

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

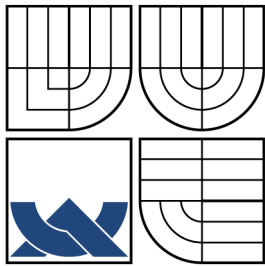
AKTIVNÍ KMITOČTOVÉ FILTRY S MINIMÁLNÍ
KONFIGURACÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

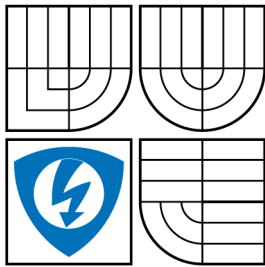
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MILAN PRECLÍK

BRNO 2008



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

AKTIVNÍ KMITOČTOVÉ FILTRY S MINIMÁLNÍ KONFIGURACÍ

ACTIVE FREQUENCY FILTERS WITH MINIMAL CONFIGURATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

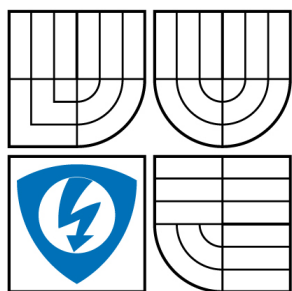
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MILAN PRECLÍK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. JAROSLAV KOTON

BRNO 2008



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Teleinformatika

Student: Preclík Milan

ID: 78421

Ročník: 3

Akademický rok: 2007/2008

NÁZEV TÉMATU:

Aktivní kmitočtové filtry s minimální konfigurací

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se a popište vlastnosti univerzálního proudového a napěťového konveju. Využitím více napěťových a proudových bran těchto aktivních prvků naleznete původní obvodová řešení kmitočtových filtrů druhého řádu popsanych charakteristickou rovnicí vhodnou pro snadný numerický návrh pasivních prvků. Analyzujte také možnost nezávislé změny některého ze základních parametrů filtru. Původní obvodové struktury podrobte citlivostní a toleranční analýze a chování vybraného zapojení experimentálně ověřte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] SU, K. L. Analog Filters Spring Verlag, 2002, 2. vydání, ISBN 1402070330
- [2] GHAUSI, M S, LAKER, K, R. Modern Filter Design, Active RC and Switched Capacitor, Noble Publishing 2003, ISBN 188493238X
- [3] MOHAN, P. V. A. Current-mode VLSI analog filters, Birkhauser, 2003, ISBN 0817642773.

Termín zadání: 11.2.2008

Termín odevzdání: 4.6.2008

Vedoucí práce: Ing. Jaroslav Koton

prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.

předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práve třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

LICENČNÍ SMLOUVA

POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Milan Preclík
Bytem: Proloh 13, 51703, Osečnice - Proloh
Narozen/a (datum a místo): 15.1.1986, Opočno

(dále jen "autor")

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
se sídlem Údolní 244/53, 60200 Brno 2
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.

(dále jen "nabyvatel")

Článek 1

Specifikace školního díla

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

- disertační práce
- diplomová práce
- bakalářská práce

jiná práce, jejíž druh je specifikován jako

(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Aktivní kmitočtové filtry s minimální konfigurací

Vedoucí/školitel VŠKP: Ing. Jaroslav Koton

Ústav: Ústav telekomunikací

Datum obhajoby VŠKP:

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v:

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

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

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

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

Článek 3

Závěrečná ustanovení

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

V Brně dne:

.....

Nabyvatel

.....

Autor

ABSTRAKT

Práce se zabývá využitím více proudových a napěťových bran aktivních prvků, po kterém následuje výběr optimálního obvodového zapojení, jeho simulace a následná realizace kmitočtového filtru. Nejprve zde jsou obecně popsány kmitočtové filtry a proudové a napěťové konvejory. Text se dále zaměřuje na hledání obvodových zapojení kmitočtových filtrů druhého řádu popsaných charakteristickou rovnicí, která umožňuje snadný numerický návrh. Metodou autonomních obvodů jsou hledána nová zapojení s jedním aktivním a minimálním počtem pasivních prvků. Jako další v pořadí je již výběr výsledného obvodového zapojení na základě provedených simulací v programu OrCAD. Práce končí ověřením chování vytvořeného přípravku.

KLÍČOVÁ SLOVA

Kmitočtový filtr, zobecněný proudový konvektor, univerzální proudový konvektor, zobecněný proudový konvektor double, zobecněný napěťový konvektor, univerzální napěťový konvektor, autonomní obvod.

ABSTRACT

This work deals with exploitation of multiple current and voltage gates of active components. After that an optimal circuit's scheme choice, its simulation and subsequent realization of frequency filter follow. First of all there is a common description of frequency filters and current and voltage conveyors. Furthermore the text focuses on searching circuit's schemes of second-level frequency filters, described by characteristic equation. These equations make an easy numerical concept possible. New circuits with one active component and with a minimal number of passive components are searched by using the method of autonomous circuits. The choice of resulting circuit based on simulations executed in Orcad is next in line. The work concludes with verification of a proper function of our filter.

KEYWORDS

Frequency filters, generalized current conveyor, universal current conveyor, generalized current conveyor double, generalized voltage conveyor, universal voltage conveyor, autonomous circuit.

PRECLÍK M. *Aktivní kmitočtové filtry s minimální konfigurací*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav telekomunikací, 2008. 49 s., 4 s. příloh. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jaroslav Koton.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Aktivní kmitočtové filtry s minimální konfigurací“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji mému vedoucímu bakalářské práce Ing. Jaroslavu Kotonovi za velmi účinnou metodickou pomoc, cenné rady a především věnovaný čas při zpracování této práce.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

OBSAH

1	Úvod	13
2	Kmitočtové filtry	14
2.1	Obecně o kmitočtových filtrech	14
2.2	Použití kmitočtových filtrů	14
2.3	Praktické vyhotovení filtrů	15
2.4	Základní vlastnosti a vztahy z problematiky filtrů	15
2.5	Kmitočtové filtry s přenosovou funkcí 2. řádu	16
2.5.1	Dolní propust 2. řádu (LP)	16
2.5.2	Horní propust 2. řádu (HP)	17
2.5.3	Pásmová propust 2. řádu (BP)	18
2.5.4	Pásmová zadrž 2. řádu (BR)	18
2.5.5	Fázovací obvod 2. řádu (AP)	18
2.6	Shrnutí přenosových funkcí kmitočtových filtrů 2. řádu	19
3	Proudové a napěťové konvejory	20
3.1	Proudové konvejory (CC)	20
3.1.1	Historie a jednotlivé generace	20
3.1.2	Zobecněný proudový konvektor (GCC)	20
3.1.3	Univerzální proudový konvektor (UCC)	22
3.1.4	Zobecněný proudový konvektor double (GDCC)	23
3.2	Napěťové konvejory (VC)	23
3.2.1	Vlastnosti a historie	24
3.2.2	Zobecněný napěťový konvektor (GVC)	24
3.2.3	Univerzální napěťový konvektor (UVC)	25
4	Návrh kmitočtových filtrů pomocí autonomních obvodů	26
4.1	Postup při návrhu kmitočtových filtrů	26
4.2	Návrhy kmitočtových filtrů s využitím GDCC	27
4.2.1	Nezávislé změny základních parametrů filtru	29
4.2.2	Konkrétní návrh s využitím autonomního obvodu č. 1	30
4.2.3	Konkrétní návrh s využitím autonomního obvodu č. 7	31
4.2.4	Numerický návrh obvodu č. 1	32
4.2.5	Numerický návrh obvodu č. 7	33
5	Simulace vybraných obvodů	34
5.1	Simulace obvodu č. 1	34
5.2	Simulace obvodu č. 7	36

6 Praktická realizace	38
6.1 Vyhotovení obvodu č. 7	38
6.2 Simulace vytvořeného filtru (obvodu č. 7)	39
7 Závěr	41
Literatura	42
Seznam symbolů, veličin a zkratk	43
Seznam příloh	45
A Rozmístění součástek na desce	46
B Deska s plošnými spoji	47
B.1 Přední strana desky plošných spojů	47
B.2 Zadní strana desky plošných spojů	48
C Fotografie zhotoveného přípravku	49

SEZNAM OBRÁZKŮ

3.1	Schématická značka GCC	21
3.2	Schématická značka UCC	22
3.3	Schématická značka GDCC	23
3.4	Schématická značka GVC	24
3.5	Schématická značka UVC	25
4.1	Obvod č. 1	31
4.2	Obvod č. 7	32
5.1	Přenosové charakteristiky obvodu č.1	34
5.2	Histogram HP obvodu č.1	35
5.3	Histogram PP obvodu č.1	35
5.4	Přenosové charakteristiky obvodu č.7	36
5.5	Histogram DP obvodu č.7	37
5.6	Histogram HP obvodu č.7	37
6.1	Schéma zapojení filtru	38
6.2	Filtr dolní propust	40
6.3	Filtr horní propust	40
A.1	Rozmístění součástek na desce	46
B.1	Deska s plošnými spoji (TOP)	47
B.2	Deska s plošnými spoji (BOTTOM)	48
C.1	Realizace filtru	49

SEZNAM TABULEK

2.1	Koeficienty přenosových funkcí zákl. typů filtrů 2. řádu	19
3.1	Koeficienty proudového konvejeoru a jejich význam [3]	21
4.1	Autonomní obvody s jedním prvkem GDCC	27
6.1	Použité součástky	39

1 ÚVOD

Kmitočtové filtry jsou lineární funkční bloky, které patří mezi nejčastěji používané v elektronice a elektrotechnice. Jejich úkolem je vhodně upravit spektrum signálu, který je dále zpracováván v analogové či digitální podobě.

Existuje nepřeberné množství struktur kmitočtových filtrů, které je možné jednoduše rozdělit na pasivní a aktivní. Poté jsou definovány jednotlivé typy kmitočtových filtrů jako dolní, horní a pásmová propust, pásmová zadrž, či fázovací článek.

V současné době se stále více prosazuje trend, kdy pasivní struktury jsou nahrazovány aktivními filtry vykazující ekvivalentní vlastnosti. Děje se tak z důvodu snadnější realizovatelnosti takových filtrů v mikroelektronické podobě a také možnosti jednoduché přeladitelnosti i přes nutnost napájení použitých aktivních prvků.

V této bakalářské práci budu analyzovat možnosti využití proudových konvektorů pro realizaci kmitočtových filtrů s minimální konfigurací. Budou hledána nová zapojení, za předpokladu využití více napěťových a proudových bran těchto aktivních prvků, která budou popsána charakteristickou rovnicí umožňující snadný numerický návrh filtrů.

V první části práce jsou popsány kmitočtové filtry, jejich vlastnosti, chování, výroba a použití. Následující část je zaměřena na kmitočtové filtry 2. řádu, jejich rozdělení podle typu filtru, s důrazem na jejich přenosovou funkci. Jsou popsány aktivní prvky proudové a napěťové konvektory, krátce historie jejich vývoje, dále také zobecněný a univerzální proudový a napěťový konvektor a zobecněný proudový konvektor double. Je uvedena skupina autonomních obvodů s proudovými konvektory. Na konkrétních zapojeních je pak ukázán vlastní postup návrhu multifunkčních kmitočtových filtrů pracujících v proudovém módu. Chování takto navržených kmitočtových filtrů bylo ověřeno simulacemi v programu OrCAD. Na základě těchto simulací bylo pak chování jednoho ze zapojení experimentálně ověřeno.

2 KMITOČTOVÉ FILTRY

V dnešní době se kmitočtové filtry [1] používají stále častěji. Jedná se o velice širokou oblast jejich využití v mnoha odvětvích elektrotechnického průmyslu.

2.1 Obecně o kmitočtových filtrech

Kmitočtové filtry tvoří základní blok v elektronických obvodech, které zpracovávají signály všeho druhu. Oblast kmitočtových filtrů je velice náročná jak po teoretické tak i po praktické stránce. Hlavně z tohoto důvodu existují stovky a dnes již tisíce skript, knížek a všemožných publikací na toto téma, které obsáhnou celé spektrum této problematiky.

2.2 Použití kmitočtových filtrů

Nejdůležitější vlastnost neboli hlavní úkol kmitočtových filtrů je selektivita tj. filtrace kmitočtových složek vstupního signálu. To znamená že, některé kmitočtové složky vstupního signálu filtr propustí bez útlumu (nazýváme propustné pásmo) a některé s útlumem (nepropustné pásmo). Výše zmíněné vlastnosti jsou popsány modulovou kmitočtovou charakteristikou běžněji nazývanou amplitudovou charakteristikou. Jedná se o závislost modulu napěťového přenosu na kmitočtu. Asi nejlépe je vše vidět při znázornění kmitočtového spektra (rozkladu signálu na jeho jednotlivé harmonické složky).

Průchodem signálu filtrem ale nedochází pouze k filtraci kmitočtových složek signálu, ale také k jeho časovému posunu, a vzniká určité zpoždění. Tyto vlastnosti kmitočtového filtru znázorňujeme fázovou kmitočtovou charakteristikou běžněji nazývanou fázovou charakteristikou. Tento vliv je asi nejlépe pozorovatelný při znázornění signálu na výstupu kmitočtového filtru v časové oblasti. Může zde dojít například ke zvlnění nebo překmitům ve sledovaném průběhu.

Jedna z oblastí použití je elektroakustika, kde se mimo jiné používají například všem dobře známé výhybky v reproduktorových systémech (soustavách). Jde také zejména o dolní, horní a pásmovou propust pro zvýraznění vybraných složek signálu vnímaných posluchačem. Další použití je při převodu analogového signálu na digitální (A/D převod) a to proto, že je zde potřeba dodržet vzorkovací teorém (někdy i jako Shannon - Kotelníkův nebo Nyquistův teorém). V tomto případě se jedná o tzv. antialiasingový filtr, který zabraňuje aliasingu, tj. nežádoucímu překrývání spekter užitečného signálu při jeho vzorkování. Další oblast je měřící technika. Zde je to hlavně při selektivních (výběrových) měřeních (například selektivní voltmetry).

Jako další možnost je použití v regulační technice a hlavně silnoproudé elektrotechnice, kde se využívají odrušovací filtry například k odstranění vysokofrekvenčních složek rušení v napájecím síťovém napětí. Tento filtr je přítomen ve velkém množství zařízení, vyžadující ke své funkci síťové napájecí napětí (50 Hz).

2.3 Praktické vyhotovení filtrů

První způsob, podle [1] je realizace číslicovými filtry. K tomuto účelu lze využít například program Matlab, který obsahuje přímo utility Filter Design and Analysis Tool (FDATool) a Filter Visualization Tool (FVTool) určené k návrhu a analýze číslicových filtrů. Při tomto způsobu realizace se může mnohdy dosáhnout i vlastností, které u analogových filtrů dosáhnout nelze. Nevýhoda je ale ta, že je zde omezení pouze na číslicové zpracování signálů a také velmi záleží na výpočetním výkonu počítače.

Druhý způsob spočívá v použití stavebních prvků jako jsou kondenzátory, cívky, odpory apod. , kde si může každý podle svého zvolit vhodné použití, rozmístění a propojení těchto prvků dle svých požadavků na výsledné vlastnosti filtru.

Jako poslední způsob se nabízí integrované řešení. Jedná se o integrovaný obvod, většinou podstatně menší než ostatní způsoby realizace. Mnohdy je také lépe zpracovaný a levnější, protože jej výrobce vyrábí v linkové (sériové) výrobě. Nevýhoda IO je ale obecně v tom, že jej uživatel nemůže nijak modifikovat.

2.4 Základní vlastnosti a vztahy z problematiky filtrů

Když je na vstup kmitočtového filtru připojen harmonický signál s určitou amplitudou, kmitočtem a fází, na výstupu se objeví taktéž harmonický signál se stejným kmitočtem, ale jinou amplitudou a fází.

Velice často se definuje přenos napětí harmonického signálu filtrem, který rozdělíme na reálnou a imaginární část, a to pak vyjadřuje modul přenosu (viz rovnice 2.2) a argument přenosu (viz rovnice 2.3) . Používá se i modul přenosu K_u v logaritmickém měřítku (viz rovnice 2.4) . V praxi se vyjadřuje přenosová funkce jako funkce kmitočtu. Značí se $K_u(j\omega)$ kde $\omega = 2\pi f$, nebo $K_u(p)$ kde $p = j\omega$.

Přenosová funkce se nejčastěji vyjadřuje ve tvaru racionální lomené funkce (viz 2.1) , kde řád polynomu čitatele m musí být menší nebo maximálně roven řádu polynomu jmenovatele n ($m \leq n$). Nejvyšší mocnina n udává řád přenosové funkce a také značí minimální počet přítomných akumulacních prvků (cívek a kondenzátorů). Většinou se počet akumulacních prvků rovná řádu přenosové funkce. Čím větší řád přenosové

funkce, tím víc se charakteristika blíží k ideálnímu průběhu, tím více se zvyšuje strmost v přechodném pásmu a tím je filtr dražší a kvalitnější.

$$K(p) = \frac{a_m(p)^m + a_{m-1}(p)^{m-1} + \dots + a_1p + a_0}{b_n(p)^n + b_{n-1}(p)^{n-1} + \dots + b_1p + b_0}, \quad (2.1)$$

$$K_u = \frac{U_2}{U_1}, \quad (2.2)$$

$$\varphi = \varphi_2 - \varphi_1, \quad (2.3)$$

$$K_u(dB) = 20 \log K_u, \quad (2.4)$$

Dále zde nebudou popisovány kmitočtové filtry s přenosovou funkcí prvního řádu, ale spíše bude prostor věnován filtrům s přenosovou funkcí druhého a případně vyšších řádů [1], i když podstata činnosti filtrů, která je zde zachycena, je v obou případech téměř totožná.

V dalším textu, věnujícím se jednotlivým typům filtrů podle [1] kap. 2.5, bude uvažována realizace kmitočtových filtrů pomocí stavebních prvků v podobě rezistorů, cívek a kondenzátorů popsanou výše v kap. 2.3. Také bude dále v kap. 2.5 princip dolní a horní propusti spíše připomínat princip kmitočtových filtrů s přenosovou funkcí 1. řádu, což je zcela záměrné, protože tyto filtry poskytují větší a hlavně jednodušší prostor pro názornější vysvětlení dané problematiky.

2.5 Kmitočtové filtry s přenosovou funkcí 2. řádu

Kmitočtové filtry s přenosovou funkcí 1. řádu musejí obsahovat vyjma rezistorů nejméně jeden akumulární prvek. U filtrů 2. řádu je tomu podobně až na přítomnost minimálně dvou akumulárních prvků. Obecně platí, že čím více akumulárních prvků filtr obsahuje, tím je vyššího řádu a tím má pro nás lepší vlastnosti. Důležité je také zmínit se o možnosti realizace všech základních typů filtrů. U filtrů s přenosovou funkcí 1. řádu totiž nelze realizovat pásmová zádrž (PZ) ani pásmová propust (PP). Tyto filtry 2. řádu nejsou složité, aplikují se pouze v jednoduchých a nenáročných případech a slouží jako základní stavební prvek pro konstrukci filtrů vyšších řádů.

2.5.1 Dolní propust 2. řádu (LP)

Její základní funkce, která je dána přenosem napětí, se dá jednoduše vysvětlit pro kmitočet roven 0 (v reálu blížící se nule) a kmitočet roven ∞ (v reálu blížící se nekonečnu) a na obvodu RC (kmitočtový filtr s přenosovou funkcí 1. řádu). Ten je zapojen jako klasický článek RC s tím že vstupní napětí je současně na obou prvcích

a výstupní napětí je odebíráno s kondenzátorem. Pro přesnost je ještě potřeba uvést, že modul impedance kondenzátoru je $Z_c = \frac{1}{\omega C}$. Když je kmitočet vstupního signálu roven nekonečnu tak se impedance kondenzátoru rovná nule (blíží se k nule), neboli nastává zkrat, takže vstupní napětí se nám jakoby zkratuje přes ten kondenzátor a na výstupu nemáme napětí žádné (veškeré napětí je na rezistoru), z čehož vyplývá, že přenos napětí se rovná nule. Naopak když máme na vstupu signál o kmitočtu blížícím se k nule, tak se impedance kondenzátoru blíží k nekonečnu. Veškeré vstupní napětí se tedy přenesou na kondenzátor a tedy na výstup obvodu. Napěťový přenos je tedy v tomto případě roven jedné. Takto je vlastně definována funkce dolní propusti.

Jelikož se jedná o kmitočtový filtr 2. řádu, jsou zde přítomny 2 akumulací, kmitočtově závislé prvky, což nám umožňuje dosáhnout větší strmosti v přechodném pásmu. Kmitočtové vlastnosti dolní propusti druhého řádu popisuje přenosová funkce v obecném tvaru

$$K(p) = \frac{\omega_0^2}{p^2 + p\frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2}, \quad (2.5)$$

kde symbol $\omega_0 = 2\pi f_0$ a f_0 představuje charakteristickou frekvenci neboli mezní kmitočet. Q je činitel jakosti. K je přenos napětí (někdy značen také K_u). Symbol p je komplexní kmitočet a je roven $j\omega$.

Další vlastnosti dolní propusti 2. řádu, jako je například vliv hodnoty činitele jakosti na průběh jednotlivých frekvenčních charakteristik a podobně, zde nebudou rozebírány, protože důležitá je především přenosová funkce (viz 2.5).

2.5.2 Horní propust 2. řádu (HP)

Zde je situace naprosto opačná než u dolní propusti. Je zde obrácené zapojení, tedy dochází k záměně prvků R a C. Z toho vyplývá, že pro nízké kmitočty (stejněsměrné napětí) na vstupu takového obvodu je přenos téměř nulový a pro vstupní signál vysokého kmitočtu, kdy kondenzátor představuje prakticky zkrat ($Z_c \rightarrow 0$), je přenos jednotkový. Opět zde platí to co u dolní propusti, tj. přítomnost dvou akumulací prvků, což značí větší strmost v přechodném pásmu než u kmitočtových filtrů prvního řádu. Kmitočtové vlastnosti horní propusti druhého řádu popisuje přenosová funkce v obecném tvaru

$$K(p) = \frac{p^2}{p^2 + p\frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2}. \quad (2.6)$$

2.5.3 Pásmová propust 2. řádu (BP)

Nejčastěji se zde využívá zapojení s paralelním rezonančním obvodem RLC a někdy i také analogické zapojení pomocí sériového rezonančního obvodu RLC. Základní princip zde opět vyplývá ze závislosti impedance na kmitočtu. Pro kmitočet vstupního signálu roven rezonančnímu kmitočtu, je impedance obvodu (LC) nekonečná a tím pádem přenos je roven jedné. Pro kmitočty blížíící se nule a kmitočty blížíící se nekonečnu se impedance obvodu (LC) blíží k nule a tím pádem se i přenos obvodu blíží nule. Kmitočtové vlastnosti pásmové propusti druhého řádu popisuje přenosová funkce v obecném tvaru

$$K(p) = \frac{p^{\frac{\omega_0}{Q}}}{p^2 + p^{\frac{\omega_0}{Q}} + \omega_0^2}. \quad (2.7)$$

2.5.4 Pásmová zádrž 2. řádu (BR)

Stejně jako u pásmové propusti se i zde používá realizace pomocí paralelního a někdy i sériového rezonančního obvodu RLC. Co se ale týče přenosu, tak je zde situace zcela opačná. Pro rezonanční kmitočet je impedance obvodu (LC) nekonečná, ale přenos obvodu je nulový. Naopak pro kmitočty blížíící se nule a nekonečnu je impedance obvodu (LC) nulová, a proto je přenos nekonečný. Kmitočtové vlastnosti pásmové zádrže druhého řádu popisuje přenosová funkce v obecném tvaru

$$K(p) = \frac{p^2 + \omega_0^2}{p^2 + p^{\frac{\omega_0}{Q}} + \omega_0^2}. \quad (2.8)$$

2.5.5 Fázovací obvod 2. řádu (AP)

Fázovací obvod, neboli také fázovací článek [1] lze realizovat obvody RLC čtvrtého a šestého řádu, který má při splnění určitých podmínek vlastnosti tohoto fázovacího obvodu. Je zde také možnost složitější realizace pomocí filtrů ARC. Jak už z názvu a také z přenosové funkce vyplývá, přenos tohoto obvodu je roven jedné, tudíž modulová charakteristika je kmitočtově nezávislá. Tento obvod pouze mění fázi. Kmitočtové vlastnosti fázovacího článku druhého řádu popisuje přenosová funkce v obecném tvaru

$$K(p) = \frac{p^2 - p^{\frac{\omega_0}{Q}} + \omega_0^2}{p^2 + p^{\frac{\omega_0}{Q}} + \omega_0^2}. \quad (2.9)$$

2.6 Shrnutí přenosových funkcí kmitočtových filtrů 2. řádu

Budeme zde vycházet, jak je zřejmé z již uvedených údajů, z obecné přenosové funkce ve tvaru racionální lomené funkce pro kmitočtové filtry 2. řádu (viz funkce 2.10).

$$K(p) = \frac{a_{22}p^2 + a_{21}p + a_{20}}{b_{22}p^2 + b_{21}p + b_{20}}. \quad (2.10)$$

Tab. 2.1: Koeficienty přenosových funkcí zákl. typů filtrů 2. řádu

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

3 PROUDOVÉ A NAPĚŤOVÉ KONVEJORY

Mezi nejznámější a nejvíce používané aktivní bloky [3] patří napěťový zesilovač (VOA). Další podobný prvek je napěťový opakovací neboli sledovací (VF). Tyto prvky, jak už je z názvu patrné, pracují v napěťovém módu. Jako další se objevily prvky s duálními vlastnostmi k těmto aktivním blokům. Patří mezi ně proudový zesilovač (COA) a proudový opakovací neboli sledovací (CF). Tyto prvky pracují v proudovém módu. Z tohoto je zřejmé, že by bylo výhodné, mít nějaký aktivní blok, který umí pracovat v obou těchto režimech a tím je konvektor. Tyto aktivní bloky nacházejí uplatnění například ve složitých systémech a nebo u širokopásmových zesilovačů.

3.1 Proudové konvektory (CC)

Jeden z prvních bloků, který umí pracovat v proudovém, napěťovém a smíšeném režimu je proudový konvektor.

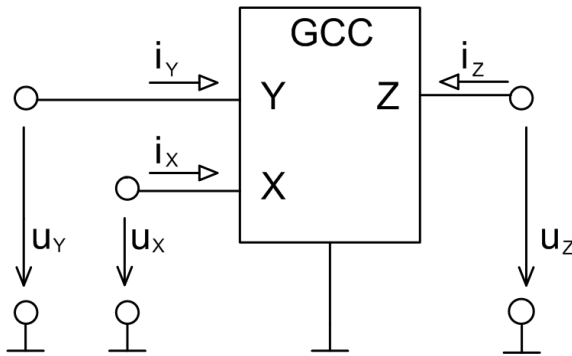
3.1.1 Historie a jednotlivé generace

Poprvé se tento aktivní prvek [9], [10] objevil v roce 1968, kdy autoři Sedra a Smith přišli s proudovým konvektorem první generace CCI [2]. Následně byly zjištěny i možnosti CCI+/- . Vývoj pokračoval a stejní autoři přišli v roce 1970 s proudovým konvektorem druhé generace CCII [3]. Následně se pak objevil i CCII+/- . Posledně zmiňovaný prvek začal nacházet větší uplatnění v elektronickém průmyslu než jeho předchůdce CCI (CCI+/-) . V roce 1995 navrhl autor Fabre proudový konvektor třetí generace CCIII [4]. Žádný typ těchto proudových konvektorů, až na CCII+/- který byl ale po čase z trhu stáhnut, se nezačal vyrábět. Objevují se pouze jako součásti větších stavebních bloků. Dnes tu je obvod OPA861 od firmy Texas Instruments. Samozřejmě zde existovala snaha po univerzálnosti těchto aktivních bloků, aby se dalo realizovat jedním prvkem více generací konvektorů a tím se i rozšířila oblast jejich využití. Proto vznikl univerzální proudový konvektor [4], [6]

3.1.2 Zobecněný proudový konvektor (GCC)

Schéma tohoto zobecněného proudového konvektoru [4], [6], [7] je uvedeno na obr. 3.1 . Písmeno **X** označuje proudovou bránu, písmeno **Y** napěťovou bránu a **Z** výstupní bránu. GCC je charakterizován maticí s koeficienty a, b, c . Koeficient a může nabývat hodnot $\{-1;1\}$, koeficient b $\{-1;0;1\}$ a koeficient c $\{-1;1\}$. Z konkrétních hodnot

jednotlivých koeficientů se může určit typ (varianta) proudového konveju. Vše je znázorněno v tabulce 3.1. Matice tohoto konveju je na (3.1).



Obr. 3.1: Schématická značka GCC

$$\begin{bmatrix} u_X \\ i_Y \\ i_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & a & 0 \\ b & 0 & 0 \\ c & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_X \\ u_Y \\ u_Z \end{bmatrix}. \quad (3.1)$$

Z této matice plynou vztahy

$$\begin{aligned} u_Y \cdot a &= u_X, \\ i_X \cdot b &= i_Y, \\ i_X \cdot c &= i_Z. \end{aligned}$$

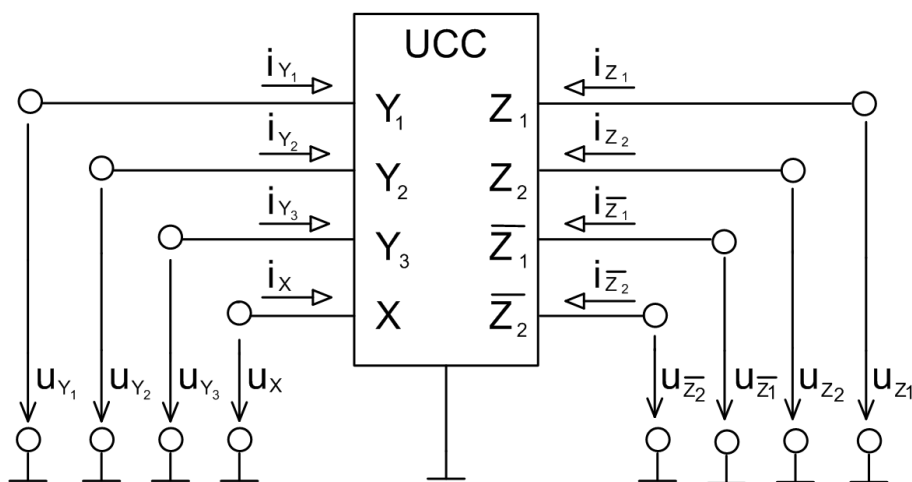
Koeficient a značí přenos napětí ze svorky Y na svorku X , koeficient b značí přenos proudu ze svorky X na svorku Y a konečně koeficient c značí přenos proudu ze svorky X na svorku Z .

Tab. 3.1: Koeficienty proudového konveju a jejich význam [3]

Hodnota koeficientů	Charakteristické koeficienty z matice		
	a	b	c
1	Neinvertující proudový konveju (např. CC)	I. generace	Kladný proudový přenos
0	—	II. generace	—
-1	Invertující proudový konveju (např. ICC)	III. generace	Záporný proudový přenos

3.1.3 Univerzální proudový konvektor (UCC)

Aby se dali jednoduše realizovat všechny typy proudových konvektorů, vyplývajících z definice GCC, plus ještě další dosud neznámé typy proudových konvektorů, byl v roce 2000 zaveden tzv. univerzální proudový konvektor [5]. Jeho schématická značka je uvedena na obr. 3.2. Je definován jako osmibrán. Má jeden nízkoimpedanční proudový vstup X , dále tři vysokoimpedanční napěťové vstupy Y_1, Y_2, Y_3 (z čehož dva jsou rozdílové (Y_1, Y_2) a dva součtové (Y_1, Y_3)) a nakonec čtyři proudové výstupy Z_1, \bar{Z}_1, Z_2 a \bar{Z}_2 . Proudové výstupy \bar{Z}_1 a \bar{Z}_2 mají záporný přenos proudu ze svorky X . Tyto i jiné vztahy mezi jednotlivými svorkami UCC jsou jasně definovány maticí (3.2).



Obr. 3.2: Schématická značka UCC

$$\begin{bmatrix} i_{Y_1} \\ i_{Y_2} \\ i_{Y_3} \\ u_X \\ i_{Z_1} \\ i_{Z_2} \\ i_{\bar{Z}_1} \\ i_{\bar{Z}_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{Y_1} \\ u_{Y_2} \\ u_{Y_3} \\ i_X \\ u_{Z_1} \\ u_{Z_2} \\ u_{\bar{Z}_1} \\ u_{\bar{Z}_2} \end{bmatrix}. \quad (3.2)$$

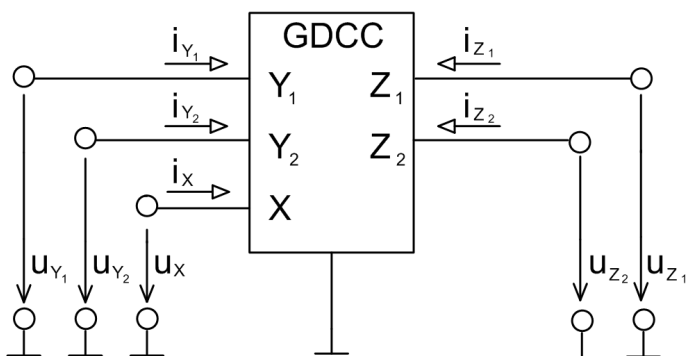
Z této matice plynou vztahy

$$\begin{aligned} u_{Y_1} - u_{Y_2} + u_{Y_3} &= u_X, \\ i_X = i_{Z_1} = i_{Z_2} = -i_{\bar{Z}_1} &= -i_{\bar{Z}_2}. \end{aligned}$$

Pomocí UCC se mohou realizovat různé typy a varianty proudových konvektorů a to příslušným propojením jeho vstupních a výstupních svorek [5].

3.1.4 Zobecněný proudový konvektor double (GDCC)

Tento zvláštní typ proudového konvektoru vychází ze zobecněného proudového konvektoru GCC. Jeho vlastnosti i schématická značka (obr. 3.3) je velice podobná GCC. Liší se pouze, jak už je z názvu tohoto aktivního prvku zřejmé, počtem napěťových bran Y a proudových bran Z, které jsou zde zastoupeny ve dvojnásobném počtu oproti GCC. Tento fakt nám zpřístupňuje širší možnosti využití při návrhu kmitočtových filtrů. Chování tohoto obvodu je jasně definováno maticí (3.3), kde vystupují koeficienty a_1 , a_2 , b_1 , b_2 , c_1 a c_2 . Význam a možné konkrétní hodnoty těchto koeficientů jsou ve shodě s GCC.



Obr. 3.3: Schématická značka GDCC

$$\begin{bmatrix} u_X \\ i_{Y_1} \\ i_{Y_2} \\ i_{Z_1} \\ i_{Z_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & a_1 & a_2 & 0 & 0 \\ b_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ b_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ c_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ c_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_X \\ u_{Y_1} \\ u_{Y_2} \\ u_{Z_1} \\ u_{Z_2} \end{bmatrix}. \quad (3.3)$$

Z této matice plynou vztahy

$$\begin{aligned} u_{Y_1} \cdot a_1 + u_{Y_2} \cdot a_2 &= u_X, \\ i_X \cdot b_1 &= i_{Y_1}, \\ i_X \cdot b_2 &= i_{Y_2}, \\ i_X \cdot c_1 &= i_{Z_1}, \\ i_X \cdot c_2 &= i_{Z_2}. \end{aligned}$$

3.2 Napěťové konvektory (VC)

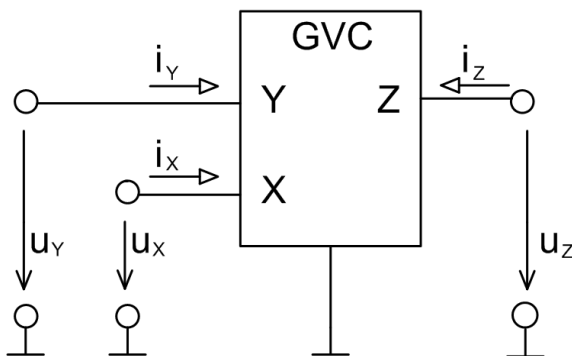
Po definici proudového konvektoru byl následně definován i konvektor napěťový.

3.2.1 Vlastnosti a historie

Popis napěťových konvektorů [8] byl odvozen na principu duality [3] z proudových konvektorů [4], [5]. Pak se tedy následně definovaly z proudových konvektorů napěťové konvektory a to jak GVC tak UVC. Již v roce 1982 zavedli autoři Dostál a Pospíšil napěťový konvektor jako teoretický prvek [7]. V roce 1999 se objevil nový aktivní blok pracující ve smíšeném režimu CDBA (Current Differencing Buffered Amplifier) [3], [5]. Tento prvek řadíme mezi napěťové konvektory. Jedná se o čtyřbran, který má dvě nízkoimpedanční vstupní svorky, jednu svorku vstupně výstupní a konečně poslední je svorka výstupní. Když na CDBA aplikujeme výše uvedený princip duality, získáme aktivní prvek Differential Voltage Current Conveyor (DVCC) [6]. Tímto výše popsaným způsobem lze pro každý proudový konvektor vybrat jeho protějšek v oblasti napěťových konvektorů. Stejně jako u proudových konvektorů i zde byla snaha o univerzálnost těchto aktivních prvků. Proto byly definovány jak zobecněný napěťový konvektor GVC, tak univerzální napěťový konvektor UVC.

3.2.2 Zobecněný napěťový konvektor (GVC)

U tohoto prvku je zjevná analogie ke zobecněnému proudovému konvektoru GCC (obr.3.1). Schématická značka GVC je uvedena na obr. 3.4. Je zde vidět naprostá shoda se schématickou značkou GCC. Rozdíl nastává až při maticovém popisu (3.4) chování tohoto obvodu, kde jsou přehozené proudové a napěťové přenosy mezi jednotlivými svorkami oproti GCC.



Obr. 3.4: Schématická značka GVC

$$\begin{bmatrix} i_X \\ u_Y \\ u_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & a & 0 \\ b & 0 & 0 \\ c & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_X \\ i_Y \\ i_Z \end{bmatrix}. \quad (3.4)$$

Z této matice plynou vztahy

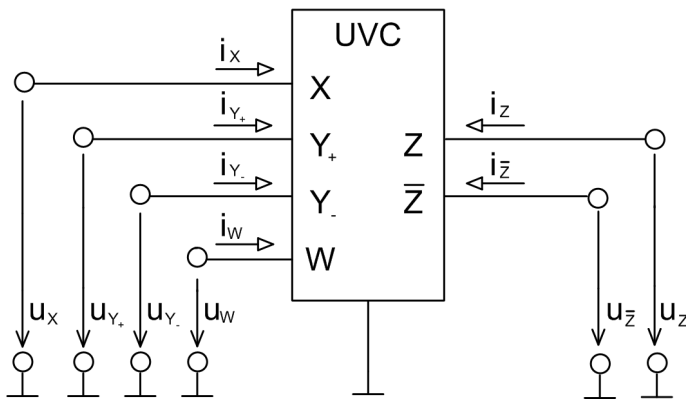
$$i_Y \cdot a = i_X,$$

$$u_X \cdot b = u_Y ,$$

$$u_X \cdot c = u_Z .$$

3.2.3 Univerzální napěťový konvektor (UVC)

Tento prvek, jak už bylo naznačeno výše, vznikl z důvodu potřeby univerzálního řešení, které by sloužilo jako základní stavební prvek, sloužící k realizaci různých typů napěťových konvektorů vhodným propojením příslušných svorek (obdobně jako u UCC). Schématická značka tohoto aktivního prvku je uvedena na obr. 3.5. Chování tohoto obvodu je jasně definováno maticí (3.5).



Obr. 3.5: Schématická značka UVC

$$\begin{bmatrix} i_X \\ u_{Y+} \\ u_{Y-} \\ i_W \\ u_Z \\ u_{\bar{Z}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_X \\ i_{Y+} \\ i_{Y-} \\ u_W \\ i_Z \\ i_{\bar{Z}} \end{bmatrix} . \quad (3.5)$$

Z této matice plynou vztahy

$$i_{Y+} - i_{Y-} = i_X ,$$

$$u_W = u_{Y+} = u_{Y-} ,$$

$$u_X = u_Z = -u_{\bar{Z}} .$$

4 NÁVRH KMITOČTOVÝCH FILTRŮ POMOCÍ AUTONOMNÍCH OBVODŮ

Obvody lze navrhovat např. pomocí teorie grafů signálových toků, pomocí pasivních struktur a nebo pomocí návrhu autonomních obvodů [11]. Posledně zmiňovanému zde bude dále věnován prostor.

Pracuje se zde se zobecněným aktivním prvkem, konkrétně se bude jednat o GDCC, ke kterému vhodně připojujeme zvolený počet admitancí, čímž jsou definována jednotlivá zapojení autonomních obvodů, které jsou pak využity pro návrh kmitočtových filtrů. Návrh kmitočtového filtru s minimální konfigurací znamená využití obvodu s jedním aktivním prvkem s nutným počtem admitancí. V našem případě se budou používat čtyři nebo maximálně pět admitancí.

4.1 Postup při návrhu kmitočtových filtrů

Návrh nových obvodů obsahujících aktivní prvky se skládá z těchto kroků [11]:

1. Návrh zobecněného autonomního obvodu při použití admitancí a zobecněných aktivních prvků.
2. Získání charakteristické rovnice autonomního obvodu výpočtem.
3. Vhodná volba součinnů koeficientů aktivních prvků a jednotlivých dvojpólů. Jmenovatel charakteristické rovnice musí mít tvar podle (rovnice 2.10) a všechny členy charakteristické rovnice musí být kladné z důvodu stability filtru.
4. Při připojování budících zdrojů v obvodu a při snímání odezev v obvodu se nesmí změnit charakter obvodu. Budíme-li autonomní obvod zdrojem napětí, musíme ho zapojit do větve mezi pasivní dvojpól a zem. Budíme-li autonomní obvod zdrojem proudu, musíme ho zapojit mezi uzel a zem. Snímáme-li napěťovou odezvu, musíme snímat napětí v uzlu proti zemi. Snímáme-li proudovou odezvu, musíme snímat proud ve větvi mezi pasivním dvojpólem a zemí.
5. Numerický návrh.
6. Simulace chování navrženého filtru za pomoci PC a příslušného softwaru.
7. Praktická realizace odsimulovaného filtru.
8. Změření přípravku a porovnání s předchozími (teoretickými) simulacemi

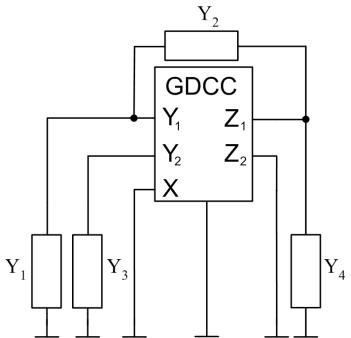
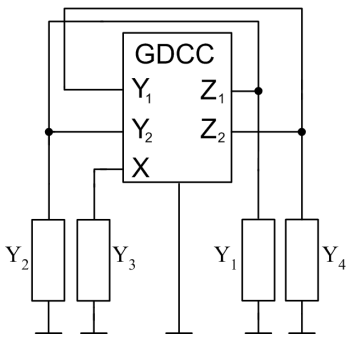
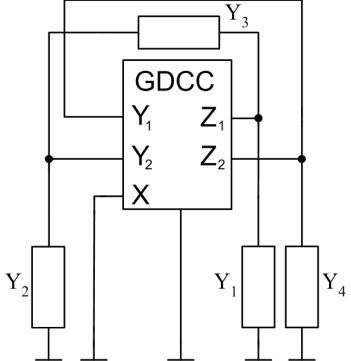
4.2 Návrhy kmitočtových filtrů s využitím GDCC

K návrhu je použit aktivní prvek z obr. 3.3. Jedná se o GDCC ke kterému jsou vhodným způsobem připojeny čtyři nebo pět admitancí. Při vhodné volbě koeficientů, obvody uvedené v tab. 4.1 splňují podmínky pro návrh kmitočtových filtrů (kap. 4.1). V levé části je vždy obecné schéma obvodu a v pravé části jemu odpovídající charakteristická rovnice opět v obecném tvaru. Je nutné také podotknout, že návrhy kmitočtových filtrů z tab. 4.1 nejsou veškerými možnými řešeními. Při vhodné volbě koeficientů se podařilo najít obvod č. 7, který má jako jediný pouze tři členy v charakteristické rovnici.

Tab. 4.1: Autonomní obvody s jedním prvkem GDCC

Č.	Schéma autonomního obvodu	Charakteristická rovnice
1		$D = Y_2 Y_4 \cdot (a_1 b_1 + a_1 c_1) + Y_1 Y_2 \cdot a_1 b_1 + a_2 b_2 \cdot (Y_1 Y_4 + Y_3 Y_4 + Y_1 Y_3)$
2		$D = Y_1 Y_3 \cdot (-a_2 b_2 - a_2 c_2) + Y_2 Y_3 + Y_3 Y_4 - a_1 b_1 \cdot (Y_1 Y_2 + Y_1 Y_4)$
3		$D = -a_1 b_1 \cdot (Y_1 Y_2 + Y_1 Y_4) + Y_1 Y_3 \cdot (-a_2 b_2 - a_2 c_2) + (Y_2 Y_3 + Y_3 Y_4) \cdot (1 - a_1 + b_1 - a_1 b_1 + c_1 - a_1 c_1)$

4		$D = -a_2 b_2 \cdot (Y_1 Y_3 + Y_3 Y_4) - a_1 b_1 \cdot (Y_1 Y_2 + Y_2 Y_4) + Y_2 Y_3 \cdot (1 - a_1 + b_1 - a_1 b_1 + c_1 - a_1 c_1 + c_2 - a_1 c_2)$
5		$D = Y_1 Y_4 \cdot (-a_2 b_2 - a_2 c_1) + Y_2 Y_4 + Y_3 Y_4 - a_1 b_1 \cdot (Y_1 Y_2 + Y_1 Y_3)$
6		$D = Y_1 Y_2 Y_4 \cdot (-a_2 b_2 - a_2 c_1) + Y_2 Y_3 Y_5 + Y_2 Y_4 Y_5 + Y_2 Y_3 Y_4 - a_1 b_1 \cdot (Y_1 Y_3 Y_5 + Y_1 Y_4 Y_5) - a_2 b_2 \cdot Y_1 Y_2 Y_3$
7		$D = Y_1 Y_3 \cdot (b_1 + c_2) + Y_2 Y_4 \cdot (b_1 + c_1) + Y_1 Y_2 \cdot b_1 + Y_3 Y_4 \cdot (b_1 + c_1 + c_2)$

8		$D = a_2 b_2 \cdot (Y_1 Y_2 + Y_2 Y_4 + Y_1 Y_4) - a_1 b_1 \cdot Y_3 Y_4 + Y_2 Y_3 \cdot (-a_1 b_1 - a_1 c_1)$
9		$D = (-a_1 b_1 - a_1 c_2) \cdot (Y_1 Y_3 + Y_2 Y_3) + Y_1 Y_4 + Y_2 Y_4 + Y_3 Y_4 \cdot (-a_2 b_2 - a_2 c_1)$
10		$D = (-a_1 b_1 - a_1 c_2) \cdot (Y_1 Y_3 + Y_1 Y_2 + Y_2 Y_3) + Y_3 Y_4 \cdot (-a_2 b_2 - a_2 c_1) - a_2 b_2 \cdot Y_1 Y_4$

4.2.1 Nezávislé změny základních parametrů filtru

Mezi základní parametry filtru, které se dají nezávisle měnit, patří činitel jakosti Q , mezní kmitočet f_m a zesílení K_0 . K tomu aby bylo možné tuto nezávislou změnu parametrů realizovat je zapotřebí obvodů, které mají více než 4 pasivní prvky ve struktuře. Tomuto požadaku odpovídá pouze obvod č. 6 z tab. 4.1. Bohužel ani s využitím tohoto obvodu nelze nezávisle měnit žádný z jeho parametrů. To nám dovoluje tuto změnu nastínit pouze teoreticky. K ukázce nezávislé změny je vybrán parametr Q . Je dána fiktivní charakteristická rovnice

$$D = p^2 C_1 C_2 + p C_1 G_3 + G_1 G_2. \quad (4.1)$$

Po úpravě dostáváme vztahy

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{G_1 G_2}{C_1 C_2}}, \quad (4.2)$$

$$\frac{\omega_0}{Q} = \frac{G_3}{C_2}. \quad (4.3)$$

Když vyjádříme z rovnic (4.2) a (4.3) činitel jakosti Q , tak dostáváme

$$Q = \left(C_2 \cdot \sqrt{\frac{G_1 G_2}{C_1 C_2}} \right) \cdot \frac{1}{G_3}. \quad (4.4)$$

Z výsledné rovnice (4.4) je patrná ona nezávislá změna parametru Q . Jedinou závorku v tomto výrazu berme jako známou konstantu a po té již pouze vhodnou změnou hodnoty prvku G_3 dosáhneme požadované změny činitele jakosti Q .

4.2.2 Konkrétní návrh s využitím autonomního obvodu č. 1

Obvod č. 1 byl vybrán z důvodu možnosti realizace dvou základních typů filtrů. Přestože se charakteristická rovnice tohoto obvodu skládá z velkého počtu členů, vhodnou volbou koeficientů lze tento počet značně redukovat. Charakteristická rovnice tohoto obvodu je

$$D = Y_2 Y_4 \cdot (a_1 b_1 + a_1 c_1) + Y_1 Y_2 \cdot a_1 b_1 + a_2 b_2 \cdot (Y_1 Y_4 + Y_3 Y_4 + Y_1 Y_3). \quad (4.5)$$

Volba koeficientů GDCC pro požadovaný tvar přenosové funkce je

$$a_1 = 1, a_2 = 1, b_1 = 1, b_2 = 1, c_1 = -1, \quad (4.6)$$

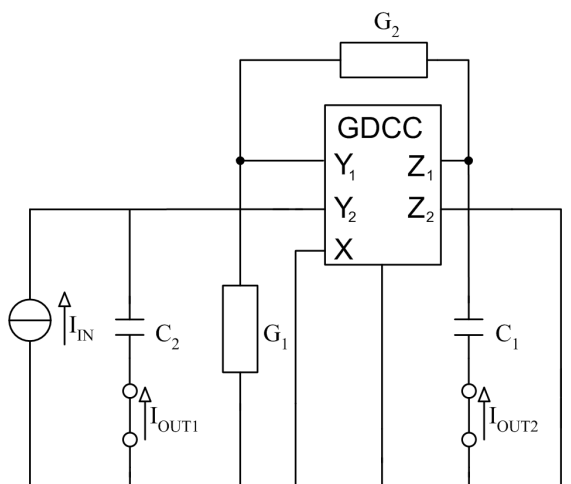
volba pasivních prvků je

$$Y_1 = pC_1, Y_2 = pC_2, Y_3 = G_1, Y_4 = G_2 \quad (4.7)$$

a následně je možné charakteristickou rovnicí přepsat do tvaru

$$D = p^2 C_1 C_2 + p2(C_1 G_2 + C_1 G_1) + G_1 G_2. \quad (4.8)$$

Konkrétní obvodové řešení autonomního obvodu s resistory a kapacitami je uvedeno na (obr. 4.1).



Obr. 4.1: Obvod č. 1

Přenosové funkce kmitočtového filtru (obr. 4.1) jsou

$$K_{INOUT1} = -\frac{I_{OUT1}}{I_{IN}} = \frac{-p^2 C_1 C_2}{D}, \quad (4.9)$$

$$K_{INOUT2} = -\frac{I_{OUT2}}{I_{IN}} = \frac{-p C_1 G_1}{D}. \quad (4.10)$$

Při snímání odezvy I_{OUT1} se obvod chová jako horní propust a při snímání I_{OUT2} jako pásmová propust podle příslušných přenosových funkcí.

4.2.3 Konkrétní návrh s využitím autonomního obvodu č. 7

Jak již z názvu vyplývá, návrh bude prováděn na autonomním obvodu č. 7 z tab. 4.1. Tento obvod byl vybrán záměrně, jelikož opět vykazuje vlastnosti dvou základních typů filtrů a navíc má jako jediný z analyzovaných obvodů charakteristickou rovnici pouze se třemi členy. Charakteristická rovnice obvodu č. 7 je

$$D = Y_1 Y_3 \cdot (b_1 + c_2) + Y_2 Y_4 \cdot (b_1 + c_1) + Y_1 Y_2 \cdot b_1 + Y_3 Y_4 \cdot (b_1 + c_1 + c_2). \quad (4.11)$$

Volba koeficientů GDCC pro požadovaný tvar přenosové funkce je

$$b_1 = 0, c_1 = 1, c_2 = 1, \quad (4.12)$$

volba pasivních prvků je

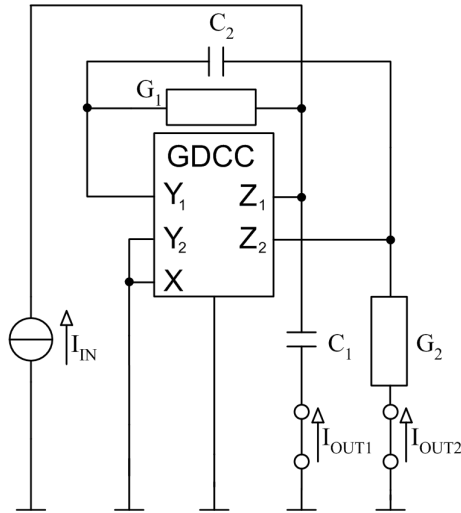
$$Y_1 = p C_1, Y_2 = G_2, Y_3 = p C_2, Y_4 = G_1 \quad (4.13)$$

a následně je možné charakteristickou rovnicí přepsat do tvaru

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

kde komplexní proměnná $p = j\omega$.

Konkrétní obvodové řešení autonomního obvodu č. 7 s rezistory, kapacitory, buzením a snímáním odezvy je uvedeno na obr. 4.2.



Obr. 4.2: Obvod č. 7

Přenosové funkce tohoto obvodu získané programem SNAP při buzení proudem I_{IN} jsou

$$K_{INOUT1} = -\frac{I_{OUT1}}{I_{IN}} = \frac{-p^2 C_1 C_2}{D}, \quad (4.15)$$

$$K_{INOUT2} = -\frac{I_{OUT2}}{I_{IN}} = \frac{G_1 G_2}{D}, \quad (4.16)$$

kde D je charakteristická rovnice (4.14). Z těchto přenosových funkcí je zřejmé, že se jedná v případě odezvy I_{OUT1} o horní propust a v případě odezvy I_{OUT2} o propust dolní. Ostatní přenosové funkce, a to jak z obvodu č. 1 tak z obvodu č. 7, nemají pro návrh kmitočtového filtru žádný význam, protože nejsou v požadovaném tvaru.

4.2.4 Numerický návrh obvodu č. 1

Vycházíme ze vztahů získaných z charakteristické rovnice (4.8) filtru. Po úpravě dostaneme

$$\frac{\omega_0}{Q} = \frac{C_1 G_2 + C_1 G_1}{C_1 C_2}, \quad (4.17)$$

$$C_2 > 4Q^2 C_1 \quad (4.18)$$

a po řešení těchto dvou vztahů dostáváme

$$G_2^2 - G_2 \frac{\omega_0 C_2}{Q} + \omega_0^2 C_1 C_2 = 0, \quad (4.19)$$

$$\omega_0^2 = \frac{G_1 G_2}{C_1 C_2}. \quad (4.20)$$

Čtyři neznámé volíme podle (nerovnice 4.18) a to $f_0 = 1$ MHz, $Q = 1$, $C_1 = 47$ pF, $C_2 = 220$ pF a zbylé dvě se dopočítají z kvadratické rovnice (4.19). Pro výsledné odpory platí

$$R_1 = \frac{1}{G_1} = 988 \Omega \Rightarrow \text{z řady E12 volíme} \Rightarrow 1000 \Omega,$$

$$R_2 = \frac{1}{G_2} = 2338 \Omega \Rightarrow \text{z řady E12 volíme} \Rightarrow 2700 \Omega.$$

4.2.5 Numerický návrh obvodu č. 7

Postup je totožný s postupem u obvodu č. 1. U numerického návrhu vycházíme ze získané charakteristické rovnice (4.14) filtru. Po úpravě dostaneme vztahy

$$\frac{\omega_0}{Q} = \frac{2G_1}{C_1}, \quad (4.21)$$

$$\omega_0^2 = \frac{G_1 G_2}{C_1 C_2}, \quad (4.22)$$

kde $\omega_0 = 2\pi f_0$. Jedná se o dvě rovnice o šesti neznámých. Proto se čtyři neznámé volí a to $f_0 = 1$ MHz, $Q = 1$, $C_1 = C_2 = 68$ pF a zbylé dvě se dopočítají podle

$$G_1 = \frac{\omega_0 C_1}{2Q}, \quad (4.23)$$

$$G_2 = \frac{\omega_0^2 C_1 C_2}{G_1}. \quad (4.24)$$

Po výpočtu vycházejí výsledné odpory

$$R_1 = \frac{1}{G_1} = 4681 \Omega \Rightarrow \text{z řady E12 volíme} \Rightarrow 4700 \Omega,$$

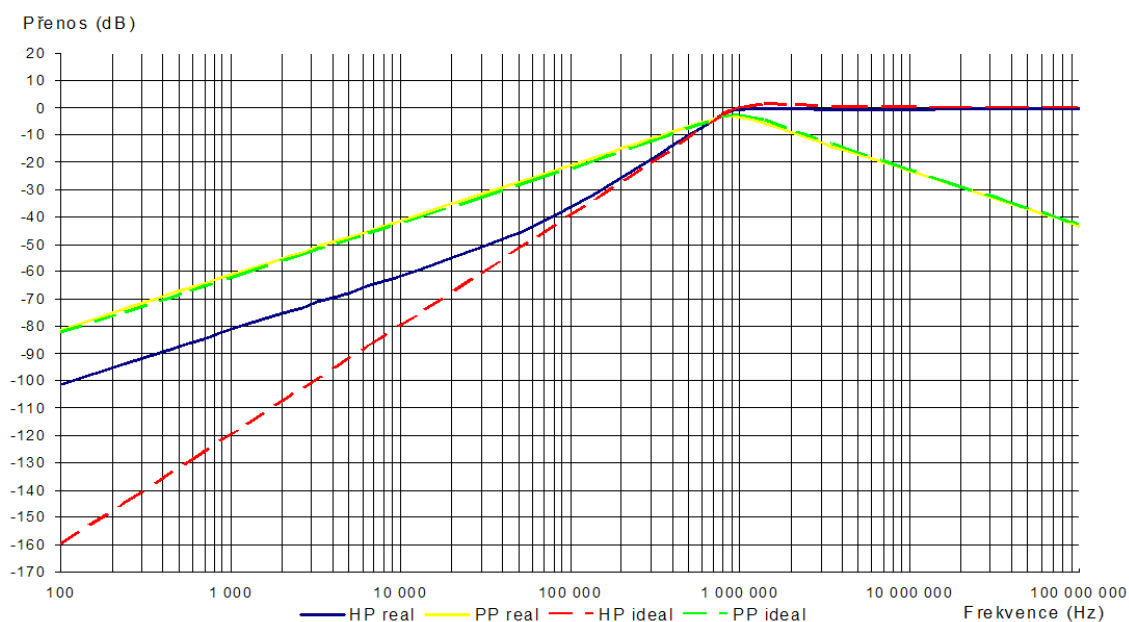
$$R_2 = \frac{1}{G_2} = 1170 \Omega \Rightarrow \text{z řady E12 volíme} \Rightarrow 1200 \Omega.$$

5 SIMULACE VYBRANÝCH OBVODŮ

U přenosových funkcí, získaných v kap. 4.2.2 a kap. 4.2.3 programem SNAP, se jednalo pouze o teoretické hodnoty neboli ideální simulaci. V praxi se s těmito výsledky ale nelze setkat, a proto je vhodné provést reálnou simulaci například v programu OrCAD, který do svých výpočtů zahrnuje celou řadu reálných faktorů, vyskytujících se a působících na všechny části simulovaného obvodu. Mezi faktory ovlivňující činnost jednotlivých součástí se počítá například tolerance hodnot jednotlivých prvků a nebo třeba jejich parazitní vlastnosti.

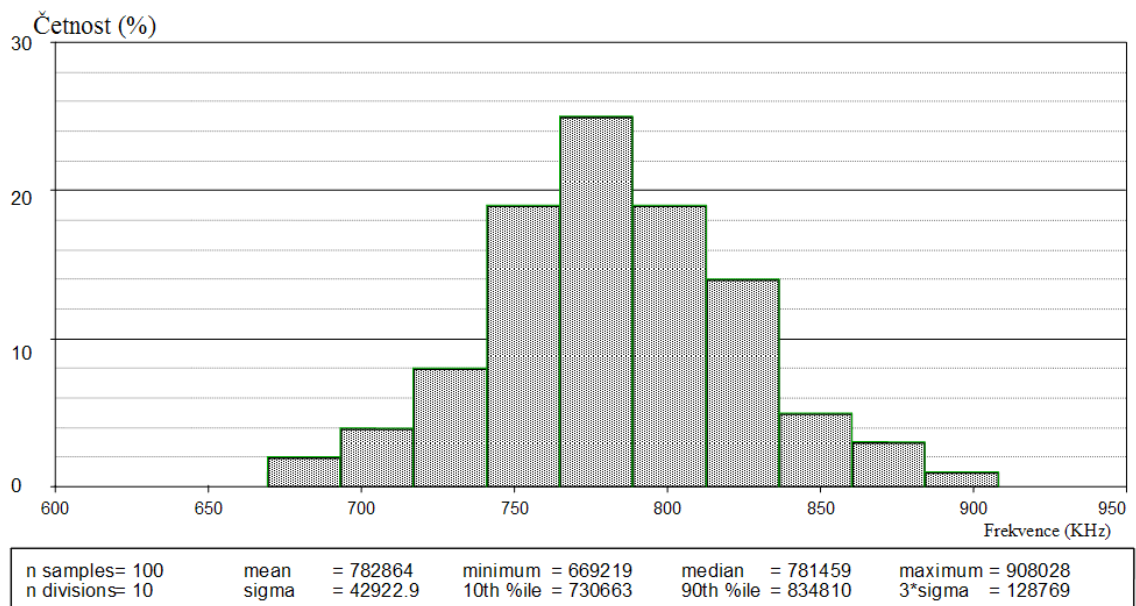
5.1 Simulace obvodu č. 1

Na obr. 5.1 jsou znázorněny ideální a reálné přenosové charakteristiky obvodu (obr. 4.1), který se chová jako horní propust podle vztahu (4.9), nebo jako pásmová propust podle (4.10). Čárkované čáry znázorňují ideální průběhy, červená pro horní propust a zelená pro pásmovou propust. Plné čáry znázorňují reálné průběhy přenosových charakteristik, modrá pro HP a žlutá pro PP.

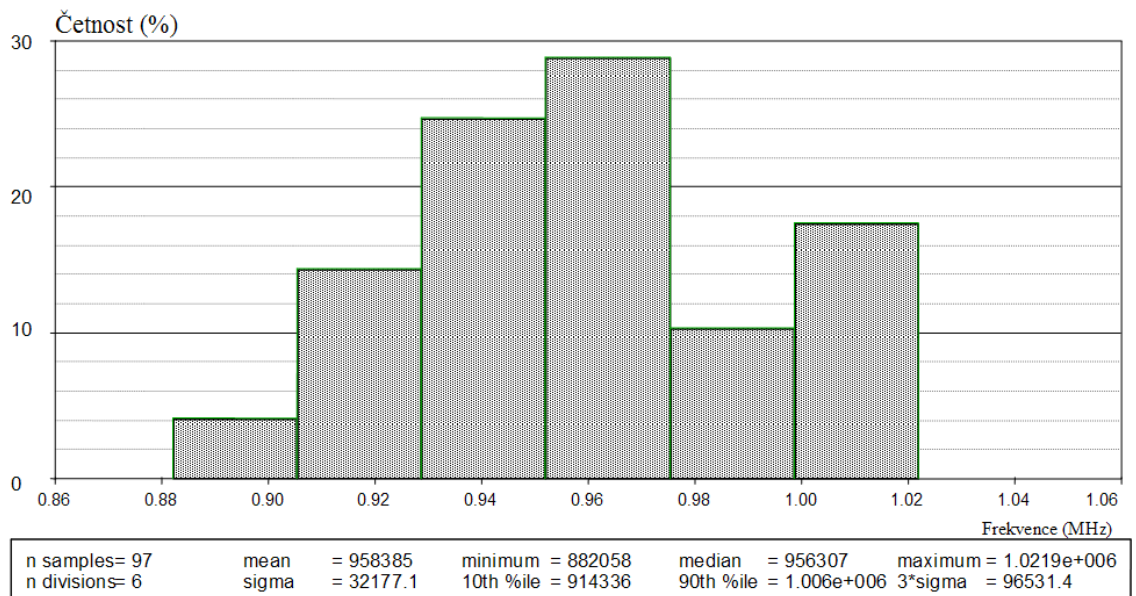


Obr. 5.1: Přenosové charakteristiky obvodu č.1

Na obr. 5.2 je znázorněn histogram horní propusti a na obr. 5.3 pásmové propusti z přenosových charakteristik (obr. 5.1) s tolerancí pasivních prvků $\pm 5\%$. Doplňující údaje jsou uvedeny pod histogramem.



Obr. 5.2: Histogram HP obvodu č.1

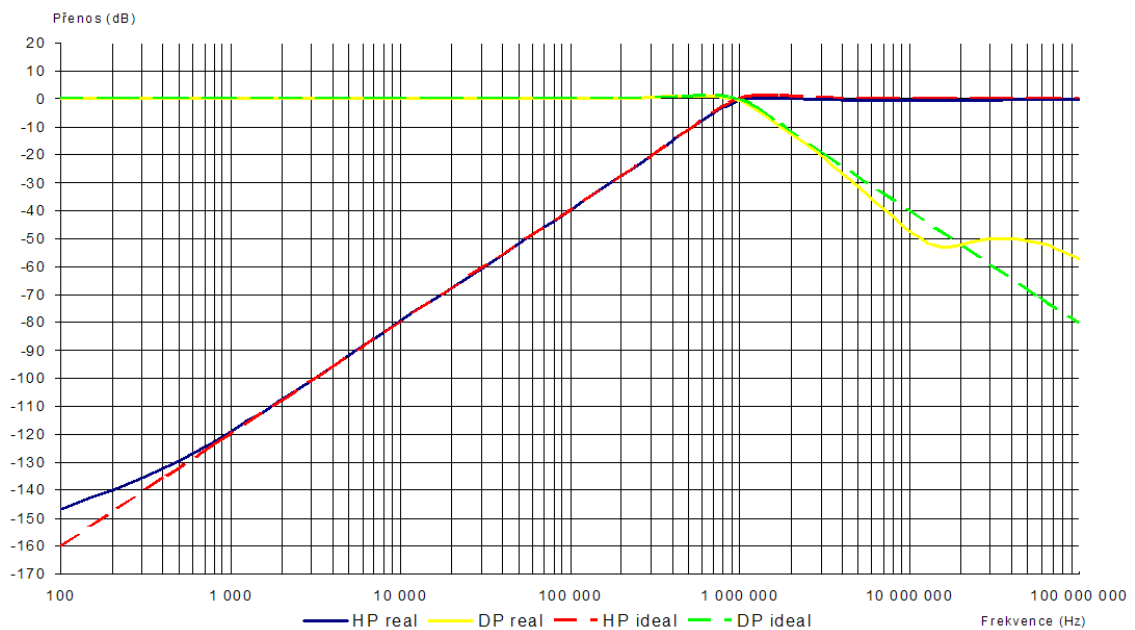


Obr. 5.3: Histogram PP obvodu č.1

V oblasti kolem frekvence 100 kHz se začal průběh skutečné přenosové charakteristiky horní propusti odklánět od ideální a začal mít pro nižší kmitočty nižší útlum.

5.2 Simulace obvodu č. 7

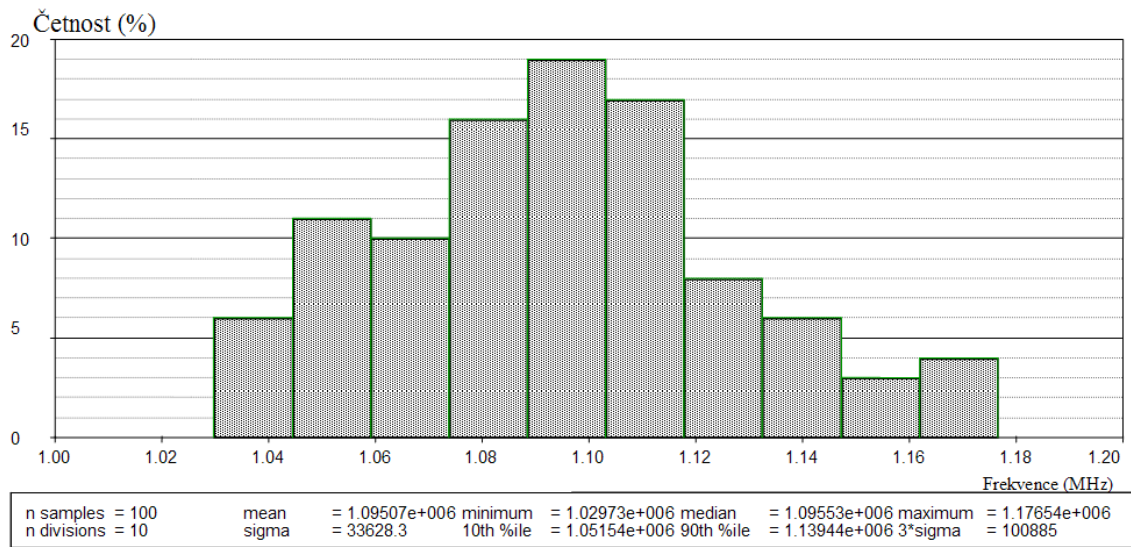
Na obr. 5.4 jsou znázorněny ideální a reálné přenosové charakteristiky obvodu (obr. 4.2), který se chová jako horní propust podle vztahu (4.15), nebo jako dolní propust podle (4.16). Veškeré barevné značení a provedení čar odpovídá charakteristikám u předchozího obvodu č. 1 (obr. 5.1).



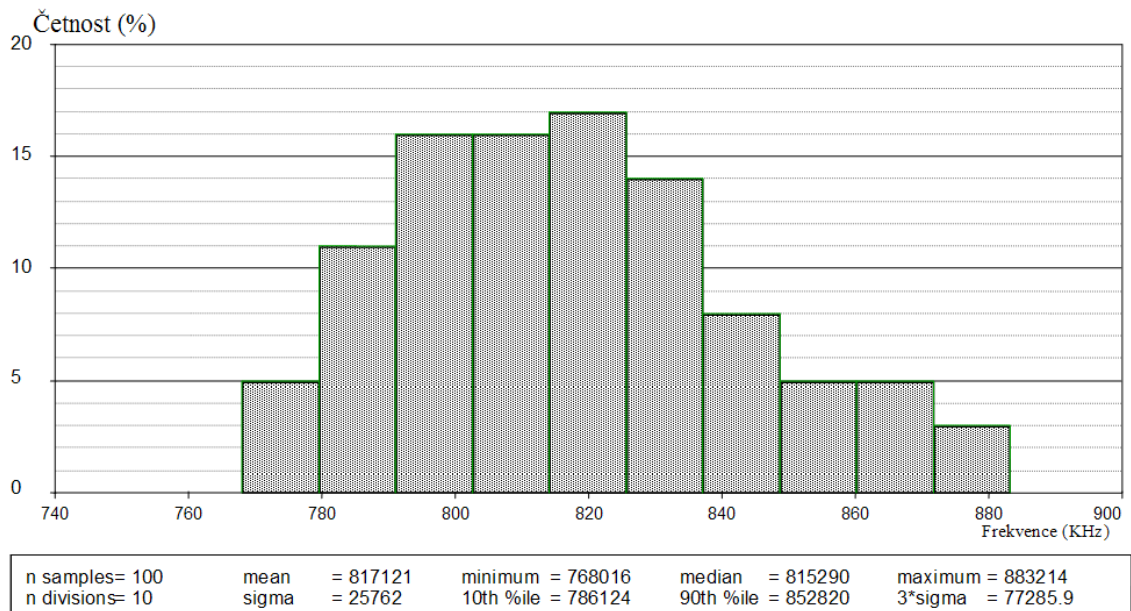
Obr. 5.4: Přenosové charakteristiky obvodu č.7

Podobný jev, který je pozorovatelný z přenosové charakteristiky horní propusti obvodu č.1 se vyskytuje i u obvodu č. 7, ale to až u kmitočtu 1 kHz. Na základě tohoto porovnání se došlo k závěru, že pro realizaci kmitočtového filtru bude vhodnější použití obvodu č. 7.

Na obr. 5.5 je znázorněn histogram dolní propusti a na obr. 5.6 je vidět histogram horní propusti z přenosových charakteristik (obr. 5.4) s tolerancí pasivních prvků $\pm 5\%$. Doplňující údaje jsou uvedeny pod histogramem.



Obr. 5.5: Histogram DP obvodu č.7



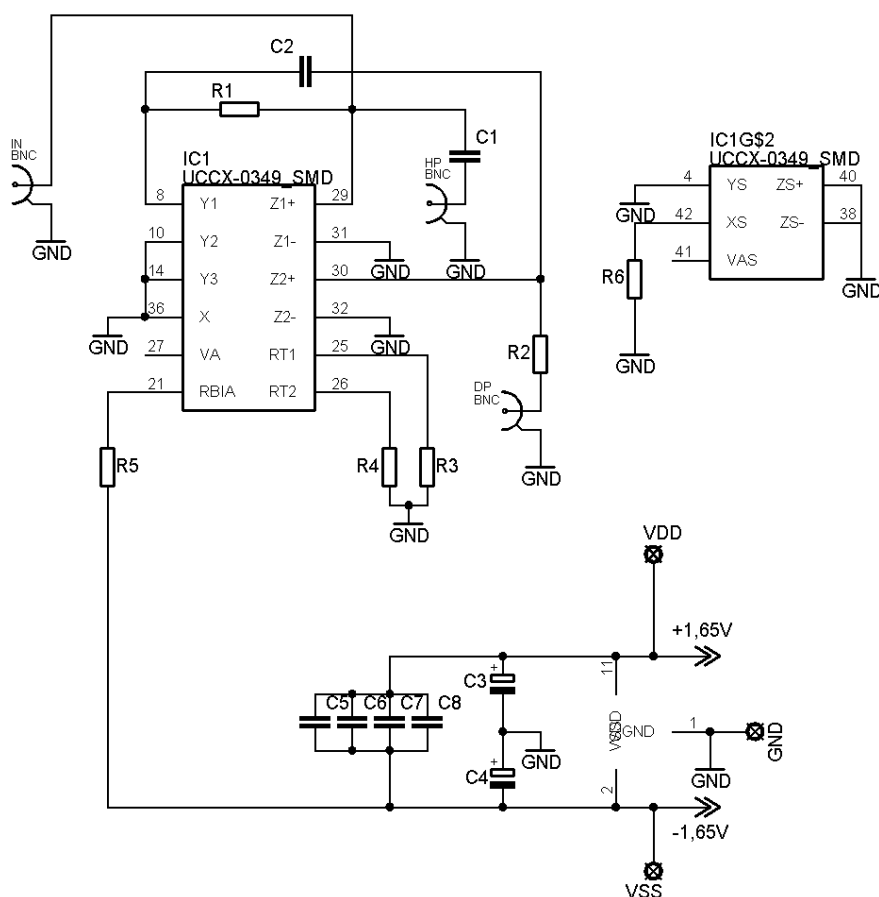
Obr. 5.6: Histogram HP obvodu č.7

6 PRAKTICKÁ REALIZACE

Na základě výsledků simulací, uvedených v kap. 5, bylo pro experimentální ověření vybráno zapojení vycházející z autonomního obvodu č.7. Přednostně se porovnávaly přenosové charakteristiky horních propustí, jelikož tento typ filtru lze totiž jako jediný realizovat z oběma zkoumanými zapojeními.

6.1 Vyhotovení obvodu č. 7

Na obr. 6.1 je nakresleno kompletní zapojení kmitočtového filtru vycházejícího z obvodu č. 7. Jsou zde použity BNC konektory, které slouží k jednoduchému připojení vtupu a výstupů. Napájení obvodu je $\pm 1,65$ V.



Obr. 6.1: Schéma zapojení filtru

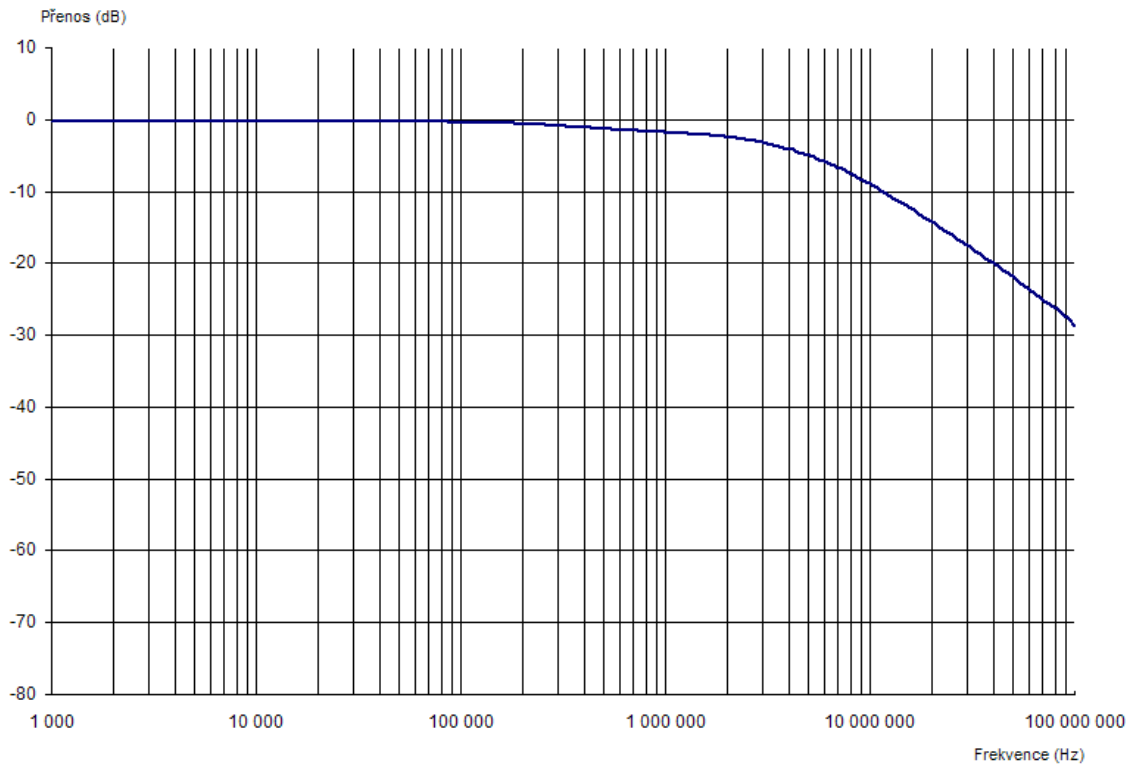
V tab. 6.1 najdeme soupis všech součástek ze zapojení z obr. 6.1 potřebných pro realizaci filtru. V příloze na obr. A.1 je znázorněno rozmístění součástek na desce a na obr. B.1 a obr. B.2 je vidět samotná deska plošných spojů. Na obr. C.1 je vidět výsledná podoba zhotoveného filtru.

Tab. 6.1: Použité součástky

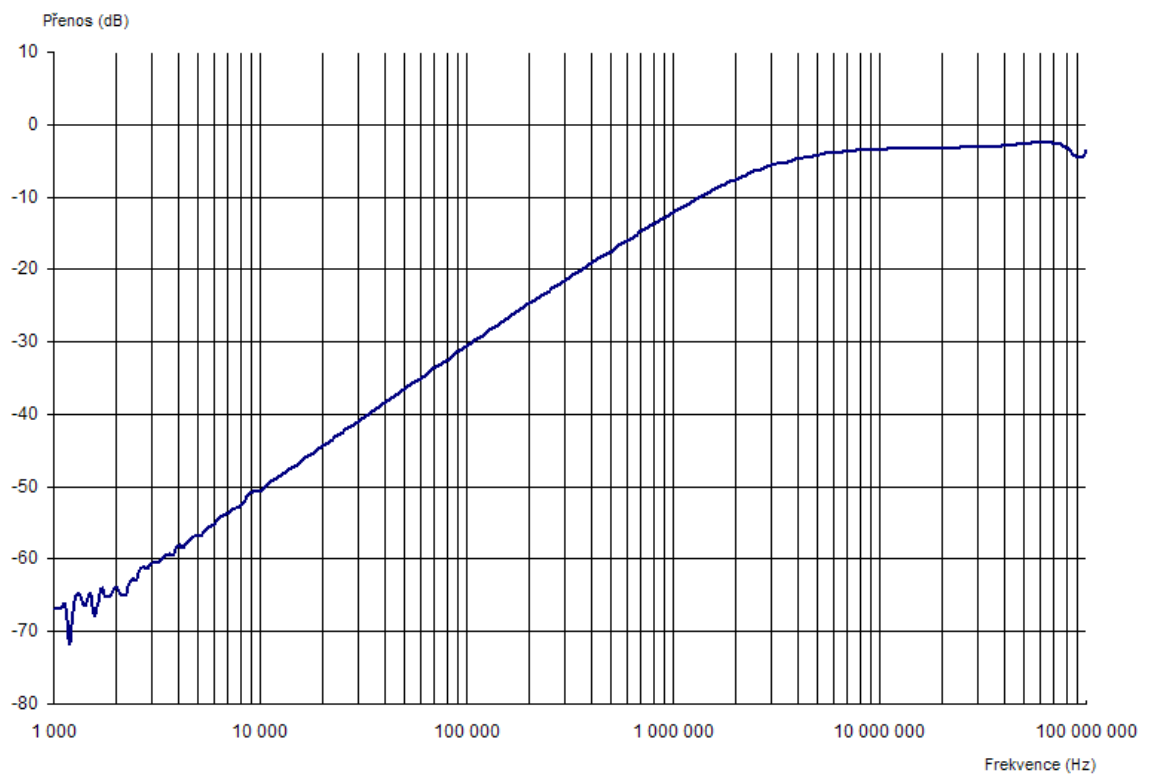
Součástka	Hodnota	Poznámka
BNC	—	konektor pro připojení vstupu a výstupů
UCC	—	aktivní prvek
R ₁	4700 Ω	součást obvodu č.7
R ₂	1200 Ω	součást obvodu č.7
R ₃	8200 Ω	odpor zajišťující správnou funkci UCC
R ₄	8200 Ω	odpor zajišťující správnou funkci UCC
R ₅	4700 Ω	odpor zajišťující správnou funkci UCC
R ₆	1000 Ω	odpor zajišťující správnou funkci UCC
C ₁	68 pF	součást obvodu č.7
C ₂	68 pF	součást obvodu č.7
C ₃	4,7 μF	tantalový kondenzátor
C ₄	4,7 μF	tantalový kondenzátor
C ₅	68 pF + 47 nF	blokovací kondenzátor
C ₆	68 pF + 47 nF	blokovací kondenzátor
C ₇	68 pF + 47 nF	blokovací kondenzátor
C ₈	68 pF + 47 nF	blokovací kondenzátor

6.2 Simulace vytvořeného filtru (obvodu č. 7)

Na obr. 6.2 je uvedena charakteristika kmitočtového filtru realizujícího dolní propust. Následující obr. 6.3 znázorňuje přenosovou charakteristiku horní propusti tohoto obvodu.



Obr. 6.2: Filtr dolní propust



Obr. 6.3: Filtr horní propust

7 ZÁVĚR

Využitím více napěťových a proudových bran aktivního prvku GDCC se podařilo nalézt deset řešení kmitočtových filtrů druhého řádu (viz tab. 4.1) popsaných charakteristickou rovnicí vhodnou pro snadný numerický návrh pasivních prvků.

Asi nejdůležitějším bodem práce je výběr jednoho z autonomních obvodů a jeho realizace spojená s ověřením funkčnosti. Výběr autonomního obvodu se prováděl na základě výsledků simulací v programu OrCAD. Nakonec byl zvolen autonomní obvod č.7.

Srovnáním výsledků experimentálního měření (viz kap. 6.2) a počítačových simulací (viz kap. 5) jsme bohužel došli k závěru, že tento filtr nelze použít jako původně navrhovaný multifunkční filtr druhého řádu. Pokud se totiž podíváme na výsledné simulace navrženého filtru, tak zjistíme, že sice sedí výsledný typ filtru realizující dolní a horní propust, ale nejedná se o původně odsimulované přenosové charakteristiky druhého řádu, ale přenosové charakteristiky řádu prvního (sklon charakteristiky 20dB/dek a nikoli požadovaných 40dB/dek). Příčina problému je zřejmě v tom, že proud, tekoucí do svorky Y_1 je nulový. Napětí na svorce Y_1 je stejné jako napětí na svorce X . Jelikož je svorka X přímo spojena se zemí (odpor minimální) tak proud tekoucí do svorky X je velice vysoký (cca 700 μA) a aktivní prvek je proto přebuzen. Následkem tohoto se aktivní prvek jakoby v obvodu neprojeví a získané přenosové charakteristiky jsou výsledkem pouhého zapojení článků RC jako filtry. To nám tedy znemožňuje jakékoli další využití tohoto filtru v praxi.

Jediný autonomní obvod z tab. 4.1 u kterého byla teoreticky možnost měnit některý z jeho základních parametrů, byl obvod č. 6. Výpočtem se ale zjistilo, že tento obvod je pro změnu parametrů nevhodný.

Deska plošných spojů a rozložení součástek na desce jsou k vidění v příslušných přílohách.

Při měření na zhotoveném přípravku je vždy aktivní pouze jeden požadovaný výstup (DP, HP), a proto je potřeba ten druhý uzemnit (přemostit BNC konektor na zem). Na obr. C.1 je vidět výsledná podoba zhotoveného filtru.

LITERATURA

- [1] SEDLÁČEK, Jiří, HÁJEK, Karel. *Kmitočtové filtry*. 1. vyd. Praha : BEN, 2002. 535 s. ISBN 80-7300-023-7.
- [2] SEDRA, A., SMITH, K. C. *The current conveyor: a new circuit building block*. IEEE Trans. Circuit Theory, 1968, Vol. 56, pp. 1368-1369.
- [3] SEDRA, A., SMITH, K. C. *A second-generation current conveyor and its application*. IEEE Trans. Circuit Theory, 1970, Vol. 17, pp. 132-134.
- [4] FABRE, A. *A third-generation current conveyor: a new helpful active element*. Electronics Letters, 1995, Vol. 31, No. 5, pp. 338-339.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] DOSTÁL T., POSPÍŠIL J. *Current and voltage conveyors - a family of three port immittance converters..* Proc. ISCAS, pp. 419-422, Roma, 1982
- [8] BEČVÁŘ, Daniel. *Napěťové konvejory* Elektorevue [online]. 2001 [cit. 2007-11-05]. Dostupné z URL:
<<http://www.elektorevue.cz/clanky/01051/index.html>>.
- [9] JEŘÁBEK, Jan, VRBA, Kamil. *Vybrané vlastnosti univerzálního proudového konveju, ukázka návrhu aplikace* Elektorevue [online]. 2006 [cit. 2007-11-11]. Dostupné z URL:
<<http://www.elektorevue.cz/clanky/06041/index.html>>.
- [10] BEČVÁŘ, Daniel, VRBA, Kamil. *Univerzální proudový konveju* Elektorevue [online]. 2000 [cit. 2007-11-11]. Dostupné z URL:
<<http://www.elektorevue.cz/clanky/00007/index.html>>.
- [11] KOTON, Jaroslav, VRBA, Kamil. *Návrh kmitočtových filtrů pomocí autonomního obvodu s úplnou sítí admitancí* Elektorevue [online]. 2005 [cit. 2007-11-11]. Dostupné z URL:
<<http://www.elektorevue.cz/clanky/05033/index.html>>.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

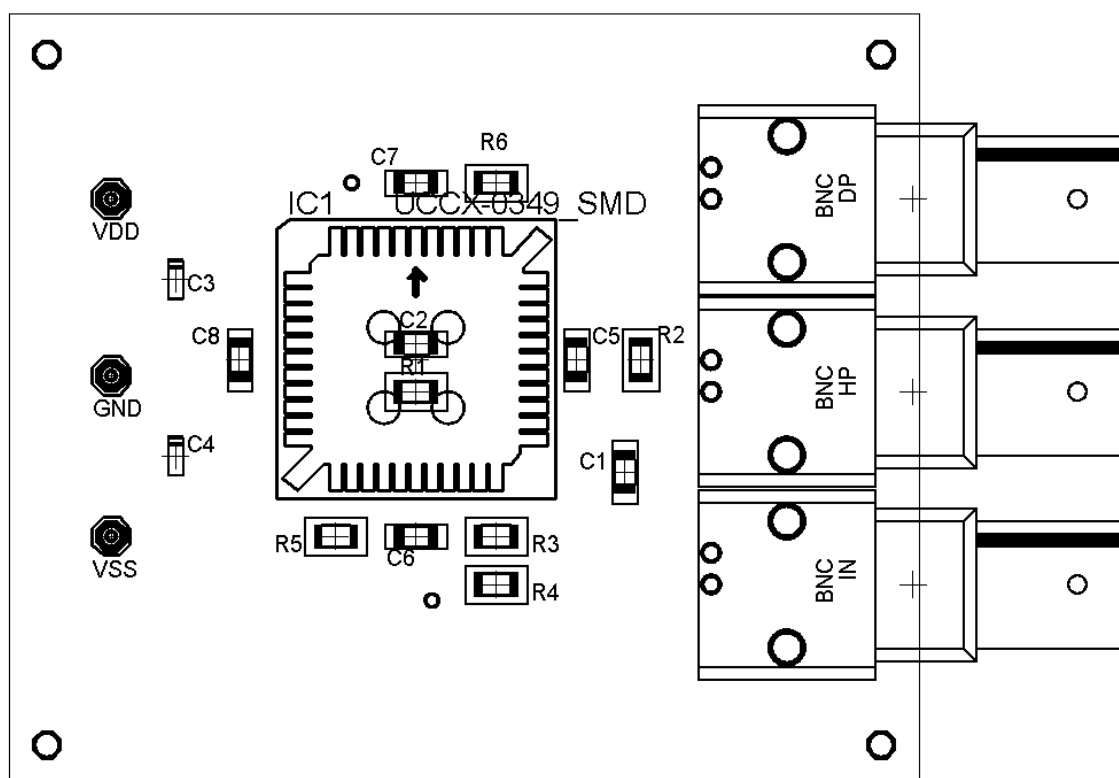
AP	all pass, anglická zkratka pro fázovací článek
BP	band pass, anglická zkratka pro pásmovou propust
BR	band reject, anglická zkratka pro pásmovou zádrž
CC	current conveyor, angl. zkratka pro proudový konvektor
CCI	proudový konvektor první generace
CCII	proudový konvektor druhé generace
CCIII	proudový konvektor třetí generace
CF	current follower, angl. zkratka pro proudový sledovač
COA	current operational amplifier, angl. zkratka pro proudový zesilovač
DP	dolní propust
DVCC	Differential Voltage Current Conveyor
FČ	fázovací článek
FDATool	Filter Design and Analysis Tool
FVTool	Filter Visualization Tool
GCC	generalized current conveyor, angl. zkratka pro zobecněný CC
GDCC	generalized double current conveyor, angl. zkratka pro GCC double
GVC	generalized voltage conveyor, angl. zkratka pro zobecněný VC
HP	horní propust
HP	high pass, anglická zkratka pro horní propust
IO	integrovaný obvod
LP	low pass, anglická zkratka pro dolní propust
PP	pásmová propust
PZ	pásmová zádrž
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
VF	voltage follower, angl. zkratka pro napěťový sledovač
VOA	voltage operational amplifier, angl. zkratka pro napěťový zesilovač
a, b, c	přenosové koeficienty konvektorů
a_{XY}, b_{XY}	členy přenosové funkce
C	kondenzátor
C	kapacita kondenzátoru
D	charakteristická rovnice
G	konduktor
G	vodivost konduktoru
i_X, i_Y, i_Z	proudy tekoucí jednotl. svorkami konvektoru
k_u	modul přenosu
L	cívka
L	indukčnost cívky
p	operátor Laplaceovy transformace
Q	činitel jakosti
R	rezistor
R	rezistivita rezistoru
u_X, u_Y, u_Z	napětí na jednotlivých svorkách konvektoru
Y	admitance
Z_C	impedance konduktoru
φ	fázový posuv
ω_0	mezní kmitočet

SEZNAM PŘÍLOH

A	Rozmístění součástek na desce	46
B	Deska s plošnými spoji	47
B.1	Přední strana desky plošných spojů	47
B.2	Zadní strana desky plošných spojů	48
C	Fotografie zhotoveného přípravku	49

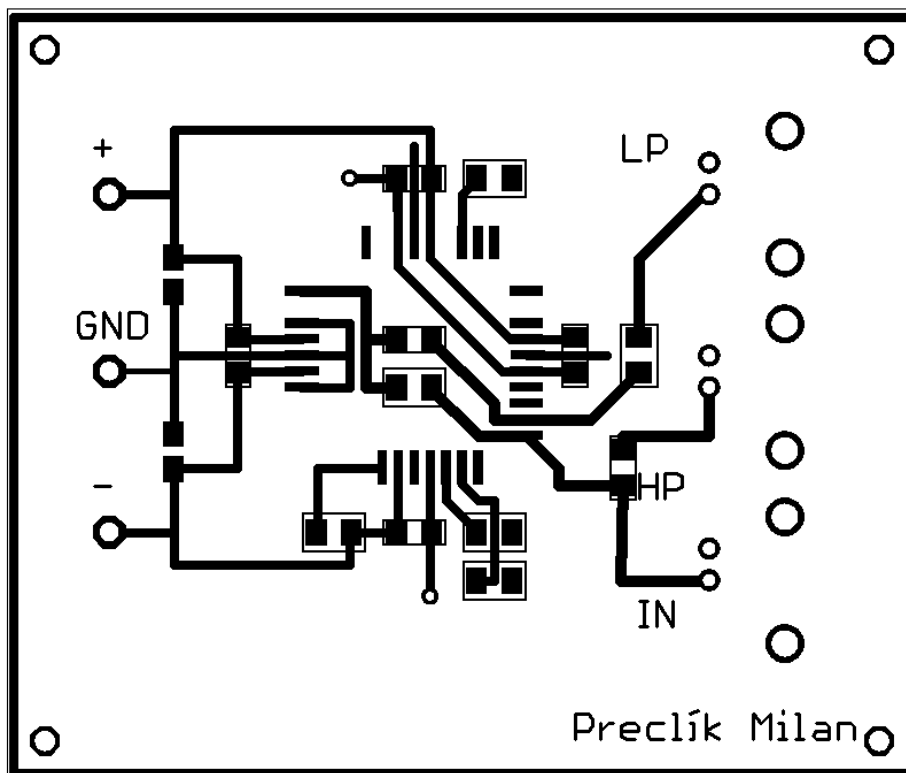
A ROZMÍSTĚNÍ SOUČÁSTEK NA DESCE



Obr. A.1: Rozmístění součástek na desce

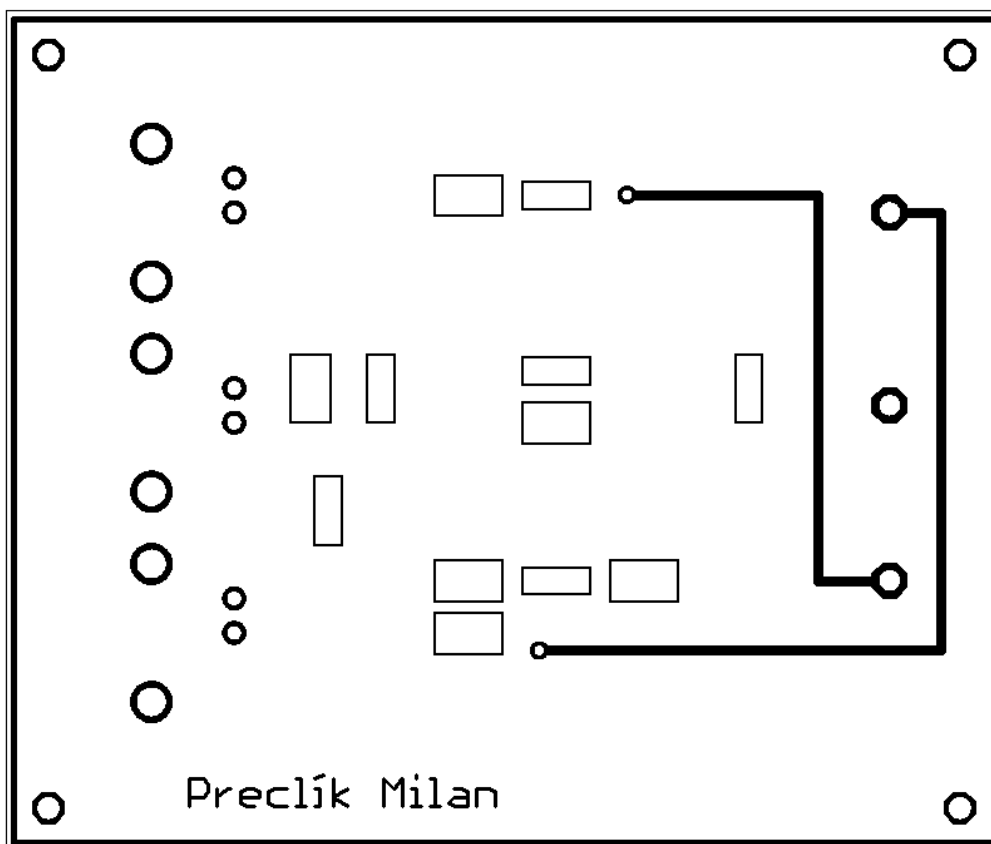
B DESKA S PLOŠNÝMI SPOJI

B.1 Přední strana desky plošných spojů



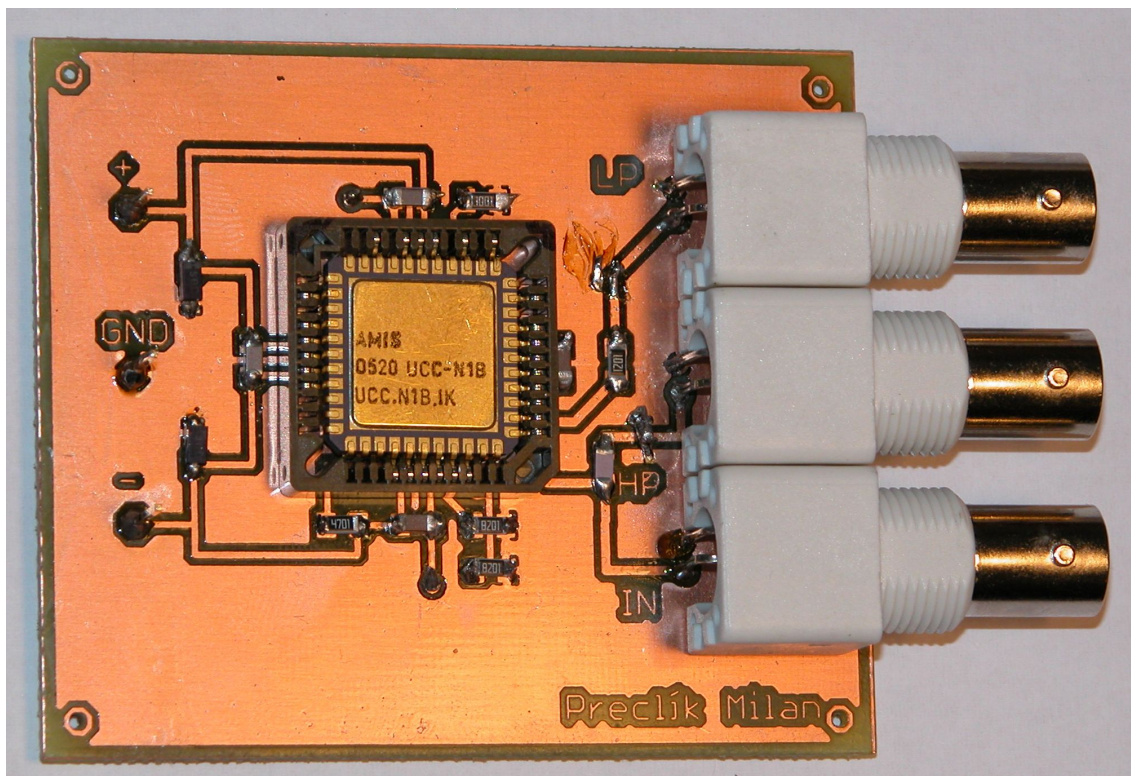
Obr. B.1: Deska s plošnými spoji (TOP)

B.2 Zadní strana desky plošných spojů



Obr. B.2: Deska s plošnými spoji (BOTTOM)

C FOTOGRAFIE ZHOTOVENÉHO PŘÍPRAVKU



Obr. C.1: Realizace filtru