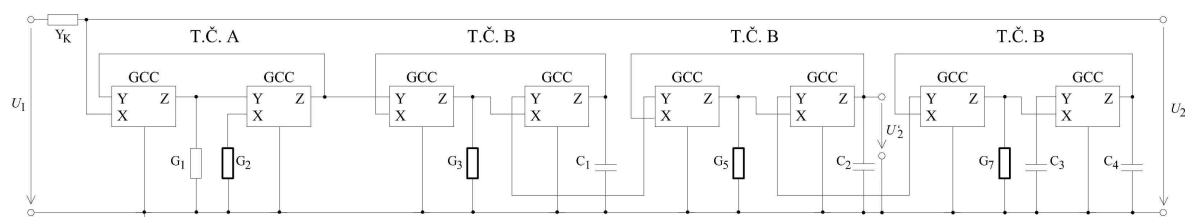
Obr. 5.10: Přenosová charakteristika horní propusti

Jak u přenosových charakteristik dolní (obr. 5.9) tak i horní (obr. 5.10) propusti jsou vidět parazitní nuly v přenosu způsobené charakterem nízkoimpedančních bran aktivního prvku. Jsou pro nás ale nežádoucí a proto se je snažíme cíleným numerickým návrhem posunout do oblasti vyšších kmitočtů.

V případě dolní propusti se útlum v nepropustném pásmu rychle snižuje. To je způsobeno právě charakterem nízkoimpedančních bran kde v oblasti kolem 1MHz a výše se impedance těchto bran zvyšuje a užitečný signál se dostává na výstup obvodu. V případě horní propusti je útlum v nepropustném pásmu konstantní. To je způsobeno nízkou impedancí vysokoimpedančních bran. Přenosové charakteristiky dolní i horní propusti jsou velice podobné předpokládaným ideálním průběhům.

5.3 Simulace kmit. filtru 4. řádu s GCC se změnou f_m pomocí pasivních prvků

K simulacím je opět využit kmitočtový filtr 4. řádu s proudovými konvejory jako tomu bylo v kapitole 4.2, ale tentokrát je změna mezního kmitočtu realizována pomocí pasivních prvků. Kompletní struktura kmitočtového filtru typu dolní propust včetně vyznačení pasivních prvků, kterými se mění mezní kmitočet je na obr. 5.11.

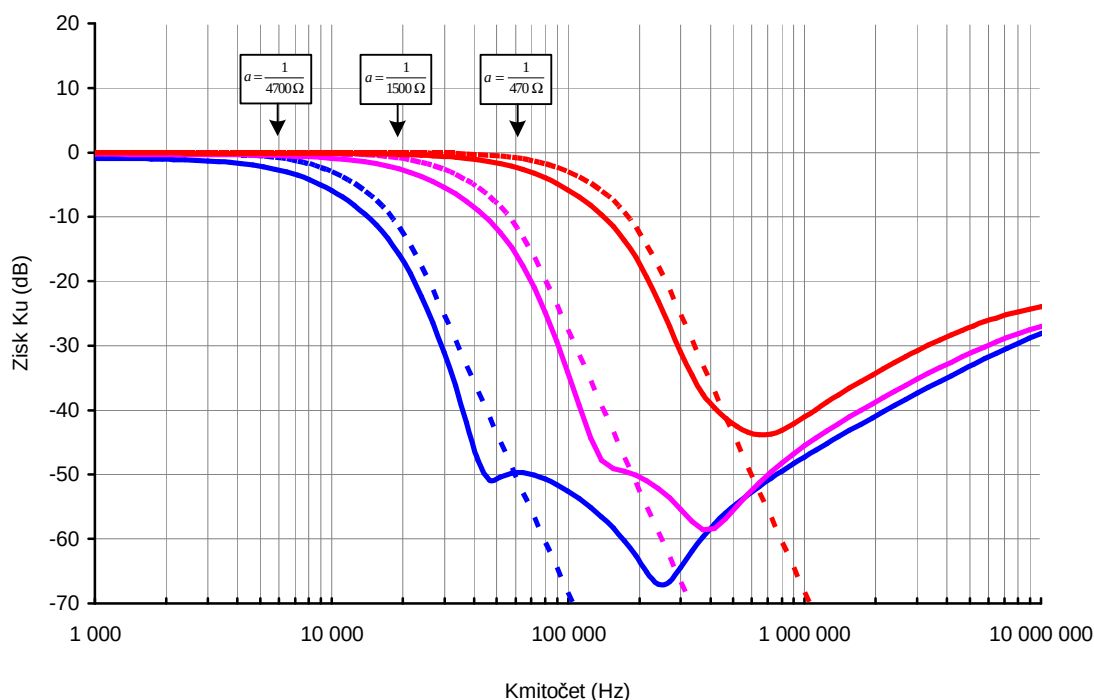


Obr. 5.11: Obvodová realizace filtru s GCC se změnou f_m pomocí pasivních prvků

Obecná přenosová funkce kmitočtového filtru odpovídá rovnici 5.3. Přenosová funkce dolní propusti je

$$K_{U_DP} = \frac{G_K G^4}{p^4 G_1 C_1 C_2 C_3 C_4 + p^3 G_1 C_1 C_2 C_4 G + p^2 G_1 C_1 C_2 G^2 + p G_1 C_1 G^3 + G_K G^4} \cdot (5.3)$$

Přenosové funkce kmitočtového filtru zároveň s hodnotami odporů jednotlivých rezistorů realizujících změnu mezního kmitočtu mezi hodnotami 10kHz, 30kHz a 100kHz jsou zobrazeny na obr. 5.12.

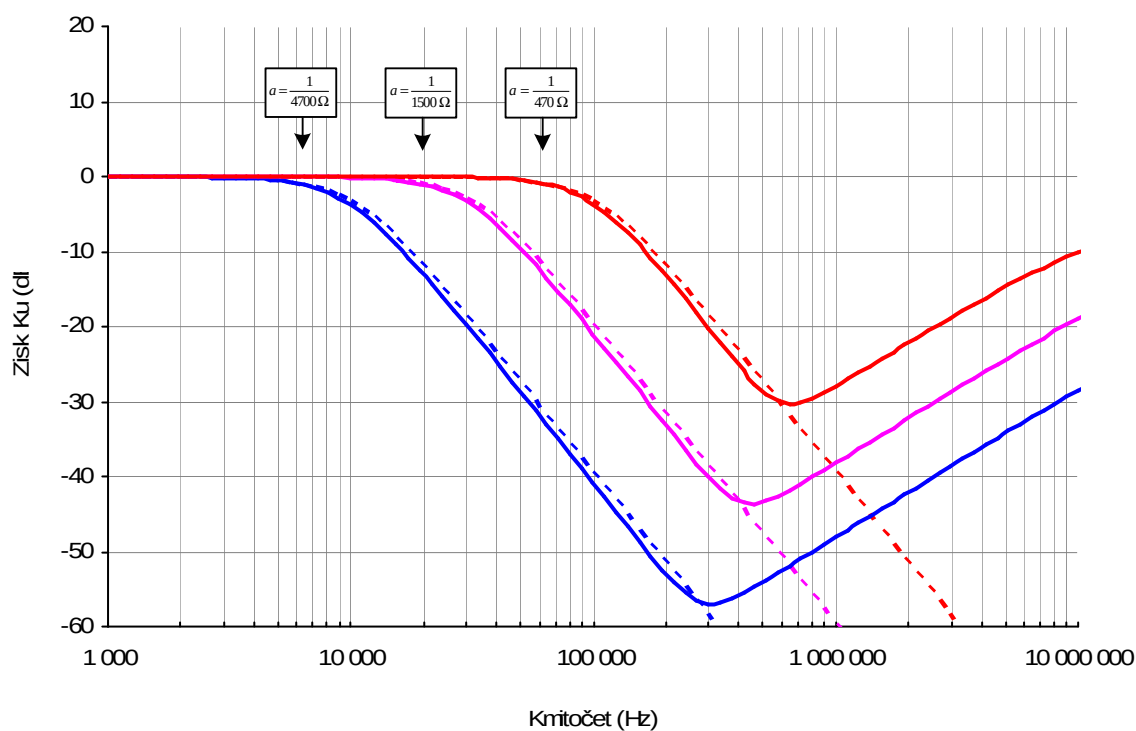


Obr. 5.12: Přenosová charakteristika dolní propusti

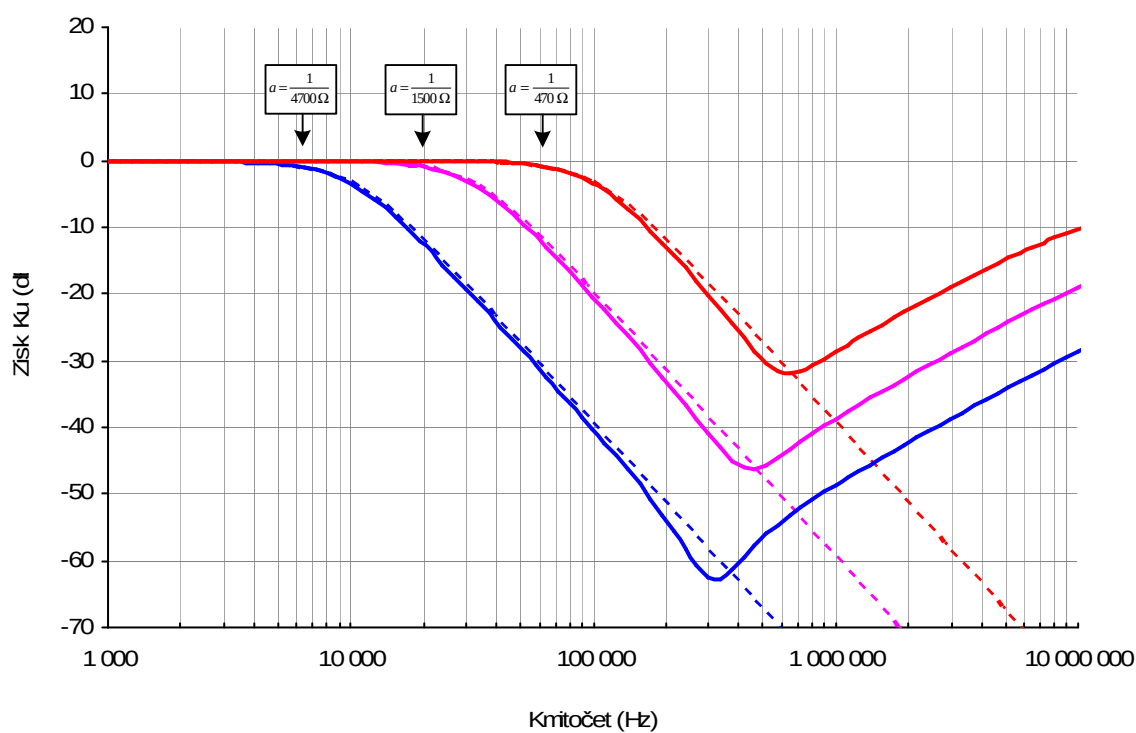
Z obr. 5.12 je patrné, že se útlum v nepropustném pásmu v oblasti vyšších kmitočtů opět snižuje důsledkem zvyšování impedance nízkoimpedančních bran aktivního prvku v oblasti vyšších kmitočtů. Na první pohled je zřejmé, že jsou reálné průběhy o něco málo posunuté od ideálních. V případě řízení mezního kmitočtu pomocí pasivních prvků (G) nelze přesněji doladit daný obvod. Tato možnost by nastala pouze v případě nahrazení daných pasivních prvků potenciometry, kde by již donastavení hodnoty odporu a tedy doladění obvodu nepředstavovalo problém.

5.4 Simulace tří zapojení se změnou f_m pomocí pasivních prvků

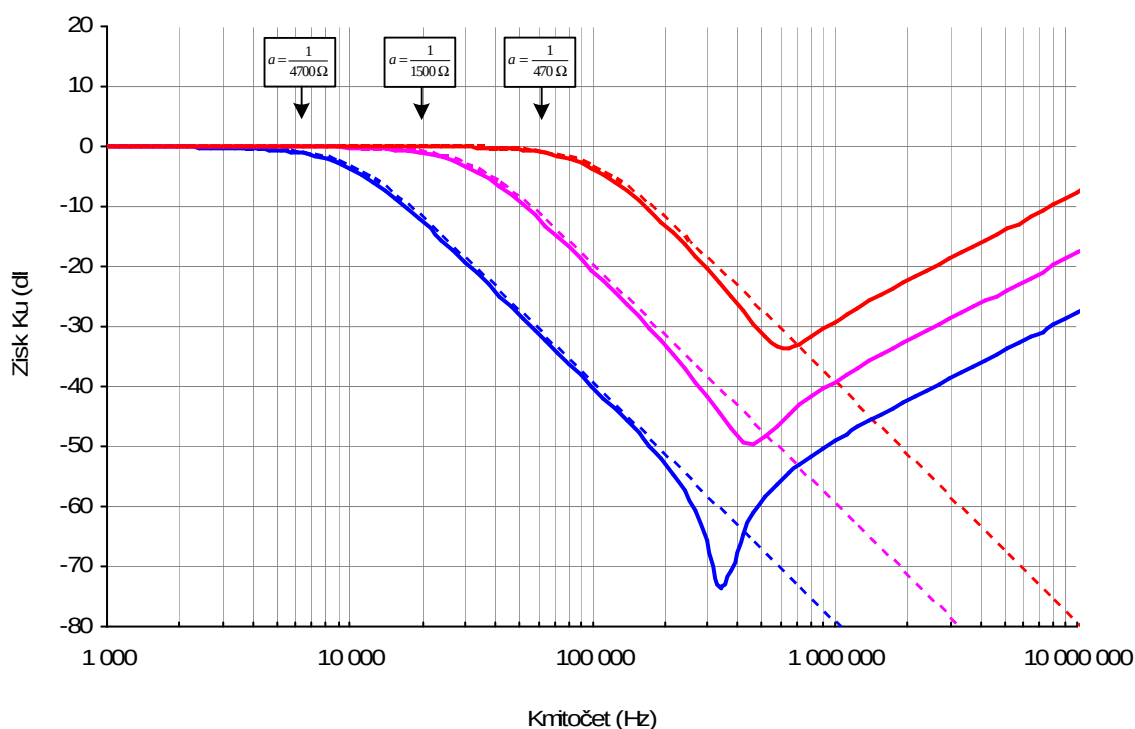
V kapitole 4.5 byly popsány tři zapojení kmitočtových filtrů se změnou mezní frekvence pomocí pasivních prvků. Jedná se o kmitočtové filtry 2. řádu, kde změnou hodnoty rezistorů vyznačených na obr. 4.7, obr. 4.8 a obr. 4.9 mezi hodnotami 4700Ω , 1500Ω nebo 470Ω dosáhneme přeladění obvodu na mezní kmitočty 10kHz, 30kHz nebo 100kHz jak je vidět pro jednotlivá zapojení na obr. 5.13, obr. 5.14 a na obr. 5.15.



Obr. 5.13: Přenosová charakteristika dolní propusti – Zapojení č.1



Obr. 5.14: Přenosová charakteristika dolní propusti – Zapojení č.2



Obr. 5.15: Přenosová charakteristika dolní propusti – Zapojení č.3

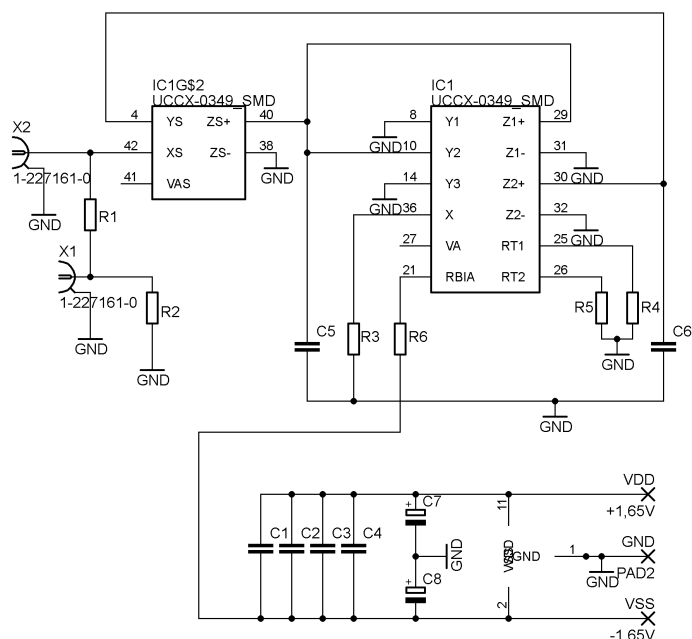
Přenosové charakteristiky všech tří zapojení vypadají velice podobně a zároveň téměř kopírují ideální průběhy. Opět nám zde vznikají parazitní nuly v přenosu, které jsou způsobeny charakterem nízkoimpedančních bran aktivního prvku. Asi nejviditelnější je u všech tří zapojení rychle se snižující útlum v nepropustném pásmu, který je opět důsledkem zvyšující se impedance nízkoimpedančních bran v oblasti vyšších kmitočtů což způsobuje, že užitečný signál nevstupuje do aktivních prvků, ale objevuje se na výstupu.

6 PRAKTICKÁ REALIZACE

Z hlediska možností realizace bylo pro experimentální ověření vybráno zapojení číslo 1 s kapitoly 4.5 resp. 5.4. Jedná se o kmitočtový filtr 2. řádu typu dolní propust.

6.1 Vyhotovení obvodu č.1

Na obr. 6.1 je nakresleno kompletní zapojení kmitočtového filtru vycházející z obvodu č.1. Celé zapojení včetně návrhu desky plošných spojů bylo realizováno v aplikaci Eagle verze 5.4.0 Professional. Vstup a výstup filtru je realizován pomocí BNC konektorů.

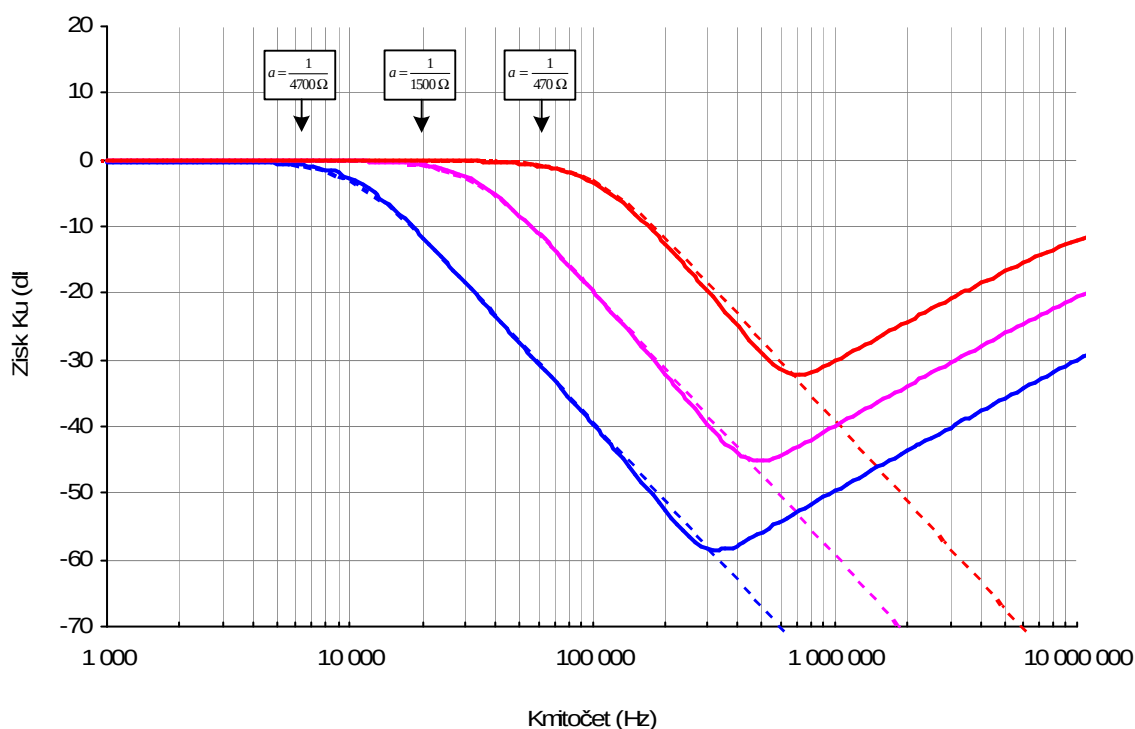


Obr. 6.1: Schéma zapojení kmitočtového filtru 2. řádu

V příloze na obr. A.1 lze nalézt rozmístění všech součástek na desce plošných spojů. V příloze A.2 lze nalézt kompletní soupis použitých součástek potřebných k realizaci zapojení číslo 1. V přílohách B.1 a B.2 jsou znázorněny plošné spoje na vrchní resp. spodní části desky plošných spojů. A konečně na obr. C.1 je fotografie výsledné podoby zhotoveného filtru.

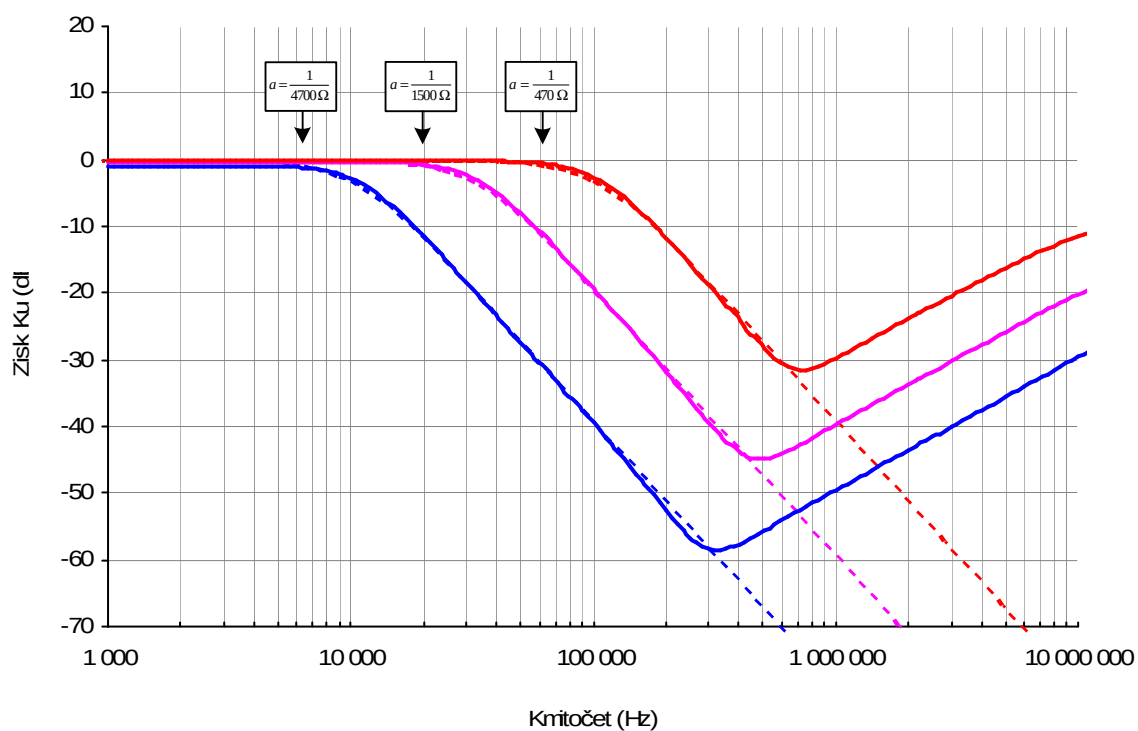
6.2 Simulace vytvořeného kmitočtového filtru

Na obr. 6.2 je znázorněna přenosová charakteristika kmitočtového filtru realizujícího dolní propust v napěťovém módu. Následující obr. 6.3 vyobrazuje přenosovou charakteristiku dolní propusti tohoto obvodu v proudovém módu.



Obr. 6.2: Přenosová charakteristika dolní propusti – napěťový mód

Protože může být na syntetický prvek nahlíženo jako na pasivní bez ohledu na vnitřní strukturu a použité aktivní prvky, lze podle obr. 3.3 (přidružená transformace) využít takto navržený filtr i k realizaci dolní propusti pracující v proudovém módu. Výsledky měření jsou na obr. 6.3. Charakteristiky jsou téměř totožné pro napěťový i proudový mód, a navíc se shodují s ideálními průběhy a souhlasí i s reálnými simulacemi chování obvodu v programu OrCAD.



Obr. 6.3: Přenosová charakteristika dolní propusti – proudový mód

7 ZÁVĚR

Práce se zabývá problematikou návrhu obvodových struktur pomocí syntetických prvků s možností řídit u konečného řešení mezní frekvenci kmitočtového filtru.

Byly definovány požadavky na podobu charakteristické rovnice kmitočtových filtrů n -tého řádu, která umožňuje měnit jejich mezní kmitočet. Abychom dosáhli této podoby charakteristické rovnice, byly definovány požadované tvary vstupních impedancí, popřípadě admitancí transformačních článků. Byly popsány čtyři struktury transformačních článků, které vyhovovaly požadavkům na možnost změny mezního kmitočtu filtru. S použitím proudových konvejsorů byly nalezeny dva transformační články typu B a jeden typu A. S použitím napěťových konvejsorů byl nalezen jeden transformační článek typu B.

Jedním z důležitých bodů práce je, že při využití metody návrhu pomocí syntetických prvků byla popsána konkrétní obvodová řešení říditelných kmitočtových filtrů vyšších řádů, kdy mezní kmitočet lze řídit změnou přenosových koeficientů použitých aktivních prvků. Tento způsob řízení je velice výhodný z hlediska možnosti přesného donastavení hodnoty řídicího koeficientu na požadovanou hodnotu. Jako alternativa k elektronickému řízení se práce věnovala také možnosti řízení mezního kmitočtu pomocí pasivních prvků.

Možnost měnit mezní kmitočet filtru pouhou změnou hodnoty vybraných pasivních prvků v obvodu je velice výhodná. Samotná změna mezního kmitočtu v analogových obvodech může být realizována potenciometry, což nám umožňuje velice plynulé nastavení včetně přesného „donastavení“ na požadovanou hodnotu odporu rezistoru a tedy mezního kmitočtu. Na druhou stranu je ale využití potenciometrů konstrukčně náročnější.

Nalezené struktury primárně realizující dolní a horní propust byly podrobeny simulacím v programu OrCAD. Přenosové charakteristiky dolní a horní propusti jsou ve všech případech velice podobné předpokládaným ideálním průběhům.

Na závěr bylo vybrané zapojení říditelného kmitočtového filtru typu dolní propust 2. řádu s proudovými konvejsory i experimentálně ověřeno.

REFERENCE

- [1] ACAR, C., OZOGUZ, S. A new versatile building block: current differencing buffered amplifier suitable for analog signal-processing filters, *Microelectronics Journal*, 1999, Vol. 30, pp. 157-160.
- [2] BEČVÁŘ, Daniel, VRBA, Kamil. Univerzální proudový konvektor. *Elektrorevue [online]*. 2000 [cit. 2009-11-22]. Dostupný z WWW: <<http://www.elektrorevue.cz/clanky/00007/index.html>>.
- [3] BEČVÁŘ, Daniel. Napěťové konvejory *Elektrorevue [online]*. 2001 [cit. 2007-11-05]. Dostupné z URL: <<http://www.elektrorevue.cz/clanky/01051/index.html>>.
- [4] BRUTON, L. T. *RC Active Circuits – Theory and Design*, New Jersey, Prentice – Hall 1980, ISBN 0-1375-3467-1.
- [5] COATES, C.L.: Flow-graph Solution of Linear Algebraic Equations. *IRE Trans. Circuit Theory*, CT-6, pp. 170-187, 1959.
- [6] ČAJKA, Josef, DOSTÁL, Tomáš, VRBA, Kamil. General view on current conveyors. *International Journal of Circuit Theory and Applications [online]*. 2004 [cit. 2009-11-22], s. 133-138. Dostupný z WWW: <<http://portal.acm.org/citation.cfm?id=1072687>>. ISSN 0098-9886 .
- [7] ČAJKA, J., KVASIL, J. *Teorie lineárních obvodů*, SNTL Praha, 1979.
- [8] DOHNAL, P. *Kmitočtové filtry s napěťovými konvejory*. 2008. 57 s. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Minarčík.
- [9] DOSTÁL T., POSPÍČIL J. Current and voltage conveyors - a family of three port immittance converters.. *Proc. ISCAS*, pp. 419-422, Roma, 1982
- [10] FABRE, A. A third-generation current conveyor: a new helpful active element. *Electronics Letters*, 1995, Vol. 31, No. 5, pp. 338-339.
- [11] FILKA, M. *Diplomní semináře - telekomunikace*. VUT v Brně, Ústav telekomunikací. Brno, 1989
- [12] GHAUSI, M. S., LAKER, K. R. *Modern Filter Design: Active RC and Switched Capacitor*, Atlanta, Noble Publishing, 2003, ISBN 1-884932-38
- [13] JEŘÁBEK, Jan, VRBA, Kamil. Vybrané vlastnosti univerzálního proudového konvektoru, ukázka návrhu aplikace. *Elektrorevue [online]*. 2006 [cit. 2009-11-22]. Dostupný z WWW: <<http://www.elektrorevue.cz/clanky/06041/index.html>>.

- [14] Katalogové listy Analog devices AD844. [cit. 2010-5-15]. Dostupný z WWW: <http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD844.pdf >.
- [15] Katalogové listy OPA860. [cit. 2010-5-15]. Dostupný z WWW: <<http://focus.ti.com/docs/prod/folders/print/opa860.html> >.
- [16] Katalogové listy OPA861. [cit. 2010-5-15]. Dostupný z WWW: <<http://focus.ti.com/docs/prod/folders/print/opa861.html> >.
- [17] KOTON, Jaroslav. *Syntéza a analýza obvodů s moderními aktivními prvky*, 2008. 92 s. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí dizertační práce prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.
- [18] MASON, S.J.: Feedback Theory: Further Properties of Signal Flow Graphs. Proc. IRE, Vol. 44, No. 7, pp. 920-926, 1956.
- [19] OLŠÁK, M., MATĚJČEK, L., VRBA, K. Transformační články pro realizaci přeladitelných imitancí vyššího řádu. *The Technology Interface*: <http://www.electronicletters.com>, 2002, No. 65
- [20] PRECLÍK, Milan. *Aktivní kmitočtové filtry s minimální konfigurací*. [s.l.], 2008. 49 s. , 4 s. příloh. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav telekomunikací. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jaroslav Koton, Ph.D.
- [21] SEDLÁČEK, Jiří, HÁJEK, Karel. *Kmitočtové filtry*. 1. vyd. Praha : BEN, 2002. 535 s. ISBN 80-7300-023-7.
- [22] SEDRA, A., SMITH, K. C. The current conveyor: a new circuit building block. IEEE Trans. Circuit Theory, 1968, Vol. 56, pp. 1368-1369.
- [23] SEDRA, A., SMITH, K. C. A second-generation current conveyor and its application. IEEE Trans. Circuit Theory, 1970, Vol. 17, pp. 132-134.
- [24] ŠPONAR, Radek. Syntetické dvojpólové prvky s imitancemi vyšších řádů v kmitočtových filtrech s proudovými konvejory. *Elektrorevue* [online]. 2004 [cit. 2009-11-22]. Dostupný z WWW: <<http://www.elektrorevue.cz/clanky/04013/index.html>>.
- [25] TEMIZYUREK, C.; MYDERRIZI, I. A novel current-mode universal filter implemented with DVCCs, In *Proceedings of the 24th International Conference on Microelectronics*, 2004, Vol. 2, pp. 581-584.
- [26] Utility FDATool a FVTool aplikace Matlab. [cit. 2010-5-15]. Dostupný z WWW: <<http://www.mathworks.com/> >.

- [27] VRBA, K., ČAJKA, J. *Obvody s imitančními prvky vyššího řádu*. Dílčí zpráva o řešení projektu Grantové agentury ČR č. 102/96/1306, FEI VUT v Brně, Ústav telekomunikací. Brno, 1997
- [28] VRBA, K., ČAJKA, J. On Voltage Conveyors, *Internet Journal: www.ElectronicsLetters.com*, 2003, Vol. 11, No. 1, ISSN 1213-161X.
- [29] VRBA, K., ČAJKA, J. *Syntetické prvky vyššího řádu - Obvody s proudovými konvejory*. Dílčí zpráva o řešení projektu Grantové agentury ČR č. 102/93/2079, FEI VUT v Brně, Ústav telekomunikací. Brno, 1995

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

a	řídící koeficient
a, b, c	přenosové koeficienty konvejšorů
C	kondenzátor
C	kapacita kondenzátoru
CC	Current Conveyor, angl. zkratka pro proudový konvejšor
CCI	proudový konvejšor první generace
CCII	proudový konvejšor druhé generace
CCIII	proudový konvejšor třetí generace
CDBA	Current Differencing Buffered Amplifier
$CE_{DP}(p)$	charakteristická rovnice dolní propusti
$CE_{HP}(p)$	charakteristická rovnice horní propusti
CFA	Current Feedback Amplifier
D	charakteristická rovnice
DCVC	Differential Current Voltage Conveyor
DO-CF	Double Output Current Follower
DP	dolní propust
DP	paralelní zapojení dvojpólů typu D
DS	seriové zapojení dvojpólů typu D
DVCC	Differential Voltage Current Conveyor
EP	paralelní zapojení dvojpólů typu E
ES	seriové zapojení dvojpólů typu E
FDATool	Filter Design and Analysis Tool
FČ	fázovací člunek
FVTool	Filter Visualization Tool
f_0	charakteristický kmitočet
f_m	mezní kmitočet
G	konduktor
G	vodivost konduktoru
GCC	Generalized Current Conveyor, angl. zkratka pro zobecněný CC
GVC	Generalized Voltage Conveyor, angl. zkratka pro zobecněný VC
HP	horní propust
IO	integrováný obvod
K	konstanta
K_u	modul přenosu
L	cívka
L	indukčnost cívky
M - C grafy	Masonovy-Coatesovy grafy

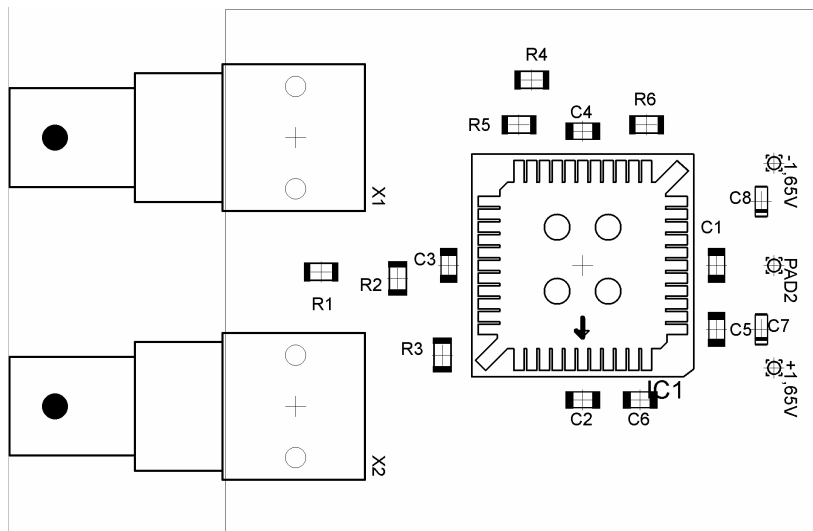
m	řád polynomu čitatele
n	řád polynomu jmenovatele
$p = j\omega$	operátor Laplaceovy transformace
PP	pásmová propust
PZ	pásmová zadrž
Q	činitel jakosti
R	rezistor
R	rezistivita rezistoru
UCC	Universal Current Conveyor, angl. zkratka pro univerzální CC
UVC	Universal Voltage Conveyor, angl. zkratka pro univerzální VC
VC	Voltage Conveyor, angl zkratka pro napěťový konvektor
Y	admittance
Z	impedance
φ	fázový posuv
$\omega = 2\pi f$	úhlová frekvence

SEZNAM PŘÍLOH

A	POUŽITÉ SOUČÁSTKY NA DESCE PLOŠNÝCH SPOJŮ	62
A.1	Rozmístění součástek na desce	62
A.2	Seznam použitých součástek	62
B	DESKA S PLOŠNÝMI SPOJI	63
B.1	Přední strana desky plošných spojů	63
B.2	Zadní strana desky plošných spojů	63
C	FOTOGRAFIE ZHOTOVENÉHO PŘÍPRAVKU	64

A Použité součástky na desce plošných spojů

A.1 Rozmístění součástek na desce



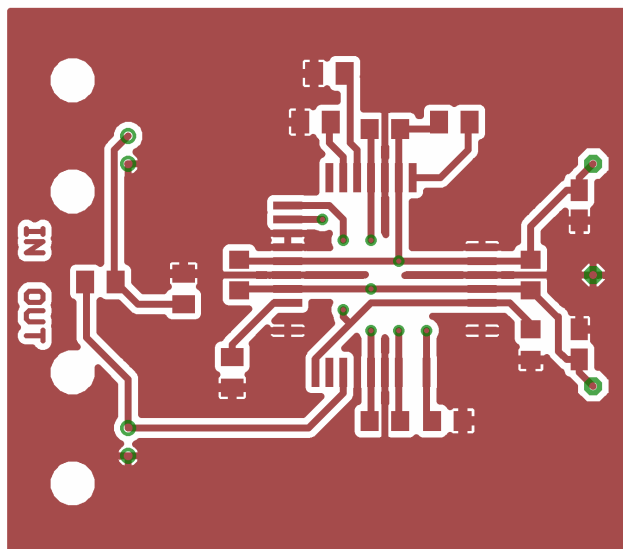
Obr. A.1: Rozmístění součástek na desce

A.2 Seznam použitých součástek

Součástka	Hodnota	Poznámka
BNC	–	konektor pro připojení vstupu a výstupů
UCC	–	aktivní prvek
R ₁	$\frac{1}{a} = \{4700\ \Omega; 1500\ \Omega; 470\ \Omega\}$	změna mezního kmitočtu
R ₂	51 Ω	součást obvodu č.1
R ₃	$\frac{1}{a} = \{4700\ \Omega; 1500\ \Omega; 470\ \Omega\}$	změna mezního kmitočtu
R ₄	8200 Ω	součást obvodu č.1
R ₅	8200 Ω	součást obvodu č.1
R ₆	4700 Ω	součást obvodu č.1
C ₁	68pF + 47 nF	blokovací kondenzátor
C ₂	68pF + 47 nF	blokovací kondenzátor
C ₃	68pF + 47 nF	blokovací kondenzátor
C ₄	68pF + 47 nF	blokovací kondenzátor
C ₅	2,2 nF	součást obvodu č.1
C ₆	4,9 nF	součást obvodu č.1
C ₇	4,7 μ F	tantalový kondenzátor
C ₈	4,7 μ F	tantalový kondenzátor

B Deska s plošnými spoji

B.1 Přední strana desky plošných spojů



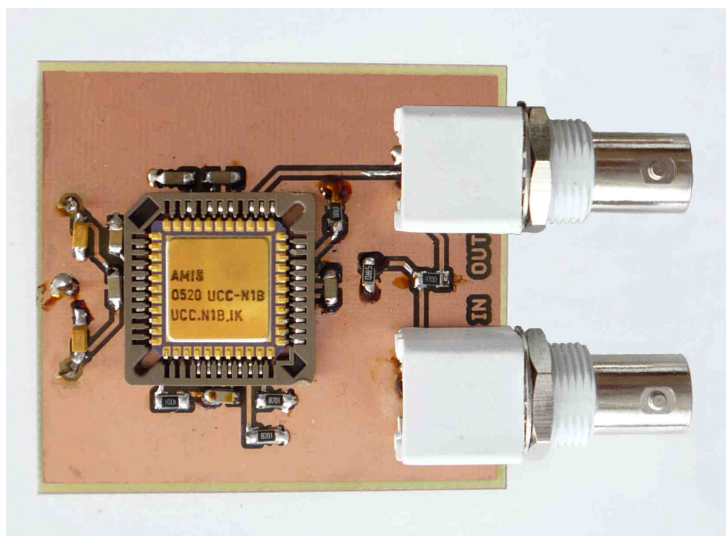
Obr. B.1: Deska s plošnými spoji - TOP

B.2 Zadní strana desky plošných spojů



Obr. B.2: Deska s plošnými spoji - BOTTOM

C Fotografie zhotoveného přípravku



Obr. C.1: Realizace kmitočtového filtru