



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

UNIVERZÁLNÍ AKTIVNÍ PRVKY A JEJICH VYUŽITÍ V KMITOČTOVÝCH FILTRECH

UNIVERSAL ACTIVE ELEMENTS AND THEIR USAGE IN FREQUENCY FILTERS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. ROMAN VENCÁLEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. NORBERT HERENCŠÁR

BRNO 2009



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Telekomunikační a informační technika

Student: Bc. Roman Vencálek

ID: 83157

Ročník: 2

Akademický rok: 2008/2009

NÁZEV TÉMATU:

Univerzální aktivní prvky a jejich využití v kmitočtových filtrech

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prozkoumejte vnitřní struktury univerzálních aktivních prvků (UCC, UVC) vyvinutých na Ústavu telekomunikací, FEKT VUT v Brně. Na základě těchto studií vytvořte nový všestranný funkční blok včetně jeho modelu v programu OrCAD PSPICE, pomocí kterého bude možné realizovat také prvky jako: CDTA, CCTA, CFTA, DCCTA, CSBA, CSTA, apod. Nově definovaným funkčním blokem navrhnete několik zapojení oscilátorů a přeladitelných kmitočtových filtrů pracujících v proudovém, napěťovém nebo smíšeném módu. Teoretické a reálné vlastnosti vybraných zapojení ověřte analýzou v programu SNAP a OrCAD PSPICE.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] FERRI, G., GUERRINI, N. C. Low-Voltage Low-Power CMOS Current Conveyors, Kluwer Acad. Publ., London, 2003.
- [2] BECVAR, D., VRBA, K., ZEMAN, V., MUSIL, V. Novel universal active block: A Universal Current Conveyor. In Proc. IEEE ISCAS'00, Geneva, Switzerland, pp. 471-474, 2000.
- [3] MINARCIK, M., VRBA, K. Low-output and high-input impedance frequency filters using universal voltage conveyor for high-speed data communication systems. In Proc. IARIA ICN'06, Mauritius, pp. 1-4, 2006.
- [4] MINARCIK, M., VRBA, K. Single-Input Six-Output Voltage-Mode Filter Using Universal Voltage Conveyors. IEICE Trans. Fundamentals, vol. E91-A, no. 8, p. 2035-2037, 2008.

Termín zadání: 9.2.2009

Termín odevzdání: 26.5.2009

Vedoucí práce: Ing. Norbert Herencsár

prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.

Předseda oborové rady

Anotace

Tato diplomová práce pojednává o univerzálních moderních aktivních prvcích, jako je univerzální proudový a univerzální napěťový konvektor. Jejich velký problém s malou šířkou pásma je minulostí díky rychlému vývoji technologií v několika posledních letech. Proudové a napěťové konvektory jsou stále ve fázi výzkumu, díky jejich dobrým vlastnostem je ale pravděpodobné jejich komerční nasazení v budoucnu. Pro ověření vlastností proudových konvektorů byly použity části jiných integrovaných obvodů, a byl tak získán prvek s podobnými vlastnostmi. V této práci je ukázán návrh aktivních filtrů s prvky DBTA a FDBTA, které vznikly „spojením“ právě univerzálního proudového a napěťového konvektoru. Na vybraných obvodech s DBTA byly provedeny simulace za účelem ověření jejich vlastností. Pro zjištění chování v reálných aplikacích byly také obvody zkonstruovány, což umožnilo porovnat výsledky získané ze simulačních programů s ideálním chováním prvků a s modely simulujícími reálné vlastnosti oproti hodnotám získaným měřeními obvodů.

Klíčová slova

proudový konvektor, napěťový konvektor, DBTA, FDBTA, aktivní filtr, autonomní obvod, oscilátor

Abstract

This master's thesis deals with the advanced universal modern active elements, such as the current and voltage conveyors. The problem with small bandwidth has been fixed due to the quick development in recent years. Current and voltage conveyors are still being researched. The good properties of conveyors promise their possible commercial usage in the future. For the research of current conveyors we can use parts of other integrated circuits and thus get elements with similar properties. This thesis suggests how to make an active filter using the DBTA and FDBTA elements which were created by “combination” of the universal current and voltage conveyor. Simulations were carried out on selected circuits containing the DBTA to verify their properties. It was for finding out about their behaviour in real applications that the circuits were constructed. This enabled the comparison of the results acquired from the simulation programs with the ideal behaviour of the elements and with the models simulating real properties against the values acquired by measurements of the circuits.

Keywords

current conveyor, voltage conveyor, DBTA, FDBTA, active filter, autonomous circuit, oscillator

VENCÁLEK, R. *Univerzální aktivní prvky a jejich využití v kmitočtových filtrech*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 68 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Norbert Herencsár.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „*Univerzální aktivní prvky a jejich využití v kmitočtových filtrech*“ 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 14. 5. 2009

.....
(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Norbertu Herencsárovi za příkladné vedení a za odbornou pomoc při řešení problémů při jejím zpracování. Mé díky patří také všem autorům literatury a programů které jsem při její tvorbě použil.

V Brně dne 14. 5. 2009

.....
(podpis autora)

Obsah

1	Úvod	8
2	Teorie kmitočtových filtrů a oscilátorů	9
2.1	Kmitočtové filtry.....	9
2.1.1	<i>Základní vlastnosti kmitočtových filtrů</i>	9
2.1.2	<i>Typy kmitočtových filtrů podle použitých stavebních prvků</i>	9
2.1.3	<i>Typy kmitočtových filtrů podle přenášeného pásma</i>	10
2.1.4	<i>Přenos a přenosová funkce kmitočtových filtrů</i>	11
2.1.5	<i>Typy kmitočtových filtrů podle použitých stavebních prvků</i>	12
2.2	Oscilátory	13
2.2.1	<i>Základní vlastnosti oscilátorů</i>	13
2.2.2	<i>Typy oscilátorů podle použitých stavebních prvků</i>	13
3	Proudové konvejory	14
3.1	Historie proudových konvejsorů	14
3.2	Zobecněný tříbranový proudový konvejsor	14
3.3	Zobecněný čtyřbranový proudový konvejsor.....	15
3.4	Univerzální proudový konvejsor	16
3.4.1	<i>Vnitřní struktura UCC</i>	19
3.5	Komerčně dostupné prvky pro realizaci konvejsorů	20
4	Napět'ové konvejory	22
4.1	Historie napět'ových konvejsorů	22
4.2	Zobecněný tříbranový napět'ový konvejsor	22
4.3	Zobecněný čtyřbranový napět'ový konvejsor.....	23
4.4	Univerzální napět'ový konvejsor	24
4.4.1	<i>Vnitřní struktura UVC</i>	26
4.5	Princip duality napět'ových konvejsorů.....	26
5	Transkonduktanční zesilovač OTA	27
6	Univerzální aktivní prvky	28
6.1	Prvek DBTA	28
6.2	Prvek FDBTA.....	30
7	Návrh a simulace filtrů s DBTA	32
7.1	Úplná admitanční síť.....	32
7.2	Navržené autonomní obvody z úplné admitanční sítě	32
7.3	Návrh filtrů metodou autonomních obvodů	34
7.4	Výsledky simulací filtrů s DBTA	36
7.5	Statistická analýza „Monte Carlo“	38
7.6	Optimalizace filtru	40
7.7	Změna činitele jakosti filtru.....	42
7.8	Citlivostní analýza filtrů s prvkem DBTA	43
8	Praktická realizace filtrů s DBTA	47
	Filtr z autonomního obvodu 1 – pásmová propust 2	47
	Filtr z autonomního obvodu 1 – změna činitele jakosti Q PP2.....	48

9	Návrh a simulace oscilátoru DBTA.....	50
9.1	Návrh oscilátoru metodou autonomních obvodů.....	50
9.2	Simulace oscilátoru s DBTA.....	51
10	Návrh a simulace pásmové zadržky FDBTA	52
10.1	Návrh pásmové zadržky metodou autonomních obvodů	52
10.2	Simulace pásmové zadržky s FDBTA.....	53
11	Závěr	54
	Literatura.....	55
	Seznam příloh	59

1 Úvod

V dnešní době probíhá rychlý vývoj aktivních prvků s cílem zlepšit jejich vlastnosti jako jsou šířka pásma, odstup signál šum, napájecí napětí a další. Ke slovu se dostávají stále častěji konvejoy a to proudové či napěťové. Proudové konvejoy se samostatně komerčně téměř nevyrábí ale využitím části integrovaných obvodů lze některé varianty proudových konvejoy nahradit. Vznikají tak obvody s přibližně stejnými vlastnostmi. Různými kombinacemi konvejoy s dalšími prvky jako transkonduktanční zesilovače OTA můžou vznikat nové aktivní prvky. Některé z nich, DBTA (*Differential-input Buffered and Transconductance Amplifier*) a FDBTA (*Fully DBTA*) jsou rozebírány v této práci. Vzhledem ke svým kvalitám je jen otázkou času než se proudové konvejoy začnou komerčně vyrábět. Tyto moderní prvky mají velké využití také ve filtračních obvodech, mohou sloužit jako oddělovače proudových a napěťových obvodů, je to náhrada za klasické operační zesilovače, mohou sloužit také jako U/I převodník. Jejich prvotní nedostatek, omezení kmitočtu zpracovávaných signálů, postupně mizí díky rychlému vzestupu technologií a vývoji.

Cílem této diplomové práce je prostudovat vlastnosti a možnosti těchto prvků. Budou navrženy kmitočtové filtry a oscilátory s DBTA nebo FDBTA. Vlastnosti navržených struktur budou ověřeny pomocí simulace v programech SNAP a OrCAD PSpice. Vybraný typ filtru bude podroben statistické a citlivostní analýze a optimalizován v PSpice. Bude také ukázána změna činitele jakosti navržených filtrů. Vybraný filtr bude také experimentálně zkonstruován a tak budou ověřeny jeho reálné vlastnosti.

2 Teorie kmitočtových filtrů a oscilátorů

2.1 Kmitočtové filtry

2.1.1 Základní vlastnosti kmitočtových filtrů

Kmitočtové filtry jsou lineární dvojbrany, které mají za úkol propustit harmonické složky signálu v určitém rozsahu kmitočtů bez nebo v námi stanovených mezích útlumu, tento rozsah se nazývá propustné pásmo. Všechny ostatní harmonické složky jsou silně (případně na námi stanovenou hodnotu útlumu) potlačeny, tento rozsah nazýváme nepropustné pásmo. Tyto hodnoty obvykle lze vyjádřit pomocí tzv. modulové (amplitudové) charakteristiky (obr. 2.1).

V praxi je při použití filtrů velkým problémem, že při průchodu signálu dochází k časovému zpoždění, to je důsledkem fázových posuvů, zpoždění navíc často bývá značně nelineární což má za následek problémy při praktickém použití filtrů (v některých případech je tato vlastnost žádoucí např. ve zpožďovacích obvodech). Tuto závislost vyjadřujeme fázovou kmitočtovou charakteristikou (obr. 2.2).

Kmitočtové filtry se používají prakticky všude kde je třeba zpracovávat signály. Např. z radiových vln, které se nám dostávají do radia (televize) je třeba oddělit pásmo jedné stanice pomocí pásmové propusti. V měřící technice se používají selektivní přístroje (mikro-voltmetry). V elektroakustice se využívá dolních propustí k záznamů pouze „užitečných“ tedy námi slyšitelných vln. Dolní propust funguje také jako antialiasingový filtr bez kterého by „nebylo možné“ vzorkovat [11].

2.1.2 Typy kmitočtových filtrů podle použitých stavebních prvků

Kmitočtové filtry můžeme rozdělit dle způsobu jejich realizace. Existují filtry realizované z pasivních prvků, integrovaných obvodů a filtry číslicové. Způsob realizace ovlivňuje vlastnosti daného filtru jako je jejich možné pracovní kmitočtové pásmo, odolnost proti rušení a to jak vnějšímu tak i tomu co produkuje samotný filtr. Filtry dělíme i dle použitých stavebních prvků na:

Pasivní filtry RC:

Díky tomu že jsou sestaveny pouze z rezistorů a kondenzátorů mají nízkou cenu což také odpovídá jejich kvalitě (v praxi se používají pouze RC filtry 1.řádu).

Pasivní filtry RLC:

Jsou velmi univerzální avšak kvůli nepříznivým vlastnostem cívky jako je její velikost a to zejména u použití na nízkých kmitočtech tak i cena, což je v dnešní době jeden z nejdůležitějších parametrů, nejsou tak hojně používány.

Pasivní filtry LC:

Jejich nevýhoda spočívá stejně jako u filtru RLC na vlastnostech cívky.

Filtry ACR (aktivní filtry RC):

Nahrazují filtry LRC, ale místo velkých a drahých cívek používají aktivní prvky, nejčastěji operační zesilovače (OZ). Dříve byly u OZ problémy s možným použitím ve vysokých kmitočtech v poslední době ale velký rozvoj techniky umožnil použití těchto filtrů i do desítek MHz. Velkým problémem ale zůstává nutnost napájení těchto aktivních prvků.

Číslicové filtry:

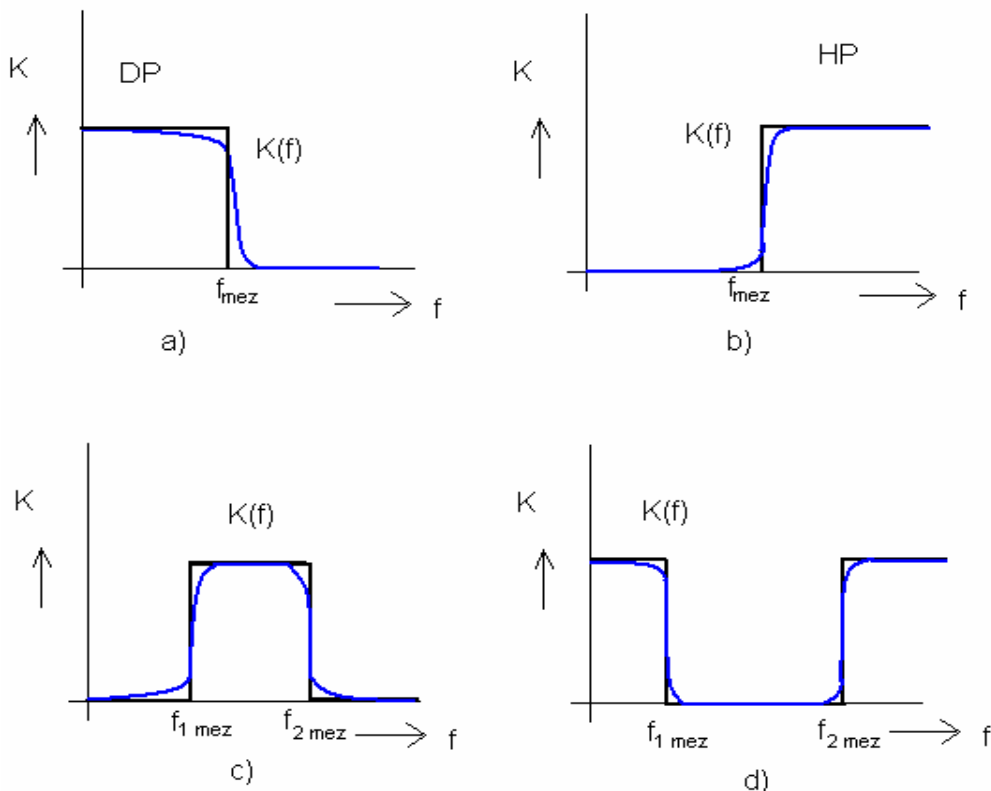
Využívají mikroprocesory a jejich výpočetních schopností, výhodou je možnost změny filtru. Nevýhodou naopak omezená výpočetní schopnost při velkých kmitočtech (dnes už částečně vyřešeno) a vznik chyb zaokrouhlováním a kvantováním.

Existuje také celá řada dalších typů: se spínanými kapacitami (ASC), s povrchovou vlnou (PAV), s piezoelektrickými rezonátory, elektromechanické filtry a další.

2.1.3 Typy kmitočtových filtrů podle přenášeného pásma

Kmitočtové filtry můžeme dle přenášeného pásma dělit na:

- Dolní propust
- Horní propust
- Pásmovou propust
- Pásmovou zadrž
- Fázovací článek



Obr. 2.1: Modulové charakteristiky:

a) dolní propusti, b) horní propusti, c) pásmové propusti a d) pásmové zadrž (černě jsou znázorněny ideální a modře reálné průběhy).

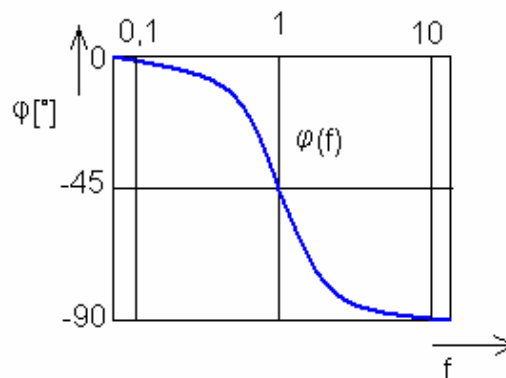
2.1.4 Přenos a přenosová funkce kmitočtových filtr

Prochází-li přes kmitočtový filtr harmonický signál s parametry f , U , φ bude mít signál na výstupu stejnou frekvenci ale změní se hodnota napětí a fáze. Přenos napětí (modul přenosu K) takovýmto filtrem můžeme dle [6] popsat pomocí rovnice (2.1).

$$\begin{aligned}
 K(p) &= \frac{U_{out}}{U_{in}} = \frac{N(p)}{D(p)} = \frac{a_m p^m + a_{(m-1)} p^{(m-1)} + \dots + a_1 p + a_0}{b_n p^n + b_{(n-1)} p^{(n-1)} + \dots + b_1 p + b_0} = \\
 &= K_0 \frac{\prod (p - n_i)}{\prod (p - p_i)}
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

kde $N(p)$ a $D(p)$ jsou mnohočleny komplexní proměnné kde $p = j\omega$ a n_i jsou nulové body a p_i póly přenosové funkce filtru.

$K(j\omega)$ běžně popisujeme pomocí modulové a argumentové charakteristiky $K(\omega)$ a $\varphi(\omega)$. K je bezrozměrná hodnota často se uvádí v logaritmické míře $K [\text{dB}] = 20 \log K$. Příklady modulových charakteristik jsou na obr. 2.1, příklad fázové charakteristiky pak na obr. 2.2.



Obr.2.2: Příklad fázové charakteristiky.

2.1.5 Typy kmitočtových filtrů podle použitých stavebních prvků

Při realizaci filtrů musíme mít představu o tom jaké vlastnosti by měl náš filtr mít. A až podle nich bychom měli zvolit způsob jeho návrhu, použití pasivních prvků atd. Musíme tedy znát zejména požadavky na:

Modulovou charakteristiku filtru:

Tedy pásmo propustnosti a nepropustnosti, strmost, zvlnění v propustném a nepropustném pásmu.

Fázovou charakteristiku filtru:

Většinou požadujeme lineární v pásmu propustnosti filtru (vliv na složky silně potlačené je pro nás nepodstatný).

Rozsah vstupního signálu:

V jakém rozmezí budou hodnoty vstupního signálu a to jak maximální (hrozí zničení některých prvků) tak minimální (nesprávná funkce).

Odolnost vůči rušivým signálům:

Důležité zejména pokud bude filtr pracovat v prostředí s vysokou hodnotou elektromagnetického rušení. Tomu musíme přizpůsobit součástky z hlediska jejich odolnosti proti šumu i samotný návrh filtru (rozmístění součástek, dodatečné stínění).

Řád filtru:

Maximální hodnota indexu n z rovnice (2.1). Platí že čím vyšší řád tím se přenosová charakteristika stává strmější, zvýší se i potlačení v nepropustném pásmu. Tím se ale zvyšuje i složitost filtru (tedy i cenu) v případě číslicových filtrů výpočetní náročnost. V praxi tedy musíme volit co nejnižší možný, ale takový aby stále splňoval naše požadavky.

Citlivost:

Vliv změny parametrů pasivních i aktivních prvků v obvodu na změnu vlastností filtru. A to relativní citlivosti tedy vliv na změnu mezního kmitočtu a činitele jakosti filtru. A zobecněná citlivostní funkce která ukazuje vliv jednotlivých prvků na přenosovou funkci obvodu.

Podavky na filtr mohou být různé podle zamýšleného použití a tedy i nároky na jednotlivé vlastnosti mohou být různé. Zde je pouze uveden přehled „nejdůležitějších“ z nich. Některé také budou rozebrány blíže v dalších kapitolách.

2.2 Oscilátory

2.2.1 Základní vlastnosti oscilátorů

Oscilátor patří mezi generátory [26], což jsou obvody které vyrábí netlumené periodické kmity bez vnějšího buzení. Oscilátor generuje harmonické kmity zatímco druhá skupina generátorů tzv.funkční generátory mají na výstupu tvarové kmity (pila, trojúhelník,). Oscilátor mění stejnosměrné napětí (napájení) na střídavé napětí (výstup). Obecně se oscilátor skládá ze zesilovacího prvku a zpětnovazebního obvodu. V této práci bude ukázán návrh oscilátoru s prvky R a C za použití moderních aktivních prvků (proudový konvektor a transkonduktanční zesilovač).

2.2.2 Typy oscilátorů podle použitých stavebních prvků

Obdobně jako kmitočtové filtry můžeme i oscilátory rozdělit dle použitých stavebních prvků na:

Oscilátory RC:

V zpětnovazebním obvodu využívají různé typy RC článků. Zpravila využívají operační zesilovače.

Oscilátory ARC:

Oproti RC oscilátorům mají snížené zkreslení výstupního signálu za pomoci filtrace [11] selektivní pásmovou propustí. Hodí se i pro velmi nízké kmitočty(omezení pouze vlastnostmi ARC filtru).

Oscilátory LC:

Stejně jako u filtrů na nízkých kmitočtech by bylo potřeba relativně velké a drahé cívky. Proto je jejich využití „možné“ až na vyšších kmitočtech kde na zesílení využívají transistory.

Krystalové oscilátory:

Oproti předchozím oscilátorům má tento velmi velkou stabilitu generovaného signálu. L a C v klasických oscilátorech jsou teplotně závislé proto je u nich stabilita generovaného signálu menší. Základ tvoří destička krystalu umístěná mezi dvě elektrody ta je za pomoci elektrického pole vybudena k vibracím.

3 Proudové konvejoy

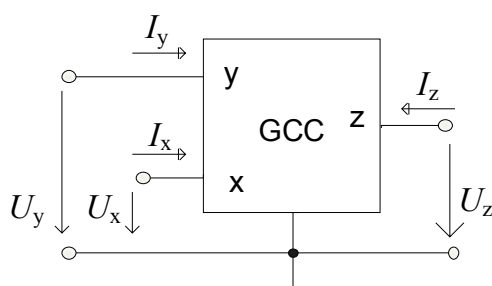
3.1 Historie proudových konvejořů

Konvejoy jsou aktivní mnohobrany, které poskytují dle určitých pravidel přenosy mezi svými branami. S proudovým konvejořem první generace CCI (*Current Conveyor*) [24] přišli v roce 1968 Smith a Sedra o dva roky později pak s proudovým konvejořem druhé generace CCII [25]. Třetí generace CIII [9] pak byla Fabrem představena až v roce 1995. Vznikly i různé varianty např. CCCII (*Second Generation Current Controlled Conveyor*) kde se dá řídit proudový přenos podobně jako u OTA, dále třeba proudové konvejoy s diferenčním vysokoimpedančním vstupem DVCC (*Differential Voltage Current Conveyor*) [8], DDCC (*Differential Difference Current Conveyor*) [8], konvejoy se symetrickým výstupem jako CCII+/- . V roce 2000 přišel D. Bečvář a K. Vrba s univerzálním konvejořem UCC (*Universal Current Conveyor*) [15], [3], který může simulovat všechny typy proudových konvejořů s jedním proudovým vstupem x.

Proudové konvejoy stále ještě komerčně nevyrábí což se řeší využíváním částí jiných obvodů. To samozřejmě není ideální tyto obvody nejsou tak kvalitní, nemají potřebnou šířku pásma či zesílení ale pro orientační měření dostačují. Komerčně se vyrábí pouze CCII a to jenom jako součást složitějšího obvodu např.: firmy Texas Instruments OPA861 a Analog Devices se svým AD844.

3.2 Zobecněný tříbranový proudový konvejoř

Zobecněný proudový konvejoř GCC (*Generalized Current Conveyor*) [15] byl navržen pro usnadnění návrhu kmitočtových filtrů s těmito prvky. Obsahuje jednu vstupní nízkoimpedanční proudovou svorku x, jeden vysokoimpedanční napěťový vstup y, a proudový výstup z.



Obr. 3.1: Schématická značka tříbranového GCC.

Tento obvod lze popsat maticí:

$$\begin{bmatrix} U_x \\ I_y \\ I_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \alpha & 0 \\ \beta & 0 & 0 \\ \gamma & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_x \\ U_y \\ U_z \end{bmatrix}, \quad (3.1)$$

kde koeficienty α , β , γ představují:

α ...rozhoduje o tom zda je konvektor neinvertující CC ($\alpha = 1$) nebo invertující ICC ($\alpha = -1$)

β ...určuje generaci konvektoru: $\beta = -1$, jde o první generaci CCI, ICCI,
 $\beta = 0$, jde o druhou generaci CCII, ICCII,
 $\beta = 1$, jde o třetí generaci CCIII, ICCIII.

γ ...určuje zda se jedná o pozitivní konvektor $\gamma = 1$ (CCI+, ICCI+, CCII+....) nebo negativní konvektor $\gamma = -1$ (CCI-, ICCI-, CCII-....).

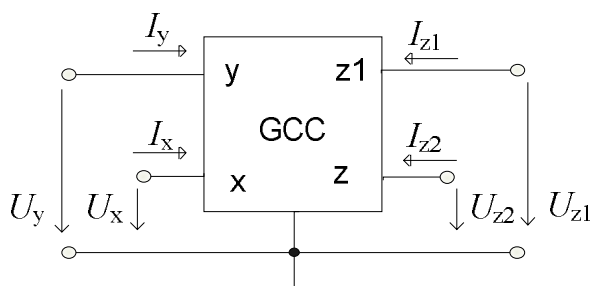
Přehled možností volby koeficientů je uveden v tab. 3.1.

Tab. 3.1: Možné způsoby volby koeficientů pro GCC [3]

Koeficient			Druh konvektoru
α	β	γ	
1/-1	1	1	CCI+ / ICCI+
1/-1	1	-1	CCI- / ICCI-
1/-1	0	1	CCII+ / ICCII+
1/-1	0	-1	CCII- / ICCII-
1/-1	-1	1	CCIII+ / ICCIII+
1/-1	-1	-1	CCIII- / ICCIII-

3.3 Zobecněný čtyřbranový proudový konvektor

Pokud ke zobecněnému tříbranovému konvektoru přidáme jednu proudovou svorku z , dostaneme zobecněný čtyřbranový GCC. Jeho schematická značka je na obr. 3.2. Volbou koeficientů z matice 3.2 můžeme, obdobně jako v kap. 3.2, získat proudové konvektory s tím rozdílem, že máme k dispozici koeficienty γ_1 a γ_2 které mohou nabývat kombinací: 1/1; 1/-1; -1/-1.



Obr. 3.2: Schematická značka čtyřbranového GCC.

Tento obvod lze popsat maticí:

$$\begin{bmatrix} U_x \\ I_y \\ I_{z1} \\ I_{z2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \alpha & 0 & 0 \\ \beta & 0 & 0 & 0 \\ \gamma_1 & 0 & 0 & 0 \\ \gamma_2 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_x \\ U_y \\ U_{z1} \\ U_{z2} \end{bmatrix}, \quad (3.2)$$

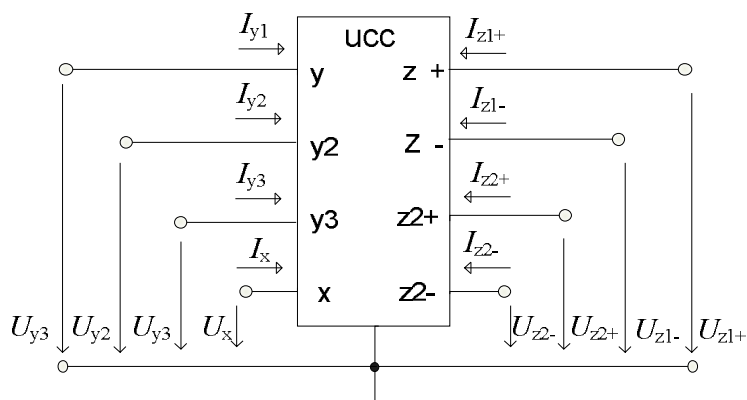
Přehled možností volby koeficientů je uveden v tab. 3.2.

Tab. 3.2: Možné způsoby volby koeficientů pro GCC [3]

Koeficient				Druh konvejeoru
α	β	γ_1	γ_2	
1/-1	-1	1	1	CCI+/+ / ICCI+/+
1/-1	-1	1	-1	CCI+/- / ICCI+/-
1/-1	-1	-1	-1	CCI-/- / ICCI-/-
1/-1	0	1	1	CCII+/+ / ICCII+/+
1/-1	0	1	-1	CCII+/- / ICCII+/-
1/-1	0	-1	-1	CCII-/- / ICCII-/-
1/-1	1	1	1	CCIII+/+ / ICCIII+/+
1/-1	1	1	-1	CCIII+/- / ICCIII+/-
1/-1	1	-1	-1	CCIII-/- / ICCIII-/-

3.4 Univerzální proudový konvejeor

Univerzální proudový konvejeor UCC (*Universal Current Conveyor*) [3], [15] umožňuje realizovat všechny typy dosavadních proudových konvejeorů. Schematická značka je na obr. 3.3. V tab. 3.4 jsou uvedeny možné klasické zapojení s jednoduchým vysokoimpedančním vstupem, v tab. 3.3 jsou pak možnosti realizace konvejeorů s rozdílovým vysokoimpedančním vstupem (DVCC, DDCC).


Obr. 3.3: Schématická značka UCC.

Obecně je UCC definován jako osmibrán. Má tři vysokoimpedanční vstupy (Y_1 , Y_2 , Y_3). Tab. 3.4 a 3.5 obsahují moduly impedancí jednotlivých vstupů. Y_1 a Y_3 jsou rozdílové a Y_2 a Y_3 jsou součtové vstupy. Je jeden nízkoimpedanční vstup X a čtyři proudové výstupy Z_{1+} , Z_{2+} , Z_{1-} a Z_{2-} . Výstupy Z_{1-} , Z_{2-} jsou inverzní k výstupům Z_{1+} , Z_{2+} . Vztahy mezi svorkami v obvodu popisuje matice (3.3).

$$\begin{bmatrix} U_x \\ I_{y1} \\ I_{y2} \\ I_{y3} \\ I_{z1+} \\ I_{z2+} \\ I_{z1-} \\ I_{z2-} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_x \\ U_{y1} \\ U_{y2} \\ U_{y3} \\ U_{z1+} \\ U_{z2+} \\ U_{z1-} \\ U_{z2-} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Realizace různých typů konvektorů se provádí pomocí vhodného propojení svorek UCC. Tab.3.4 uvádí možnosti realizace klasických konvektorů s vysokoimpedančním vstupem a tab. 3.3 uvádí možnosti realizace konvektorů s rozdílovým vstupem [3].

Tab. 3.3: Možnosti realizace konvektorů s rozdílovým vstupem [3]

Typ konvektoru	Vstup	Výstup	Spojené vývody	Uzemněné vývody
DVCCI-	Y ₁ - vstup Y ₁ Y ₂ - vstup Y ₂	Z ₁ - výstup Z	Y ₁ , Z ₁₊ Y ₂ , Z ₂₊	Y ₃ , Z ₂₋
DVCC	Y ₁ - vstup Y ₁ Y ₂ - vstup Y ₂	Z ₁₊ - výstup Z Z ₁₋ - výstup Z-		Y ₃ Z ₂₊ , Z ₂₋
DVCCIII+	Y ₁ - vstup Y ₁ Y ₂ - vstup Y ₂	Z ₁₊ - výstup Z	Y ₁ , Z ₁₋ Y ₂ , Z ₂₋	Y ₃ , Z ₂₊
DDCC-	Y ₁ - vstup Y ₁ Y ₂ - vstup Y ₂ Y ₃ - vstup Y ₃	Z ₁ - výstup Z		Z ₁₊ , Z ₂₊ , Z ₂₋
DDCC +	Y ₁ - vstup Y ₁ Y ₂ - vstup Y ₂ Y ₃ - vstup Y ₃	Z ₁₊ - výstup Z		Z ₂₊ , Z ₁₋ , Z ₂₋
DDCC +/-	Y ₁ - vstup Y ₁ Y ₂ - vstup Y ₂ Y ₃ - vstup Y ₃	Z ₁₊ - výstup Z Z ₁₋ - výstup Z-		Z ₂₊ , Z ₂₋

Tab. 3.4: Možnosti realizace klasických konvektorů s vysokoimpedančním vstupem [3]

Typ konvektoru	Vstup	Výstup	Spojené vývody	Uzemněné vývody
CCI-	Y_1 – vstup Y	Z_{1-} – výstup Z	Y_1, Z_{1+}	Y_2, Y_3 Z_{2+}, Z_{2-}
CCI+	Y_1 – vstup Y	Z_{2+} – výstup Z	Y_1, Z_{1+}	Y_2, Y_3 Z_{1-}, Z_{2-}
CCI+/-	Y_1 – vstup Y	Z_{2+} – výstup Z Z_{1-} – výstup Z-	Y_1, Z_{1+}	Y_2, Y_3 Z_{2-}
CCII-	Y_1 – vstup Y	Z_{1-} – výstup Z		Y_2, Y_3 Z_{1+}, Z_{2+}, Z_{2-}
CCII+	Y_1 – vstup Y	Z_{1+} – výstup Z		Y_2, Y_3 Z_{2+}, Z_{1-}, Z_{2-}
CCII+/-	Y_1 – vstup Y	Z_{1+} – výstup Z Z_{1-} – výstup Z-		Y_2, Y_3 Z_{2+}, Z_{2-}
CCIII-	Y_1 – vstup Y	Z_{2-} – výstup Z	Y_1, Z_{1-}	Y_2, Y_3 Z_{1+}, Z_{2+}
CCIII+	Y_1 – vstup Y	Z_{1+} – výstup Z	Y_1, Z_{1-}	Y_2, Y_3 Z_{2+}, Z_{2-}
CCIII+/-	Y_1 – vstup Y	Z_{1+} – výstup Z Z_{2-} – výstup Z-	Y_1, Z_{1-}	Y_2, Y_3 Z_{2+}
ICCI-	Y_2 – vstup Y	Z_{1-} – výstup Z	Y_2, Z_{1+}	Y_1, Y_3 Z_{2+}, Z_{2-}
ICCI+	Y_2 – vstup Y	Z_{2+} – výstup Z	Y_2, Z_{1+}	Y_1, Y_3 Z_{1-}, Z_{2-}
ICCI+/-	Y_2 – vstup Y	Z_{2+} – výstup Z Z_{1-} – výstup Z-	Y_2, Z_{1+}	Y_1, Y_3 Z_{2-}
ICCI-	Y_2 – vstup Y	Z_{1-} – výstup Z		$Y_1, Y_3, Z_{1+}, Z_{2+}, Z_{2-}$
ICCI+	Y_2 – vstup Y	Z_{1+} – výstup Z		Y_1, Y_3 Z_{2+}, Z_{1-}, Z_{2-}
ICCI+/-	Y_2 – vstup Y	Z_{1+} – výstup Z Z_{1-} – výstup Z-		Y_1, Y_3 Z_{2+}, Z_{2-}
ICCI-	Y_2 – vstup Y	Z_{2-} – výstup Z	Y_2, Z_{1-}	Y_1, Y_3 Z_{1+}, Z_{2+}
ICCI+	Y_2 – vstup Y	Z_{1+} – výstup Z	Y_2, Z_{1-}	Y_1, Y_3 Z_{2+}, Z_{2-}
ICCI+/-	Y_2 – vstup Y	Z_{1+} – výstup Z Z_{2-} – výstup Z-	Y_2, Z_{1-}	Y_1, Y_3 Z_{2+}

Některé prvky, které lze s UCC realizovat dříve neexistovaly: (ICCI–; ICCI+; ICCI+/-; ICCII–; ICCII+; ICCII+/-), což znovu dokazuje univerzálnost tohoto prvku.

UCC byl vyroben pod označením UCCX–0349 a poté ve vylepšené formě jako 0520 UCC–N1B. Oba tyto integrované obvody obsahují kromě UCC také klasický CCII+/-, což zvyšuje využití obvodu.

Obvod 0520 UCC–N1B byl vyroben v Design Centre firmy AMI Semiconductors technologií CMOS 0,35 μm . Tento obvod je napájen napětím o velikosti $\pm 1,65\text{ V}$ maximální proud do libovolné svorky je $\pm 0,7\text{ mA}$ a vstupní napětí (lineární oblast) je $\pm 1\text{ V}$ [15].

V tab. 3.5 jsou uvedeny moduly impedance svorek UCC, v tab. 3.6 pak hodnoty modulů impedance CCII+/-, který je jak bylo řečeno součástí integrovaného obvodu společně s UCC.

Tab. 3.5: *Moduly impedance svorek UCC [15]*

f	Z_X	Z_{Y1}	Z_{Y2}	Z_{Y3}	Z_{Z1+}	Z_{Z1-}	Z_{Z2+}	Z_{Z2-}
10 kHz	0,7 Ω	4,4 M Ω	4,4 M Ω	4,4 M Ω	710 k Ω	1,03M Ω	704 k Ω	823 k Ω
1 MHz	8,7 Ω	45 k Ω	45 k Ω	45 k Ω	35 k Ω	35 k Ω	31 k Ω	35 k Ω
10 MHz	76 Ω	5,3 k Ω	5,3 k Ω	5,3 k Ω	2,3 k Ω	2,4 k Ω	2,3 k Ω	2,4 k Ω

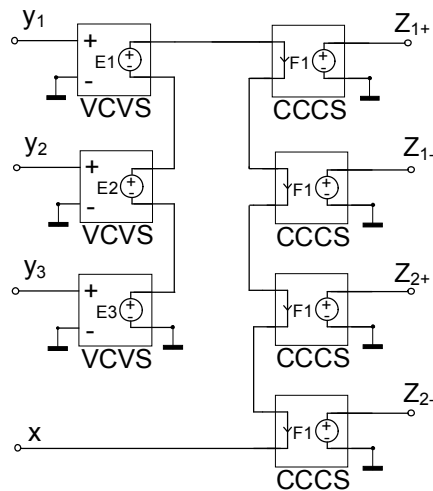
Tab. 3.6: *Moduly impedance svorek CCII+/- [15]*

f	Z_X	Z_y	Z	Z-
10 kHz	2,5 Ω	2,8 M Ω	660 k Ω	1,11 M Ω
1 MHz	6,0 Ω	27 k Ω	41 k Ω	40 k Ω
10 MHz	196 Ω	3,8 k Ω	2,6 k Ω	2,5 k Ω

Univerzálnost tohoto konvejeoru sice trochu zhoršila jeho kmitočtové vlastnosti, ale toto je bohatě vynahrazeno právě jeho univerzálností. Za toto zhoršení může zejména velký počet vývodů, díky kterým se zvýšila parazitní kapacita. [3], [15].

3.4.1 Vnitřní struktura UCC

Univerzální proudový konvejeor se skládá ze zdrojů napětí řízených napětím VCVS (*Voltage Controlled Voltage Source*) označených E1 až E3 a zdrojů proudu řízených proudem CCCS (*Current Controlled Current Source*), označených F1 až F4. Jeho struktura [3] je zachycena na obr. 3.3. E1 a E3 mají přenos 1 zatímco E2 -1 viz. matice 3.3. Jedná se pouze o ideální model a nejsou uvažovány vstupní a výstupní impedance, parazitní kapacity svorek, kmitočtová závislost zdrojů a další praktické vlastnosti.



Obr. 3.4: Ideální model UCC.

3.5 Komerčně dostupné prvky pro realizaci konvejsorů

AD844

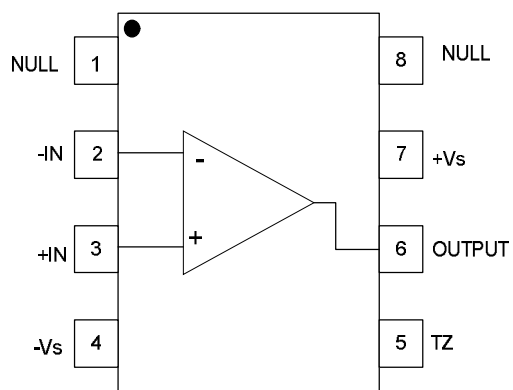
AD844 je velmi rychlý operační zesilovač, který na výstupu obsahuje napěťový sledovač (Voltage Buffer). Jak už bylo řečeno, umožňuje realizovat CCII+. Na obr. 3.5 a je uvedena schematická značka tohoto prvku v katalogového listu. Pro realizaci CCII+ využijeme svorku $-IN$ jako X , svorku $+IN$ jako Y a svorku TZ jako Z . Výstup (output) je napěťový sledovač pokud ho nebudeme využívat je potřeba ho uzemnit přes velký rezistor aby neovlivňoval funkci námi vytvořeného obvodu. Vývody NULL necháme nezapojené. Příklad zapojení je v přílohách. Charakteristické vlastnosti obvodu (další informace jsou k dispozici na webu výrobce www.analog.com) [28]:

- šířka pásma: 60MHz
- rychlost přeběhu: 2000 V/ μ s
- nízký klidový proud: 6.5 mA
- chyba zesílení 0.03% (při 4.4 MHz)
- chyba fáze 0.158% (při 4.4 MHz)

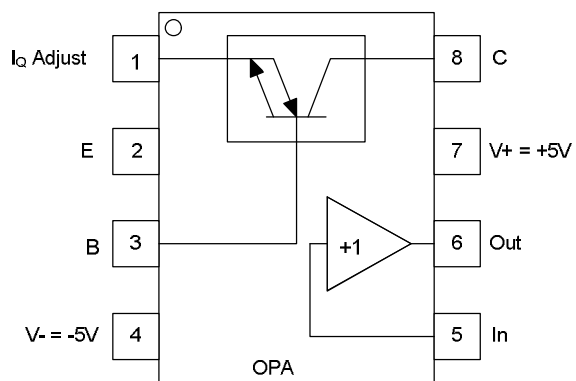
OPA860

OPA860 [29], obdobně jako AD844, umožňuje realizovat s určitými nedostatky CCII+. Značení vývodů je na obr. 3.5 b. Svorka E plní funkci X , B funkci Y a C funkci Z . Svorku I_Q je potřeba připojit na záporné napájecí napětí (svorka VEE). Na svorkách 5 a 6 má obvod zabudovaný napěťový sledovač, který využijeme pro prvek DBTA. Podrobné informace o obvodu jsou na k dispozici na adrese výrobce <http://www.ti.com/>. Některé typické hodnoty jsou uvedeny zde:

- šířka pásma: 80MHz
- rychlost přeběhu: 900 V/ μ s
- externí řízení I_Q
- nízký klidový proud: 11.2 mA
- velikost transkonduktance (95mA/V)



a)



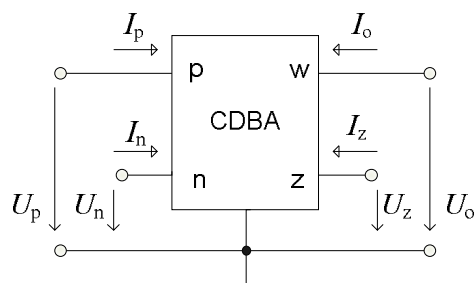
b)

Obr.3.5: Zapojení obvodů: a) AD844 a b) OPA860.

4 Napěťové konvejory

4.1 Historie napěťových konvektorů

Stejně jako proudové konvejory i napěťové jsou aktivní mnohobrany, které poskytují dle určitých pravidel přenosy mezi svými branami. První byl teoreticky představen v roce 1982 a jeho autoři jsou Dostál a Pospíšil. V roce 1999 představili autoři Acar a Ozogus „první“ z řady napěťových konvektorů a to CDDBA (*C*urrent *D*ifferential *B*uffered *A*mplifier) [2]. Schématická značka tohoto prvku je na obr. 4.1. Jeho maticový popis představuje rovnice (4.1). Vstupy *n* a *p* jsou nízkoimpedanční rozdílové proudové vstupy, *z* je vstupně - výstupní, *w* je vysokoimpedanční výstup. Napěťové konvejory mohou pracovat v obvodech při napěťovém, proudovém i smíšeném módu.



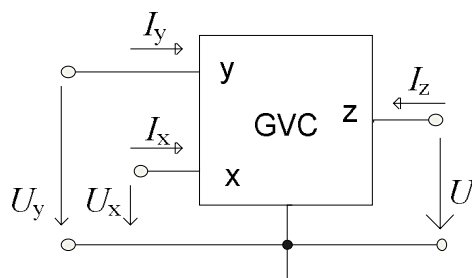
Obr. 4.1: Schématická značka CDDBA.

Tento obvod lze popsat maticí:

$$\begin{bmatrix} I_z \\ U_o \\ U_p \\ U_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_z \\ I_o \\ I_p \\ I_n \end{bmatrix}. \quad (4.1)$$

4.2 Zobecněný tříbranový napěťový konvektor

Zobecněný napěťový konvektor GVC (*G*eneralized *V*oltage *C*onveyor) [20]. byl navržen pro usnadnění návrhu kmitočtových filtrů s těmito prvky. Jeho funkce vychází z GCC z kapitoly 3.2.



Obr. 4.2: Schématická značka tříbranového GVC.

Tento obvod lze popsat maticí:

$$\begin{bmatrix} I_x \\ U_y \\ U_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \alpha & 0 \\ \beta & 0 & 0 \\ \gamma & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_x \\ I_y \\ I_z \end{bmatrix}, \quad (4.2)$$

kde koeficienty α, β, γ představují:

α ... (přenos proudu ze svorky y do svorky x)

rozhoduje o tom zda je konvektor neinvertující VC ($\alpha = 1$) nebo invertující IVC ($\alpha = -1$)

β ... (přenos napětí ze svorky x na svorku y)

určuje generaci konvektoru: $\beta = -1$, jde o první generaci VCI, IVCI,

$\beta = 0$, jde o druhou generaci VCII, IVCII,

$\beta = 1$, jde o třetí generaci VCIII, IVCIII.

γ ... (přenos napětí ze svorky x na svorku z)

určuje zda se jedná o pozitivní konvektor $\gamma = 1$ (VCI+, IVCI+, VCII+....) nebo

negativní konvektor $\gamma = -1$ (VCI-, IVCI-, VCII-....).

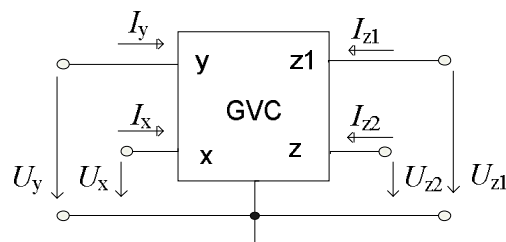
Přehled možností volby koeficientů je uveden v tab. 4.1. znovu je vidět podobnost s GCC viz tabulka 3.1

Tab. 4.1: Možné způsoby volby koeficientů pro GVC [21]

Koeficient			Druh konvektoru
α	β	γ	
1/-1	1	1	VCI+ / IVCI+
1/-1	1	-1	VCI- / IVCI-
1/-1	0	1	VCII+ / IVCII+
1/-1	0	-1	VCII- / IVCII-
1/-1	-1	1	VCIII+ / IVCIII+
1/-1	-1	-1	VCIII- / IVCIII-

4.3 Zobecněný čtyřbranový napět'ový konvektor

Podle principu duality byl vytvořen také čtyřbranový napět'ový konvektor vychází z konvektoru z kapitoly 3.3. Jeho schématická značka je uvedena na obr 4.3.



Obr. 4.3: Schématická značka čtyřbranového GVC.

Tento obvod lze popsat maticí:

$$\begin{bmatrix} I_x \\ U_y \\ U_{z1} \\ U_{z2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \alpha & 0 & 0 \\ \beta & 0 & 0 & 0 \\ \gamma_1 & 0 & 0 & 0 \\ \gamma_2 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_x \\ I_y \\ I_{z1} \\ I_{z2} \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

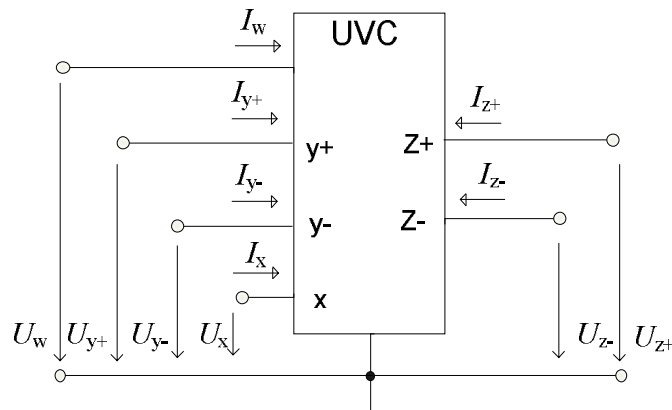
Přehled možností volby koeficientů je uveden v tab. 4.2.

Tab. 4.2: Možné způsoby volby koeficientů pro GCC [20]

Koeficient				Druh konveju
α	β	γ_1	γ_2	
1/-1	-1	1	1	VCI+/+ / IVCI+/+
1/-1	-1	1	-1	VCI+/- / IVCI+/-
1/-1	-1	-1	-1	VCI-/- / IVCI-/-
1/-1	0	1	1	VCII+/+ / IVCII+/+
1/-1	0	1	-1	VCII+/- / IVCII+/-
1/-1	0	-1	-1	VCII-/- / IVCII-/-
1/-1	1	1	1	VCIII+/+ / IVCIII+/+
1/-1	1	1	-1	VCIII+/- / IVCIII+/-
1/-1	1	-1	-1	VCIII-/- / IVCIII-/-

4.4 Univerzální napěťový konveju

Obdoba univerzálního proudového konveju je UVC (*Universal Voltage Conveyor*) [20]. Umožňuje vhodným propojením vstupů a výstupů realizovat napěťové konvejory všech generací a typů. UVC je definován jako šestihran. Má jeden vstup x , dva rozdílové proudové vstupy y_1 , y_2 a napěťové výstupy z (neinvertující z^+ , invertující z^-). Impedance nízkoimpedančních vstupů je v ideálním případě nulová to znemožňuje vytvořit konvejory první a třetí generace proto má UVC svorku w která v případě $\beta = -1$ bude propojena s invertujícím výstupem z^- , v případě $\beta = 1$ s neinvertujícím výstupem z^+ . Pokud by se jednalo druhou generaci $\beta = 0$ bude svorka w uzemněna. Schematická značka je na obr. 4.4.



Obr. 4.4: Schematická značka UVC.

Vztahy mezi svorkami v obvodu popisuje matice (4.4). Možnosti zapojení jsou uvedeny v tabulce 4.3 a 4.4 [20].

$$\begin{bmatrix} I_x \\ I_w \\ U_{y+} \\ U_{y-} \\ U_{z+} \\ U_{z-} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_x \\ U_w \\ I_{y+} \\ I_{y-} \\ I_{z+} \\ I_{z-} \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Tab. 4.3: Možnosti realizace klasických napěťových konvektorů [20]

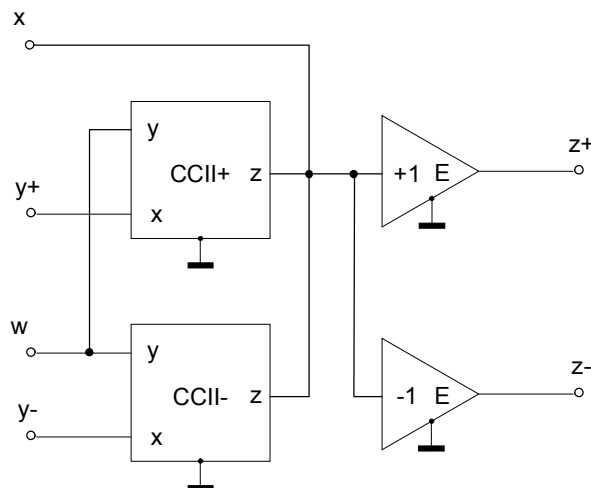
Typ konvektoru	Vstup	Výstup	Spojené vývody	Uzemněné vývody
VCI-	y+	z-	w, z+	-
VCI+	y+	z+	w, z+	-
VCI+/-	y+	z+, z-	w, z+	-
VCII-	y+	z-	-	w
VCII+	y+	z+	-	w
VCII+/-	y+	z+, z-	-	w
VCIII+/-	y+	z+, z-	w, z-	-
IVCI-	y-	z-	w, z+	-
IVCI+	y-	z+	w, z+	-
IVCI+/-	y-	z+, z-	w, z+	-
IVCII-	y-	z-	-	w
IVCII+	y-	z+	-	w
IVCII+/-	y-	z+, z-	-	w
IVCIII-	y-	z-	w, z-	-
IVCIII+	y-	z+	w, z-	-
IVCIII+/-	y-	z+, z-	w, z-	-

Tab. 4.4: Možnosti realizace konvektorů s rozdílovým vstupem [20]

Typ konvektoru	Vstup	Výstup	Spojené vývody	Uzemněné
DCVCI-	y+, y-	z-	-	w
DCVC+	y+, y-	z+	-	w
DCVC +/-	y+, y-	z+, z-	-	w

4.4.1 Vnitřní struktura UVC

Univerzální napěťový konvektor lze složit z proudových konvektorů CCII+, CCII- (viz kap. 3.2) a dvou napěťových sledovačů. Stejně jako v případě UCC i model na obr.4.5 je pouze ideální a tedy při simulacích vhodný pouze pro pochopení činnosti případně pro kontrolu správnosti zapojení [20].



Obr. 4.5: Ideální model UVC.

4.5 Princip duality napěťových konvektorů

K napěťovým konvektorům existují duální prvky (ve smyslu rovnosti proudů a napětí u duálních prvků a také opačných hodnot impedancí vstupů a výstupů vše je ukázáno na příkladu níže) a to jsou právě proudové konvektory, podle kterých můžeme definovat množství napěťových konvektorů např. k prvku CDBA (DCVC+ (*Differential Current Voltage Conveyor*)) je duální proudový konvektor DVCC+ (*Differential Voltage Current Conveyor*) [8]. Mezi DVCC a CDBA platí tyto duální vztahy [2]:

DVCC+ :

$$I_z = I_x \quad (\text{proud na výstupu } z \text{ se rovná proudu na vstupu } x)$$

$$I_{y1} = I_{y2} = 0 \quad (\text{proud na vstupech } y \text{ je nulový})$$

$$U_x = U_{y1} - U_{y2} \quad (\text{napětí vstupu } x \text{ je rovno rozdílu napětí na vysokoimpedančních vstupech } y)$$

Duální – CDBA :

$$U_z = U_0 \quad (\text{napětí na výstupu } w \text{ se rovná napětí na vstupu } z)$$

$$U_p = U_n = 0 \quad (\text{napětí na vstupech } p, n \text{ je nulové})$$

$$I_z = I_p - I_n \quad (\text{proud výstupu } z \text{ je roven rozdílu proudů na nízkoimpedančních vstupech } p, n)$$

5 Transkonduktanční zesilovač OTA

Transkonduktanční zesilovač OTA (*Operational Transconductance Amplifier*) je zdroj proudu řízený napětím pro který platí [26]:

$$I_0 = -g_m(U_p - U_n). \quad (5.1)$$

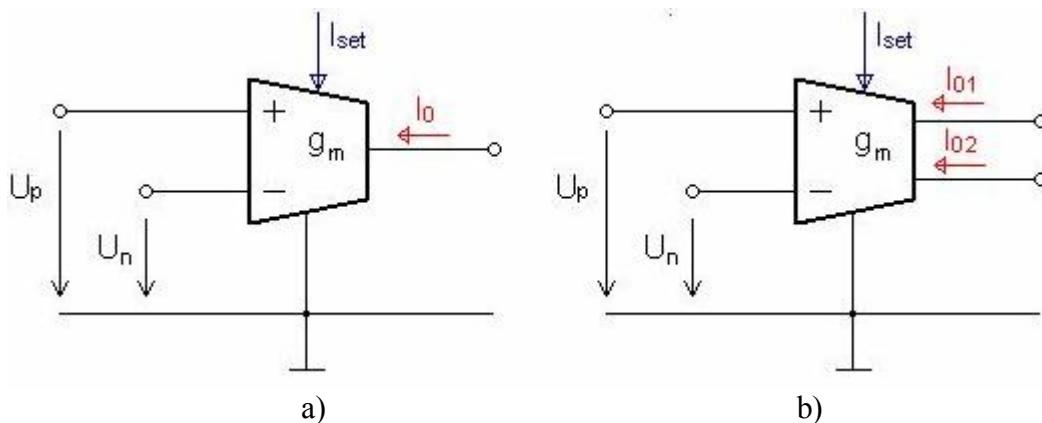
kde g_m je transkonduktance (přenosová vodivost) někdy také označovaná jako S (strmost), U_p je napětí na neinvertujícím vstupu a U_n je napětí na invertujícím vstupu zesilovače vztažené k zemi.

Na obr 5.1 je schematická značka OTA. U některých OTA je velkou výhodou možnost měnit přenosovou vodivost pomocí proudu I_{SET} (to je důležité také proto, že g_m je závislé na teplotě).

Vstupní i výstupní impedanci by měly mít teoreticky nekonečnou ale v praxi se setkáváme s hodnotami v řádech $M\Omega$ u výstupního odporu u vstupního se pak pohybujeme v řádech $k\Omega$. V ideálním případě je také g_m kmitočtově nezávislá.

BOTA (*Balanced-output Operational Transconductance Amplifier*) – vychází z OTA ale má navíc jeden výstup s opačným směrem proudu než je I_0 a platí pro něj tedy:

$$I_{01} = -I_{02} = -g_m(U_p - U_n). \quad (5.2)$$



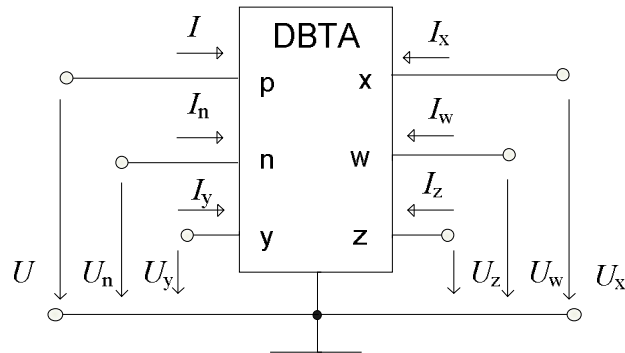
Obr.5.1: Schematická značka a) OTA a b) BOTA.

Kvůli snahám o co největší integraci prvků vznikl prvek s názvem MOTA (*Multiple-output Operational Transconductance Amplifier*), který může mít i několik výstupů.

6 Univerzální aktivní prvky

6.1 Prvek DBTA

Prvek DBTA (*Differential-input Buffered and Transconductance Amplifier*) [14] vznikne „spojením“ UCC a UVC a byl definován na Ústavu telekomunikací FEKT VUT v Brně. Obsahuje dva nízkoimpedanční proudové vstupy **p**, **n** a jeden napěťový vstup **y**, proudový výstup **z**, napěťový výstup **w** a přes transkonduktanční operační zesilovač OTA [26] výstupní proudovou svorku **x**. Schematická značka je na obr. 6.1.

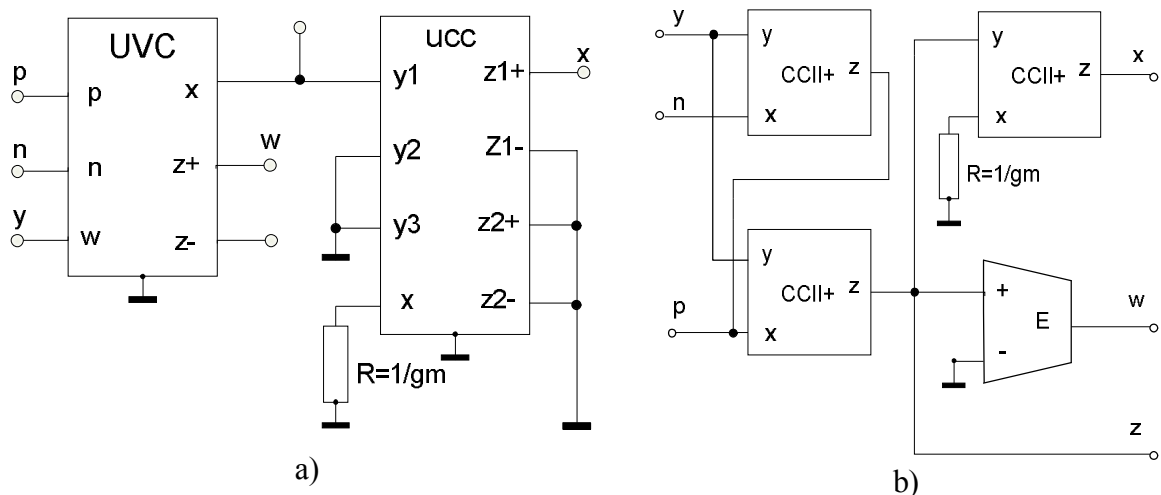


Obr. 6.1: Schématická značka DBTA.

Vztahy mezi svorkami v obvodu popisuje matice (6.1).

$$\begin{bmatrix} U_p \\ U_n \\ I_y \\ I_z \\ U_w \\ I_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \pm g_m & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_p \\ I_n \\ U_y \\ U_z \\ I_w \\ U_x \end{bmatrix}. \quad (6.1)$$

Jak již bylo řečeno DBTA lze realizovat pomocí UVC a UCC zapojení je uvedeno na obr.6.2a. Další možná realizace DBTA za pomoci dvou proudových konvektorů druhé generace CCII+, napěťového sledovače a transkonduktančního zesilovače OTA je uvedena na obr. 6.2b.



Obr. 6.2: Vnitřní struktura DBTA: a) pomocí UVC a UCC
b) pomocí CCII+.

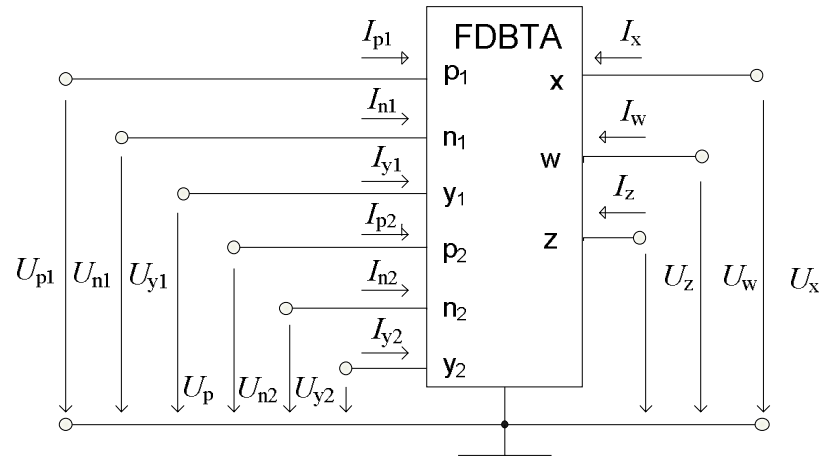
Z vytvořeného modelu je vidět že OTA byla nahrazena pomocí proudového konveju a transkonduktance g_m pomocí odporu R připojeného na svorku x [13]. Prvek DBTA je velmi univerzální a s jeho pomocí můžeme realizovat velké množství aktivních prvků ty viz tab. 6.1. [14].

Tab. 6.1: Možnosti realizace aktivních prvků pomocí DBTA [14]

Typ konveju	Vstupy	Výstupy	Nevyužité vývody	Uzemněné vývody	Poznámka
CCII+	p, y	z	n, w, x	x	[25]
CCII-	n, y	z	p, w, x	x	[25]
VCII+	p, z	w	n, y, x	y, x	[7]
IVCII+	n, z	w	p, y, x	y, x	[22]
CFA	p, y	z, w	n, x	x	[10]
DCFA	p, n, y	z, w	x	x	[27]
CFTA	p	z, x	n, w, y	y	[12]
CCTA	p, y	z, x	n, w		[23]
CDBA	p, n	z, w	y, x	y, x	[1]
CDTA	p, n	z, x	w, y	y	[4]
DCCTA	p, n, y	z, x	w		

6.2 Prvek FDBTA

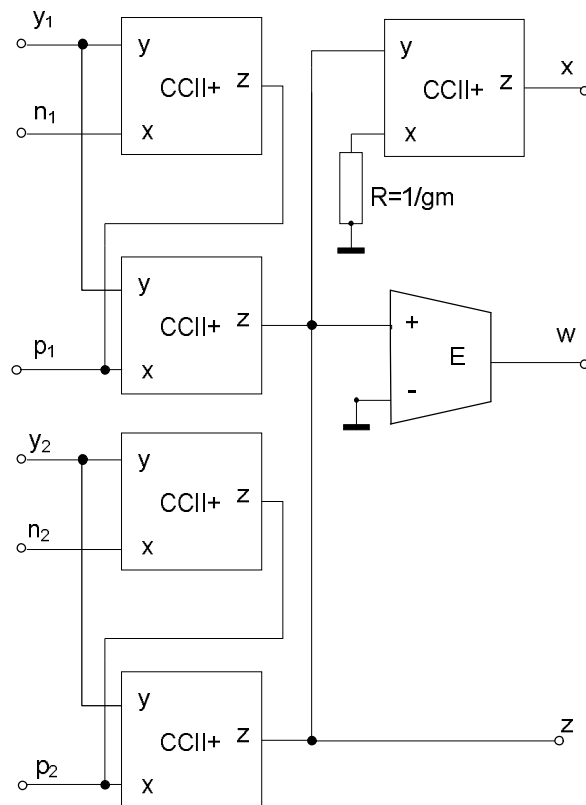
Prvek FDBTA (*Fully Differential-input Buffered and Transconductance Amplifier*) byl definován Ing. Norbertem Herencsárem v průběhu diplomové práce vznikne „přidáním“ dvou CCII+ do struktury DBTA díky tomu může FDBTA realizovat další aktivní prvky. Schematická značka je na obr. 6.3. Na obr. 6.4 je vnitřní struktura prvku FDBTA.



Obr. 6.3: Schématická značka DBTA.

Vztahy mezi svorkami v obvodu popisuje matice (6.2).

$$\begin{bmatrix} U_{p1} \\ U_{n1} \\ I_{y1} \\ U_{p2} \\ U_{n2} \\ I_{y2} \\ I_z \\ U_w \\ I_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \pm g_m & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{p1} \\ I_{n1} \\ U_{y1} \\ I_{p2} \\ I_{n2} \\ U_{y2} \\ U_z \\ I_w \\ U_x \end{bmatrix}. \quad (6.2)$$


Obr. 6.4: Vnitřní struktura FDBTA

Oproti struktuře DBTA na obr 6.2b má dva CCII+ díky kterým prvek získal vstup y_2 , n_2 , p_2 . V tabulce 6.2 jsou možné realizace aktivních prvků.

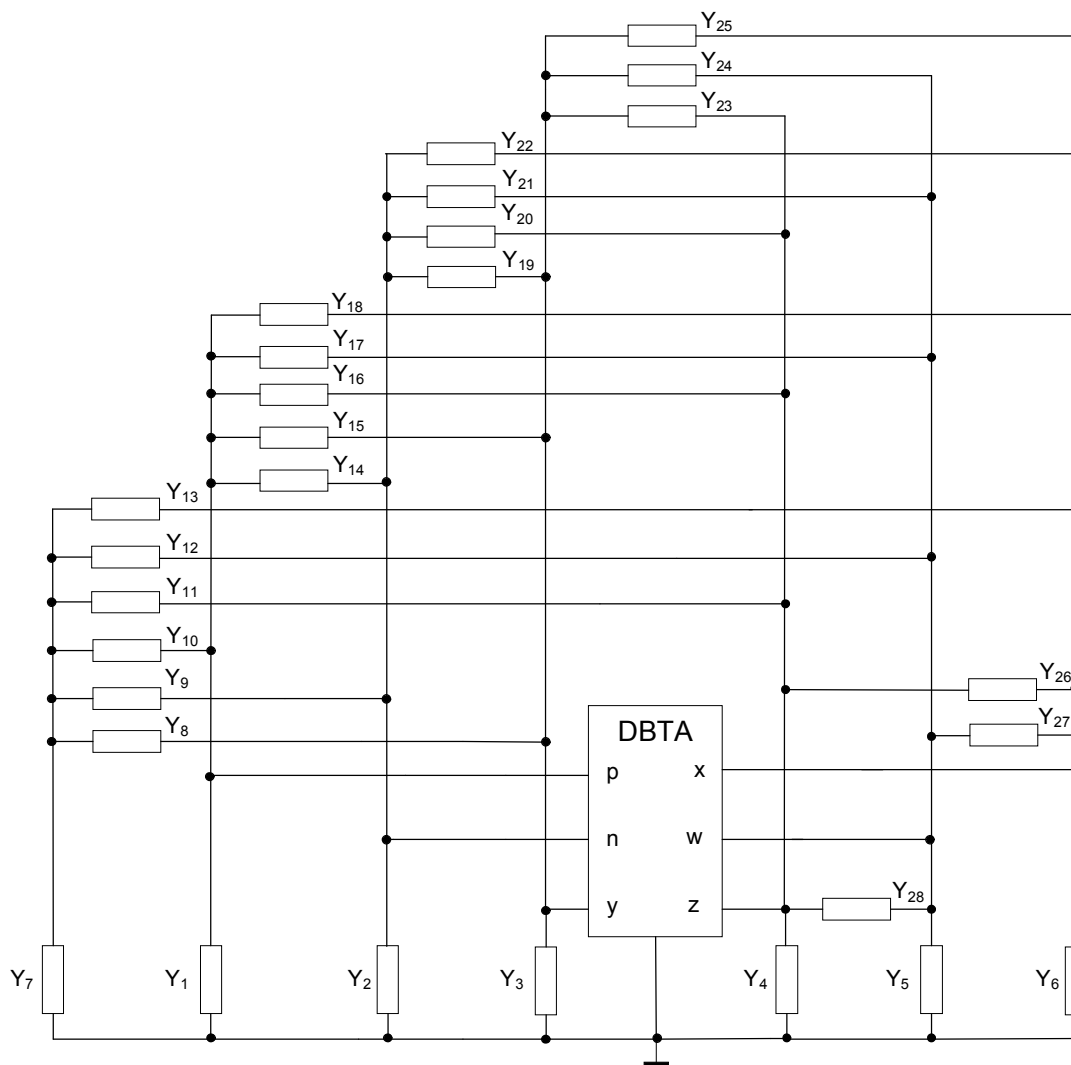
Tab. 6.2: Možnosti realizace aktivních prvků pomocí FDBTA

Typ konvejeoru	Vstupy	Výstupy	Nevyužité vývody	Uzemněné vývody	Poznámka
CSBA	p_1, p_2	z, w	n_1, n_2, y_1, y_2, x	y_1, y_2, x	[17]
CSTA	p_1, p_2	z, x	n_1, n_2, y_1, y_2, w	y_1, y_2	

7 Návrh a simulace filtrů s DBTA

7.1 Úplná admitanční síť

Pro návrh autonomních obvodů s jedním prvkem DBTA byl sestavena úplná admitanční síť [16], ve které byl propojen každý vstup a výstup s ostatními vstupy a výstupy přes admitance. Pro výpočet uzlů obvodu musí platit $n(m+1)$, kde n je počet aktivních prvků a m je počet bran aktivních prvků, tedy pro DBTA, který má šest bran, bude úplná admitanční síť obsahovat 7 uzlů. Vzniklá síť je vidět na obr 7.1.



Obr. 7.1: Úplná admitanční síť s jedním prvkem DBTA.

7.2 Navržené autonomní obvody z úplné admitanční sítě

Ze sítě na obr 7.1 vytvoříme např. filtr následujícím způsobem tak, že budeme hledat vhodné autonomní obvody a to tímto postupem:

- určíme počet pasivních prvků, které požadujeme v obvodu.
- postupně zjednodušíme počet prvků v síti na požadovaný počet. Tento postup je značně intuitivní a při jeho aplikaci závisí na obvodu, který hledáme. Preferuje se nechávat uzemněné prvky kvůli snazší realizaci obvodu.
- charakteristickou rovnicí získáme např. za pomoci programu SNAP [5]. Ta musí obsahovat všechny mocniny Laplaceova operátoru p od p^0 po p^n , kde n značí řád filtru.
- admitance nahradíme konkrétními pasivními součástkami, v našem případě R a C jejich vhodnou volbou lze v některých případech měnit typ filtru DP, HP atd.

Tab. 7.1: Navržené autonomní obvody

číslo obvodu	autonomní obvod	levá strana charakteristická rovnice	aplikace
1.		$Y_3 Y_4 + gm Y_2$	filtr
2.		$gm Y_2 + 2gm Y_{20} + Y_3 Y_4 + 2Y_3 Y_{20}$	filtr
3.		$Y_3 Y_4 + 2Y_3 Y_{20} + 2gm Y_{20} + gm Y_1 - gm Y_1$	filtr

4.		$-gmY_2 + gmY_1 + Y_3Y_4$	oscilátor
----	--	---------------------------	-----------

7.3 Návrh filtrů metodou autonomních obvodů

Při návrhu filtrů využijeme metodu autonomních obvodů. Využijeme autonomního obvodu číslo 1 z tabulky 7.1.

Charakteristická rovnice tohoto obvodu byla získána pomocí programu SNAP [5]:

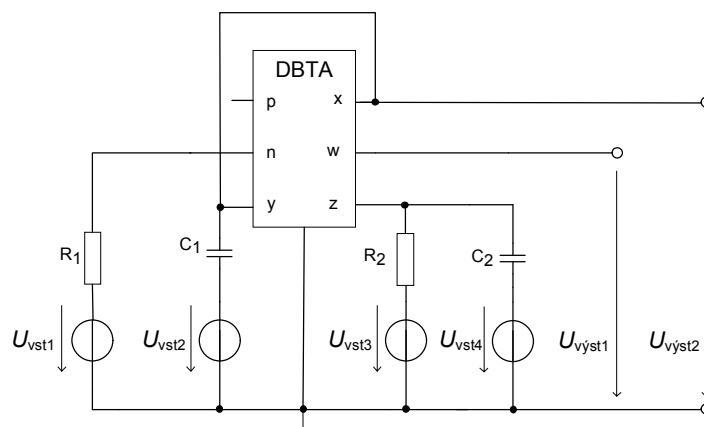
$$D = Y_3Y_4 + gmY_2 = 0. \quad (7.1)$$

Konkrétní zapojení prvků v obvodu, které je ukázáno na obr. 7.2 získáme volbou: $Y_2 = 1/R_1 = G_1$, $Y_3 = pC_1$, Y_4 složíme paralelní kombinací $G_2 = 1/R_2$ a pC_2 (komplexní proměnná $p = j\omega$).

Rovnice (7.1) přechází na tvar:

$$D(p) = p^2C_1C_2R_1R_2 + pC_1R_1 + R_2g_m = 0. \quad (7.2)$$

Obvod v napěťovém módu (obr. 7.2) umožňuje obvod realizovat všechny tři základní typy filtrů: dolní propust, horní propust, pásmová propust:



Obr. 7.2: Navržený obvod v napěťovém módu

Komplexní přenosové funkce napětí navrženého filtru odebírané z výstupu $U_{výst1}$ mají tvar:

$$PP1 : K_u = \frac{U_{výst1}}{U_{vst1}} = \frac{pC_1R_2}{D(p)}, \quad (7.3)$$

$$PP2 : K_u = \frac{U_{výst1}}{U_{vst2}} = \frac{pC_1R_2}{D(p)}, \quad (7.4)$$

$$PP3 : K_u = \frac{U_{výst1}}{U_{vst3}} = \frac{pC_1R_1}{D(p)}, \quad (7.5)$$

$$HP1 : K_u = \frac{U_{výst1}}{U_{vst4}} = \frac{p^2C_1C_2R_1R_2}{D(p)}. \quad (7.6)$$

Komplexní přenosové funkce napětí navrženého filtru odebírané z výstupu $U_{výst2}$ mají tvar:

$$DP1 : K_u = \frac{U_{výst2}}{U_{vst1}} = \frac{R_2gm}{D(p)}, \quad (7.7)$$

$$PP4 : K_u = \frac{U_{výst2}}{U_{vst4}} = -\frac{pC_2R_1R_2gm}{D(p)}, \quad (7.8)$$

$$DP2 : K_u = \frac{U_{výst2}}{U_{vst3}} = -\frac{R_1gm}{D(p)}. \quad (7.9)$$

Pro filtry druhého řádu platí podle [6] obecná přenosová funkce:

$$K(p) = \frac{a_0}{p^2b_2 + pb_1 + b_0} = \frac{K_0\omega_p^2}{p^2 + p\frac{\omega_p}{Q_p} + \omega_p^2}. \quad (7.10)$$

Pro charakteristický kmitočet a činitel jakosti Q navrženého filtru tedy platí:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{b_0}{b_2}} = \sqrt{\frac{gm}{C_1C_2R_1}}, \quad Q = \omega_0\sqrt{\frac{b_2}{b_1}} = \frac{\sqrt{b_0b_2}}{b_1} = R_2\sqrt{\frac{C_2gm}{C_1R_1}}. \quad (7.11), (7.12)$$

Pro zvolený kmitočet $f_0 = 100$ kHz a činitel jakosti $Q = 0,707$ pro aproximaci dle Butterwortha [6] byly zvoleny hodnoty pasivních prvků následovně: $R_1 = R_2 = R_{gm} = 1$ k Ω ($g_m = 1$ mS). Můžeme za pomoci vztahů 7.11 a 7.12 získat návrhové vztahy pro výpočet kapacitorů:

$$C_1 = \frac{1}{QR\omega_0}, \quad C_2 = C_1Q^2, \quad (7.13), (7.14)$$

a dopočítat hodnoty kondenzátorů: $C_1 = 2,25$ nF a $C_2 = 1,125$ nF. Tyto teoretické hodnoty budou ověřeny v kap. 7.4 pomocí simulačních programů SNAP [5] a OrCAD PSpice [33].

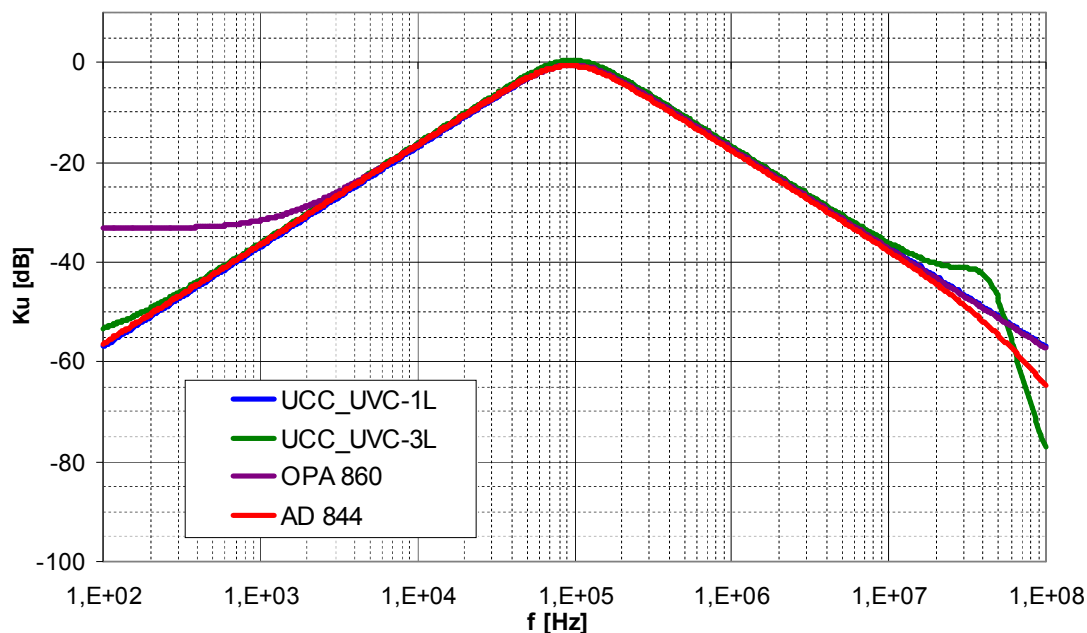
7.4 Výsledky simulací filtrů s DBTA

V této kapitole budou ukázány výsledky simulací obvodů navržených v kap. 7.3. Bude ukázáno porovnání jak s ideálním prvkem tak porovnání reálných prvků mezi sebou v OrCAD PSpice [33] (zapojení obvodů v programu OrCAD PSpice je v přílohách I až III).

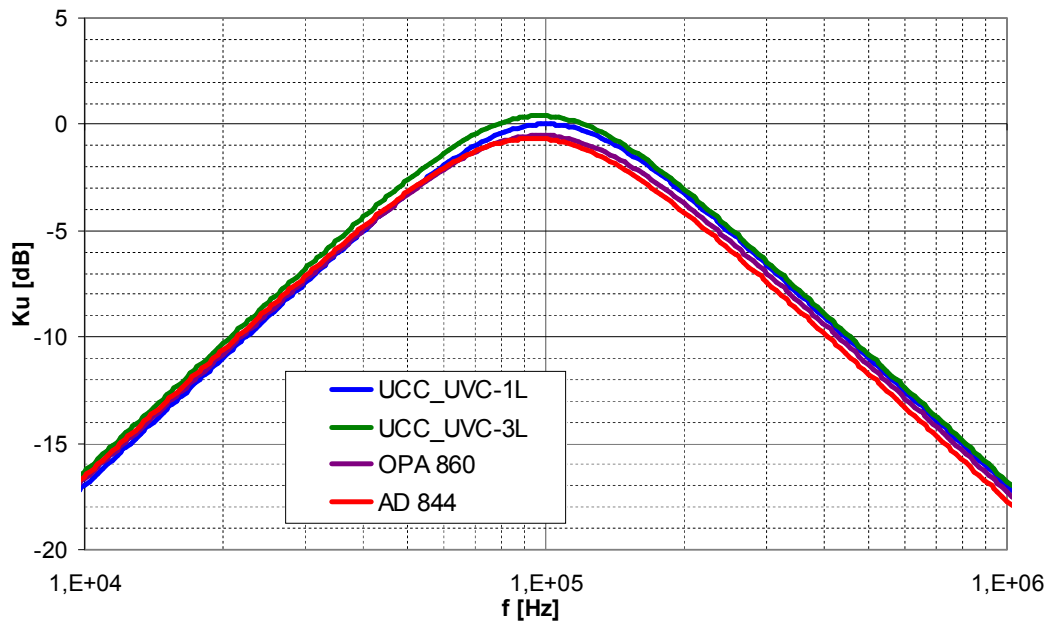
Při simulacích byly použity modely UCC a UVC Level 1, což jsou prakticky ideální prvky, přidány byly zejména pro kontrolu správnosti zapojení. UCC a UVC Level 3 se svými parametry blíží reálnému prvku.

Prvek DBTA lze realizovat za pomoci CCII+, kdy podle obr. 5.2b potřebuje pouze dva konvejory CCII+ z důvodu nevyužijeme svorku p . Konvejory CCII+ se dají realizovat např. pomocí částí obvodů AD844 případně OPA 860. Nemají sice přesné parametry jako CCII+ ale jejich vlastnosti jsou dostačující alespoň pro ověření funkčnosti. Tyto prvky budou také využity při simulaci popis a návod na jejich využití jako CCII+ je v kapitole 3.5.

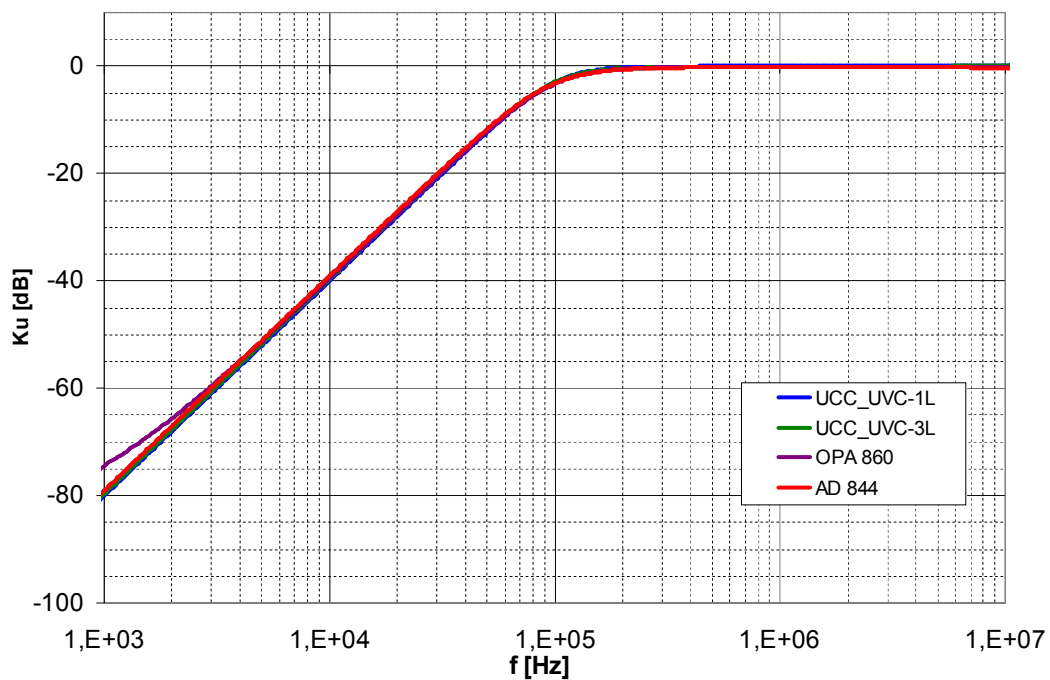
Na obr. 7.3 a 7.4 jsou modulové kmitočtové charakteristiky pásmové propusti PP1 druhého řádu s mezním kmitočtem 100 kHz a na obr. 7.5 a 7.6 horní propusti HP1 pro stejný mezní kmitočet simulované v programu PSpice [33]. Byly použity modely UCC a UVC Level 1, UCC a UVC Level 3, AD844 a OPA860. U pásmové propusti je při použití OPA860 vidět „nedostatečné“ potlačení při nízkých kmitočtech při vyšších se ale naopak více blíží ideálnímu průběhu při použití UCC a UVC Level 1, což nám nabízí možnost konstruovat filtry s vyšším mezním kmitočtem.



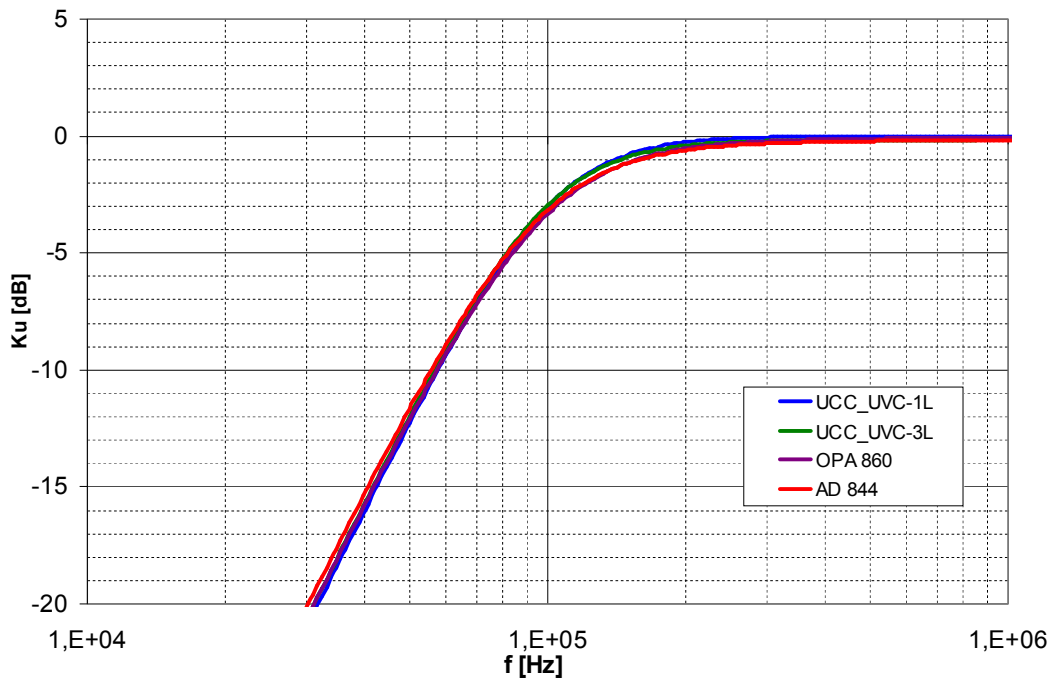
Obr 7.3: Modulové kmitočtové charakteristiky přenosu pásmové propusti při použití modelů: UCC_UVC-1L, UCC_UVC-3L, AD844 a OPA860.



Obr 7.4: *Detaily modulové kmitočtové charakteristiky přenosu pásmové propusti při použití modelů: UCC_UVC-1L, UCC_UVC-3L, AD844 a OPA86*



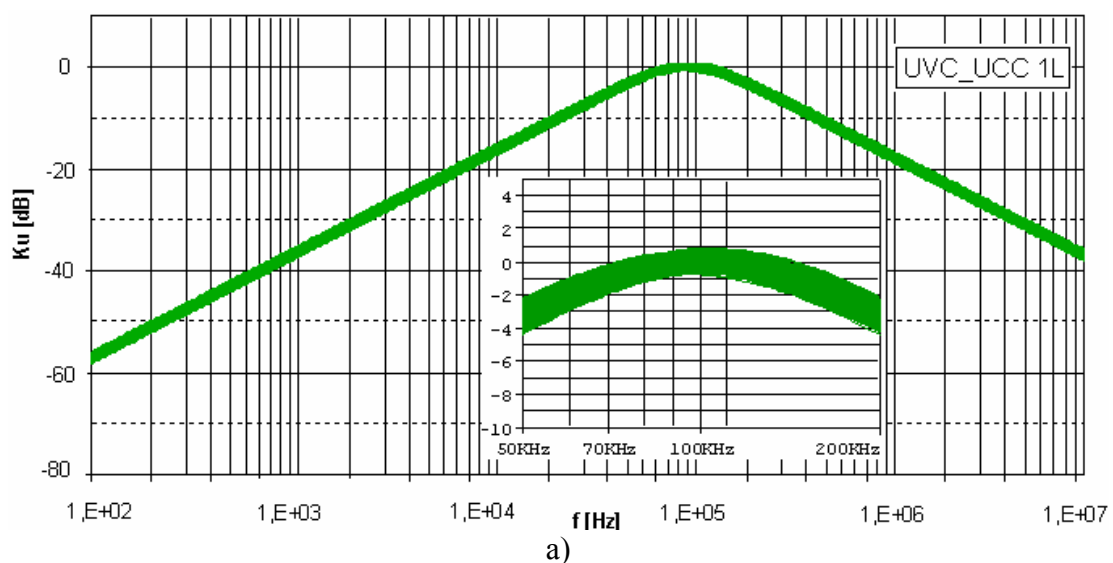
Obr 7.5: *Modulové kmitočtové charakteristiky přenosu horní propusti při použití modelů: UCC_UVC-1L, UCC_UVC-3L, AD844 a OPA860.*

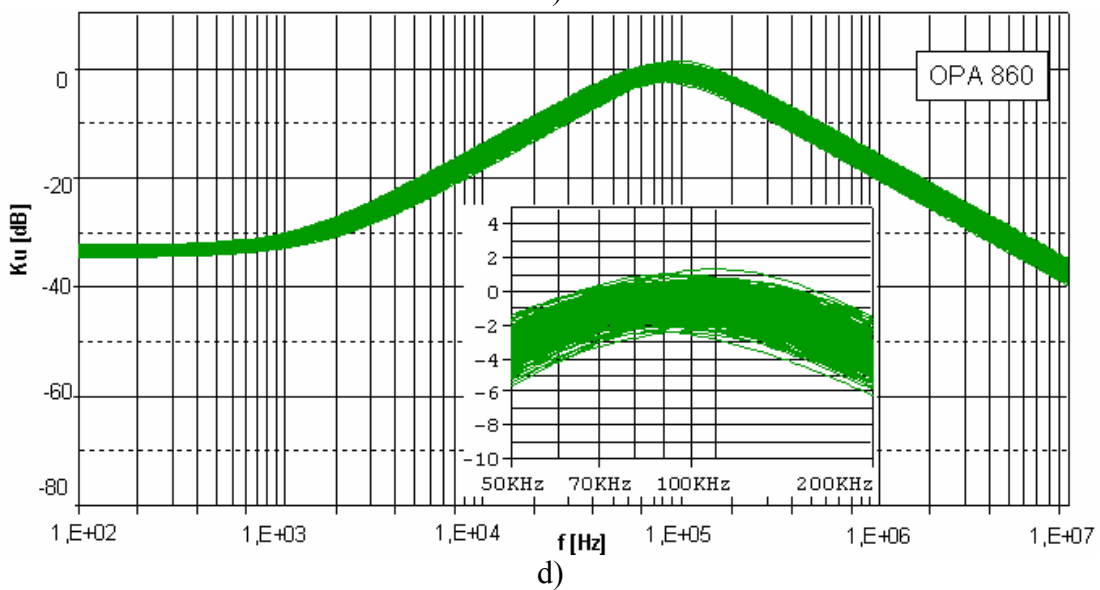
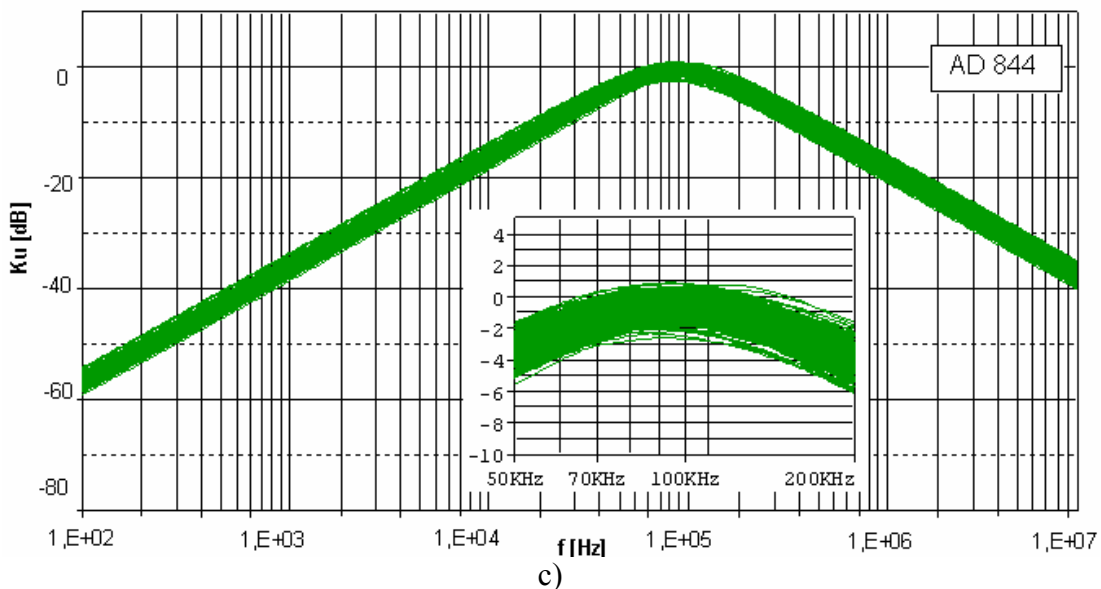
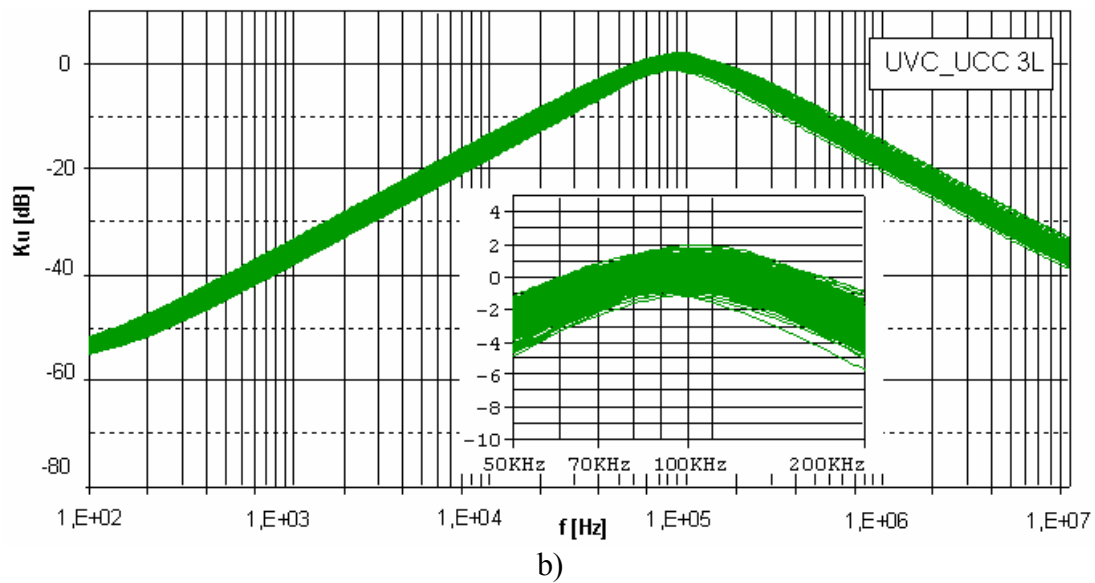


Obr 7.6: *Detaily modulové kmitočtové charakteristiky přenosu horní propusti při použití modelů: UCC_UVC-1L, UCC_UVC-3L, AD844 a OPA860.*

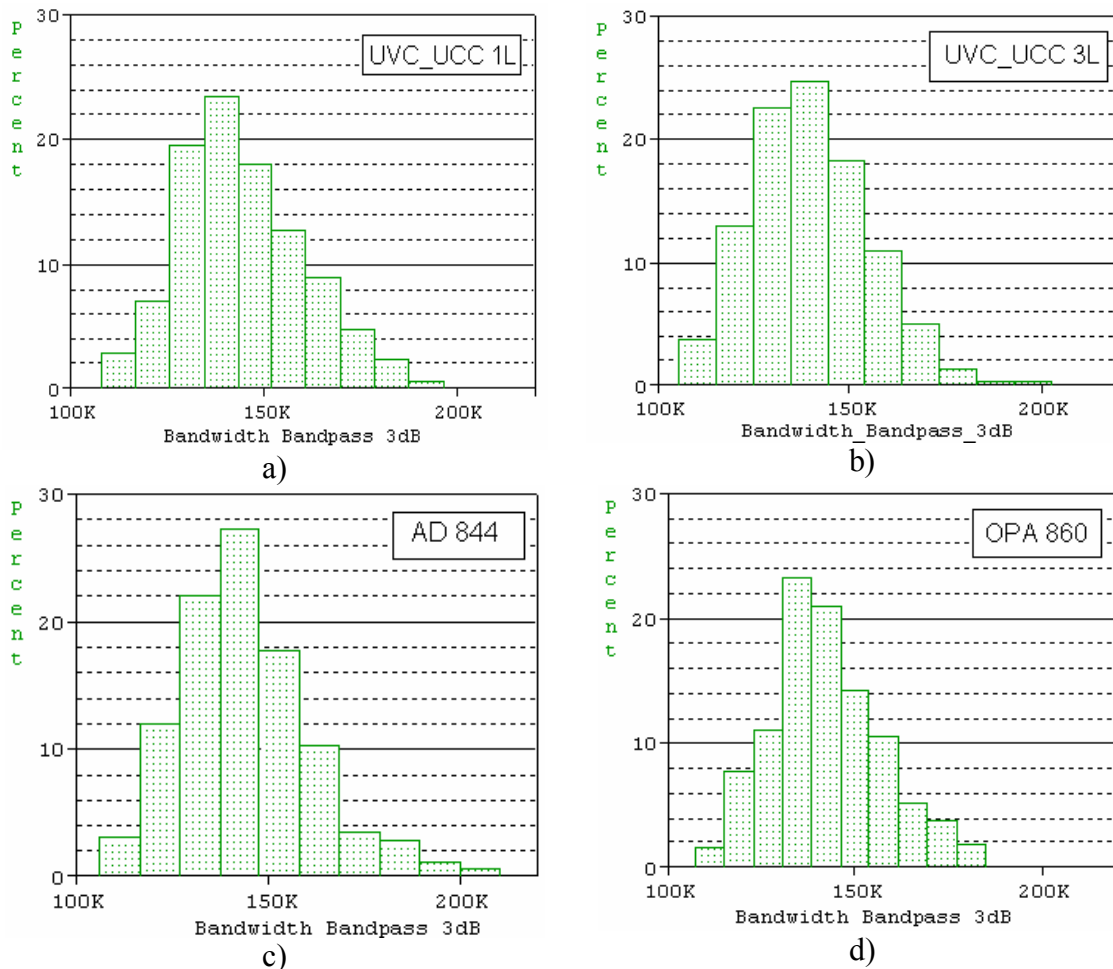
7.5 Statistická analýza „Monte Carlo“

Při výrobě součástek dochází k jistým odchylkám od hodnot výrobních řad. Použití takovýchto prvků pak je potřeba počítat s určitým vlivem na funkci obvodu. Tyto vlivy se nám snaží připlížit statistická analýza „Monte Carlo“, při které lze nastavit procentuální možnou odchylku od požadované hodnoty podle určitého pravděpodobnostního rozdělení (v našem případě Gaussovo) a pro zvolený počet běhů (400). Byly zvoleny odchylky $\pm 5\%$ pro rezistory a $\pm 10\%$ pro kapacitory. Výsledky této analýzy pro pásmovou propust a jednotlivé modely jsou na obr. 7.7. Pravděpodobnostní rozložení pro šířku pásma je na obr. 7.8.





Obr.7.7: Výsledky statistické analýzy „Monte Carlo“ pro:
 a) UCC_UVC – 1L, b) UCC_UVC – 3L, c) AD844 a d) OPA860.



Obr. 7.8: Pravděpodobnostní rozložení pro šířku pásma
 a) UCC_UVC 1L, b) UCC_UVC 3L, c) AD844, d) OPA860.

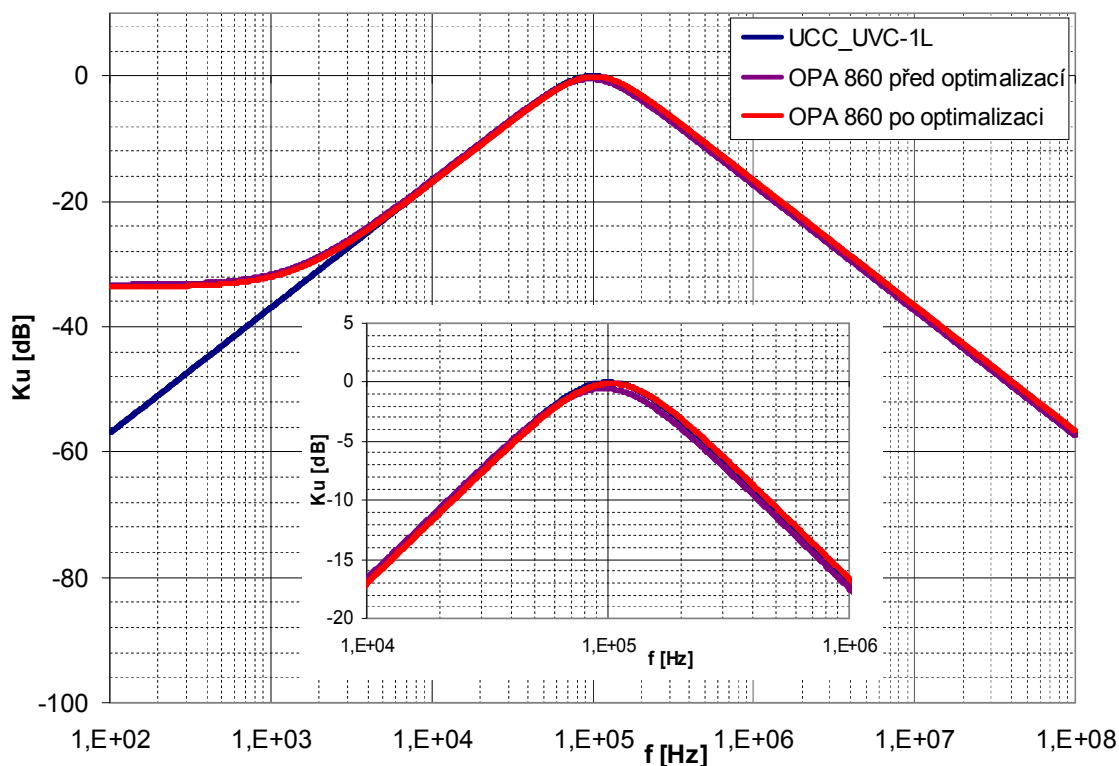
7.6 Optimalizace filtru

Při simulaci pásmové propusti při použití modelu OPA860 byla zjištěno velká podobnost s ideálním průběhem UCC-1L. Nemá sice tak velké potlačení v nepropustném pásmu při nízkých kmitočtech jako s AD844, ale při vyšších kmitočtech vykazuje lepší vlastnosti a podle analýzy Monte Carlo je nejméně citlivý. Pro optimalizaci filtru byl zvolen tento prvek. Je potřeba parametry tohoto obvodu přizpůsobit reálným aplikacím nejen z hlediska požadovaného průběhu ale i z hlediska výrobních řad pasivních prvků. Byla použita parametrická analýza (Parametric Sweep), kde lze nastavit krokování jednotlivých prvků. Z původního teoretického návrhu s hodnotami:

$$R_1 = 1\text{k}\Omega, R_2 = 1\text{k}\Omega, R_{\text{gm}} = 1\text{k}\Omega, C_1 = 2.25\text{nF}, C_2 = 1.125\text{nF},$$

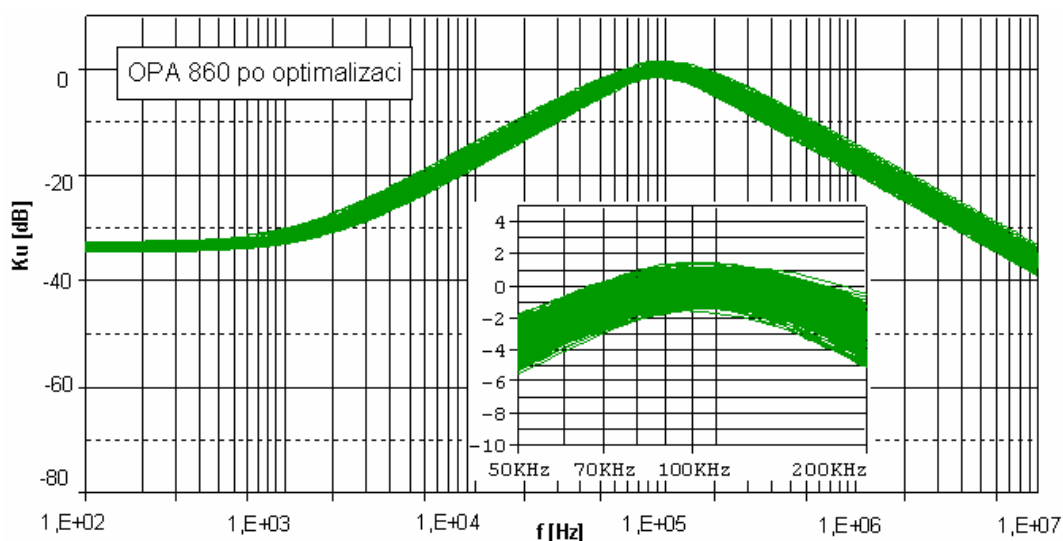
jsem se za pomoci parametrické analýzy dopracoval k těmto hodnotám z výrobní řady E48:

$$R_1 = 909\Omega, R_2 = 953\Omega, R_{\text{gm}} = 953\Omega, C_1 = 2.26\text{nF}, C_2 = 1.15\text{nF}.$$

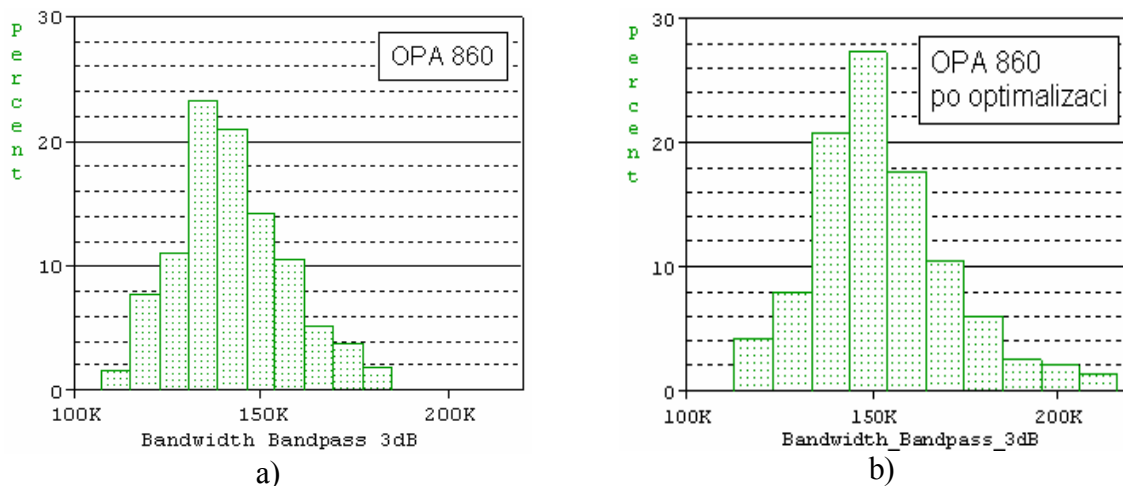


Obr 7.9: Modulové kmitočtové charakteristiky proudových přenosů dolní propusti UCC–1L a AD844 před a po úpravě prvků pomocí parametrické analýzy.

Na obr. 7.9 je výsledná modulová kmitočtová charakteristika pásmové propusti po optimalizaci. Pro porovnání byla také znázorněna modulová kmitočtová charakteristika s ideálními prvky UCC–1L a UVC–1L. Jak je vidět, za pomoci prvků OPA860 se podařilo dosáhnout modulové charakteristiky téměř shodné s ideálním prvkem (v potřebném kmitočtovém pásmu). Jak již bylo řečeno, v nepropustném pásmu je sice hodnota útlumu při nízkých kmitočtech „nedostatečná“, ale při vysokých kmitočtech se prvek chová lépe. Byla provedena také statistická analýza „Monte Carlo“ s optimalizovanými hodnotami prvků. Její výsledná simulace je na obr. 7.10. Na obr. 7.11 pak pravděpodobnostní rozložení pro šířku pásma pro prvek OPA860 před a po optimalizaci.



Obr.7.10: Výsledky statistické analýzy „Monte Carlo“ pro OPA860 po optimalizaci



Obr. 7.11: Pravděpodobnostní rozložení pro šířku pásma
 a) OPA860 před optimalizací b) OPA860 po optimalizaci

Na obr. 7.10 je vidět velký vliv volby prvků na posunutí mezního kmitočtu. Tento problém by bylo možné vyřešit použitím součástek s tolerancí 1% nebo proměřením jednotlivých součástek. Tento vliv nepřesnosti prvků by také bylo možné odstranit použitím aktivních prvků s „řízením“ jako např. CCCII (*Current Controlled Conveyor*) případně použitím OTA s vnějším řízením I_{SET} .

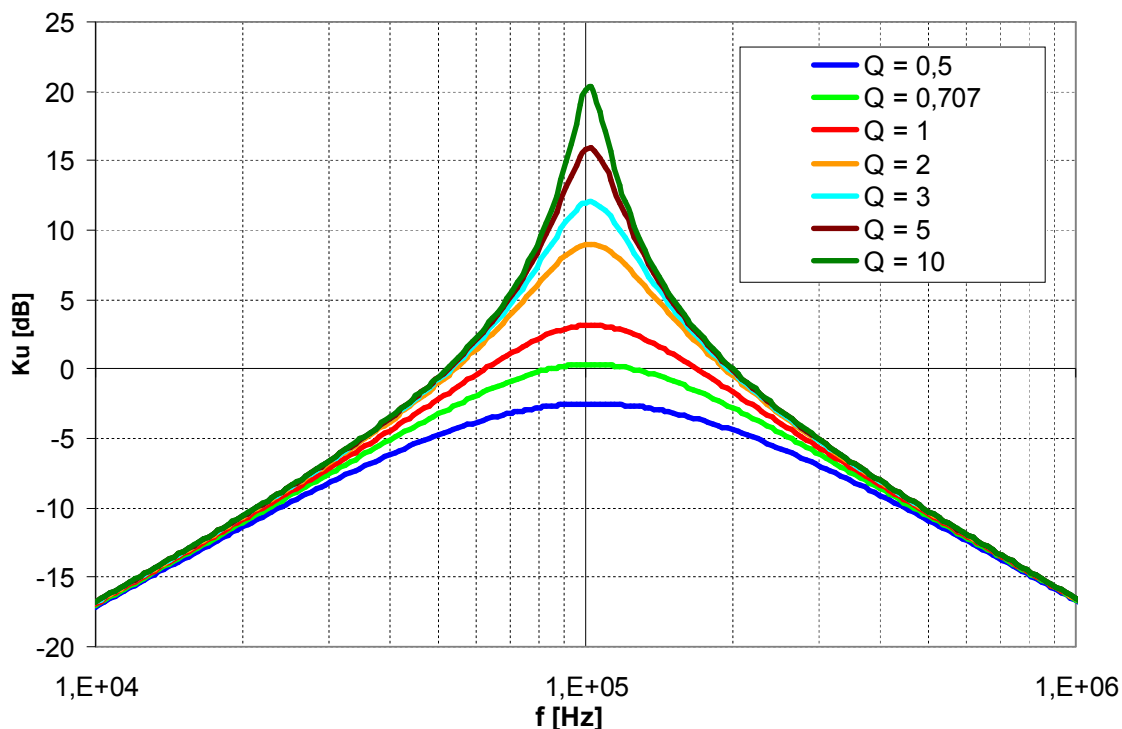
7.7 Změna činitele jakosti filtru

Podle rovnic (7.13) a (7.14) lze měnit činitel jakosti filtru pomocí odporu R_2 bez toho, aniž bychom změnil mezní kmitočet filtru (mění se zesílení). Na obr. 7.12 jsou ukázány průběhy pro činitele jakosti $Q = \{0,5; 0,707; 1; 2; 3; 5; 10\}$ a odpovídající hodnoty rezistoru R_2 zvolené z řady E48 jsou uvedeny v tab. 7.2. Hodnoty ostatních pasivních prvků vychází z kapitoly 7.6 optimalizace filtru.

$$R_2 = \frac{\sqrt{C_2 gm}}{C_1 R_1} \cdot Q \quad (7.15)$$

Tab. 7.2: Hodnoty rezistoru R_2 pro změnu činitele jakosti filtru:

Q [-]	0,5	0,707	1	2	3	5	10
R_2 [kΩ]	0,715	1	1,4	2,87	4,22	7,15	14



Obr 7.12: Detaily modulové kmitočtové charakteristiky přenosů pásmové propusti při změně činitele jakosti s modelem OPA 860

7.8 Citlivostní analýza filtrů s prvkem DBTA

V této kapitole bude popsán vliv jednotlivých pasivních prvků na citlivost obvodu. Budou vypočteny relativní citlivosti obvodu i zobecněná citlivostní funkce. Pro výpočty byl použit program Derive 6 [30].

Relativní citlivosti

Citlivostními vlastnostmi filtru se rozumí vliv změny parametrů pasivních prvků v obvodu na změnu vlastností filtru. Použijeme rovnice (7.12) a (7.13). Jak již bylo rozebráno v kapitole 7.7 R_2 nemá vliv na mezní kmitočet filtru to se také promítne na rovnici (7.19) kde R_2 není obsažen naopak podle rovnice (7.20) je vidět že má zásadní vliv na činitel jakosti filtru. Podle [19], [18] platí:

$$S_{q_i}^{\omega_0} = \frac{q_i}{\omega_0} \cdot \frac{\partial \omega_0}{\partial q_i}, \quad S_{q_i}^{Q_0} = \frac{q_i}{Q_0} \cdot \frac{\partial Q_0}{\partial q_i}. \quad (7.16), (7.17)$$

kde q_i je označení parametru i -tého pasivního prvku.

Pro všechny filtry platí:

$$-S_{C_1}^{Q_0} = S_{C_2}^{Q_0} = -S_{R_1}^{Q_0} = S_{g_m}^{Q_0} = S_{g_m}^{\omega_0} = -S_{C_1}^{\omega_0} = -S_{C_2}^{\omega_0} = -S_{R_1}^{\omega_0} = \frac{1}{2}, \quad (7.18)$$

$$S_{R_2}^{Q_0} = 1; \quad S_{R_2}^{\omega_0} = 0. \quad (7.19), (7.20)$$

Zobecněná citlivostní funkce

Zobecněná citlivostní funkce ukazuje vliv jednotlivých prvků na přenosovou funkci obvodu. Využívá se zejména tam, kde „nedostačují“ relativní citlivosti. Tato funkce může být použita jak pro aktivní tak i pro pasivní prvky.

$$S_{q_i}^K = \frac{q_i}{K} \cdot \frac{\partial K}{\partial q_i}. \quad (7.21)$$

Podle rovnic (7.21) a přenosových funkcí (7.3) a (7.6) můžeme tedy vypočítat vliv prvku na přenosovou funkci obvodu např. za programů Derive 6 [30] a MATLAB [32]. Dílčí zobecněné citlivostní funkce jednotlivých filtrů na parametry pasivních prvků mají tvar:

Pásmová propust

$${}^{PP1}S_{C_1}^{K_u} = -\frac{R_2 g_m}{p^2 C_1 C_2 R_1 R_2 + p C_1 R_1 + R_2 g_m}, \quad (7.22)$$

$${}^{PP1}S_{C_2}^{K_u} = \frac{p^2 C_1 C_2 R_1 R_2}{p^2 C_1 C_2 R_1 R_2 + p C_1 R_1 + R_2 g_m}, \quad (7.23)$$

$${}^{PP1}S_{R_1}^{K_u} = \frac{p^2 C_1 C_2 R_1 R_2 + p C_1 R_1}{p^2 C_1 C_2 R_1 R_2 + p C_1 R_1 + R_2 g_m}, \quad (7.24)$$

$${}^{PP1}S_{R_2}^{K_u} = \frac{p C_1 R_1}{p^2 C_1 C_2 R_1 R_2 + p C_1 R_1 + R_2 g_m}, \quad (7.25)$$

$${}^{PP1}S_{g_m}^{K_u} = \frac{R_2 g_m}{p^2 C_1 C_2 R_1 R_2 + p C_1 R_1 + R_2 g_m}, \quad (7.26)$$

Horní propust

$${}^{HP1}S_{C_1}^{K_u} = -\frac{R_2 g_m}{p^2 C_1 C_2 R_1 R_2 + p C_1 R_1 + R_2 g_m}, \quad (7.27)$$

$${}^{HP1}S_{C_2}^{K_u} = -\frac{p C_1 R_1 + R_2 g_m}{p^2 C_1 C_2 R_1 R_2 + p C_1 R_1 + R_2 g_m}, \quad (7.28)$$

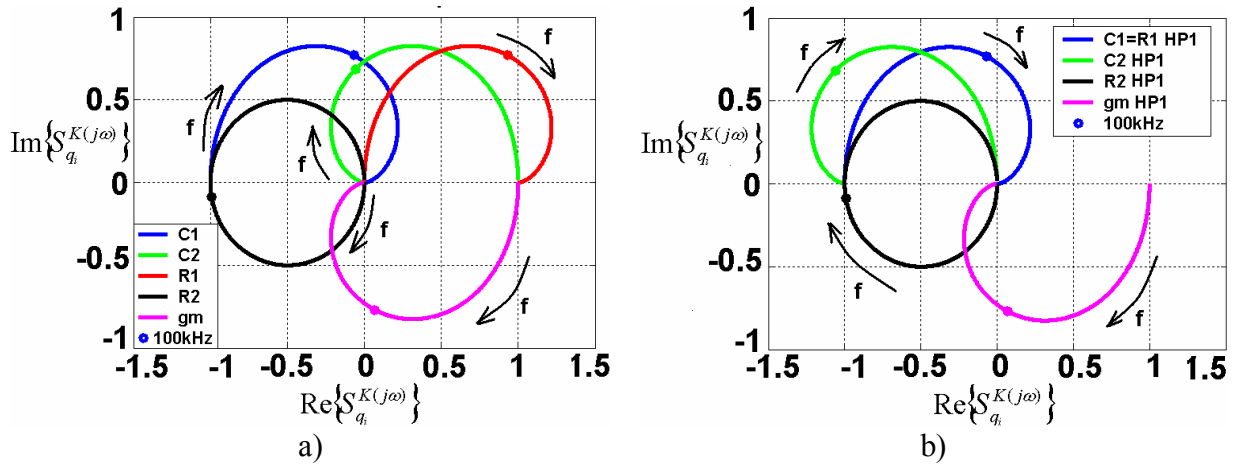
$${}^{HP1}S_{R_1}^{K_u} = -\frac{R_2 g_m}{p^2 C_1 C_2 R_1 R_2 + p C_1 R_1 + R_2 g_m}, \quad (7.29)$$

$${}^{HP1}S_{R_2}^{K_u} = \frac{p C_1 R_1}{p^2 C_1 C_2 R_1 R_2 + p C_1 R_1 + R_2 g_m}, \quad (7.30)$$

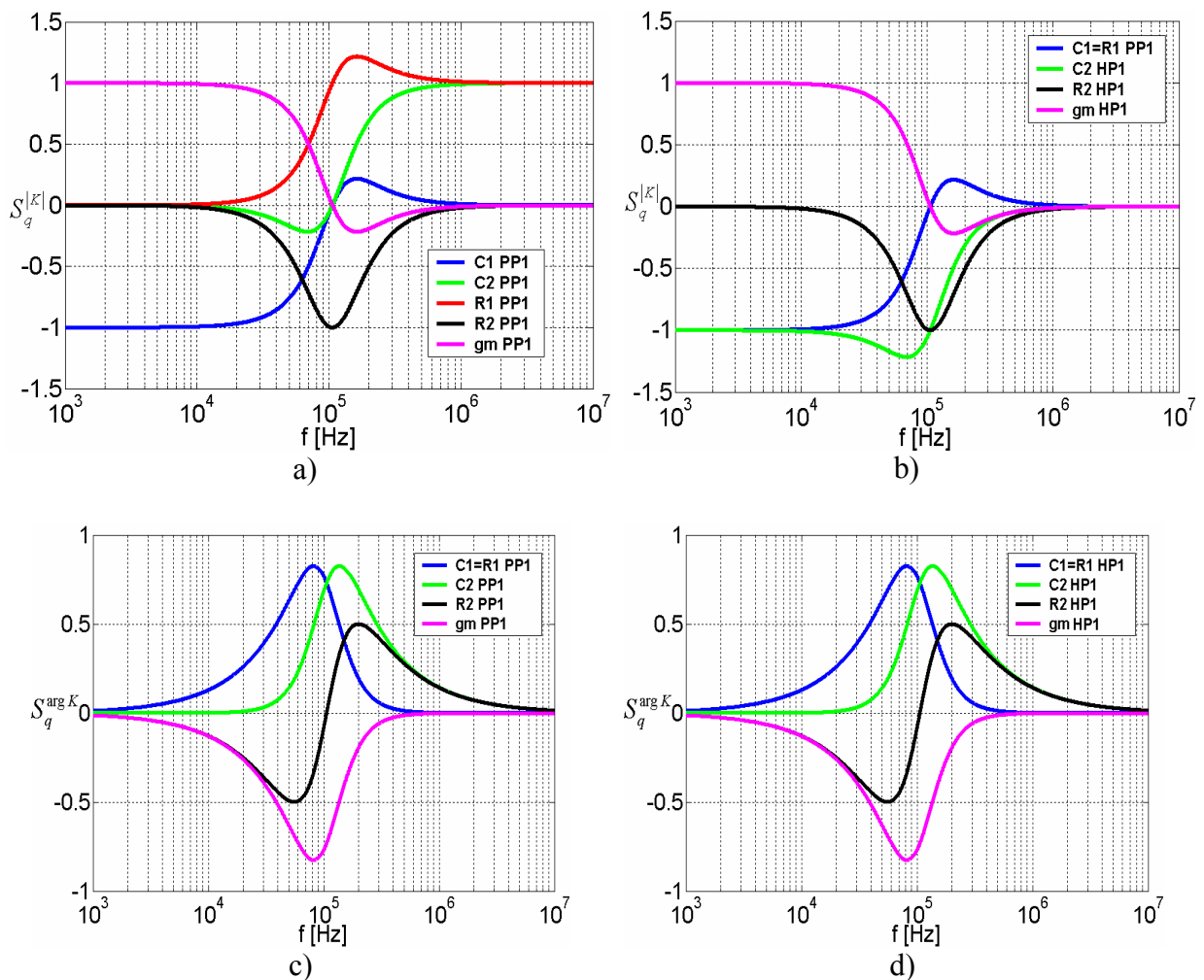
$${}^{HP1}S_{g_m}^{K_u} = \frac{R_2 g_m}{p^2 C_1 C_2 R_1 R_2 + p C_1 R_1 + R_2 g_m}. \quad (7.31)$$

Pro tyto citlivosti je vynesena hodograf na obr. 7.13, což je znázornění citlivostí v komplexní rovině. Na obr. 7.14 je také ukázán průběh reálných a imaginárních částí citlivostí jednotlivých prvků. Grafy byly znázorněny za pomoci programu MATLAB [32], zápis programu je v příloze IV. Hodnoty prvků byly vzaty z kap. 7.6 (Optimalizace filtru) a jsou následující:

$$R_1 = 909 \, \Omega, R_2 = 953 \, \Omega, R_{gm} = 953 \, \Omega, C_1 = 2.26 \, \text{nF}, C_2 = 1.15 \, \text{nF}.$$



Obr. 7.13: Hodograf pro pasivní prvky filtru s OPA860 a) PP1 b) HP1.

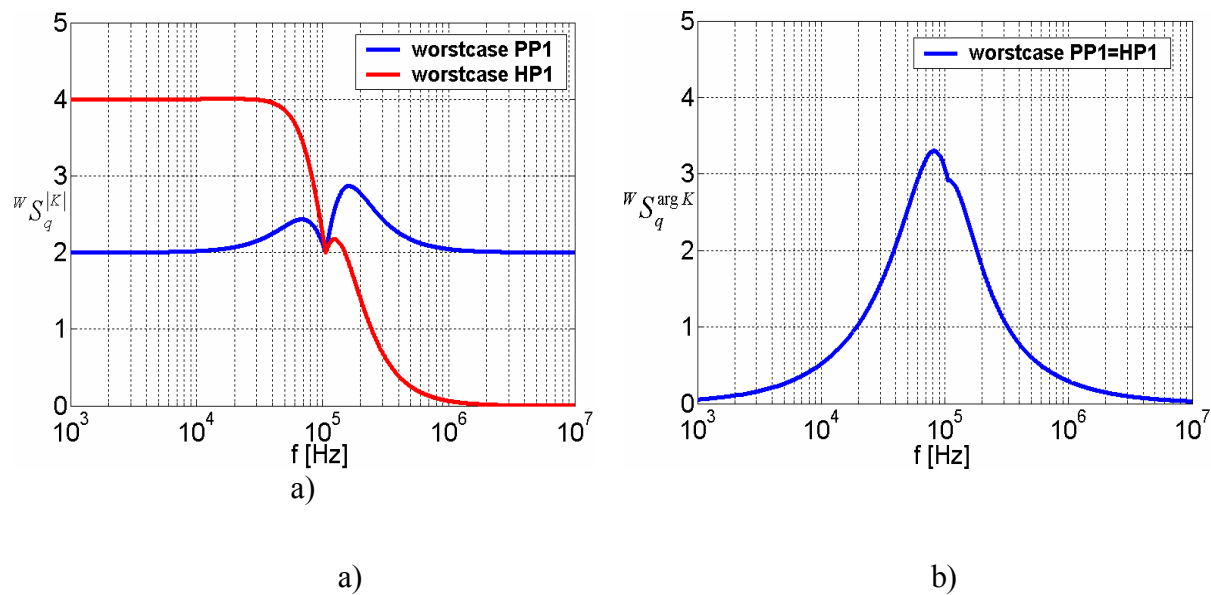


Obr. 7.14: Dílčí zobecněné citlivosti jednotlivých typů filtru: a), c) PP1, b), d) HP1.

Pokud chceme znát jakým způsobem bude maximálně ovlivněna kmitočtová charakteristika, je vhodné definovat tzv. worst-case relativní citlivosti modulu přenosu filtru, která podává informaci o nejhorší kombinaci tolerancí obvodových prvků. Dle [19] platí:

$${}^w S_{q_i}^{|K|} = \sum_{i=1}^N \left| \operatorname{Re} S_{q_i}^K \right|, \quad {}^w S_{q_i}^{\arg K} = \sum_{i=1}^N \left| \operatorname{Re} S_{q_i}^K \right|. \quad (7.32), (7.33)$$

Worst-case multiparametrové relativní citlivosti modulu přenosu a semirelativní citlivosti argumentu přenosu filtrů jsou zobrazeny na obr. 7.15.



Obr. 7.15: Worst-case: a) multiparametrové relativní citlivosti modulu a b) semirelativní citlivosti argumentu přenosu filtrů PP1 a HP1.

8 Praktická realizace filtrů s DBTA

Pro realizaci byl zvolen filtr PP2 s jak s obvodu OPA860 tak s AD844. Teoretický návrh obvodu je ukázán v kap. 7. Pro návrh plošných spojů byl použit program EAGLE 4.14. [31] k dispozici na www.cadsoft.de/freeware.htm. V přílohách jsou obrázky navržených desek spolu s příslušnými partlisty a fotografiemi realizovaných filtrů.

Filtr z autonomního obvodu 1 – pásmová propust 2

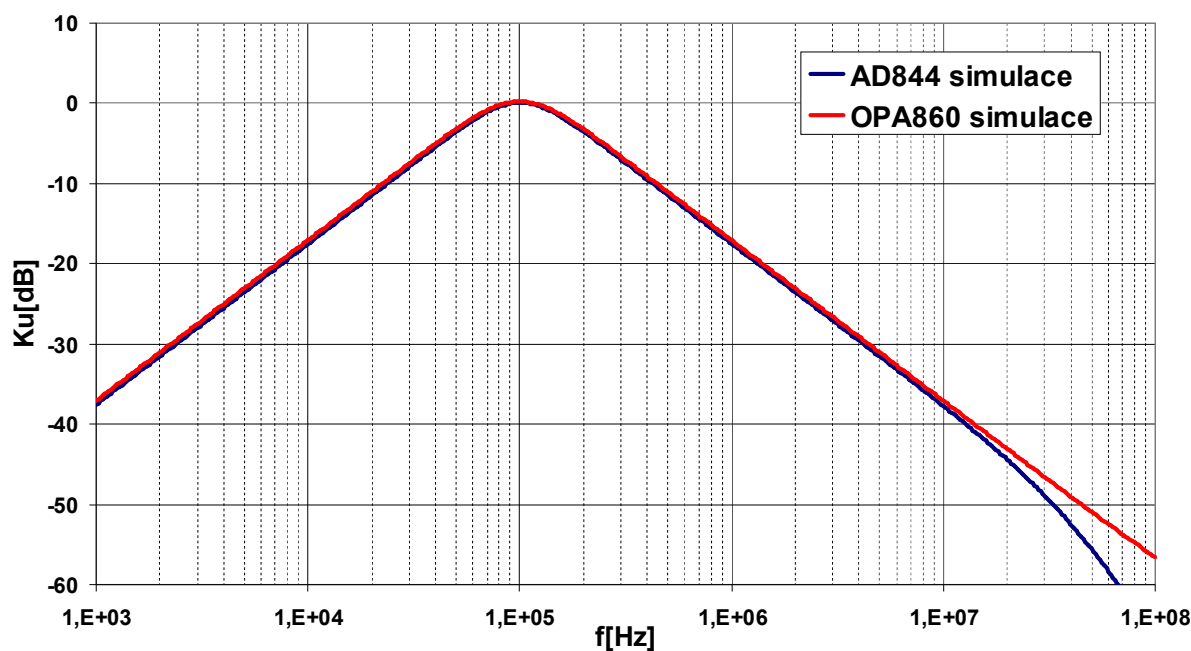
Při realizaci filtru byly použity součástky z výrobní řady E24. Obvod je v napěťovém módu. Mezní kmitočet filtrů je 100 kHz. Filtr byl optimalizován (kap 7.6) za pomoci parametrické analýzy a dopracoval k těmto hodnotám z výrobní řady E24:

Pro **OPA860**:

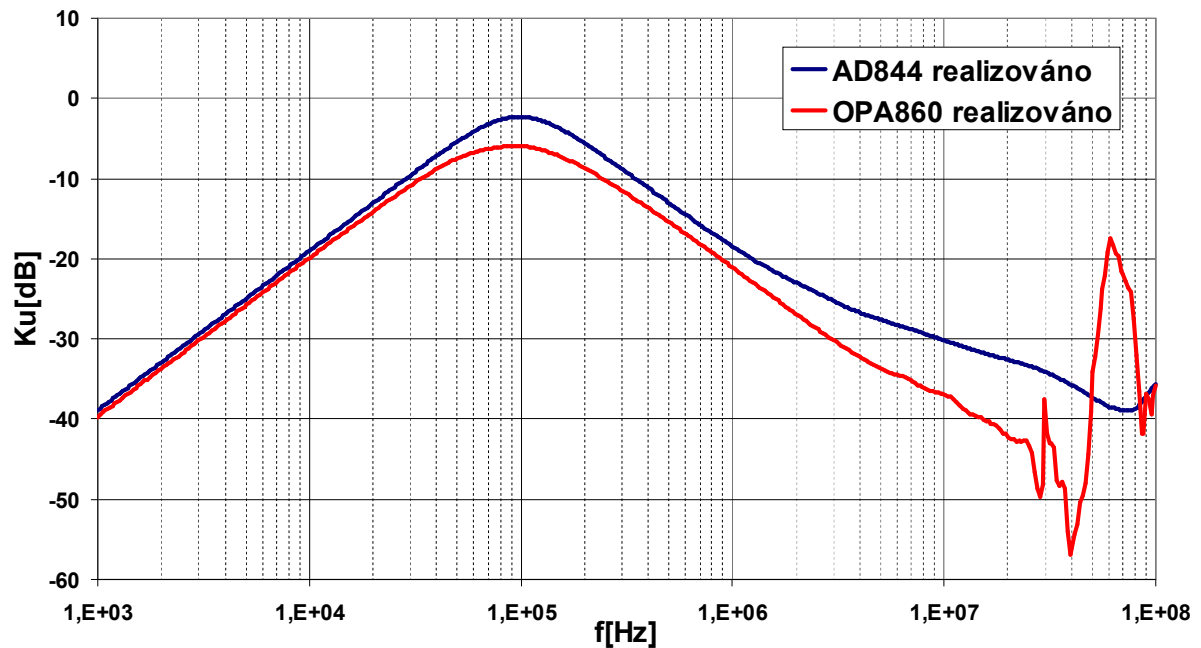
$$R_1 = 910 \, \Omega, R_2 = 1 \, \text{k}\Omega, R_{\text{gm}} = 910 \, \Omega, C_1 = 2.4 \, \text{nF}, C_2 = 1.2 \, \text{nF}.$$

Pro **AD844**:

$$R_1 = 910 \, \Omega, R_2 = 1 \, \text{k}\Omega, R_{\text{gm}} = 910 \, \Omega, C_1 = 2.2 \, \text{nF}, C_2 = 1.2 \, \text{nF}.$$



Obr 8.1: Simulované modulové kmitočtové charakteristiky napěťových přenosů pásmových propustí PP2.



Obr 8.2: Změřené modulové kmitočtové charakteristiky napěťových přenosů pásmových propustí PP2.

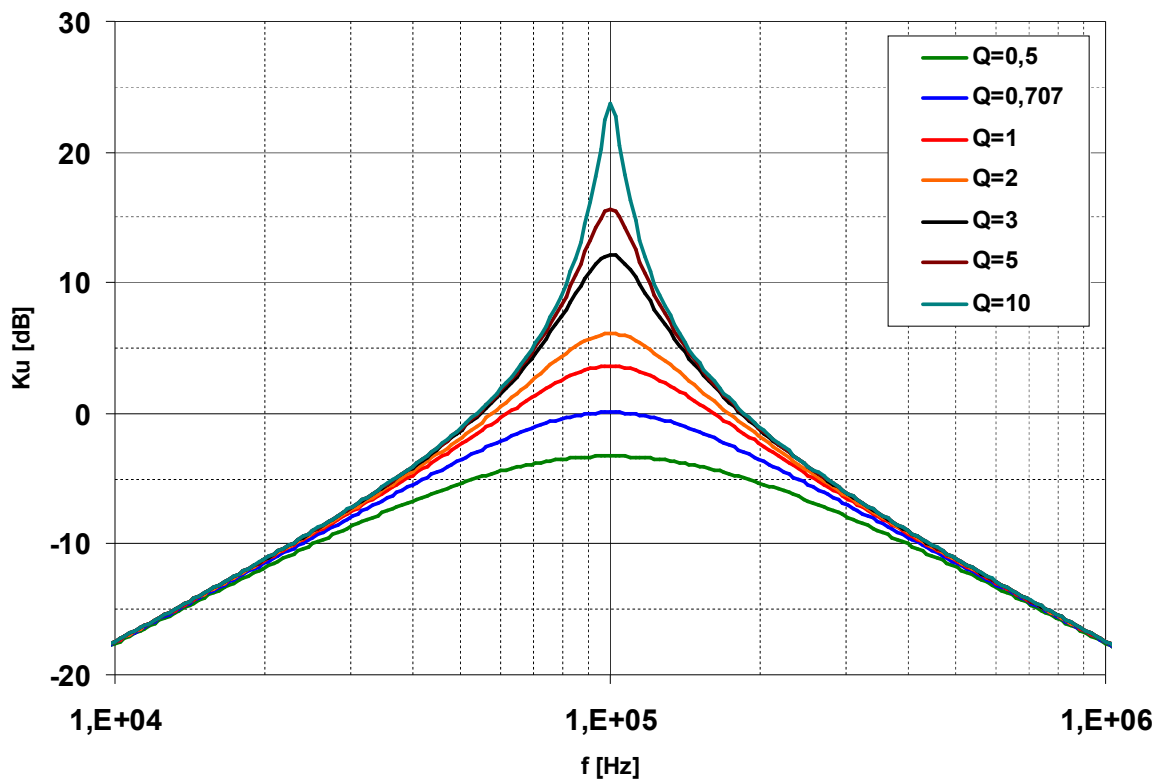
Z obr. 8.2 je vidět, že PP2 s OPA860 má na mezním kmitočtu velký útlum. Na vysokých frekvencích okolo 40 MHz jsou zákmity způsobené parazitními kapacitami. Navzdory tomu že v simulacích vypadal jako lepší kandidát na realizaci obvodu s OPA860 v praxi má lepší vlastnosti obvod s AD844.

Filtr z autonomního obvodu 1 – změna činitele jakosti Q PP2

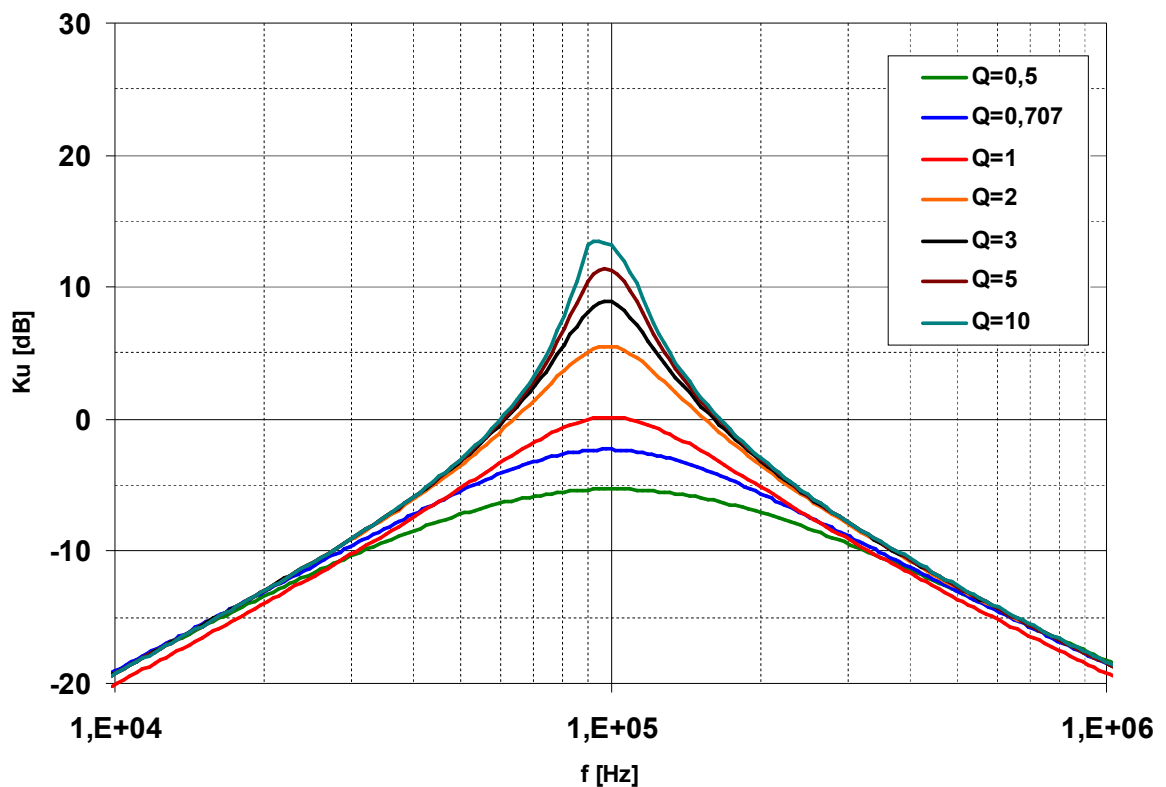
Tak jako v kap 7.7 můžeme měnit činitel jakosti bez změny mezního kmitočtu pouhou změnou odporu R_2 (součástka byla tedy několikrát přepájena). Obvod je v napěťovém módu. Mezní kmitočet filtrů je 100 kHz. Jako výchozí byl ponechán filtr PP2 s AD844 (měněn byl pouze R_2), který dosáhl lepších výsledků (viz obr. 8.2). Na obr. 8.3 jsou zobrazeny výsledné přenosy ze simulací na obr 8.4 naměřené přenosy. Byly použity následující hodnoty z výrobní řady E24:

Tab. 8.1: Hodnoty rezistoru R_2 pro změnu činitele jakosti filtru:

Q [-]	0,5	0,707	1	2	3	5	10
R_2 [k Ω]	0,68	1	1,5	2,7	4,3	6,8	15



Obr 8.3: Simulované modulové kmitočtové charakteristiky napěťových přenosů pásmových propustí PP2 v okolí mezního kmitočtu.

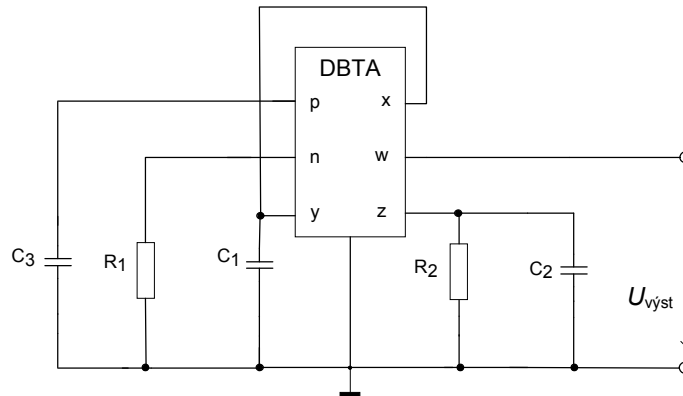


Obr 8.4: Změřené modulové kmitočtové charakteristiky napěťových přenosů pásmových propustí PP2 v okolí mezního kmitočtu.

9 Návrh a simulace oscilátoru DBTA

9.1 Návrh oscilátoru metodou autonomních obvodů

Obdobně jako kapitole 7.4 využijeme při návrhu oscilátoru metodu autonomních obvodů. Využijeme autonomního obvodu číslo 4 z tabulky 7.1. Vhodnou volbou pasivních prvků dle obrázku 9.1 získáme charakteristickou rovnici obvodu 9.1.



Obr. 9.1: Navržený oscilátor.

Charakteristická rovnice obvodu:

$$D(p) = p^2 C_1 C_2 R_1 R_2 + p (C_1 R_1 - C_3 R_1 R_2 g_m) + R_2 g_m = 0 \quad (9.1)$$

Pro charakteristický kmitočet navrženého oscilátoru tedy platí:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g_m}{C_1 C_2 R_1}}. \quad (9.2)$$

Oscilační podmínka obvodu je dána rovnicí:

$$(C_1 R_1 - C_3 R_1 R_2 g_m) = 0. \quad (9.3)$$

Hodnoty pasivních prvků musí dle rovnice 9.2 splnit podmínku:

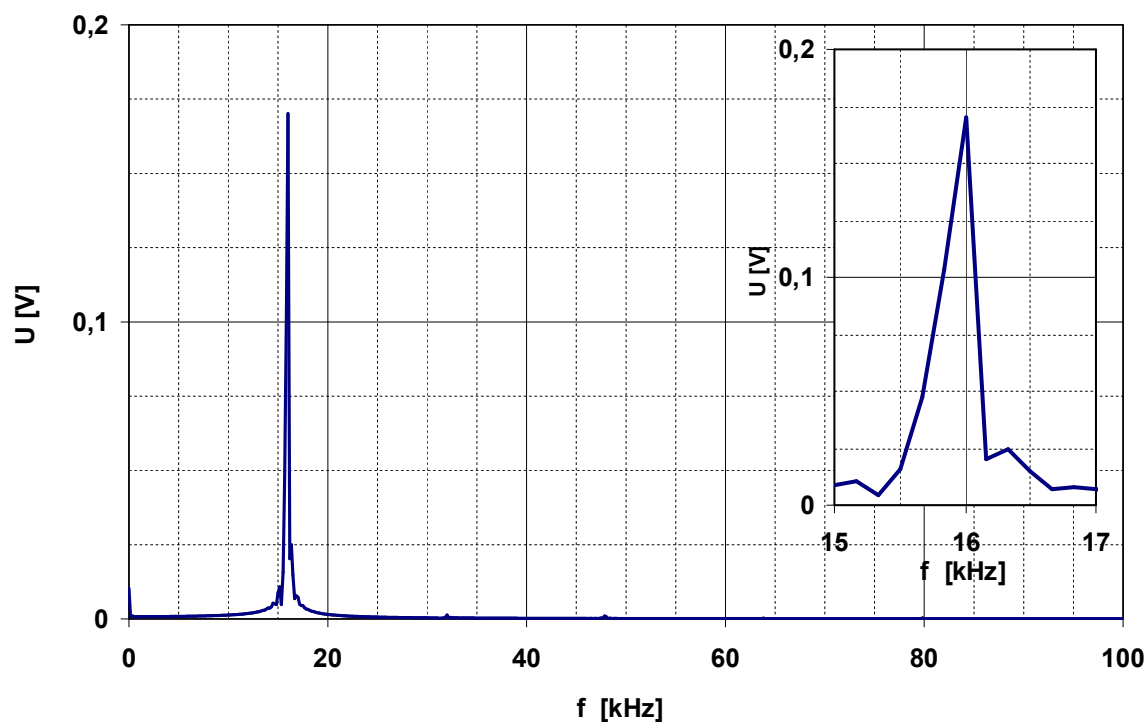
$$\frac{C_1}{R_2} = C_3 g_m. \quad (9.4)$$

Z rovnice 9.4 vyplývá že oscilační podmínku můžeme splnit následující volbou hodnot pasivních prvků: $R_1 = R_2 = R_{gm} = 10 \text{ k}\Omega$ ($g_m = 0,1 \text{ mS}$), $C_1 = C_2 = C_3 = 1 \text{ nF}$. Dle rovnice 9.2 je výsledný oscilační kmitočet $15,92 \text{ kHz}$. Rovnice 9.3 je teoretická, aby se obvod rozkmital musí být nestabilní toho docílíme volbou $R_2 = 10,6 \text{ k}\Omega$ pak je splněna rovnice 9.5:

$$(C_1 R_1 - C_3 R_1 R_2 g_m) < 0. \quad (9.5)$$

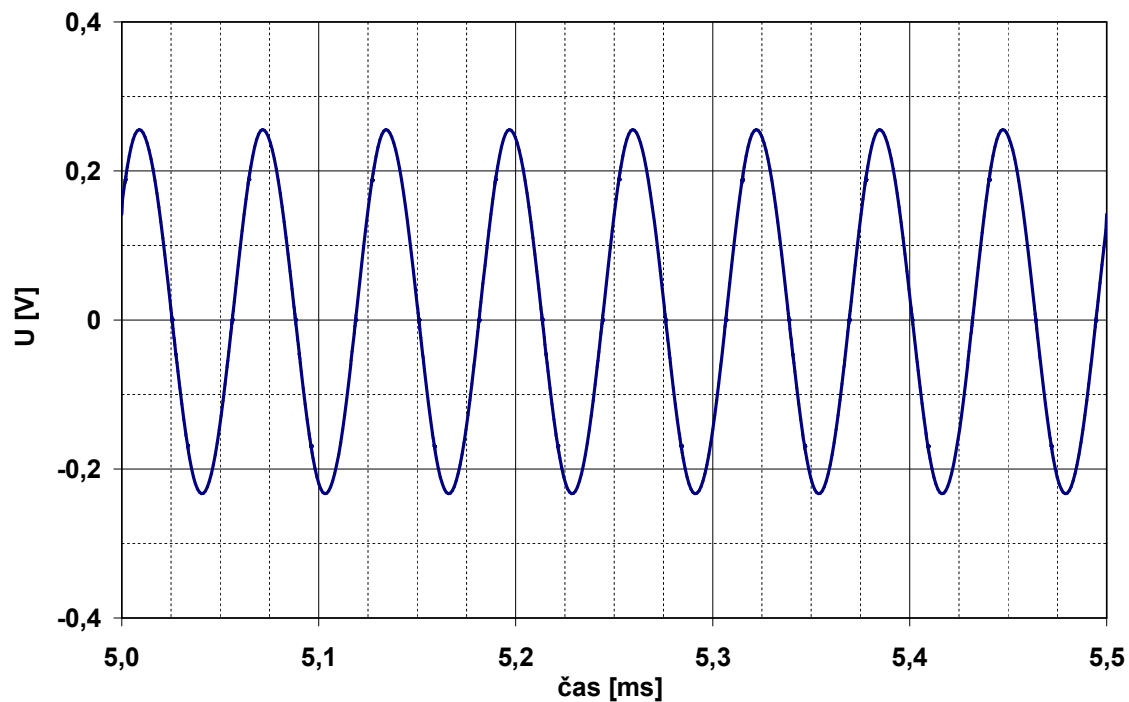
9.2 Simulace oscilátoru s DBTA

V této kapitole budou ukázány výsledky simulací oscilátoru navrženého v kap. 9.1. Časový průběh oscilací je na obr. 9.2. Spektrum výstupního napětí na obr.9.3.



Obr 9.2: Spektrum výstupního napětí oscilátoru.

Z obr 9.2 vyplívá že oscilační kmitočet je mírně vyšší (16 kHz) oproti teoretické hodnotě (15,92 kHz) z kapitoly 9.1 o 80 Hz.

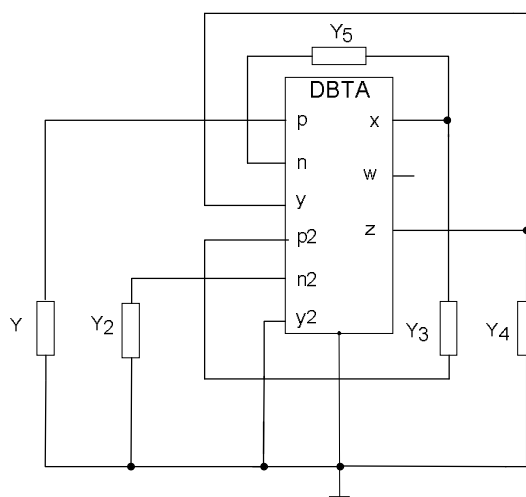


Obr 9.3: Časový průběh oscilací.

10 Návrh a simulace pásmové zadržky FDBTA

10.1 Návrh pásmové zadržky metodou autonomních obvodů

Obdobně jako kapitole 7.4 využijeme při návrhu oscilátoru metodu autonomních obvodů. Autonomní obvod s jedním prvkem FDBTA je obrázku 10.1. Za pomoci programu SNAP získáme charakteristickou rovnici obvodu 10.1.

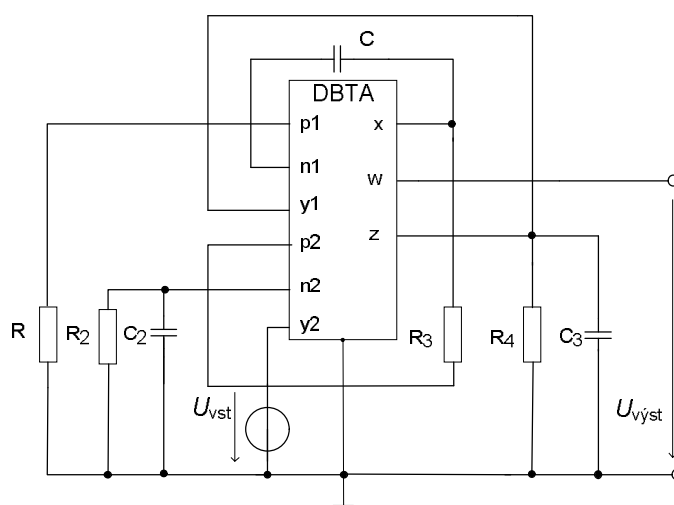


Obr. 10.1: Autonomní obvod s FDBTA.

Charakteristická rovnice tohoto obvodu byla získána pomocí programu SNAP [5]:

$$D = Y_5 Y_4 + Y_3 Y_4 - Y_5 Y_1 - Y_1 Y_3 + g_m Y_3 + 2 Y_5 Y_3 - g_m Y_5 = 0. \quad (10.1)$$

Konkrétní zapojení prvků v obvodu, které je ukázáno na obr. 10.2 získáme volbou: $Y_1 = 1/R_1 = G_1$, Y_2 složíme paralelní kombinací $G_2 = 1/R_2$ a pC_2 , $Y_3 = 1/R_3 = G_3$, Y_4 složíme paralelní kombinací $G_4 = 1/R_4$ a pC_3 , $Y_5 = pC_1$ (komplexní proměnná $p = j\omega$).



Obr. 10.2: Navržená pásmová zadržka v napěťovém módu.

Pokud volíme hodnoty pasivních prvků následovně: $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_{gm}$, $C_1 = C_2 = C_3$ pak komplexní přenosová funkce pásmové zadržky má tvar:

$$K_u = \frac{U_{\text{výst}}}{U_{\text{vst}}} = -\frac{p^2 C^2 R^2 + 1}{p^2 C^2 R^2 + p 2CR + 1}. \quad (10.2)$$

Pro charakteristický kmitočet a činitel jakosti Q navrženého filtru tedy platí:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{b_0}{b_2}} = \frac{1}{RC}, \quad Q = \omega_0 \sqrt{\frac{b_2}{b_1}} = \frac{\sqrt{b_0 b_2}}{b_1} = \frac{1}{2}. \quad (10.3), (10.4)$$

Pro zvolený kmitočet $f_0 = 100$ kHz byly zvoleny hodnoty pasivních prvků následovně: $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_{\text{gm}} = 10$ k Ω ($g_m = 0,1$ mS). Můžeme za pomoci vztahu 10.3 získat návrhový vztah pro výpočet kapacitorů

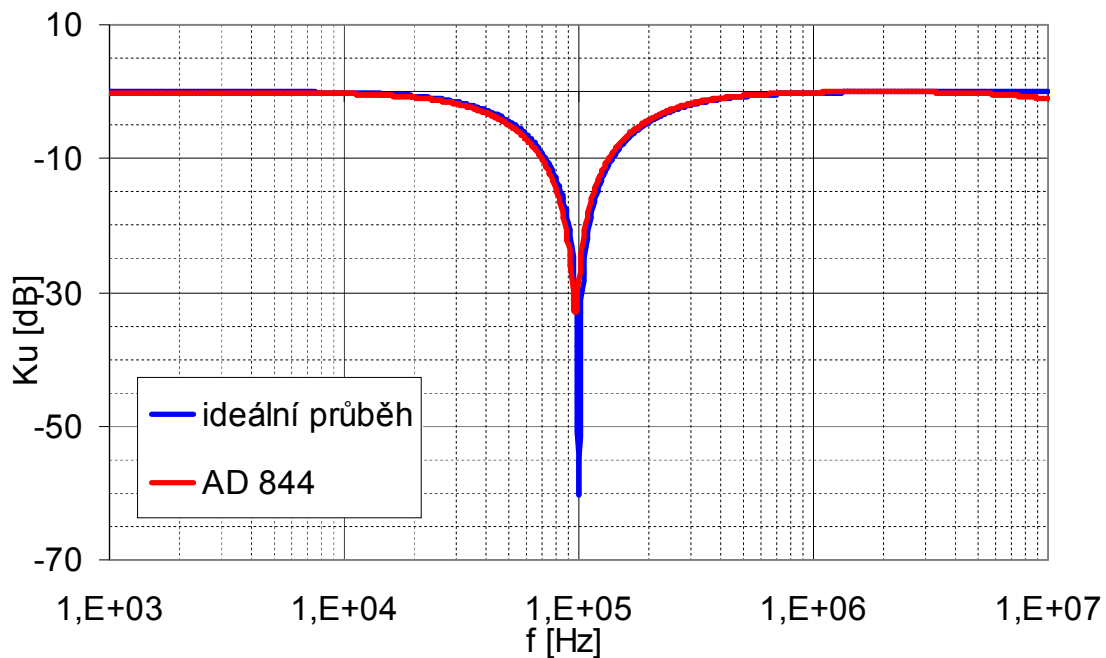
$$C = \frac{1}{\omega_0 R}. \quad (10.5)$$

a dopočítat hodnoty kondenzátorů: $C_1 = C_2 = 159$ pF. Tyto teoretické hodnoty budou ověřeny v kap. 10.2 pomocí simulačních programů SNAP [5] a OrCAD PSpice [33].

10.2 Simulace pásmové zadržky s FDBTA

V této kapitole budou ukázány výsledky simulací obvodu navrženého v kap. 10.1. Bude ukázáno porovnání s ideálním prvkem.

Při simulacích byly pro DBTA použity modely CCII+ Level 1, což je prakticky ideální prvek, přidán byly zejména pro kontrolu správnosti zapojení. Z reálných prvků potom AD844. Na obr. 10.3 jsou modulové kmitočtové charakteristiky pásmové zadržky druhého řádu s mezním kmitočtem 100 kHz.



Obr 10.3: Modulové kmitočtové charakteristiky přenosu pásmové zadržky s ideálním prvkem a AD844.

11 Závěr

Cílem této práce bylo prostudovat aplikační možnosti moderních aktivních prvků, tj. proudových a napěťových konvektorů.

Na prvku DBTA bylo ukázáno jak za pomoci těchto aktivních prvků vznikají nové. Pomocí metody autonomních obvodů bylo navrženo několik obvodů. Na vybraném a obvodu byl ukázán celý návrhový proces kmitočtového filtru. Vlastnosti navrženého filtru byly simulovány v programu OrCAD PSpice a byly použity modely UCC-1L, UCC-3L, UVC-1L, UVC-3L, AD844 a OPA860. Pro zvolený mezní kmitočet měl z reálných prvků nejvhodnější vlastnosti obvod OPA860 od firmy Texas Instruments, pro který byla provedena i optimalizace. Ta byla provedena za pomoci parametrické analýzy (Parametric Sweep) v programu OrCAD PSpice. Byl ukázán rozdíl mezi návrhem filtru s ideálními součástkami a jeho „reálnými“ modely. Díky svým výrobním odchylkám mohou způsobit velké problémy při použití v reálných aplikacích. Tento vliv byl také ukázán pomocí statistické analýzy „Monte Carlo“. Bylo zjištěno, že i malá odchylka parametrů součástek má relativně velký vliv na posun mezního kmitočtu a tím zhoršení kvality výsledného filtru. Filtr byl také navržen pro různé činitele jakosti a byly zjištěny relativní citlivosti i zobecněné citlivostní funkce. Prvek DBTA byl zvolen i pro ukázkou návrhu oscilátoru. Návrh filtru byl proveden i s nově definovaným prvkem FDBTA

Byly realizovány dvě „stejně“ pásmové propusti s DBTA za použití obvodů OPA860 a AD844 z naměřených hodnot vyšel lépe obvod s AD844. S tímto prvkem proto byla tedy pásmová propust realizována pro různé činitele jakosti pouze změnou jediného odporu bez změny mezního kmitočtu. Z výsledků práce vyplývá, že jsou znatelné rozdíly mezi simulačními programy (i když s reálnými modely) a praxí.

Literatura

- [1] C. Acar and S. Ozoguz, "A new versatile building block: current differencing buffered amplifier suitable for analog signal processing filters," *Microelectronics Journal*, vol. 30, pp. 157-160, 1999.
- [2] BEČVÁŘ D., VRBA K.: Napěťové konvejory. *Elektrorevue - Internetový časopis* (<http://www.elektrorevue.cz>), 2001.
- [3] BEČVÁŘ D., VRBA K.: Universální proudový konvektor. *Elektrorevue - Internetový časopis* (<http://www.elektrorevue.cz>), 2000, č. 15, s. 1-4. ISSN: 1213-1539.
- [4] D. Biolek, "CDTA - Building Block for Current-Mode Analog Signal Processing", *Proc. 16th ECCTD'03*. Krakow, Poland, pp. 397-400, 2003
- [5] BIOLEK, D., KOLKA, Z.: SNAP – symbolic, semisymbolic, and numerical analysis of electronic circuits. URL <http://snap.webpark.cz/indexa.html>
- [6] DOSTÁL, T.: *Elektrické filtry*. Brno: Učební elektronické texty FEKT VUT, 2004.
- [7] T. Dostal and J. Pospisil, "Hybrid models of 3-port immittance convertors and current and voltage conveyors," *Electronics Letters*, vol. 18, no. 20, pp. 887-888, 1982.
- [8] ELWAN, H.O. and SOLIMAN, A.M.: "Novel CMOS differential voltage current conveyor and its applications.", *IEE Proc.-Circuits Devices Syst.*, 1997, Vol. 144, No.3, pp. 195-200
- [9] FABRE, A.: "Third-generation current conveyor: A new helpful active element", *Elec. Letters*, Vol. 31, No.5, pp. 338-339, Mar. 1995
- [10] S. Franco, "Current-feedback amplifiers benefit high-speed designs," *EDN*, pp. 161-172, 1989.
- [11] HÁJEK, K.; SEDLÁČEK, J.: *Kmitočtové filtry*. Praha: BEN – technická literatura, 2002. 523 stran. ISBN 8-0730-0023-7
- [12] N. Herencsar, J. Koton, I. Lattenberg, and K. Vrba, "Signal-flow graphs for current-mode universal filter design using Current Follower Transconductance Amplifiers (CFTAs)," *Proc. APPEL'08*, Pilsen, Czech R., pp. 113-116, 2008.
- [13] HERENCŠÁR, N.; VRBA, K. Current conveyors-based circuits using novel transformation method, *IEICE Electronics Express*, 2007, vol. 4, no. 21, s. 650-656. ISSN: 1349-2543.
- [14] HERENCŠÁR, N.; VRBA, K.; KOTON, J.; LATTENBERG, I. The conception of differential-input buffered and transconductance amplifier (DBTA) and its application, *IEICE Electronics Express*, 2009, vol. 6, no. 6, s. 329-334. ISSN: 1349-2543.
- [15] JEŘÁBEK J., VRBA K.: Vybrané vlastnosti universálního proudového konvektoru - ukázka návrhu aplikace. *Elektrorevue - Internetový časopis* (<http://www.elektrorevue.cz>), 2006, roč. 2006, č. 33, s. 1-4. ISSN: 1213-1539.
- [16] KOTON, J.; VRBA, K.: Zobecněné metody návrhu kmitočtových filtrů. *Elektrorevue - Internetový časopis* (<http://www.elektrorevue.cz>), 2008, roč. 2008, č. 26, s. 1-17. ISSN: 1213-1539.

- [17] I. Lattenberg, K. Vrba, Novel bipolar current buffered amplifiers, *Proc. of the 5th WSES/IEEE International Conference on Circuits, Systems, Communications and Computers*, pp. 1-4, Rethymno, Crete, Greece, 2001. ISBN 960-8052-33-5.
- [18] MATĚJÍČEK, L., OLŠÁK, M., VRBA, K. Nový multifunkční filtr v proudovém módu. *Elektrorevue - Internetový časopis (<http://www.elektrorevue.cz>)*, 2002, roč. 2002, č. 39, s. 1-14. ISSN: 1213-1539.
- [19] MATĚJÍČEK, L., VRBA, K.: Komplexní citlivostní analýza. *Elektrorevue - Internetový časopis (<http://www.elektrorevue.cz>)*, 2001, roč. 2001, č. 3, s. 1-19. ISSN: 1213-1539.
- [20] MINARČÍK, M., VRBA, K. Low-output and high input impedance frequency filters using universal voltage conveyor for High Speed Data Communication Systems. In *Proc. IARIA ICN'06*, Mauritius, 2006. s. 1-4. ISBN: 0-7695-2570-9.
- [21] MOHAN, P. V. A. *Current-Mode VLSI Analog Filters..* Boston: Birkhäuser, 2003. 453 s. ISBN 0-8176-4277-3.
- [22] V. Novotny and K. Vrba, "Applications with Voltage Conveyors," *Proc. 2nd WSEAS ICECS'03*, Singapore, pp. 1-4, 2003.
- [23] R. Prokop and V. Musil, "Modular approach to design of modern circuit blocks for current signal processing and new device CCTA," *Proc. 7th IASTED SIP'05*, Hawaii, USA, pp. 494-499, 2005
- [24] SEDRA, A., and SMITH, K.C.: "The current conveyor: A new circuit building block", *Proc. IEEE*, Vol.56, pp. 1368-1369, Aug. 1968
- [25] SEDRA, A.S., and SMITH, K.C.: "A second generation current conveyor and its application", *IEEE Trans.*, 1970, CT-17, pp. 132-134
- [26] VRBA, K., LATTENBERG, I., MATĚJÍČEK, L. *Analogová technika - TKO 008*. Brno: VUT Brno, 2002. s. (107 s.)
- [27] A. Zeki, A. Toker, and S. Ozoguz, "Linearly tunable transconductor using modified CDBA," *Analog Integrated Circuits and Signal Proc*, vol. 26, no. 2, pp. 179-183, 2001.
- [28] AD844—operational amplifier. Datasheet, Analog Devices. 2003.URL: <http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD844.pdf>
- [29] OPA860— wide bandwidth operational transkonduktance amplifier. Datasheet, Texas Instruments, 2008. URL: < <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/opa860.pdf> >
- [30] Derive 6 trial, Introduction to Derive(tm) [pdf online file] http://education.ti.com/educationportal/appsdelivery/download/download_eula.jsp?applicationId=6100&contentPaneId=7&cid=US. 52 stran.
- [31] EAGLE 4.14 Light Help.
- [32] MATLAB User's Guide.
- [33] OrCAD, Inc. OrCad PSpice User's Guide [pdf online file] USA: OrCAD, 1998. <http://www.electronics-lab.com/downloads/schematic/013/>. 436 pages.

Seznam použitých zkratek a symbolů

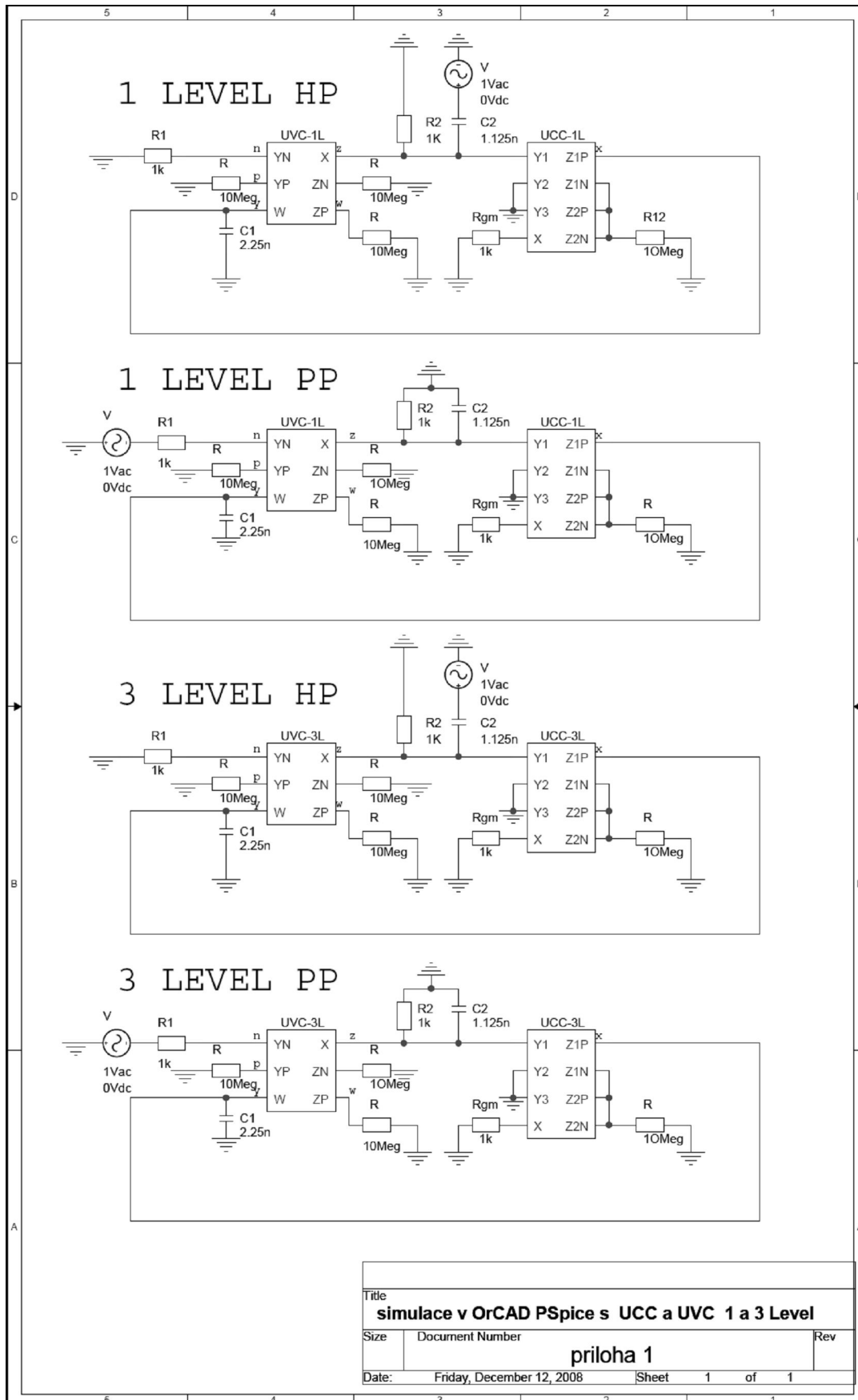
C	Kapacita, jednotka farad [F]
CC	Proudový konvektor (<i>Current Conveyor</i>)
CCC	Řízený proudový konvektor (<i>Current Controlled Conveyor</i>)
CCTA	(<i>Current Conveyor Transconductance Amplifier</i>)
CDBA	(<i>Current Differential Buffered Amplifier</i>)
CDTA	(<i>Current Differencing Transconductance Amplifier</i>)
CFTA	(<i>Current Follower Transconductance Amplifier</i>)
CMRR	Činitel potlačení souhlasného signálu (<i>Common Mode Rejection Ratio</i>)
CSBA	(<i>Current Summing Buffered Amplifier</i>)
CSTA	(<i>Current Summing Transconductance Amplifier</i>)
$D(p)$	Charakteristická rovnice
DBTA	(<i>Differential-input Buffered and Transconductance Amplifier</i>)
DCCTA	(<i>Differential Current Conveyor Transconductance Amplifier</i>)
DDCC	Proudový konvektor s diferenčním vysokoimpedančním vstupem (<i>Differential Difference Current Conveyor</i>)
DP	Doplňkový propust
DVCC	Proudový konvektor s diferenčním vysokoimpedančním vstupem (<i>Differential Voltage Current Conveyor</i>)
F	Frekvence, jednotka hertz [Hz]
FDBTA	(<i>Fully Differential-input Buffered and Transconductance Amplifier</i>)
f_m	Mezní frekvence, jednotka hertz [Hz]
G	Vodivost, jednotka siemens [S]
GCC	Zobecněný proudový konvektor (<i>Generalized Current Conveyor</i>)
GVC	Zobecněný napěťový konvektor (<i>Generalized Voltage Conveyor</i>)
g_m	Transkonduktance
HP	Horní propust
I	Proud, jednotka ampér [A]
K	Modul přenosu
MOTA	OTA s více výstupy (<i>Multiple Operational Transconductance Amplifier</i>)
n_i, p_i	Nuly a póly přenosové funkce filtru
OTA	Operační transkonduktanční zesilovač (<i>Operational Transconductance Amplifier</i>)
OZ	Operační zesilovač
p	$p = j\omega$, komplexní proměnná
PP	Pásmová propust
PZ	Pásmová zádrž
Q	Činitel jakosti
R	Odpor, jednotka ohm [Ω]
U	Napětí, jednotka volt [V]
UCC	Univerzální proudový konvektor (<i>Universal Current Conveyor</i>)
VC	Napěťový konvektor (<i>Voltage Conveyor</i>)
VCCS	Zdroj proudu řízený napětím (<i>Voltage-Controlled Current Source</i>)

UVC	Univerzální napěťový konvektor (<i>Universal Voltage Conveyor</i>)
Y	Admittance, jednotka siemens [S]
Z	Impedance, jednotka ohm [Ω]
α, β, γ	Koeficienty přenosu proudového konvektoru
Φ	Argument, jednotka radián, stupeň [rad, $^\circ$]
Ω	Úhlová frekvence $\omega = 2\pi f$

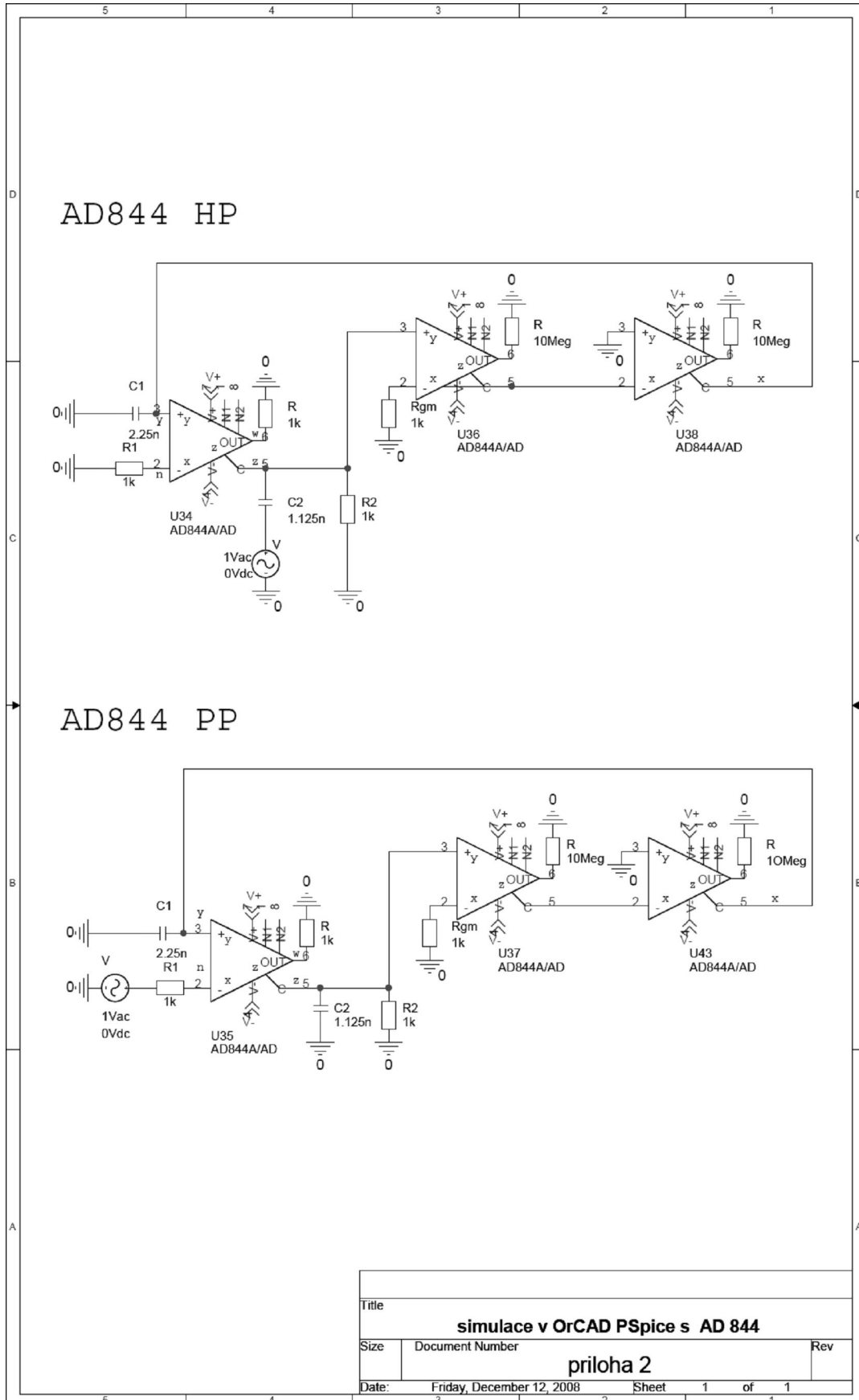
Seznam příloh

Příloha I: Simulace v OrCAD PSpice: horní a pásmová propust s UCC a UVC 1L, 3L.	60
Příloha II: Simulace v OrCAD PSpice: horní a pásmová propust s AD 844.....	61
Příloha III: Simulace v OrCAD PSpice: horní a pásmová propust s OPA860	62
Příloha IV: Program pro výpočet citlivostí v MATLABu	63
Příloha V: Návrh desky a partlist pro PP2 s AD844.....	66
Příloha VI: Návrh desky a partlist pro PP2 s OPA860.....	67
Příloha VII: Fotografie realizovaných filtrů	68
Příloha VIII: Elektronická verze diplomové práce na CD ve formátu PDF	

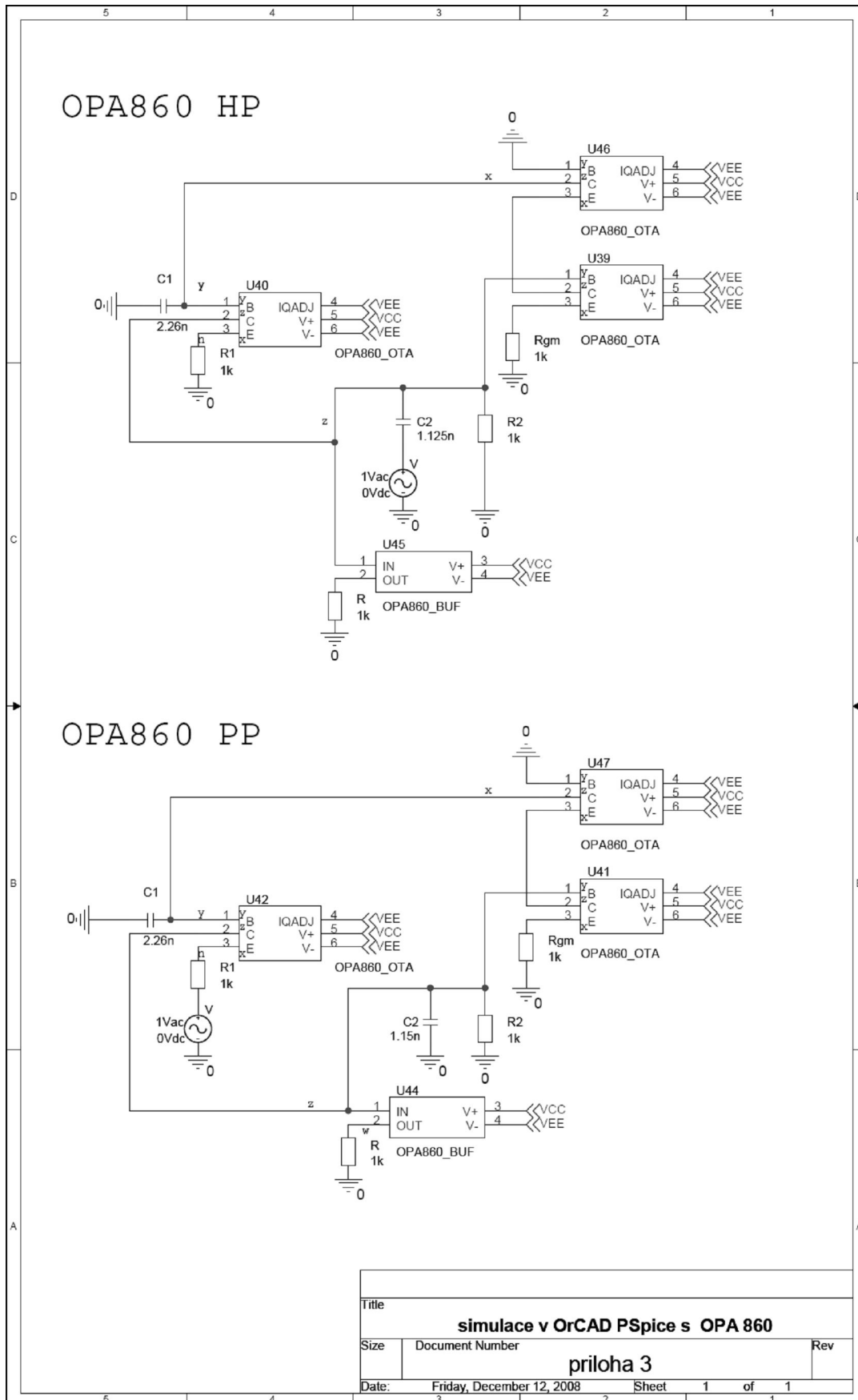
Příloha I: Simulace v OrCAD PSpice: horní a pásmová propust s UCC a UVC 1L, 3L



Příloha II: Simulace v OrCAD PSpice: horní a pásmová propust s AD 844



Příloha III: Simulace v OrCAD PSpice: horní a pásmová propust s OPA860



Příloha IV: Program pro výpočet citlivostí v MATLABu

close all; clear all;

R1=909; R2=953; C1=2.26e-9 ; C2=1.15e-9; gm=1/953; % hodnoty použitých pasivních prvků
f=0:100:1e+7; % krokovaní frekvence

w=2*pi*f; p=1*w; % p = jw , komplexní proměnná

% jednotlivé citlivosti podle vzorců 7.22 ať 7.31

kc1=-((gm*R2)/(p.^2*C1*C2*R1*R2+p*C1*R1+R2*gm));

kc2=-((p.^2*C2*C1*R1*R2)/(p.^2*C1*C2*R1*R2+p*C1*R1+R2*gm));

kr1=-((p.^2*C2*C1*R1*R2+p*C1*R1)/(p.^2*C1*C2*R1*R2+p*C1*R1+R2*gm));

kr2=-((p.*C1*R1)/(p.^2*C1*C2*R1*R2+p*C1*R1+R2*gm));

kgm=((gm*R2)/(p.^2*C1*C2*R1*R2+p*C1*R1+R2*gm));

hkc1=-((gm*R2)/(p.^2*C1*C2*R1*R2+p*C1*R1+R2*gm));

hkc2=-((p.*C1*R1+R2*gm)/(p.^2*C1*C2*R1*R2+p*C1*R1+R2*gm));

hkr1=-((R2*gm)/(p.^2*C1*C2*R1*R2+p*C1*R1+R2*gm));

hkr2=-((p.*C1*R1)/(p.^2*C1*C2*R1*R2+p*C1*R1+R2*gm));

hkgm=((gm*R2)/(p.^2*C1*C2*R1*R2+p*C1*R1+R2*gm));

rkc1=real(kc1); % reálné části citlivosti prvků PP1

rkc2=real(kc2);

rkr1=real(kr1);

rkr2=real(kr2);

rkgm=real(kgm);

rkc1h=real(hkc1); % reálné části citlivosti prvků HP1

rkc2h=real(hkc2);

rkr1h=real(hkr1);

rkr2h=real(hkr2);

rkgmh=real(hkgm);

ikc1=imag(kc1); % imaginární části citlivosti prvků PP1

ikc2=imag(kc2);

ikr1=imag(kr1);

ikr2=imag(kr2);

ikgm=imag(kgm);

ikc1h=imag(hkc1); % imaginární části citlivosti prvků HP1

ikc2h=imag(hkc2);

ikr1h=imag(hkr1);

ikr2h=imag(hkr2);

ikgmh=imag(hkgm);

arkc1=abs(rkc1); % absolutní hodnota z reálné části citlivosti prvků PP1

arkc2=abs(rkc2);

arkr1=abs(rkr1);

arkr2=abs(rkr2);

arkgm=abs(rkgm);

arkc1h=abs(rkc1h); % absolutní hodnota z reálné části citlivosti prvků HP1

arkc2h=abs(rkc2h);

arkr1h=abs(rkr1h);

```

arkr2h=abs(rkr2h);
arkgmh=abs(rkgmh);

irkc1=abs(ikc1); % absolutní hodnota z imaginární části citlivosti prvků PP1
irkc2=abs(ikc2);
irkr1=abs(ikr1);
irkr2=abs(ikr2);
irkgm=abs(ikgm);

irkc1h=abs(ikc1h); % absolutní hodnota z imaginární části citlivosti prvků HP1
irkc2h=abs(ikc2h);
irkr1h=abs(ikr1h);
irkr2h=abs(ikr2h);
irkgmh=abs(ikgmh);

wc=arkc1+arkc2+arkr1+arkr2+arkgm; %worstcase : součet všech absolutních hodnot z reálných
částí
wch=arkc1h+arkc2h+arkr1h+arkr2h+arkgmh;

wi=irkc1+irkc2+irkr1+irkr2+irkgm; % součet všech absolutních hodnot z imaginárních částí
wih=irkc1h+irkc2h+irkr1h+irkr2h+irkgmh;

figure(1) % hodograp DP - vykreslení
plot(kc1,'b', 'LineWidth', 4)
hold on; plot(kc2,'g', 'LineWidth', 4)
plot(kr1,'r', 'LineWidth', 4)
plot(kr2,'k', 'LineWidth', 4)
plot(kgm,'m', 'LineWidth', 4)
plot(-0.0662 + 0.7690i,'ob','LineWidth', 4) %citlivosti při 100 kHz staci vypsát hodnoty do100kHz
plot(-0.0589 + 0.6835i,'og','LineWidth', 4)
plot(0.9338 + 0.7690i,'or','LineWidth', 4)
plot(-0.9926 - 0.0855i,'ok','LineWidth', 4)
plot(0.0662 - 0.7690i,'om','LineWidth', 4)

title('Hodograp PP1','fontsize',16);xlabel('Re','fontsize',16);ylabel('Im','fontsize',16);
legend('C1 PP1', 'C2 PP1','R1 PP1','R2 PP1','gm PP1','100kHz',0);grid on; AXIS([-1.5 1.5 -1 1])

figure(2) % hodograp HP - vykreslení
plot(hkc1,'b', 'LineWidth', 4)
hold on; plot(hkc2,'g', 'LineWidth', 4)
%plot(hkr1,'r', 'LineWidth', 4)
plot(hkr2,'k', 'LineWidth', 4)
plot(hkgm,'m', 'LineWidth', 4)
plot(-0.0662 + 0.7690i,'ob','LineWidth', 4) %citlivosti při 100 kHz staci nechat vypsát hodnoty pro f
do 100kHz
plot(-1.0589 + 0.6835i,'og','LineWidth', 4)
plot(-0.9926 - 0.0855i,'ok','LineWidth', 4)
plot(0.0662 - 0.7690i,'om','LineWidth', 4)
title('Hodograp HP1','fontsize',16);xlabel('Re','fontsize',16);ylabel('Im','fontsize',16);
legend('C1=R1 HP1', 'C2 HP1','R2 PP1','gm HP1','100kHz',0);grid on; AXIS([-1.5 1.5 -1 1])

figure(3) % realné části PP1 - vykreslení
grid on;
semilogx(f,rkc1,'b', 'LineWidth', 4)
hold on;

```

```
semilogx(f,rkc2,'g', 'LineWidth', 4)
semilogx(f,rkr1,'r', 'LineWidth', 4)
semilogx(f,rkr2,'k', 'LineWidth', 4)
semilogx(f,rkgm,'m', 'LineWidth', 4)
title('Závislost reálné složky na frekvenci PP1','fontsize',16);xlabel('f [Hz]','fontsize',16);
ylabel('Re','fontsize',16);legend('C1 PP1', 'C2 PP1','R1 PP1','R2 PP1','gm PP1',0);grid on;
AXIS([ 1000 10e6 -1.5 1.5])
```

```
figure(4) % realné části HP - vykreslení
grid on;
semilogx(f,rkc1h,'b', 'LineWidth', 4)
hold on;
semilogx(f,rkc2h,'g', 'LineWidth', 4)
%semilogx(f,rkr1h,'r', 'LineWidth', 4)
semilogx(f,rkr2h,'k', 'LineWidth', 4)
semilogx(f,rkgmh,'m', 'LineWidth', 4)
title('Závislost reálné složky na frekvenci HP1','fontsize',16);xlabel('f [Hz]','fontsize',16);
ylabel('Re','fontsize',16);legend('C1=R1 HP1', 'C2 HP1','R2 HP1','gm HP1',0);grid on;
AXIS([ 1000 10e6 -1.5 1.5])
```

```
figure(5) % imaginární části PP1 - vykreslení
grid on; semilogx(f,ikc1,'b', 'LineWidth',4)
hold on; semilogx(f,ikc2,'g', 'LineWidth', 4)
%semilogx(f,ikr1,'r', 'LineWidth', 4)
semilogx(f,ikr2,'k', 'LineWidth', 4)
semilogx(f,ikgm,'m', 'LineWidth', 4)
```

```
AXIS([1000 1e+7 -1 1])
title('Závislost imaginární složky na frekvenci PP1','fontsize',20);xlabel('f [Hz]','fontsize',24);
ylabel('Im','fontsize',24);legend('C1= R1 PP1', 'C2 PP1','R2 PP1','gm PP1',0);grid on;
```

```
figure(6) % imaginární části - vykreslení HP1
semilogx(f,ikc1h,'b', 'LineWidth',4)
hold on;grid on;
semilogx(f,ikc2h,'g', 'LineWidth', 4)
%semilogx(f,ikr1h,'r', 'LineWidth', 4)
semilogx(f,ikr2h,'k', 'LineWidth', 4)
semilogx(f,ikgmh,'m', 'LineWidth', 4)
title('Závislost imaginární složky na frekvenci HP1','fontsize',20);xlabel('f [Hz]','fontsize',24);
ylabel('Im','fontsize',24);legend('C1=R1 HP1', 'C2 HP1','R2 HP1','gm HP1',0);AXIS([1000 1e+7 -11])
```

```
figure(7) % worstcase - vykreslení
grid on; semilogx(f,wc,'b', 'LineWidth',4)
hold on; semilogx(f,wch,'r', 'LineWidth',4)
AXIS([1000 1e+7 0 5]) ; title('worstcase','fontsize',16);xlabel('f [Hz]','fontsize',16);
ylabel('suma |Re|','fontsize',16);legend('worstcase PP1','worstcase HP1',0);grid on;
```

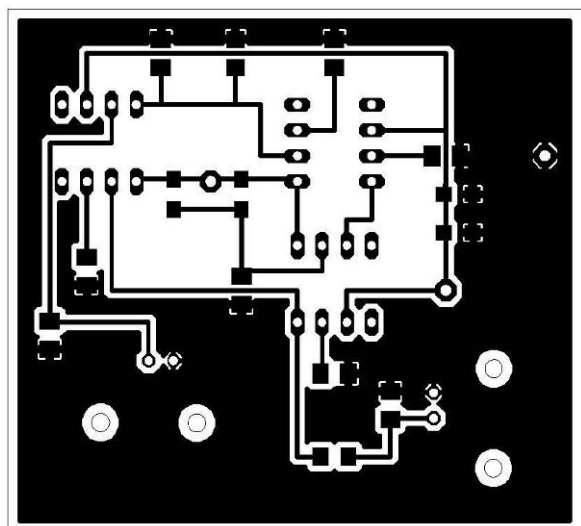
```
figure(8) % suma imag - vykreslení
grid on; semilogx(f,wih,'b', 'LineWidth',4)
%semilogx(f,wi,'r', 'LineWidth',4)
hold on;
AXIS([1000 1e+7 0 5])
title('worstcase','fontsize',16);xlabel('f [Hz]','fontsize',16);
ylabel('suma imag','fontsize',16);legend('worstcase PP1=HP1',0);grid on
```

Příloha V: Návrh desky a partlist pro PP2 s AD844

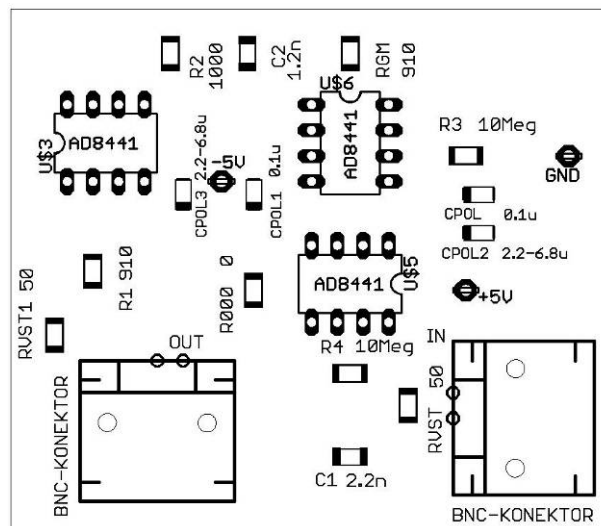
Partlist

EAGLE Version 4.14 Copyright (c) 1988-2005 CadSoft

Part	Value	Package	Library	Position (mm)	Orientation
+5V	LSP10	LSP10	solpad	(44.45 24.765)	MR0
-5V	LSP10	LSP10	solpad	(20.32 35.56)	R180
AD844_1	AD8441	DIL08	AD844	(33.02 25.4)	R180
AD844_2	AD8441	DIL08	AD844	(33.02 39.37)	R270
AD844_3	AD8441	DIL08	AD844	(8.89 39.37)	R0
C1	2.2n	C1206	rcl	(33.02 8.255)	MR180
C2	1.2n	C1206	rcl	(22.86 48.26)	MR90
CPOL	0.1u	SMC_A	rcl	(45.72 34.29)	MR180
CPOL1	0.1u	SMC_A	rcl	(23.495 34.29)	MR90
CPOL2	2.2-6.8u	SMC_A	rcl	(45.72 30.48)	MR180
CPOL3	2.2-6.8u	SMC_A	rcl	(16.51 34.29)	MR90
GND	LSP10	LSP10	solpad	(54.61 38.1)	R180
IN	BNC-KONEKTOR	KONEKTOR	BNC-konektor	(43.18 4.445)	R0
OUT	BNC-KONEKTOR	KONEKTOR	BNC-konektor	(6.35 17.78)	R270
R000	000	M1206	rcl	(23.495 24.765)	MR270
R1	910	M1206	rcl	(7.62 26.67)	MR90
R2	1000	M1206	rcl	(15.24 48.26)	MR270
R3	10Meg	M1206	rcl	(44.45 38.1)	MR0
R4	10Meg	M1206	rcl	(33.02 16.51)	MR0
RGM	910	M1206	rcl	(33.02 48.26)	MR270
RVST	50	M1206	rcl	(38.735 13.335)	MR270
RVST1	50	M1206	rcl	(3.81 20.32)	MR270



a)



b)

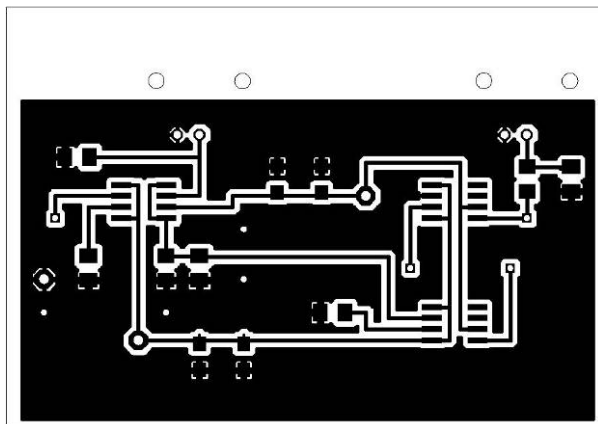
Obr. V.1: Navržená deska a) strana spojů b) rozmístění součástek.

Příloha VI: Návrh desky a partlist pro PP2 s OPA860

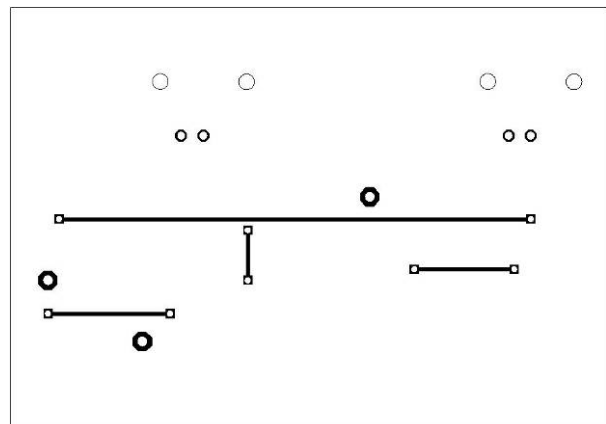
Partlist

EAGLE Version 4.14 Copyright (c) 1988-2005 CadSoft

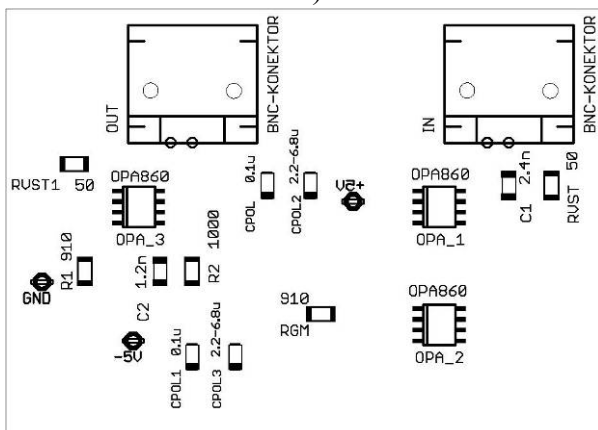
Part	Value	Package	Library	Position (mm)	Orientation
+5V	LSP10	LSP10	solpad	(40.64 27.305)	MR0
-5V	LSP10	LSP10	solpad	(14.605 10.795)	R180
C1	2.4n	C1206	rcl	(59.055 29.21)	MR90
C2	1.2n	C1206	rcl	(17.78 19.05)	MR270
CPOL	0.1u	SMC_A	rcl	(30.48 29.21)	MR90
CPOL1	0.1u	SMC_A	rcl	(21.59 8.89)	MR90
CPOL2	2.2-6.8u	SMC_A	rcl	(35.56 29.21)	MR90
CPOL3	2.2-6.8u	SMC_A	rcl	(26.67 8.89)	MR90
GND	LSP10	LSP10	solpad	(3.81 17.78)	R180
IN	BNC-KONEKTOR	KONEKTOR	BNC-konektor	(66.675 34.29)	R90
OPA_1	OPA860	SO-08	OPA860	(50.8 26.67)	MR90
OPA_2	OPA860	SO-08	OPA860	(50.8 12.7)	MR90
OPA_3	OPA860	SO-08	OPA860	(15.24 26.67)	MR90
OUT	BNC-KONEKTOR	KONEKTOR	BNC-konektor	(29.21 34.29)	R90
R1	910	M1206	rcl	(8.89 19.05)	MR90
R2	1000	M1206	rcl	(21.59 19.05)	MR90
RGM	910	M1206	rcl	(36.83 13.97)	MR180
RVST	50	M1206	rcl	(64.135 29.21)	MR90
RVST1	50	M1206	rcl	(7.62 31.75)	MR0



a)



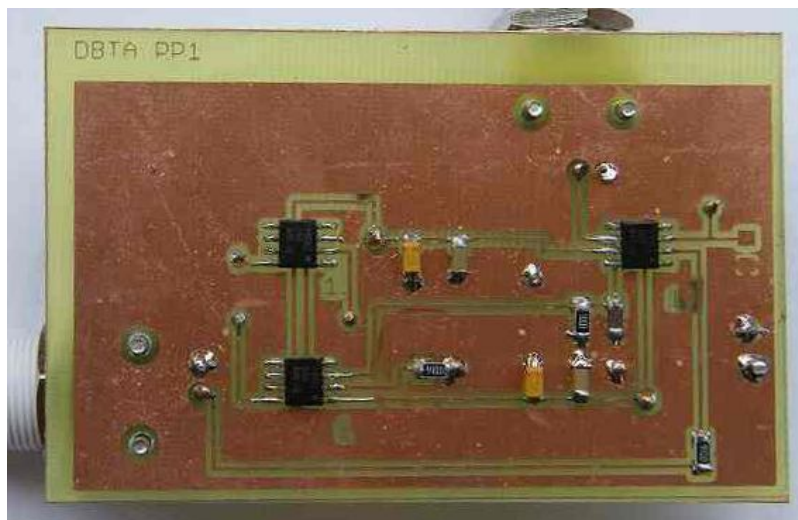
b)



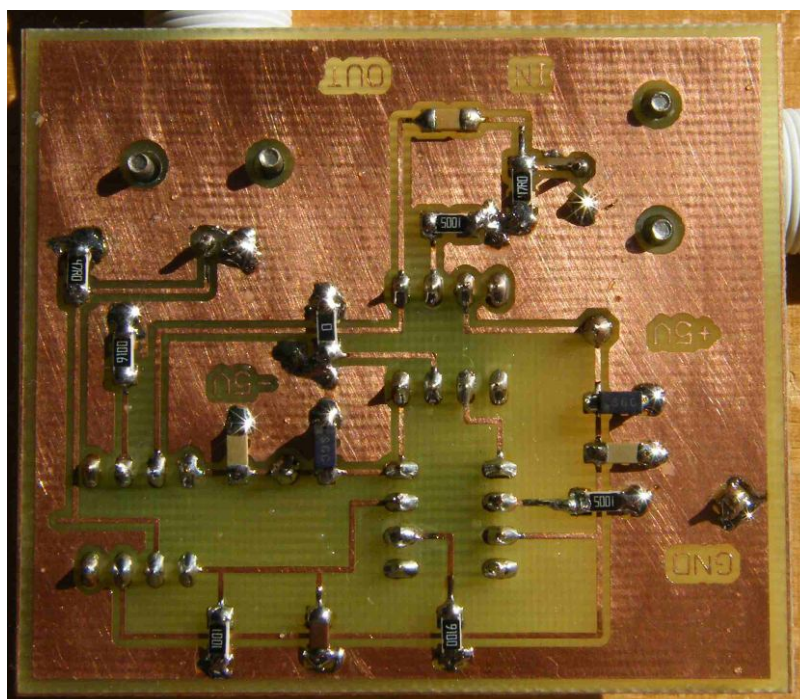
c)

Obr. VI.1: Navržená deska a) spodní strana spojů b) vrchní strana spojů c) rozmístění součástek.

Příloha VII: Fotografie realizovaných filtrů



Obr. VII.1: Fotografie realizovaného filtru s OPA 860.



Obr. VII.2: Fotografie realizovaného filtru s AD844.