

Obsah

1	ÚVOD	2
2	FILTRY DRUHÉHO ŘÁDU S KONVEJORY A JEJICH MOŽNOSTI ELEKTRONICKÉHO LADĚNÍ	15
2.1	Filtry se dvěma konvejory pro realizaci přenosových funkcí s nulou přenosu	15
2.2	Filtry s jedním konvejorem pro realizaci přenosových funkcí s nulou přenosu	18
2.3	Filtry s jedním konvejorem CCII+ a čtyřmi pasivními prvky	22
2.3.1	Dolní propust s jedním konvejorem a čtyřmi pasivními prvky	23
2.3.2	Pásmová propust s jedním konvejorem a čtyřmi pasivními prvky	26
2.3.3	Horní propust s jedním konvejorem a čtyřmi pasivními prvky	28
2.3.4	Pásmová zadrž s jedním konvejorem a čtyřmi pasivními prvky	29
2.3.5	Fázovací článek s jedním konvejorem a čtyřmi pasivními prvky	31
2.4	Filtry s jedním konvejorem CCII+ a pěti pasivními prvky pro realizaci přenosových funkcí s nulou přenosu	33
2.4.1	Dolní propust s nulou přenosu s jedním konvejorem a pěti pasivními prvky	34
2.4.2	Horní propust s nulou přenosu s jedním konvejorem a pěti pasivními prvky	39
2.5	PŘELAŽOVÁNÍ FILTRŮ S KONVEJORY	42
2.5.1	TOPOLOGIE FILTRŮ VHODNÉ PRO PŘELAŽOVÁNÍ	43
3	OVĚŘENÍ REALIZOVATELNOSTI FILTRŮ DRUHÉHO ŘÁDU S KONVEJORY .	46
3.1	Ověření filtrů se dvěma konvejory pro realizaci přenosových funkcí DP, PP a HP .	46
3.2	Ověření zapojení filtrů se dvěma konvejory pro realizaci přenosových funkcí s nulou přenosu	51
3.3	Ověření zapojení filtrů jedním konvejorem a šesti pasivními prvky	52
3.4	Ověření filtrů s jedním konvejorem a čtyřmi pasivními prvky	54
3.5	Ověření filtrů s jedním konvejorem a pěti pasivními prvky pro realizaci přenosových funkcí s nulami přenosu	59
4	ZÁVĚR	62

1 ÚVOD

V roce 2000, před ukončením inženýrského studia, jsem přišel za Prof. Ing. Tomášem Dostálem DrSc. z ústavu radioelektroniky. Požádal jsem ho, zda by byl ochoten abych pod jeho vedením mohl absolvovat doktorské studium, a to se zaměřením na oblast filtrů, nejlépe v oblasti aktivních RC filtrů.

Zpočátku doktorského studia jsem se pod vedením svého školitele zaměřil na zjišťování, která oblast aktivních RC filtrů by byla vhodná ke zpracování disertační práce.

Po rozboru situace jsem se rozhodl, že se budu věnovat studiu a výzkumu v oblasti aktivních RC filtrů s konvejory, protože jsem tam našel možnost působení v oblasti filtrů druhého řádu s nulami přenosu a v oblasti filtrů s elektronicky nastavitelnými parametry.

Přesto, že mé zaměření disertační práce je relativně úzké, tak při obhajobě tezí disertační práce bylo rozhodnuto, že název zůstane nezměněn, a proto je název mé disertační práce „Obvody s moderními aktivními prvky“. Toto rozhodnutí komise bylo učiněno také vzhledem k tomu, že se v disertační práci zabývám možností elektronického nastavování parametrů filtrů pomocí metody napět'ového bootstrapu, kde využívám moderní elektronické součástky. V tomto případě se skutečně jedná o zapojení, která mohou využívat celou řadu různých aktivních prvků pro realizaci funkce elektronického nastavování parametrů.

1.1 Aktivní RC filtry druhého řádu s konvejory

Konvektor jako aktivní prvek je znám již od konce šedesátých let dvacátého století, kdy byl definován K.C.Smithem a A. Sedrou [1].

O možnostech využití konvektorů ve filtrech se začalo uvažovat již od počátku sedmdesátých let. V této době se již vyskytovaly publikace využívající proudový konvektor druhé generace CCII+ a CCII- ke konstrukci gyrátoru. Konvejory zapojené jako gyrátory byly používány pro simulaci cívek v klasických RLC filtrech. Příklad použití konvektorů CCII+ a CCII- jako gyrátoru byl publikován ve [2], kde je také ukázána možnost konstrukce konvektoru pomocí operačního zesilovače a proudových zrcadel. Vzhledem k použití operačního zesilovače ke konstrukci konvektoru a tehdejšímu stavu technologie měly takto konstruované konvejory šířku pásma menší než 1MHz. Praktické měření je také ukázáno v [1].

V osmdesátých letech se stále objevují publikace využívající ke konstrukci konvektorů operační zesilovače a v této době již byla známa zapojení pro simulaci plovoucí cívky pomocí dvou konvektorů CCII-. Ve [3] je uvedeno zapojení, které nahrazuje plovoucí cívku pomocí

dvou proudových konvektorů druhé generace CCII-. Ve [3] je také ukázána praktická realizace a měření pásmové propusti konstruované pomocí plovoucí cívky simulované dvěma CCII-, čtyř rezistorů a jednoho kondenzátoru.

Výhodou všech těchto konstrukcí byla možnost použít návrhu klasických metod pro návrh RLC filtrů. Nevýhodou těchto zapojení byl značný počet použitých aktivních a pasivních prvků použitých pro konstrukci konvektory a tudíž pro simulaci cívek.

Od počátku devadesátých let začíná prudký rozvoj v konstrukci proudových konvektorů druhé generace a snaha o jejich integraci. Byly publikovány články s proudovými konvektory na bázi operačních zesilovačů (stejný princip jako v předešlých letech), ale vzhledem k rozvoji CMOS technologií se začaly objevovat konvektory na bázi CMOS tranzistorů. Proudový konvektor CCII+ a CCII- konstruovaný na bázi CMOS tranzistorů byl publikován ve [4].

V návaznosti na vývoj v oblasti konstrukce proudových konvektorů druhé generace, CCII+ a CCII-, a jejich integrace začíná počátkem devadesátých let také prudký rozvoj výzkumu týkající se možnosti využití těchto prvků v ARC filtrech, kde by nahradil proudový konvektor CCII+ a CCII- klasický operační zesilovač. Pod pojmem klasický operační zesilovač je míněn operační zesilovač s napětovou zpětnou vazbou. Začala se objevovat zapojení filtrů druhého řádu (biquadů) s konvektory pro kaskádní syntézu filtrů.

Shen-Iuan Liu a Hen-Wai Tsao publikovali v [5] velice zajímavé zapojení ARC filtru druhého řádu pro kaskádní syntézu filtrů pomocí jednoho proudového konvektoru druhé generace

V polovině devadesátých let se objevovaly články zabývající se filtry druhého řádu v proudovém módu využívající jako aktivní prvek proudový konvektor druhé generace CCII+ a CCII-. V této době se také začalo objevovat použití konvektorů konstruovaných na principu translineárních obvodů. Proudový konvektor konstruovaný na tomto principu se později stal základním stavebním kamenem pro konstrukci operačních zesilovačů s proudovou zpětnou vazbou.

V této době byla publikována zapojení filtrů s konvektory a pasivními prvky obsahující více než jeden aktivní prvek CCII+ nebo CCII-. Zajímavá jsou zapojení publikovaná v [6], [7], [8].

V polovině devadesátých let se objevilo zapojení filtru druhého řádu s konvektory umožňující realizaci všech typů přenosových funkcí druhého řádu (DP, PP, HP, PZ, FČ, DPN, HPN), bylo publikováno v [9]. Toto zapojení vychází ze zapojení s operačním zesilovačem (Friend-Deliyannis aktivní RC biquad). Vzhledem k velkému množství prvků v obvodu je však obtížně použitelné pro praxi. V této době se také začínají objevovat práce zabývající se transformacemi mezi zapojeními s operačními zesilovači a s konvektory ([10]).

V druhé polovině devadesátých let se začínaly také objevovat publikace a konstrukce zabývající se konvejory s elektronicky nastavitelnými parametry a v návaznosti na to také zapojení filtrů s elektronicky měnitelnými parametry na bázi konvektorů [11], [12], [21], [22].

V polovině devadesátých let se začaly konvejory objevovat také v komerčně dostupných součástkách od různých výrobců. Jedná se zejména o obvody AD844, OPA660, OPA2662, MAX435 a MAX436. Začínají se také objevovat zapojení aktivních RC filtrů na bázi těchto komerčně vyráběných součástek.

Ke konci devadesátých let se objevily publikace zabývající se syntézou filtrů s konvejory vyšších řádů na bázi bloků prvního nebo druhého řádu. Nejedná se ovšem o kaskádní syntézu, ale většinou o implementaci topologie filtrů s integrátory. Tato možnost variability je většinou vykoupena velkou složitostí výsledného zapojení filtru a tím vyplývajících nedostatků [16], [18].

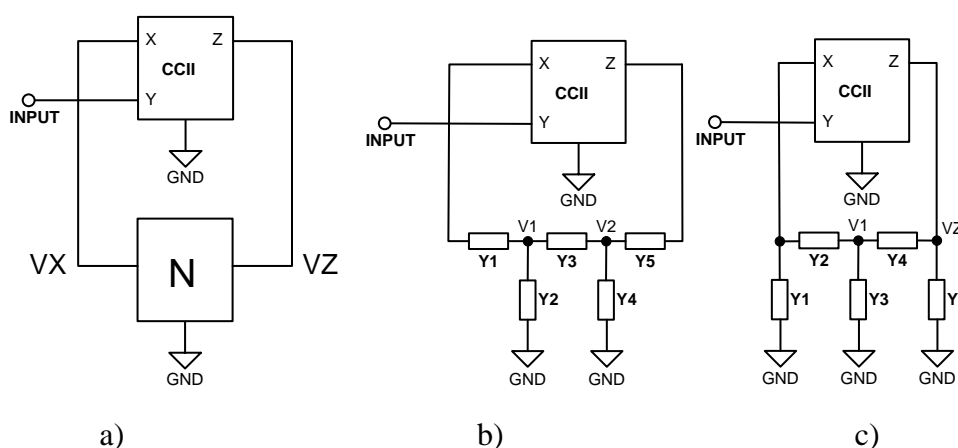
1.2. Současný stav řešeného problému

Jak bylo zmíněno výše, konvektor jako aktivní prvek je znám již od konce šedesátých let dvacátého století, kdy byl definován K.C.Smithem a A. Sedrou [1]. O možnostech využití konvektorů ve filtrech se začalo uvažovat již od začátku sedmdesátých let, kdy začaly vycházet první publikace zaměřeny na aktivní RC filtry s konvektory.

1.2.1. Známá zapojení aktivních RC filtrů s konvektory z pohledu počtu aktivních prvků

V současné době je známo několik zapojení aktivních RC filtrů s jedním konvektorem [5] a je také známa transformace zapojení obvodu v napěťovém módu s invertujícím operačním zesilovačem na zapojení v napěťovém nebo proudovém módu s konvektorem [10].

V [5] Shen-Iuan Liu a Hen-Wai Tsao publikovali velice zajímavé zapojení ARC filtru druhého řádu pro kaskádní syntézu filtrů pomocí jednoho proudového konvektoru druhé generace. Obecné zapojení filtru druhého řádu pomocí jednoho proudového konvektoru je na Obr.1.1.

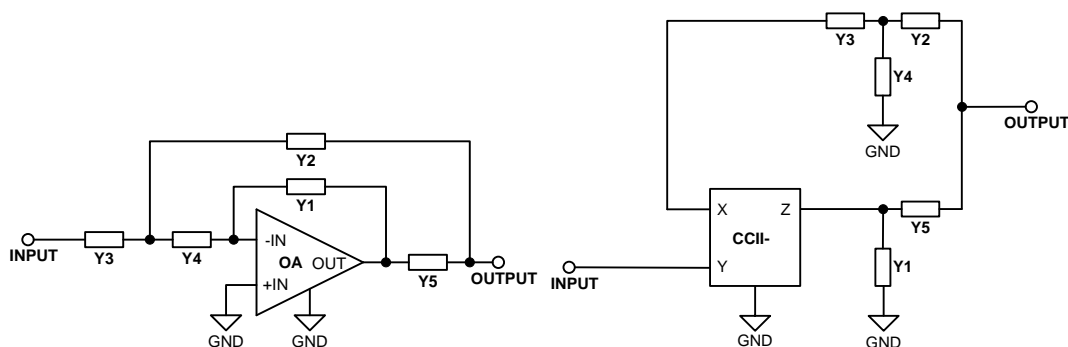


Obr.1.1. Zapojení filtru druhého řádu s jedním konvektorem a) obecné zpětnovazební zapojení, b) varianta T konfiguraci, c) varianta Pi konfiguraci.

V této konfiguraci je rozebráno použití obou typů proudových konvektorů druhé generace CCII+ a CCII-. Zapojení odvozená v tomto článku jsou vhodná pro konstrukci dolní horní a pásmové propusti druhého řádu, pásmové zádrže druhého řádu a fázovacího článku prvního řádu (viz. [5]). Velkou výhodou těchto zapojení je relativně malý počet aktivních a pasivních prvků a velká vstupní impedance filtru z důvodu použití vysokoimpedanční svorky konvektorů pro vstup. Tato výhoda dává velice dobrou možnost řadit tyto filtry kaskádně bez nutnosti dalších oddělovacích prvků. Nevýhodou je nemožnost konstrukce modifikované dolní a horní propusti druhého řádu a fázovacího článku druhého řádu. Další nevýhodou je, že vzhledem k

topologii není možné dosáhnout možnosti přeladování všech možných typů filtrů metodou napětového bootstrapu.

V [10] bylo publikována velice zajímavá možnost transformace zapojení aktivních RC filtrů s operačními zesilovači na zapojení s proudovými konvejory. Transformace umožňuje převést aktivní filtr s invertujícím operačním zesilovačem na aktivní filtr v napětovém nebo proudovém módu s konvejorem. Tato transformace je pro filtr v napětovém módu symbolicky uvedena na Obr.1.2.



Obr.1.2. Transformace zapojení s operačním zesilovačem na zapojení s konvejorem CCII-
 a) topologie s operačním zesilovačem b) ekvivalentní topologie s konvejorem CCII-.

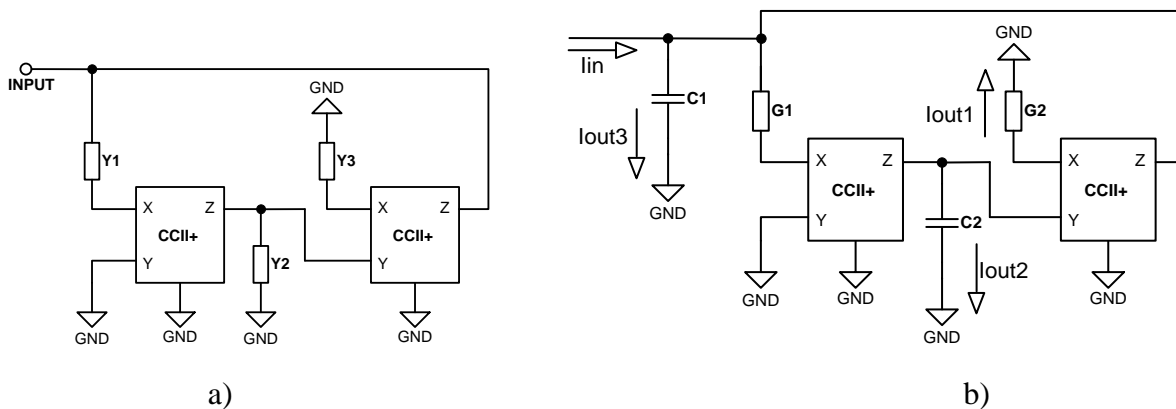
V tomto článku je také uveden příklad převodu filtru s integrátory využívajícího operační zesilovače na zapojení s konvejory. Výsledná topologie transformace na filtr s konvejory je velice podobná topologii v [5] (viz. výše) a proto výhody a nevýhody jsou podobné. Další výhodou této transformace je možnost jednoduchého převedení filtrů s invertujícím operačním zesilovači na filtry s konvejory. Tato transformace je především využitelná na převod filtrů s jedním operačním zesilovačem nebo filtrů s invertujícími integrátory. Další výhodou je možnost převodu na proudový mód.

V současné době je známo několik možností realizace aktivních RC filtrů se dvěma konvejory. Zajímavá zapojení jsou publikována v [3], [6], [7], [8], [13], [15], [17], [20], [23]. Ve [3] bylo uvedeno zapojení které nahrazuje plovoucí cívku pomocí dvou proudových konvejerů druhé generace CCII-zapojených jako gyrátoru. Je zde také ukázána praktická realizace a měření konstrukce pásmové propusti pomocí plovoucí cívky simulované dvěma CCII-, čtyř rezistorů a jednoho kondenzátoru. Výhodou použití gyrátoru je možnost použití návrhu klasických metod pro návrh RLC filtrů. Nevýhodou těchto zapojení byl značný počet potřebných aktivních a pasivních prvků pro konstrukci s konvejory a tudíž pro simulaci

cívek. Další nevýhodou vyplývající ze složitosti zapojení obvodů pro simulaci cívek byl nízký maximální použitelný kmitočet těchto filtrů.

V [6] bylo publikováno zapojení filtru třetího řádu v proudovém módu se dvěma konvejsory CCII+. V tomto článku je velice zajímavá první část filtru která tvoří filtr druhého řádu ve smíšeném módu s jedním konvejsorem a jedná se o velice zajímavou topologii. V tomto případě lze konstruovat pouze dolní a pásmovou propust druhého řádu ve smíšeném módu. Výhoda zapojení publikovaného filtru je v necitlivosti přenosu v propustném pásmu na napět'ovém přenosu ze svorky Y na X u obou konvejsorů. Proudový přenos druhého konvejsoru se projeví jako stejnosměrný offset. Pomocí tohoto zapojení nelze realizovat horní propust a filtry s nulami přenosu.

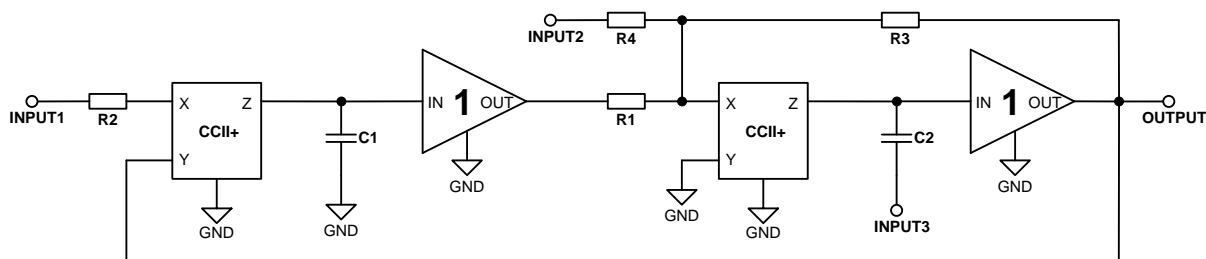
V [7] bylo publikováno zapojení simulující ztrátový gyrátor pomocí dvou konvejsorů CCII+ a ukazuje možnost realizace pásmové propusti druhého řádu v proudovém módu. Velkým přínosem tohoto článku je zajímavá konfigurace pásmové propusti druhého řádu se dvěma aktivními prvky (CCII+) a čtyřmi pasivními prvky. V tomto článku je publikována možnost realizace dolní, pásmové a horní propusti druhého řádu v proudovém módu. Schéma zapojení filtru je na Obr.1.3.



Obr.1.3.: Topologie univerzálního filtru a) topologie pro realizaci ztrátového gyrátoru
b) topologie filtru v proudovém módu pro realizaci DP, PP, HP.

Výhodou tohoto zapojení je malý počet pasivních prvků a použití pouze proudových konvejsorů CCII+. Byla zde použita velice zajímavá myšlenka konstrukce různých typů filtrů využitím různých uzlů v obvodu. Tato metoda se také používá u filtrů s integrátory, kde je možno pomocí vhodně umístěných vstupů a výstupů filtru dosáhnout různých typů aproximací.

V [8] bylo publikováno zapojení filtru druhého řádu s dvěma transimpedančními zesilovači AD844 od firmy Analog Devices. Jeden obvod AD844 obsahuje proudový konvektor CCII+ a napět'ový sledovač se vstupem připojeným na svorku „Z“ konvektoru. Jedná se tudíž o filtr druhého řádu se dvěma konvektory CCII+ a dvěma napět'ovými sledovači. Schéma zapojení je na Obr.1.4.

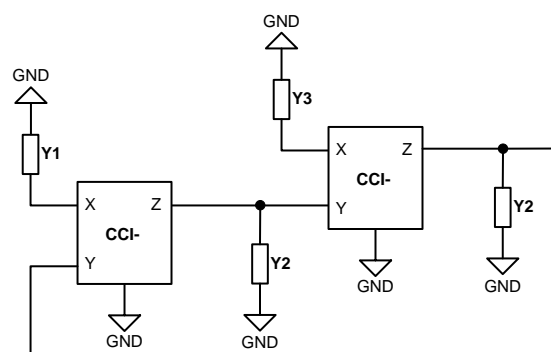


Obr.1.4: Zapojení filtru druhého řádu se dvěma obvody AD844.

U tohoto zapojení bylo oproti předchozímu článku využito různých typů přenosových charakteristik různou polohou vstupní svorky obvodu. Tímto obvodem lze realizovat přenosovou charakteristiku typu DP, PP, HP, PZ, FČ pomocí čtyř nebo pěti pasivních prvků. Velkou výhodou tohoto zapojení jsou malé citlivosti pasivních a aktivních prvků na vlastnosti filtru. To je dáno jeho topologií. Autor patrně vycházel ze zapojení filtrů s integrátory a aplikoval je na zapojení s proudovými konvektory. Nevýhodou této konfigurace je velké množství aktivních prvků a přemostění těchto prvků globální zpětnou vazbou. Toto může vést k problémům při konstrukci filtrů na vyšších kmitočtech.

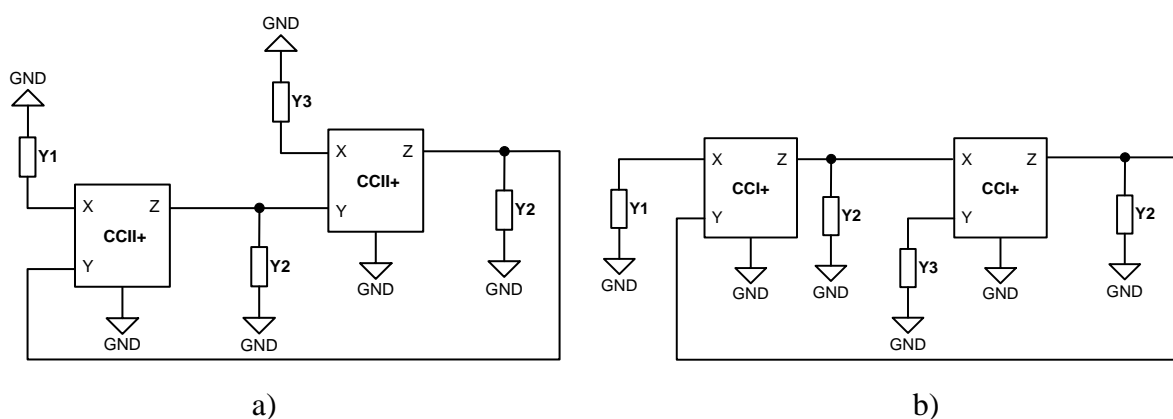
Podobná zapojení jako v [7] a [8] byla publikována také v [13], [15], [17], [20], [23]. Ve všech případech se jedná o zapojení se dvěma konvektory. V [17] a [23] jsou navíc přidány ještě dva napět'ové sledovače podobně jako v [8]. Z hlediska konstrukce filtru s konvektory jsou nejzajímavější publikace [13], [15], [20] a [23], které využívají pro konstrukci filtrů dvou konvektorů a maximálně šesti zemněných součástí.

Ve [13] bylo publikováno zapojení oscilátoru se dvěma proudovými konvektory první generace CCI- a čtyřmi zemněnými admitancemi (viz. Obr.1.5.). Je to jedno z mála zapojení postavené na proudových konvektorech první generace. Jedná se sice o zapojení oscilátoru, ale vzhledem k velmi podobné topologii s ostatními filtry se dvěma konvektory by neměl být problém ho využít jako filtru druhého řádu.



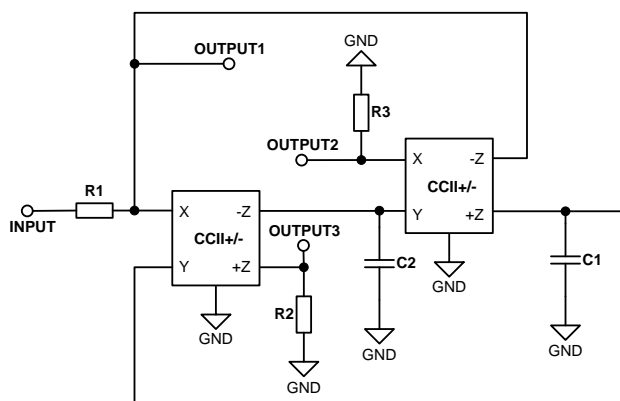
Obr.1.5.: Topologie oscilátoru se dvěma proudovými konvejory první generace.

V [15] bylo publikováno topologicky stejné zapojení jako ve [13], s tím rozdílem, že je pro konstrukci filtru druhého řádu využito dvou konvejořů CCII+ (Obr.1.6.) místo CCI-. V tomto článku je také publikováno zapojení filtru druhého řádu s CCI+ s topologií podobnou [7]. Schéma zapojení konfigurace filtru se dvěma proudovými konvejory CCI+ je na Obr.1.6.



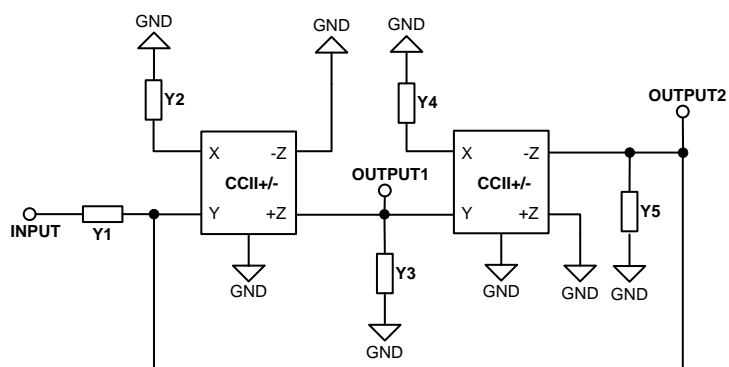
Obr.1.6. Topologie filtrů druhého řádu se dvěma konvejory a) zapojení se dvěma CCII+, b) zapojení se dvěma CCI+.

Ve [20] byla publikována další varianta zapojení filtru druhého řádu se dvěma konvejory. V tomto případě je využito konvejořů s komplementárními výstupy. Schéma zapojení je zobrazeno na Obr.1.7. Jedná se opět o univerzální zapojení pro realizaci DP, PP, HP. Ani v tomto případě nelze realizovat přenosové funkce s nulami přenosu. Toto zapojení má podobné vlastnosti jako předešlé. Navíc má nevýhodu v nutnosti použít proudové konvejory s komplementárními výstupy.



Obr.1.7.: Zapojení ARC filtru druhého řádu se dvěma konvejory s komplementárním výstupem.

Ve [23] byla uvedena další varianta obecného zapojení filtru druhého řádu se dvěma konvejory. V tomto zapojení jsou použity stejně jako ve [20] konvejory s komplementárním výstupem. Schéma zapojení filtru je na Obr.1.8. Na rozdíl od zapojení ve [20] není v tomto případě použití konvejsorů s komplementárním výstupem opodstatněné, protože je vždy jeden výstup konvejsoru uzemněn.



Obr.1.8. Zapojení filtru druhého řádu se dvěma konvejory publikované v [23].

V tomto případě se jedná v podstatě o zapojení filtru druhého řádu se dvěma proudovými konvejory se stejnou topologií jako [15] s tím rozdílem, že jeden z konvejsorů je CCII-. O tomto zapojení lze v určité konfiguraci pasivních součástí nalézt konfiguraci gyrátoru.

Jsou samozřejmě známá také zapojení filtrů s více než dvěma konvejory. Zajímavá zapojení filtrů s více než dvěma konvejory jsou publikována v [9], [14], [16], [18], [21], [22]. V oblasti filtrů druhého řádu s více konvejory můžeme najít zapojení, která byla odvozena s pomocí různých přístupů. V [9] bylo publikováno zapojení, které bylo odvozeno z existujícího zapojení s operačním zesilovačem. Jednalo se o Friend-Deliyannis aktivní RC topologii v

provedení s proudovými konvejory. Ve [14] byla publikována zapojení filtru druhého řádu se čtyřmi konvejory, přičemž konstrukce filtrů vycházela z obvodové realizace gyrátorů. V [16], [18], [21], [22] byla publikována zapojení filtrů druhého řádu s konvejory na principu filtrů s integrátory. V tomto případě lze pro převod struktury s operačními zesilovači na strukturu s konvejory použít například transformaci publikovanou v [10] (pokud se jedná o zapojení s invertujícími integrátory).

1.2.2. Známá zapojení aktivních RC filtrů s konvejory vhodnými pro realizaci přenosových funkcí s nulami přenosu

V současné době je známo několik zapojení aktivních RC filtrů s konvejory vhodnými pro realizaci přenosových funkcí s nulami přenosu. Zajímavá zapojení jsou publikována v [5], [8], [9], [14], [16]. Ve většině publikací, kde je publikována možnost realizace přenosové funkce s nulou přenosu, je publikována pouze možnost realizace pásmové zádrže ([5], [8], [14], [16]). V těchto případech je nejzajímavější [5], poněvadž se jedná o možnost realizace pásmové zádrže pouze s jedním proudovým konvejorem CCII-. Ve všech ostatních případech je nutno více aktivních prvků.

Možnost realizace přenosové funkce typu PZ, DPN a HPN byla publikována v [9]. Tato publikace prezentuje zapojení filtru druhého řádu s konvejory umožňující realizaci všech typů přenosových funkcí druhého řádu (DP, PP, HP, PZ, FČ, DPN, HPN). Toto zapojení vychází ze zapojení s operačním zesilovačem (Friend-Deliyannis aktivní RC topologie). Na rozdíl od zapojení s operačním zesilovačem pracuje zapojení s konvejory s proudovými vstupy a výstupy. Velkou výhodou tohoto zapojení je možnost realizace všech typů přenosové funkce druhého řádu. Nevýhodou je velká složitost zapojení a nutnost více konvejořů pro některé typy přenosových funkcí a nutnost konvejořů s více výstupy.

1.2.3. Známá zapojení aktivních RC filtrů z hlediska možnosti elektronického přeladování

V současné době je známo několik možností realizace elektronicky přesaditelných filtrů s konvejory. Možné způsoby implementace přeladování v aktivních RC filtrech druhého řádu s konvejory byly publikovány v [11], [12], [21], [22].

Jedná se v podstatě o dva způsoby realizace možnosti elektronického přeladování ve filtrech s konvejory. První možnost je elektronicky měnit parametry pasivních součástek filtru přidáním

dalších aktivních prvků. Tato možnost je použita v [11], [21]. Další možnost je elektronicky měnit parametry aktivního prvku (proudového konveje) a tím dosáhnout možnosti elektronického přeladování. Tato možnost je použita ve [12] a [22].

V [11] je k přeladování využito možnosti elektronické změny parametrů zemněných rezistorů filtru napětím. Jako napětím řízený rezistor je využit CMOS tranzistor v lineárním módu. Filtr využívá realizace gyrátoru pomocí dvou konveje a tudíž se jedná o filtr se zemněným gyrátorem, u kterého se změnou hodnoty rezistorů docílí změny gyračních konstant gyrátoru.

Ve [21] byla publikována možnost realizace laditelného oscilátoru. Bylo publikováno několik možností zapojení oscilátoru se třemi konveji obsahující zemněné pasivní prvky vhodné pro možnost elektronického přeladování. I v tomto případě bylo k přeladování využito možnosti elektronické změny parametrů rezistorů v obvodu. Bohužel v článku nebylo publikováno jakým způsobem bylo změny parametrů zemněných rezistorů dosaženo.

Ve [12] byl prezentován konveje řízený proudem, který může být vhodný pro realizaci elektronicky přesaditelných filtrů. Jako možnost aplikace tohoto konveje je v článku obsažen elektronicky laditelný filtr se dvěma konveji CCCII+ v zapojení jako pásmová propust. Topologie zapojení filtru je podobná s topologií publikovanou v [7]. V tomto případě je využito změny velikosti parazitního rezistoru na svorce X konveje prostřednictvím změny velikosti proudu nastavujícího stejnosměrný pracovní bod tranzistorů uvnitř konveje.

V [22] byla prezentována další možnost realizace řízeného konveje. V tomto případě se využívalo elektronické změny proudového přenosu konveje ze svorky X na svorku Y. Změny parametrů bylo opět dosaženo pomocí změny biasovacího proudu. Publikovaný laditelný filtr se skládal ze sedmi konveje druhého řádu a osmi pasivních prvků. Tento článek je přínosný především ukázkou možnosti realizace konveje s měnitelným proudovým přenosem.

1.2.4. Shrnutí současného stavu řešeného problému

V současné době je známo zapojení filtrů druhého řádu s jedním konvejem CCII+ pro realizaci DP, PP, HP a zapojení s jedním konvejem CCII- pro realizaci DP, PP, HP, PZ a FČ prvního řádu publikované v [5]. Pokud je mi známo, tak nebyla publikována zapojení pro realizaci přenosové funkce typu DPN a HPN. Nebyla publikována také zapojení umožňující elektronickou změnu parametrů filtru.

Možností zapojení filtrů druhého řádu se dvěma konvejory je známo více (viz. výše a [3], [6], [7], [8], [13], [15], [17], [20], [23]), ale byly publikovány možnosti realizace pouze pro DP, PP, HP PZ a FČ. Pokud je mi známo, tak stejně jako u filtrů s jedním konvejorem nebyla publikována zapojení umožňující realizovat přenosové funkce typu DPN a HPN. V této kategorii filtrů jsou známa některá zapojení umožňující elektronickou změnu parametrů filtru (viz. [11], [12], [21]).

Aktivní RC filtry s více než dvěma konvejory vycházejí většinou ze zapojení filtrů s integrátory nebo gyrátory (viz. [14], [16], [18], [21], [22]). Výjimkou je topologie filtru publikovaná v [9], která jako jediná je schopna realizovat přenosovou funkci typu DPN a HPN. Možnost elektronické změny parametrů filtrů s více než dvěma konvejory byla publikována ve [22].

Z předešlého vyplývá, že v současné době nejsou známy možnosti realizace aktivních RC filtrů s jedním konvejorem pro realizaci přenosové funkce typu FČ.

Z předešlého vyplývá, že v současné době nejsou známy možnosti realizace aktivních RC filtrů s jedním nebo dvěma konvejory pro realizaci přenosových funkcí druhého řádu typu DPN a HPN.

Z předešlého vyplývá, že v současné době nejsou známy možnosti realizace aktivních RC filtrů s elektronicky měnitelnými parametry u topologií s jedním konvejorem.

Z předešlého vyplývá, že v současné době nejsou známy možnosti realizace aktivních RC filtrů s elektronicky měnitelnými parametry pro přenosovou funkci s nulami přenosu u topologií se dvěma a více konvejory.

1.3. Cíle disertační práce

Cílem disertační práce je vytvořit nové možnosti realizace (zapojení) filtrů druhého řádu s jedním nebo dvěma konvejsory vhodné pro realizaci přenosové funkce typu DP, PP, HP PZ, FČ, DPN a HPN s malým počtem pasivních prvků a snadnou možností návrhu parametrů filtru.

Cílem disertační práce je vytvořit nové možnosti realizace filtrů s konvejsory s možností elektronického nastavování parametrů filtru.

U nových zapojení filtrů bude kladen důraz zejména na možnost použití těchto zapojení filtrů pro konstrukci filtrů v kmitočtové oblasti nad 1MHz nebo na možnosti elektronického měnění parametrů filtru.

Nová zapojení budou ověřena počítačovými simulacemi s ideálními prvky v programu SNAP.

Nová zapojení budou ověřena počítačovými simulacemi s modely reálných prvků v programu PSpice.

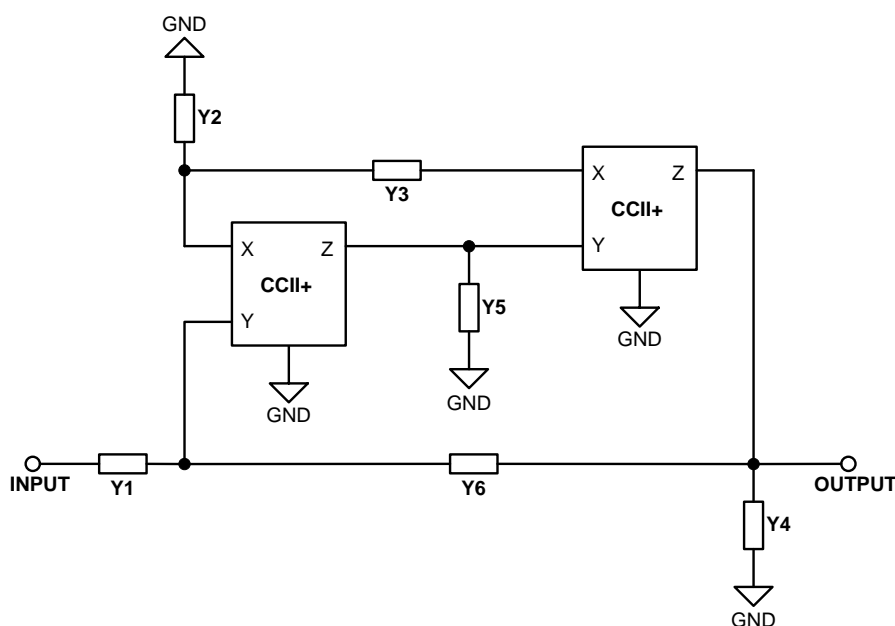
Některá zapojení budou ověřena praktickou realizací v oblasti nízkých (akustických) kmitočtů nebo v oblasti vysokých kmitočtů.

2 FILTRY DRUHÉHO ŘÁDU S KONVEJORY A JEJICH MOŽNOSTI ELEKTRONICKÉHO LADĚNÍ

Na začátku doktorského studia bylo nutné abych se seznámil s proudovými konvejory, jejich vlastnostmi a známými možnostmi použití. Poté, co jsem se dozvěděl, že na komerčním trhu jsou poměrně snadno dostupné proudové konvejory CCII+ obsažené v obvodech AD844 a OPA 660, jsem se rozhodl, že se zaměřím právě na filtry druhého řádu s proudovými konvejory CCII+. Na popud mého školitele jsem se začal věnovat obvodům publikovaným ve [12] a [24].

2.1 Filtry se dvěma konvejory pro realizaci přenosových funkcí s nulou přenosu

Nejdříve jsem se věnoval zapojením filtrů se dvěma proudovými konvejory. Zjistil jsem, že nejsou běžně publikována zapojení s konvejory pro realizaci filtrů s nulami přenosu, proto jsem se začal zabývat touto oblastí. Vytvořil jsem zapojení vhodné pro realizaci přenosových funkcí s nulami přenosu. Topologie se dvěma konvejory umožňující realizaci přenosových funkcí s nulami přenosu je uvedena na Obr.2.1.



Obr.2.1 topologie pro realizaci přenosových funkcí s nulou přenosu.

Nová myšlenka spočívá v zavedení zpětné vazby mezi konvejory přes svorky „X“. Tvar obecné přenosové funkce tohoto zapojení je

$$K(p) = \frac{Y1 \cdot Y5 \cdot Y6 + Y1 \cdot Y3 \cdot Y6 + Y1 \cdot Y2 \cdot Y3 - Y1 \cdot Y3 \cdot Y5}{Y4 \cdot Y5 \cdot Y6 + Y4 \cdot Y5 \cdot Y1 + Y4 \cdot Y6 \cdot Y3 + Y4 \cdot Y1 \cdot Y3 + Y1 \cdot Y5 \cdot Y6 + Y3 \cdot Y5 \cdot Y6 - Y2 \cdot Y3 \cdot Y6 + Y6 \cdot Y1 \cdot Y3} \quad (1)$$

Použitím na admitancích Y5 a Y6 kondenzátorů a Y1 až Y4 vodivostí (rezistorů) vznikne zapojení dolní propusti s nulou přenosu (DPN) s přenosovou funkcí ve tvaru

$$K(p) = \frac{p^2 \cdot (C1 \cdot C2 \cdot G1) + p \cdot (G1 \cdot G3 \cdot (C2 - C1)) + G1 \cdot G2 \cdot G3}{p^2 \cdot (C1 \cdot C2 \cdot (G1 + G3 + G4)) + p \cdot (C2 \cdot G3 \cdot G4 + C2 \cdot G1 \cdot G3 - C2 \cdot G2 \cdot G3 + C1 \cdot G1 \cdot G4) + G1 \cdot G3 \cdot G4} \quad (2)$$

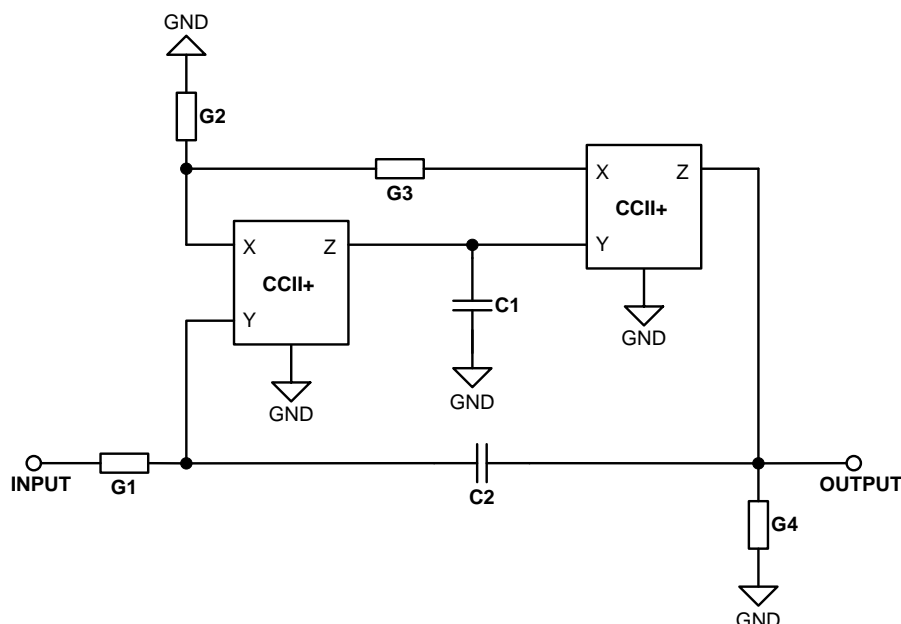
Aby se jednalo o přenosovou funkci DPN musí platit podmínka $C1=C2=C$. Tato podmínka je patrná z tvaru přenosové funkce (2). Při této podmínce jsem odvodil vztahy pro parametry obvodu (rovnice 3 až 6). Schéma zapojení filtru je na Obr.2.2.

$$\omega_N = \sqrt{\frac{G2 \cdot G3}{C^2}}, \quad (3)$$

$$\omega_P = \sqrt{\frac{G1 \cdot G3 \cdot G4}{C^2 \cdot (G1 + G3 + G4)}}, \quad (4)$$

$$\frac{\omega_N}{\omega_P} = \sqrt{\frac{G2 \cdot (G1 + G3 + G4)}{G1 \cdot G4}}, \quad (5)$$

$$Q_P = \frac{\sqrt{G1 \cdot G3 \cdot G4 \cdot (G1 + G3 + G4)}}{G3 \cdot G4 + G1 \cdot G3 + G1 \cdot G4 - G2 \cdot G3} \quad (6)$$



Obr.2.2. Dolní propust s nulou přenosu na bázi dvou konvejořů CII+.

Analogicky jsem vytvořil zapojení pro realizaci horní propusti s nulou přenosu (HPN) tím, že jsem zaměnil vodivosti za kondenzátory a opačně. Schéma zapojení HPN je znázorněno na Obr.2.3. Odvodil jsem výrazy pro parametry horní propusti s nulou přenosu pro podmínku $G1=G2=G$. Rovnice jsou uvedeny ve vztazích (7), (8), (9) a (10).

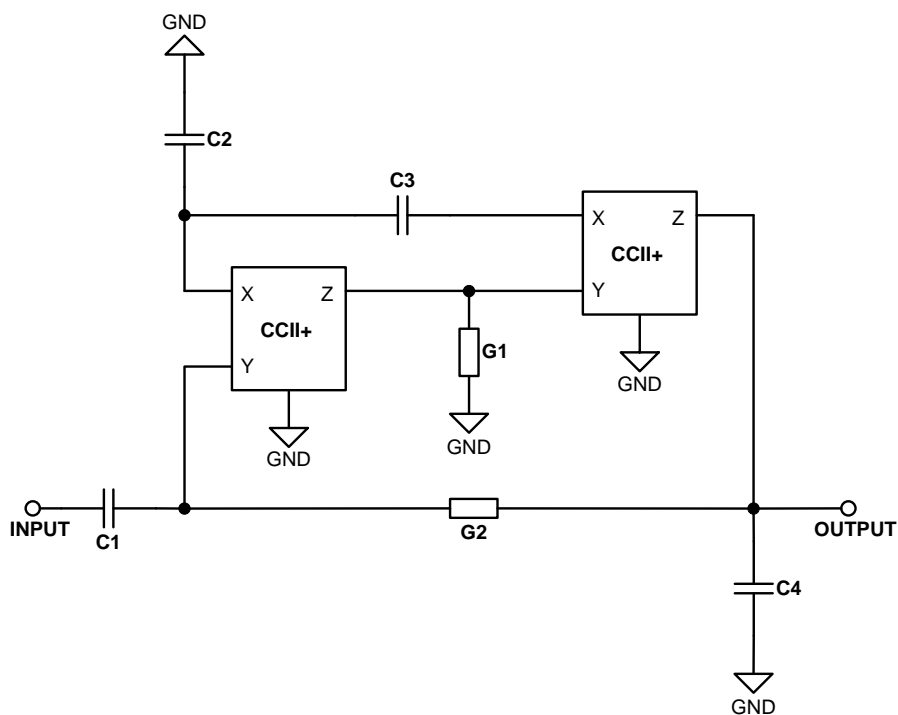
$$\omega_N = \sqrt{\frac{G^2}{C2 \cdot C3}}, \quad (7)$$

$$\omega_P = \sqrt{\frac{G^2 \cdot (C1 + C3 + C4)}{C1 \cdot C2 \cdot C4}}, \quad (8)$$

$$\frac{\omega_N}{\omega_P} = \sqrt{\frac{C1 \cdot C4}{C2 \cdot (C1 + C3 + C4)}}, \quad (9)$$

$$Q_P = \frac{\sqrt{C1 \cdot C3 \cdot C4 \cdot (C1 + C3 + C4)}}{C1 \cdot C4 + C1 \cdot C3 + C3 \cdot C4 - C2 \cdot C3}. \quad (10)$$

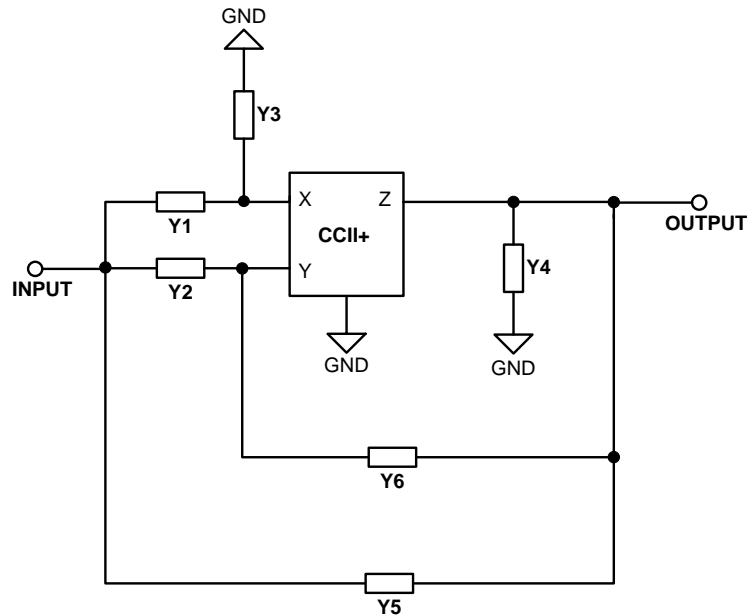
U obou zapojení vycházejí poměrně složité vztahy pro jednotlivé parametry obvodu. Nevýhodou těchto zapojení je nutnost dvou konvejořů CCII+ a svázanost jakosti pólu obvodu s polohou nuly. Tato provázanost značně omezuje využití této konfigurace v praxi. U horní propusti (Obr.2.3.) je další nevýhoda v připojení kondenzátorů na svorky „X“ konvejořů a tudíž se uplatňuje parazitní odpor těchto svorek (nedá se kompenzovat pasivními prvky).



Obr.2.3. Horní propust s nulou přenosu na bázi dvou konvektorů CII+.

2.2 Filtry s jedním konvejorem pro realizaci přenosových funkcí s nulou přenosu

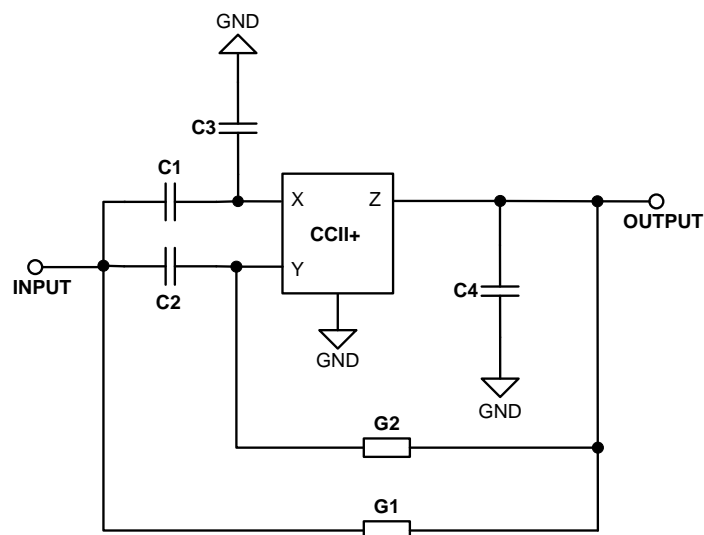
Věnoval jsem se také zapojením s jedním konvejorem a snažil jsem se vytvořit zapojení pro realizaci přenosových funkcí s nulou přenosu na bázi jednoho konvejeoru. Vytvořil jsem topologii umožňující realizaci filtru pouze s jedním konvejorem. Tato topologie je znázorněna na Obr.2.4. Jedná se o zapojení s více zpětnými vazbami a šesti pasivními prvky. Přenosová funkce tohoto zapojení má tvar (11).



Obr.2.4. Topologie pro realizaci filtrů s nulou přenosu s jedním konvejorem.

$$K(p) = \frac{Y5 \cdot Y6 + Y5 \cdot Y2 + Y6 \cdot Y2 + Y2 \cdot Y3 - Y6 \cdot Y1}{Y5 \cdot Y6 + Y5 \cdot Y2 + Y6 \cdot Y2 + Y6 \cdot Y4 + Y2 \cdot Y4 - Y6 \cdot Y1 - Y6 \cdot Y3} \quad (11)$$

Pro realizaci dolní propusti s nulou přenosu jsem $Y1$, $Y2$, $Y3$ a $Y4$ nahradil kondenzátory a $Y5$, $Y6$ jsem nahradil rezistory. V tomto případě se změní obecná přenosová funkce (11) na přenosovou funkci (12). Obrázek 2.5. schematicky znázorňuje dolní propust s nulou přenosu. V případě, že platí $Q_N \rightarrow \infty$ můžeme pro parametry obvodu psát výrazy (13), (14), (15), (16). Při nízkých kmitočtech (menších než kmitočet pólu) se uplatňuje přenosová cesta ze vstupu filtru na výstup přes vodivost $G1$ (viz. Obr.2.5.). Při vysokých kmitočtech (vyšších než kmitočet nuly) se uplatňuje přenosová cesta ze vstupu přes konvektor na výstup. Ze schématu zapojení je patrné, že ke svorce “X” konvektoru jsou připojeny kondenzátory, které mají pro vysoké kmitočty malou impedanci. Z toho vyplývá, že se nepříznivě projeví parazitní rezistor na svorce “X” konvektoru. V tomto případě tento parazitní rezistor nelze kompenzovat a projeví se v přenosových charakteristikách filtru.



Obr.2.5. Dolní propust s nulou přenosu na bázi jednoho konvejeoru CCII+.

Přenosová funkce filtru typu DPN má tvar (12).

$$K(p) = \frac{p^2 \cdot C2 \cdot C3 + p \cdot (C2 \cdot G1 + C2 \cdot G2 - C1 \cdot G1) + G1 \cdot G2}{p^2 \cdot (C2 \cdot C4) + p \cdot (C2 \cdot G1 + C2 \cdot G2 + C4 \cdot G1 - C1 \cdot G1 - C3 \cdot G1) + G1 \cdot G2} \quad (12)$$

Pro $Q_N \rightarrow \infty$ musí platit $C2 \cdot G2 + C2 \cdot G1 - C1 \cdot G1 = 0$ a potom:

$$\omega_N = \sqrt{\frac{G1 \cdot G2}{C2 \cdot C3}}, \quad (13)$$

$$\omega_P = \sqrt{\frac{G1 \cdot G2}{C2 \cdot C4}}, \quad (14)$$

$$\frac{\omega_N}{\omega_P} = \sqrt{\frac{C4}{C3}}, \quad (15)$$

$$Q_P = \frac{\sqrt{C2 \cdot C4 \cdot G2}}{G1 \cdot (C4 - C3)}. \quad (16)$$

Stejně jako v předchozím případě jsem vytvořil zapojení pro realizaci horní propusti s nulou přenosu (HPN) tím, že jsem zaměnil vodivosti za kondenzátory a opačně. Schéma zapojení HPN je znázorněno na Obr.2.6. Přenosová funkce obvodu z obrázku 2.6. má tvar (17).

Pro nízké kmitočty (kmitočet je nižší než kmitočet nuly obvodu) se uplatňuje signálová cesta přes konvektor. Pro vysoké kmitočty (kmitočet je vyšší než kmitočet pólu filtru) se uplatňuje signálová cesta přes kondenzátor C1.

$$K(p) = \frac{p^2 \cdot C1 \cdot C2 + p \cdot (C1 \cdot G2 + C2 \cdot G2 - C1 \cdot G1) + G2 \cdot G3}{p^2 \cdot (C1 \cdot C2) + p \cdot (C1 \cdot G2 + C1 \cdot G4 + C2 \cdot G2 - C1 \cdot G1 - C1 \cdot G3) + G2 \cdot G4} \quad (17)$$

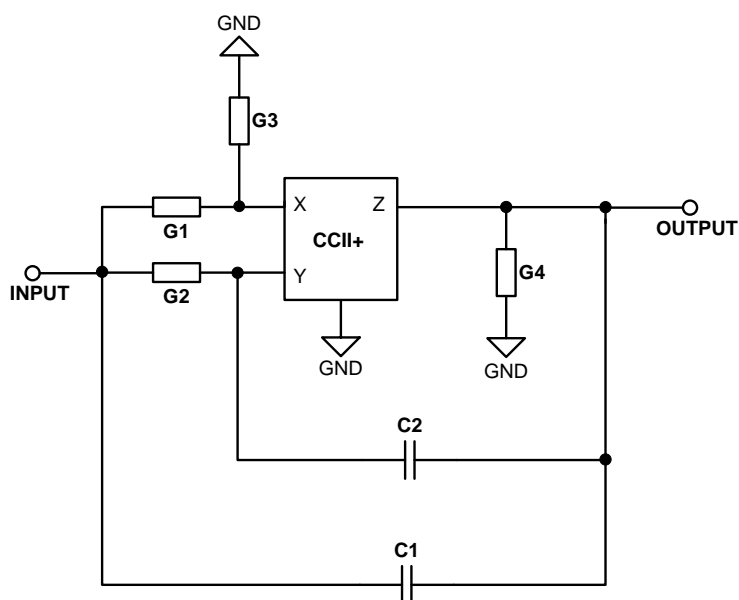
Pro $Q_N \rightarrow \infty$ musí platit $C1 \cdot G2 + C2 \cdot G2 - C1 \cdot G1 = 0$ a potom:

$$\omega_N = \sqrt{\frac{G2 \cdot G3}{C1 \cdot C2}}, \quad (18)$$

$$\omega_P = \sqrt{\frac{G2 \cdot G4}{C1 \cdot C2}}, \quad (19)$$

$$\frac{\omega_N}{\omega_P} = \sqrt{\frac{G3}{G4}}, \quad (20)$$

$$Q_P = \frac{\sqrt{C2 \cdot G2 \cdot G4}}{C1 \cdot (G4 - G3)}. \quad (21)$$



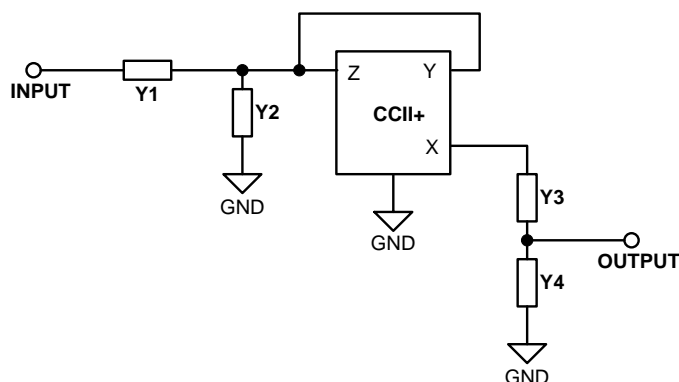
Obr. 2.6. Horní propust s nulou přenosu na bázi jednoho konvejeoru CCII+.

Nevýhodou zapojení z obrázku 2.6. a obrázku 2.7. je závislost jakosti pólu na poměru kmitočtu pólu a nuly. Z toho plyne, že nelze nezávisle nastavit jakost pólu a poměr kmitočtu pólu a nuly.

Pro správnou funkci tato zapojení vyžadují oddělovací zesilovače na vstupu a na výstupu obvodu. S oddělovacími zesilovači lze tyto filtry řadit kaskádně pro zvýšení řádu filtru.

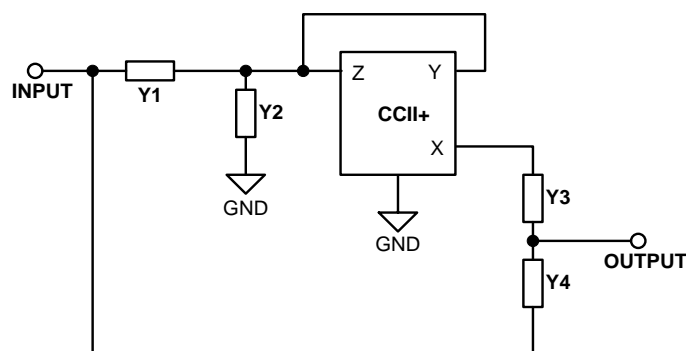
2.3 Filtry s jedním konvejorem CCII+ a čtyřmi pasivními prvky

Vytvořil jsem topologii pro realizaci filtrů druhého řádu typu DP, PP, HP, PZ a FČ na bázi jednoho proudového konvejeoru zapojeného jako negativní impedanční konvertor. Obecné schéma zapojení pro realizaci těchto filtrů je na Obr.2.7. a Obr.2.8. Obecná přenosová funkce pro DP, PP, HP viz. Rovnice (22) a obecná přenosová funkce pro PZ a FČ viz. (23).



Obr. 2.7. Topologie filtru s jedním konvejorem a čtyřmi pasivními prvky pro realizaci DP, PP, HP.

$$K(p) = \frac{Y1 \cdot Y3}{Y1 \cdot Y3 + Y1 \cdot Y4 + Y2 \cdot Y3 + Y2 \cdot Y4 - Y3 \cdot Y4} \quad (22)$$



Obr. 2.8. Topologie filtru s jedním konvejorem a čtyřmi pasivními prvky pro realizaci PZ, FČ.

$$K(p) = \frac{Y2 \cdot Y4 + Y1 \cdot Y4 + Y1 \cdot Y3 - Y3 \cdot Y4}{Y1 \cdot Y3 + Y1 \cdot Y4 + Y2 \cdot Y3 + Y2 \cdot Y4 - Y3 \cdot Y4} \quad (23)$$

Zapojení využívají proudového konveje druhého generace se zkratovanými svorkami Y a Z. Jedná se o velice jednoduchou konfiguraci umožňující použít minimální počet aktivních a pasivních prvků.

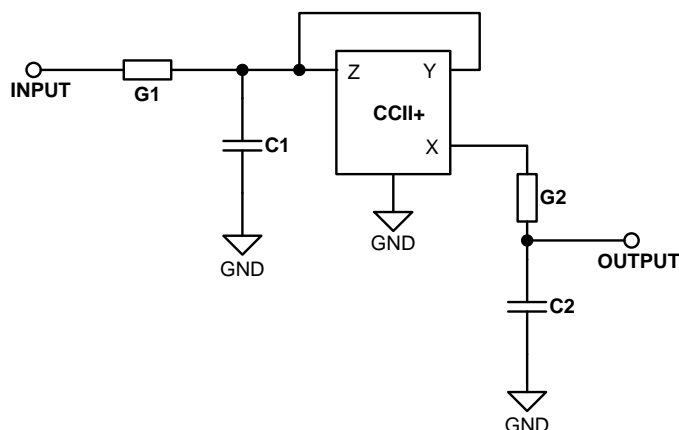
2.3.1 Dolní propust s jedním konvejorem a čtyřmi pasivními prvky

Zapojením vodivostí do pozic Y1 a Y3 a kondenzátorů do pozic Y2 a Y4 získáme zapojení dolní propusti druhého řádu znázorněné na Obr.2.9. V podstatě se jedná o zapojení dvou filtrů prvního řádu, mezi nimiž je zapojen negativní impedanční konvertor v podobě proudového konveje.

Z přenosové funkce (24) jsem odvodil výrazy pro kmitočet a jakost pólu (26), (27). V přenosové funkci jsou také zahrnuty přenosy A_{YX} a I_{XZ} konveje. Z výrazů (25) až (27) vyplývá, že přenosy uvnitř konveje mají vliv na stejnosměrný přenos filtru a na jakost pólu filtru. Vzhledem k tomu, že jsou přenosy většinou menší než jedna, tak výsledná jakost pólu filtru bude menší než u zapojení s ideálními prvky. U dolní propusti z Obr.2.9. se plně projeví také napět'ový offset mezi svorkami Y a X konveje. Citlivosti na jednotlivé prvky obvodu jsou uvedeny ve (28) a (29).

Většinou jsou dostupné konveje s napět'ovým a proudovým přenosem rovným jedné. V tomto případě má přenosová funkce tvar (31). Z tohoto tvaru jsem odvodil vztahy pro kmitočet a jakost pólu (33), (34).

Odvodil jsem také návrhové vztahy pro návrh dolní propusti. Tyto vztahy jsou uvedeny pod rovnicemi (36) až (40). Citlivosti pro případ, že napěťový a proudový přenos konvejeoru je jedna, jsou uvedeny ve výrazech (35).



Obr.2.9. Dolní propust druhého řádu s jedním konvejeorem a čtyřmi pasivními prvky.

Přenosová funkce filtru s vyjádřenými přenosy uvnitř konvejeoru:

$$K(p) = \frac{A_{YX} \cdot G1 \cdot G2}{p^2 \cdot C1 \cdot C2 + p \cdot (C1 \cdot G2 + C2 \cdot G1 - A_{YX} \cdot I_{XZ} \cdot C2 \cdot G2) + G1 \cdot G2} \quad (24)$$

$$K_0 = A_{YX}, \quad (25)$$

$$\omega_p = \sqrt{\frac{G1 \cdot G2}{C1 \cdot C2}}, \quad (26)$$

$$Q_p = \frac{\sqrt{C1 \cdot C2 \cdot G1 \cdot G2}}{C1 \cdot G2 + C2 \cdot G1 - A_{YX} \cdot I_{XZ} \cdot C2 \cdot G2} \quad (27)$$

$$S_{G1}^{\omega_p} = S_{G2}^{\omega_p} = \frac{1}{2}, \quad S_{C1}^{\omega_p} = S_{C2}^{\omega_p} = -\frac{1}{2}, \quad S_{A_{YX}}^{\omega_p} = S_{I_{XZ}}^{\omega_p} = 0 \quad (28)$$

$$S_{G1}^K = S_{G2}^K = S_{C1}^K = S_{C2}^K = S_{I_{XZ}}^K = 0, \quad S_{A_{YX}}^K = 1 \quad (29)$$

pro optimální návrh z hlediska citlivostí na jakost pólu platí:

$$C1 \cdot C2 = 1, \quad G1 \cdot G2 = 1, \quad \frac{C1}{C2} = \frac{G1}{G2}$$

$$S_{G1}^{Q_p} = S_{C1}^{Q_p} = -\left(Q_p - \frac{1}{2}\right), S_{G2}^{Q_p} = S_{C2}^{Q_p} = \left(Q_p - \frac{1}{2}\right), S_{A_{yx}}^{Q_p} = S_{I_{xz}}^{Q_p} = 1 - 2 \cdot Q_p \quad (30)$$

pro klasické proudové konvejory s přenosy $A_{xy} = I_{xz} = 1$ platí:

$$K(p) = \frac{G1 \cdot G2}{p^2 \cdot C1 \cdot C2 + p \cdot (C1 \cdot G2 + C2 \cdot G1 - C2 \cdot G2) + G1 \cdot G2} \quad (31)$$

$$K_0 = 1 \quad (32)$$

$$\omega_p = \sqrt{\frac{G1 \cdot G2}{C1 \cdot C2}} \quad (33)$$

$$Q_p = \frac{\sqrt{C1 \cdot C2 \cdot G1 \cdot G2}}{C1 \cdot G2 + C2 \cdot G1 - C2 \cdot G2} \quad (34)$$

Pro optimální návrh z hlediska citlivostí musí platit:

$G1 \cdot G2 = 1$, $C1 \cdot C2 = 1$ a $\frac{C1}{C2} = \frac{G1}{G2}$ potom vztahy pro citlivosti jsou následující:

$$S_{G1}^{\omega_p} = S_{G1}^{Q_p} = \frac{1}{2}, S_{C1}^{\omega_p} = S_{C1}^{Q_p} = -\frac{1}{2}, S_{G1}^{Q_p} = S_{C1}^{Q_p} = \frac{1}{2} - Q, S_{G2}^{Q_p} = S_{C2}^{Q_p} = \frac{1}{2} + (Q - 1) \quad (35)$$

návrhové vztahy pro tento případ jsou:

$$A = 2 - \frac{1}{Q_p} \quad (36)$$

$$C2 = \sqrt{A} \cdot C \quad (37)$$

$$C1 = \frac{C}{\sqrt{A}} \quad (38)$$

$$G2 = \sqrt{A} \cdot G \quad (39)$$

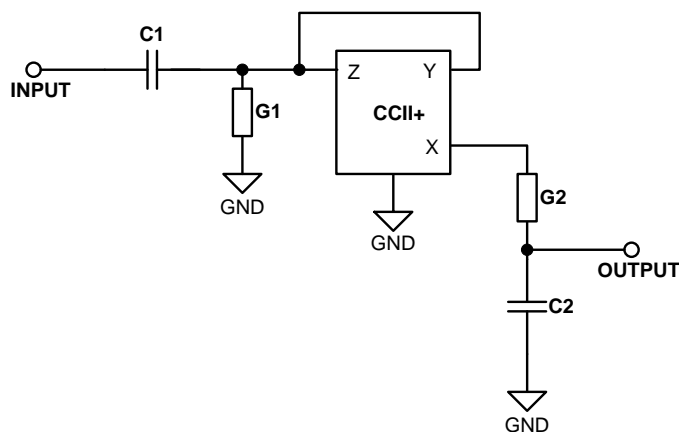
$$G1 = \frac{G}{\sqrt{A}} \quad (40)$$

Tato velice jednoduchá propust druhého řádu je vhodná pro realizaci filtrů na vyšších kmitočtech. V této konfiguraci není parazitní nula přenosu na vysokých kmitočtech jako u zapojení s operačními zesilovači. Pokud chceme použít návrhové vztahy (rovnice (36)...(40)) tak nevýhodou tohoto obvodu je nutnost použití napěťového oddělovače mezi jednotlivými stupni filtru. Lze realizovat filtr i bez napěťových oddělovačů, ale potom je větší problém s realizací, protože se jednotlivé stupně navzájem ovlivňují.

Velkou výhodou tohoto a dalších zapojení s touto topologií je možnost kompenzace některých parazitních prvků konveju. sériová kombinace kondenzátoru a vodivosti na svorce "X" konveju. V tomto případě se totiž dá velice jednoduše kompenzovat parazitní rezistor na této svorce konveju. Velikostí kapacity kondenzátoru C1 je možné kompenzovat parazitní kapacitu svorek Y a Z konveju, což je výhodné zejména na vyšších kmitočtech, kde parazitní kapacity již mohou značně ovlivňovat vlastnosti filtru. V tomto zapojení lze rovněž kompenzovat parazitní rezistor k zemi svorek Y a Z konveju. V tomto případě se na vstupu objeví dělič napětí, kde horní rezistor děliče je R1 a spodní rezistor je parazitní rezistor svorek Y a Z.

2.3.2 Pásmová propust s jedním konvejorem a čtyřmi pasivními prvky

Topologie filtru z Obr.2.8. umožňuje také realizaci pásmové propusti druhého řádu. Existují dvě varianty realizace pásmové propusti. První varianta je zapojení vodivostí na pozice Y2 a Y3 schematu na Obr.2.8. a kondenzátorů na pozice Y1 a Y4. Tato varianta je znázorněna na Obr.2.11.



Obr.2.10. Pásmová propust druhého řádu – varianta1.

$$K(p) = \frac{p \cdot C1 \cdot G2}{p^2 \cdot C1 \cdot C2 + p \cdot (C1 \cdot G2 + C2 \cdot G1 - C2 \cdot G2) + G1 \cdot G2} \quad (41)$$

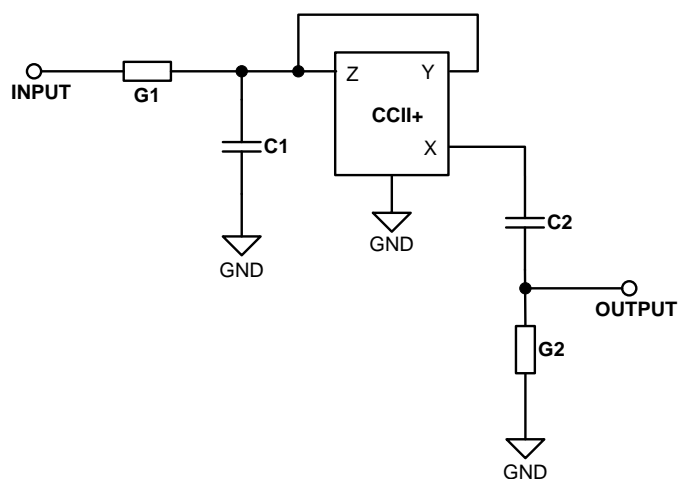
$$\omega_p = \sqrt{\frac{G1 \cdot G2}{C1 \cdot C2}} \quad (42)$$

$$Q_p = \frac{\sqrt{C1 \cdot C2 \cdot G1 \cdot G2}}{C1 \cdot G2 + C2 \cdot G1 - C2 \cdot G2} \quad (43)$$

Druhá možnost realizace pásmové propusti je možná prohozením vodivostí a kondenzátorů první varianty a je znázorněna na Obr.2.12.

Z přenosových funkcí pásmových propustí (41) respektive (44) jsem odvodil vztahy pro kmitočet pólu (42) respektive (45) a jakost pólu (43) respektive (46).

Vzhledem k tomu, že se jedná o stejnou topologii zapojení, tak jsou návrhové vztahy totožné se vztahy pro dolní propust (36) až (40).



Obr.2.11. Pásmová propust druhého řádu – varianta2.

$$K(p) = \frac{p \cdot C2 \cdot G1}{p^2 \cdot C1 \cdot C2 + p \cdot (C1 \cdot G2 + C2 \cdot G1 - C2 \cdot G2) + G1 \cdot G2} \quad (44)$$

$$\omega_p = \sqrt{\frac{G1 \cdot G2}{C1 \cdot C2}} \quad (45)$$

$$Q_p = \frac{\sqrt{C1 \cdot C2 \cdot G1 \cdot G2}}{C1 \cdot G2 + C2 \cdot G1 - C2 \cdot G2} \quad (46)$$

Stejně jako u dolní propusti lze i u pásmové propusti kompenzovat některé parazitní prvky konveju. Vhodným návrhem prvku R2 lze kompenzovat parazitní rezistor na svorce X proudového konveju. Vhodným návrhem prvku R1 a C1 lze kompenzovat parazitní zemněný rezistor a kondenzátor na svorkách Y Z konveju.

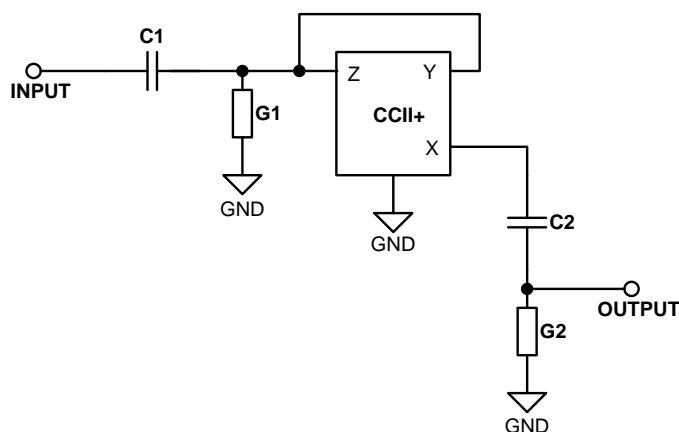
Stejně jako u dolní propusti není v přenosové funkci parazitní nula přenosu na vysokých kmitočtech jako u zapojení s operačním zesilovačem. Proto je toto zapojení vhodné pro konstrukce na vysokých kmitočtech.

Na vysokých kmitočtech se nejvíce projeví parazitní rezistor na svorce X konveju a je nutné s ním počítat. Parazitní rezistor se projeví z důvodu nízké impedance filtru.

2.3.3 Horní propust s jedním konvejem a čtyřmi pasivními prvky

Horní propust jsem vytvořil prohozením vodivostí a kondenzátorů u zapojení dolní propusti. Výsledné schéma je na Obr.2.12. Z přenosové funkce (47) jsem odvodil vztahy pro kmitočet pólu (48) a jakost pólu (49).

Návrhové vztahy jsou opět totožné se vztahy pro dolní propust (36) až (40).



Obr.2.12. Horní propust druhého řádu s jedním CCII+ a čtyřmi pasivními prvky.

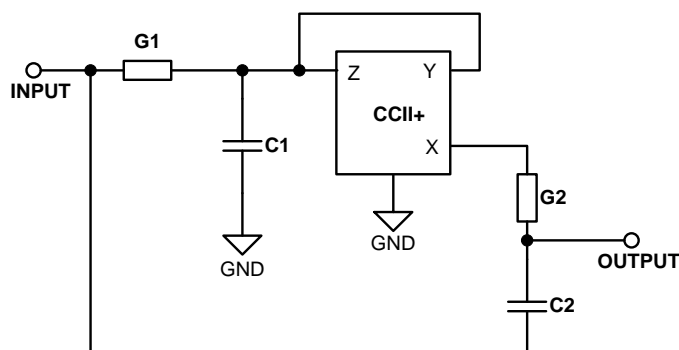
$$K(p) = \frac{p^2 \cdot C1 \cdot C2}{p^2 \cdot C1 \cdot C2 + p \cdot (C1 \cdot G2 + C2 \cdot G1 - C2 \cdot G2) + G1 \cdot G2} \quad (47)$$

$$\omega_p = \sqrt{\frac{G1 \cdot G2}{C1 \cdot C2}} \quad (48)$$

$$Q_p = \frac{\sqrt{C1 \cdot C2 \cdot G1 \cdot G2}}{C1 \cdot G2 + C2 \cdot G1 - C2 \cdot G2} \quad (49)$$

2.3.4 Pásmová zadrž s jedním konvejorem a čtyřmi pasivními prvky

Na bázi topologie na Obr.2.9. jsem vytvořil pásmovou zadrž s jedním konvejorem a čtyřmi pasivními prvky. Lze vytvořit dvě varianty pásmové zadrž. První varianta má místo Y1 a Y3 vodivosti a místo Y2 a Y4 kondenzátory a je nakreslena na Obr.2.14. Druhá varianta má ve srovnání s první variantou zaměněny vodivost za kondenzátory a kondenzátory za vodivosti. Aby se jednalo o pásmovou zadrž, tak musí platit $G1=G2$ pro první variantu, respektive $C1=C2$ pro druhou variantu. Přenosová funkce pro první variantu je vyjádřena výrazem (50), pro druhou variantu (56). Rovnice pro vyjádření kmitočtu a jakosti pólu jsou vyjádřeny výrazy (51) a (52) pro první variantu, respektive (57) a (58) pro druhou variantu. Pro návrh platí výrazy (53), (54), (55) pro první variantu a (59), (60), (61) pro druhou variantu.



Obr.2.13. Pásmová zadrž s jedním konvejorem – varianta 1

$$K(p) = \frac{p^2 \cdot C1 \cdot C2 + p \cdot (C2 \cdot (G1 - G2)) + G1 \cdot G2}{p^2 \cdot C1 \cdot C2 + p \cdot (C2 \cdot (G1 - G2) + C1 \cdot G2) + G1 \cdot G2} \quad (50)$$

pro $Q_N \rightarrow \infty$ platí $G1 = G2$

$$\omega_N = \omega_P = \sqrt{\frac{G1 \cdot G2}{C1 \cdot C2}} \quad (51)$$

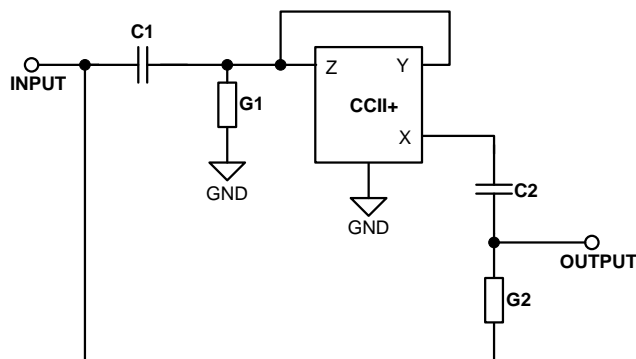
$$Q_P = \sqrt{\frac{C2}{C1}} \quad (52)$$

Pro návrh platí následující vztahy:

$$G1 = G2 = G \quad (53)$$

$$C2 = Q_p \cdot C \quad (54)$$

$$C1 = \frac{C}{Q_p} \quad (55)$$



Obr.2.14. Pásmová zadrž s jedním konvejorem – varianta2

$$K(p) = \frac{p^2 \cdot C1 \cdot C2 + p \cdot (G2 \cdot (C1 - C2)) + G1 \cdot G2}{p^2 \cdot C1 \cdot C2 + p \cdot (G2 \cdot (C1 - C2) + C2 \cdot G1) + G1 \cdot G2} \quad (56)$$

pro $Q_N \rightarrow \infty$ platí $C1 = C2$

$$\omega_N = \omega_p = \sqrt{\frac{G1 \cdot G2}{C1 \cdot C2}} \quad (57)$$

$$Q_p = \sqrt{\frac{G2}{G1}} \quad (58)$$

Pro návrh platí následující vztahy:

$$C1 = C2 = C \quad (59)$$

$$G2 = Q_p \cdot G \quad (60)$$

$$G1 = \frac{G}{Q_p} \quad (61)$$

2.3.5 Fázovací článek s jedním konvejorem a čtyřmi pasivními prvky

Fázovací článek má stejné zapojení jako první varianta pásmové zadržky Obr.2.13, respektive druhá varianta pásmové zadržky Obr.2.14. Rozdíl od pásmové zadržky je v tom, že pro fázovací článek platí jiné návrhové vztahy. Přenosová funkce má stejný tvar jako u pásmové zadržky (50), (56). Z přenosových funkcí jsem odvodil vztahy pro podmínku fázovacího článku (62) pro první variantu, respektive (69) pro druhou variantu a vztahy pro kmitočet nuly a pólu a jakost nuly a pólu (63), (64) pro variantu 1, respektive (70) a (71) pro druhou variantu.

$$C_2 \cdot (G_1 - G_2) = -\frac{C_1 \cdot G_2}{2} \quad (62)$$

$$\omega_N = \omega_P = \sqrt{\frac{G_1 \cdot G_2}{C_1 \cdot C_2}}, \quad (63)$$

$$Q_P = Q_N = 2 \cdot \sqrt{\frac{G_1 \cdot C_2}{C_1 \cdot G_2}} \quad (64)$$

Návrhové vztahy pro první variantu fázovacího článku jsem odvodil ve vztazích (65), (66), (67) a (68). Pro druhou variantu jsem odvodil návrhové vztahy (72), (73), (74) a (75).

$$\frac{C_2}{C_1} = A, \quad (65)$$

$$\frac{G_2}{G_1} = B, \quad (66)$$

$$C_1 = C, C_2 = A \cdot C, G_1 = G, G_2 = B \cdot G, Q_P = 2 \cdot \sqrt{\frac{A}{B}}, C_2 \cdot (G_1 - G_2) = -\frac{C_1 \cdot G_2}{2}$$

$$B = \frac{2}{Q_P^2} + 1, \quad (67)$$

$$A = \frac{B}{2 \cdot (B - 1)} \quad (68)$$

podmínka pro druhou variantu fázovacího článku:

$$G_2 \cdot (C_1 - C_2) = -\frac{G_1 \cdot C_2}{2} \quad (69)$$

$$\omega_N = \varpi_P = \sqrt{\frac{G_1 \cdot G_2}{C_1 \cdot C_2}}, \quad (70)$$

$$Q_P = Q_N = 2 \cdot \sqrt{\frac{C_1 \cdot G_2}{G_1 \cdot C_2}} \quad (71)$$

návrhové vztahy pro druhou variantu fázovacího článku:

$$\frac{C_2}{C_1} = A, \quad (72)$$

$$\frac{G_2}{G_1} = B, \quad (73)$$

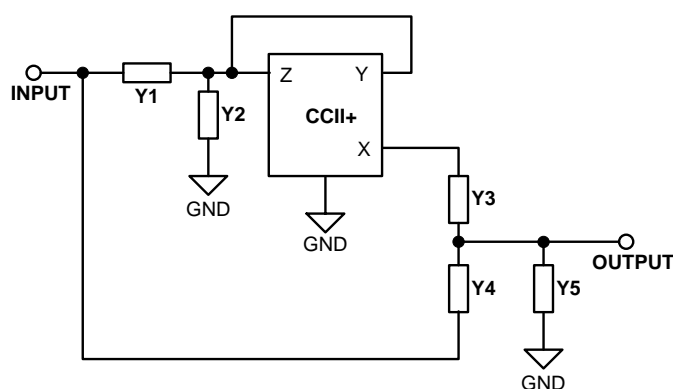
$$C_1 = C, C_2 = A \cdot C, G_1 = G, G_2 = B \cdot G, Q_P = 2 \cdot \sqrt{\frac{B}{A}}, G_2 \cdot (C_1 - C_2) = -\frac{G_1 \cdot C_2}{2}$$

$$A = \frac{2}{Q_P^2} + 1, \quad (74)$$

$$B = \frac{A}{2 \cdot (A - 1)} \quad (75)$$

2.4 Filtry s jedním konvejorem CCII+ a pěti pasivními prvky pro realizaci přenosových funkcí s nulou přenosu

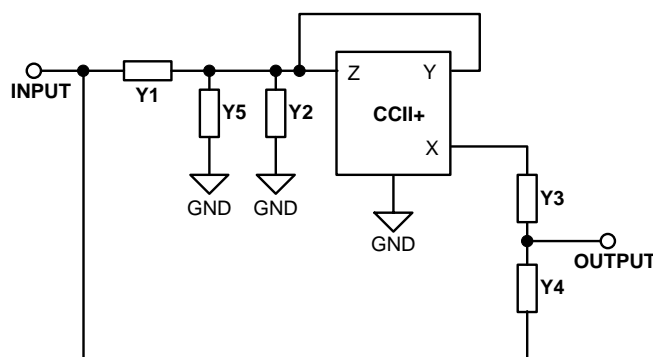
Z pásmové zadržky prezentované v předešlé kapitole jsem odvodil možná zapojení pro konstrukci filtrů typu DPN a HPN. Jedná se celkem o tři velice podobná zapojení, která se liší polohou jednoho pasivního prvku vytvářejícího z pásmové zadržky filtr typu DPN a HPN. Tři možné varianty jsou zobrazeny na Obr.2.14, Obr.2.15, Obr.2.16.



Obr.2.15. Topologie pro realizaci filtru druhého řádu s nulou přenosu – varianta 1.

Obecná přenosová funkce obvodu z Obr.2.14. je vyjádřena v (76).

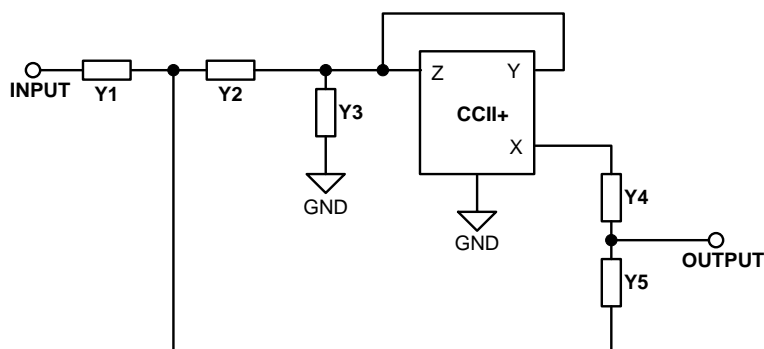
$$K(p) = \frac{Y2 \cdot Y4 + Y1 \cdot Y4 + Y1 \cdot Y3 - Y3 \cdot Y4}{Y1 \cdot Y3 + Y1 \cdot Y4 + Y1 \cdot Y5 + Y2 \cdot Y3 + Y2 \cdot Y4 + Y2 \cdot Y5 - Y3 \cdot Y4 - Y3 \cdot Y5}. \quad (76)$$



Obr.2.16. Topologie pro realizaci filtru druhého řádu s nulou přenosu – varianta 2.

Obecná přenosová funkce obvodu z Obr.2.15. je vyjádřena v (77).

$$K(p) = \frac{Y1 \cdot Y4 + Y1 \cdot Y3 + Y4 \cdot Y5 + Y4 \cdot Y2 - Y3 \cdot Y4}{Y1 \cdot Y3 + Y1 \cdot Y4 + Y3 \cdot Y5 + Y3 \cdot Y2 + Y4 \cdot Y5 + Y4 \cdot Y2 - Y3 \cdot Y4} \quad (77)$$



Obr.2.17. Topologie pro realizaci filtru druhého řádu s nulou přenosu – varianta 3.

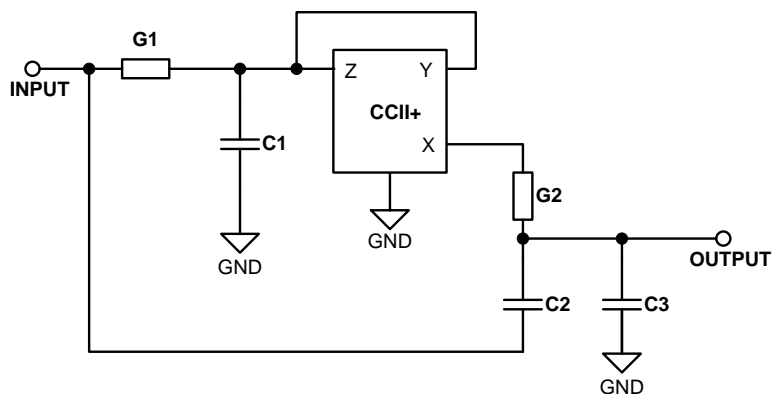
Obecná přenosová funkce obvodu z Obr.2.16. je vyjádřena v (78)

$$K(p) = \frac{Y1 \cdot Y2 \cdot Y5 + Y1 \cdot Y3 \cdot Y5 + Y1 \cdot Y2 \cdot Y4 - Y1 \cdot Y4 \cdot Y5}{Y1 \cdot Y2 \cdot Y4 + Y1 \cdot Y2 \cdot Y5 + Y1 \cdot Y3 \cdot Y4 + Y1 \cdot Y3 \cdot Y5 + Y2 \cdot Y3 \cdot Y4 + Y2 \cdot Y3 \cdot Y5 + Y3 \cdot Y4 \cdot Y5 - Y1 \cdot Y4 \cdot Y5} \quad (78)$$

2.4.1 Dolní propust s nulou přenosu s jedním konvejorem a pěti pasivními prvky

Z obecného zapojení Obr.2.15. jsem odvodil zapojení dolní propusti s nulou přenosu. Jedná se o zapojení s jedním konvejorem CCII+, dvěma rezistory a třemi kondenzátory. Z tvaru přenosové funkce (79) jsem odvodil přenosovou funkci pro jakost nuly jdoucí k nekonečnu (80). Aby jakost nuly šla k nekonečnu, tak musí platit aby se rovnaly vodivosti G1 a G2. V tomto případě se filtr chová jako dolní propust s nulou přenosu. Z přenosové funkce (80) jsem odvodil vztahy pro kmitočet nuly, kmitočet a jakost pólu a poměr kmitočet nuly a pólu (81), (82), (83), (84).

Odvodil jsem návrhové vztahy pro tuto topologii dolní propusti s nulou přenosu. Nejdříve je nutno zvolit G1 a G2, přičemž z podmínky pro dolní propust s nulou přenosu musí platit $G1=G2=G$. Poté se dle vztahů (85), (86) a (87) dopočítají ostatní součástky filtru (C1, C2, C3).



Obr.2.18. Dolní propust s nulou přenosu – varianta 1

$$K(p) = \frac{p^2 \cdot C1 \cdot C2 + p \cdot (C2 \cdot (G1 - G2)) + G1 \cdot G2}{p^2 \cdot C1 \cdot (C2 + C3) + p \cdot (C2 \cdot (G1 - G2) + C3 \cdot (G1 - G2) + C1 \cdot G2) + G1 \cdot G2} \quad (79)$$

pro $G1=G2=G$ platí:

$$K(p) = \frac{p^2 \cdot C1 \cdot C2 + G^2}{p^2 \cdot C1 \cdot (C2 + C3) + p \cdot C1 \cdot G + G \cdot G} \quad (80)$$

$$\omega_N = \sqrt{\frac{G^2}{C1 \cdot C2}}, \quad (81)$$

$$\omega_P = \sqrt{\frac{G^2}{C1 \cdot (C2 + C3)}}, \quad (82)$$

$$\frac{\omega_N}{\omega_P} = \sqrt{\frac{C2 + C3}{C2}}, \quad (83)$$

$$Q_P = 2 \cdot \sqrt{\frac{C2 + C3}{C1}}. \quad (84)$$

návrh:

volíme G

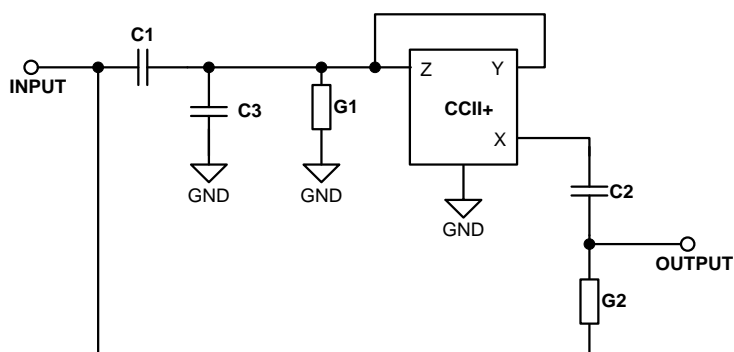
$$C1 = \frac{G}{Q_P \cdot \omega_P}, \quad (85)$$

$$C2 = \frac{Q_p \cdot G}{\omega_p \cdot \left(\frac{\omega_N}{\omega_p}\right)^2}, \quad (86)$$

$$C3 = \frac{Q_p \cdot G \cdot \left(\left(\frac{\omega_N}{\omega_p}\right)^2 - 1\right)}{\omega_p \cdot \left(\frac{\omega_N}{\omega_p}\right)^2}, \quad (87)$$

Druhá varianta dolní propusti s nulou přenosu je na Obr.2.19. Přenosová funkce tohoto obvodu (88) se při zavedení podmínky $C1+C3=C2$ změní na přenosovou funkci (89). Z (89) jsem odvodil výrazy pro kmitočet nuly (90), kmitočet pólu (91), poměr kmitočtu nuly a pólu (92) a jakost pólu (93).

Odvodil jsem také návrhové vztahy pro tento typ dolní propusti s nulou přenosu (94), (95), (96), (97) a (98).



Obr.2.19. Dolní propust s nulou přenosu – varianta 2.

$$K(p) = \frac{p^2 \cdot C1 \cdot C2 + p \cdot (G2 \cdot (C1 + C3 - C2)) + G1 \cdot G2}{p^2 \cdot C2 \cdot (C1 + C3) + p \cdot (G2 \cdot (C1 + C3 - C2) + G1 \cdot C2) + G1 \cdot G2} \quad (88)$$

pro $C1+C3=C2$ platí:

$$K(p) = \frac{p^2 \cdot C1 \cdot C2 + G1 \cdot G2}{p^2 \cdot C2 \cdot (C1 + C3) + p \cdot G1 \cdot C2 + G1 \cdot G2} \quad (89)$$

$$\omega_N = \sqrt{\frac{G1 \cdot G2}{C1 \cdot C2}}, \quad (90)$$

$$\omega_P = \sqrt{\frac{G1 \cdot G2}{C2 \cdot (C1 + C3)}}, \quad (91)$$

$$\frac{\omega_N}{\omega_P} = \sqrt{\frac{C1 + C3}{C1}}, \quad (92)$$

$$Q_P = 2 \cdot \sqrt{\frac{G2}{G1}}. \quad (93)$$

návrh:

$$\frac{\omega_N}{\omega_P} = k, \quad C1 \cdot C2 = C^2, \quad G1 \cdot G2 = G^2$$

$$G1 = \frac{2 \cdot G}{Q_P} \quad (94)$$

$$G2 = \frac{Q_P \cdot G}{2} \quad (95)$$

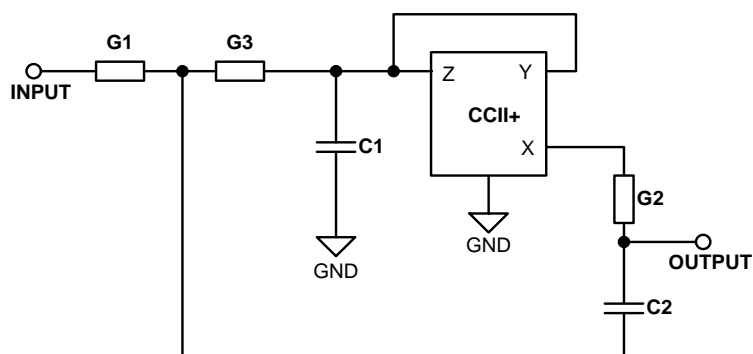
$$C1 = \frac{C}{k} \quad (96)$$

$$C2 = k \cdot C \quad (97)$$

$$C3 = C2 - C1 \quad (98)$$

Třetí varianta dolní propusti s nulou přenosu je znázorněna na Obr.2.20. Z přenosové funkce (99) lze snadno odvodit podmínku pro dolní propust s nulou přenosu. Aby se filtr choval jako dolní propust s nulou přenosu, musí platit $G3=G2$. Potom přejde přenosová funkce do tvaru (100). Ze (100) jsem odvodil vztahy pro kmitočet nuly (101), kmitočet pólu (102), poměr kmitočtu nuly ku kmitočtu pólu (103) a jakost pólu (104).

Toto zapojení filtru je zajímavé z hlediska vodivosti $G1$, protože v této konfiguraci může být vodivost $G1$ vnitřní vodivostí zdroje signálu. Tato vlastnost je výhodná na vyšších kmitočtech.



Obr.2.20. Dolní propust s nulou přenosu – varianta 3.

$$K(p) = \frac{p^2 \cdot C1 \cdot C2 \cdot G1 + p \cdot (C2 \cdot G1 \cdot (G3 - G2)) + G1 \cdot G3 \cdot G2}{p^2 \cdot C1 \cdot C2 \cdot (G1 + G3 + G2) + p \cdot (C2 \cdot G1 \cdot (G3 - G2) + C1 \cdot G2 \cdot (G1 + G3)) + G1 \cdot G3 \cdot G2} \quad (99)$$

pro $G3=G2$ platí:

$$K(p) = \frac{p^2 \cdot C1 \cdot C2 \cdot G1 + G1 \cdot G2^2}{p^2 \cdot C1 \cdot C2 \cdot (G1 + 2 \cdot G2) + p \cdot (C1 \cdot G2 \cdot (G1 + G2)) + G1 \cdot G2^2} \quad (100)$$

$$\omega_N = \sqrt{\frac{G2^2}{C1 \cdot C2}}, \quad (101)$$

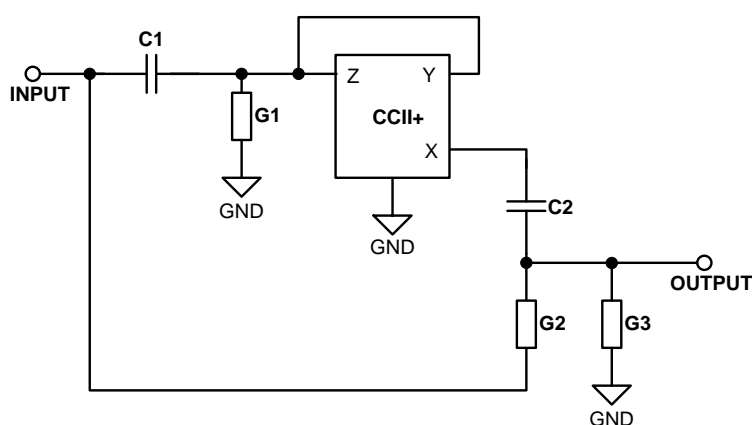
$$\omega_P = \sqrt{\frac{G1 \cdot G2^2}{C1 \cdot C2 \cdot (G1 + 2G2)}}, \quad (102)$$

$$\frac{\omega_N}{\omega_P} = \sqrt{\frac{G1 + 2G2}{G1}}, \quad (103)$$

$$Q_P = \sqrt{\frac{C2}{C1}} \cdot \sqrt{1 - \frac{G2^2}{(G1 + G2)^2}}. \quad (104)$$

2.4.2 Horní propust s nulou přenosu s jedním konvejorem a pěti pasivními prvky

Z obecného zapojení Obr.2.15. jsem odvodil zapojení horní propusti s nulou přenosu. Jedná se o zapojení s jedním konvejorem CCII+, třemi rezistory a dvěma kondenzátory. Z tvaru přenosové funkce (105) jsem odvodil přenosovou funkci pro jakost nuly jdoucí k nekonečnu (106). Aby jakost nuly šla k nekonečnu, tak musí se rovnat kondenzátory C1 a C2. V tomto případě se filtr chová jako horní propust s nulou přenosu. Z přenosové funkce (106) jsem odvodil vztahy pro kmitočet nuly, kmitočet a jakost pólu a poměr kmitočet nuly a pólu (107), (108), (109), (110).



Obr.2.21. Horní propust s nulou přenosu – varianta 1

$$K(p) = \frac{p^2 \cdot C1 \cdot C2 + p \cdot (G2 \cdot (C1 - C2)) + G1 \cdot G2}{p^2 \cdot C1 \cdot C2 + p \cdot (G2 \cdot (C1 - C2) + G3 \cdot (C1 - C2) + G1 \cdot C2) + G1 \cdot (G2 + G3)} \quad (105)$$

pro $C1=C2=C$ platí:

$$K(p) = \frac{p^2 \cdot C^2 + G1 \cdot G2}{p^2 \cdot C^2 + p \cdot G1 \cdot C + G1 \cdot (G2 + G3)} \quad (106)$$

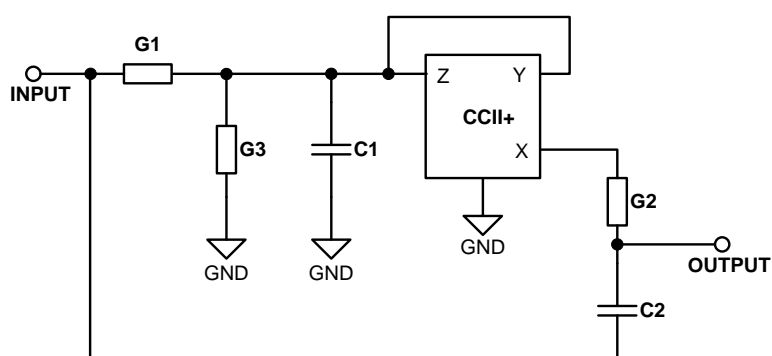
$$\omega_N = \sqrt{\frac{G1 \cdot G2}{C^2}}, \quad (107)$$

$$\omega_P = \sqrt{\frac{G1 \cdot (G2 + G3)}{C^2}}, \quad (108)$$

$$\frac{\omega_N}{\omega_P} = \sqrt{\frac{G2}{G2 + G3}}, \quad (109)$$

$$Q_P = \sqrt{\frac{G2 + G3}{G1}}. \quad (110)$$

Druhá varianta horní propusti s nulou přenosu je na Obr.2.19. Přenosová funkce tohoto obvodu (111) se při zavedení podmínky $G1+G3=G2$ změní na přenosovou funkci (112). Z (112) jsem odvodil výrazy pro kmitočet nuly (113), kmitočet pólu (114), poměr kmitočtu nuly a pólu (115) a jakost pólu (116).



Obr.2.22. Horní propust s nulou přenosu – varianta 2

$$K(p) = \frac{p^2 \cdot C1 \cdot C2 + p \cdot (C2 \cdot (G1 + G3 - G2)) + G1 \cdot G2}{p^2 \cdot C1 \cdot C2 + p \cdot (C2 \cdot (G1 + G3 - G2) + C1 \cdot G2) + G2 \cdot (G1 + G3)} \quad (111)$$

pro $G1+G3=G2$ platí:

$$K(p) = \frac{p^2 \cdot C1 \cdot C2 + G1 \cdot G2}{p^2 \cdot C1 \cdot C2 + p \cdot C1 \cdot G2 + G2 \cdot G2 \cdot (G1 + G3)} \quad (112)$$

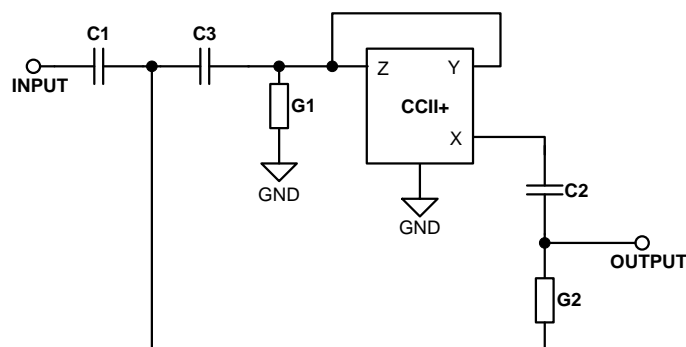
$$\omega_N = \sqrt{\frac{G1 \cdot G2}{C1 \cdot C2}}, \quad (113)$$

$$\omega_P = \sqrt{\frac{G2 \cdot (G1 + G3)}{C1 \cdot C2}}, \quad (114)$$

$$\frac{\omega_N}{\omega_P} = \sqrt{\frac{G1}{G1 + G3}}, \quad (115)$$

$$Q_p = \sqrt{\frac{C_2}{C_1}}. \quad (116)$$

Třetí varianta horní propusti s nulou přenosu je znázorněna na Obr.2.23. Z přenosové funkce (117) lze snadno odvodit podmínku pro dolní propust s nulou přenosu. Aby se filtr choval jako dolní propust s nulou přenosu, musí platit $C_3=C_2$. Potom přejde přenosová funkce do tvaru (118). Ze (118) jsem odvodil vztahy pro kmitočet nuly (119), kmitočet pólu (120), poměr kmitočtu nuly ku kmitočtu pólu (121) a jakost pólu (122).



Obr.2.23. Horní propust s nulou přenosu – varianta 3

$$K(p) = \frac{p^2 \cdot C_1 \cdot C_3 \cdot C_2 + p \cdot (G_2 \cdot C_1 \cdot (C_3 - C_2)) + G_1 \cdot G_2 \cdot C_1}{p^2 \cdot C_1 \cdot C_3 \cdot C_2 + p \cdot (G_2 \cdot C_1 \cdot (C_3 - C_2)) + G_1 \cdot C_2 \cdot (C_1 + C_3) + G_1 \cdot G_2 \cdot (C_1 + C_3 + C_2)} \quad (117)$$

pro $C_3=C_2$ platí:

$$K(p) = \frac{p^2 \cdot C_1 \cdot C_2^2 + G_1 \cdot G_2 \cdot C_1}{p^2 \cdot C_1 \cdot C_2^2 + p \cdot (C_2 \cdot G_1 \cdot (C_1 + C_2)) + G_1 \cdot G_2 \cdot (C_1 + 2 \cdot C_2)} \quad (118)$$

$$\omega_N = \sqrt{\frac{G_1 \cdot G_2}{C_2^2}}, \quad (119)$$

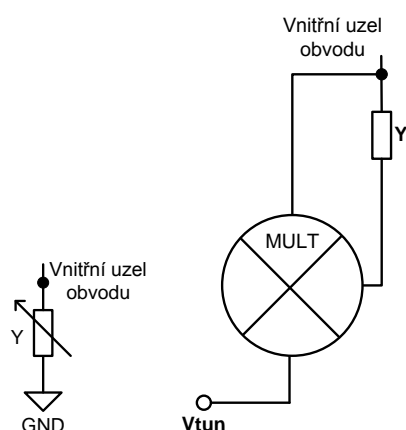
$$\omega_P = \sqrt{\frac{G_1 \cdot G_2 \cdot (C_1 + 2 \cdot C_2)}{C_1 \cdot C_2^2}}, \quad (120)$$

$$\frac{\omega_N}{\omega_P} = \sqrt{\frac{C_1}{C_1 + 2 \cdot C_2}}, \quad (121)$$

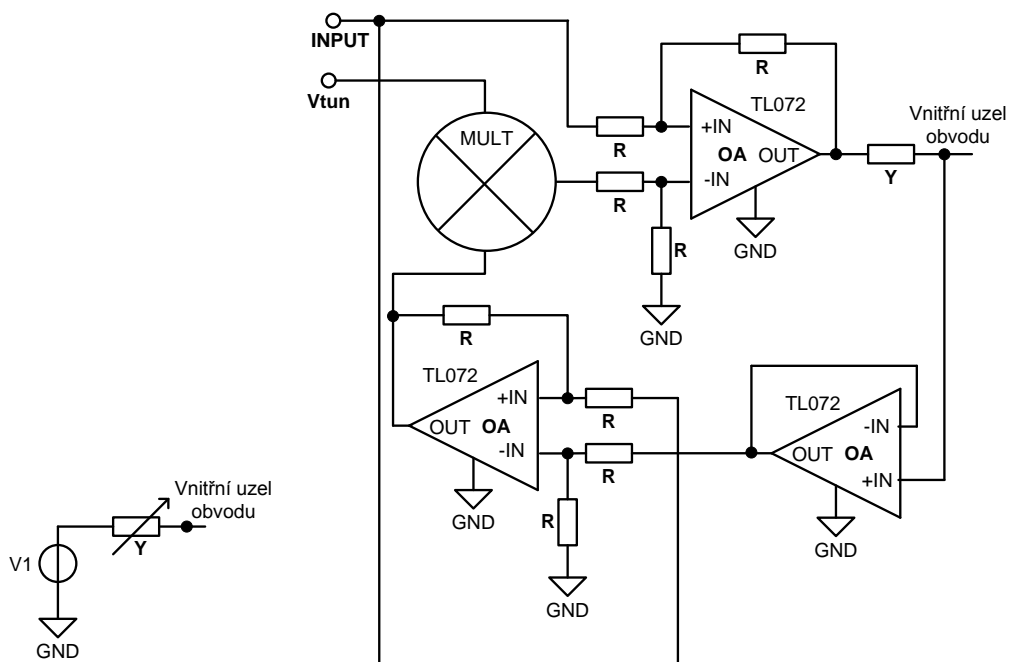
$$Q_p = \sqrt{\frac{G_2}{G_1}} \cdot \sqrt{1 - \frac{C_2^2}{(C_1 + C_2)^2}} \quad (122)$$

2.5 PŘELAŽOVÁNÍ FILTRŮ S KONVEJORY

Pro přelažování aktivních filtrů s konvejory jsem využil metodu napěťového bootstrapu. Tuto metodu je možno použít díky dostupnosti analogových násobiček na trhu. Principy, které využívám pro přelažování jsou uvedeny na Obr.2.24 a Obr.2.25. V obou případech využívám analogové násobení napětí. V případě nezemněné admittance také pomocné sčítání.



Obr.2.24. Princip změny zemněné admittance

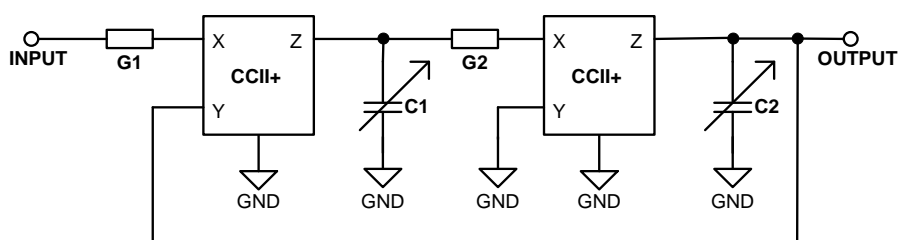


Obr.2.25. Princip změny admitance připojené na napěťový zdroj.

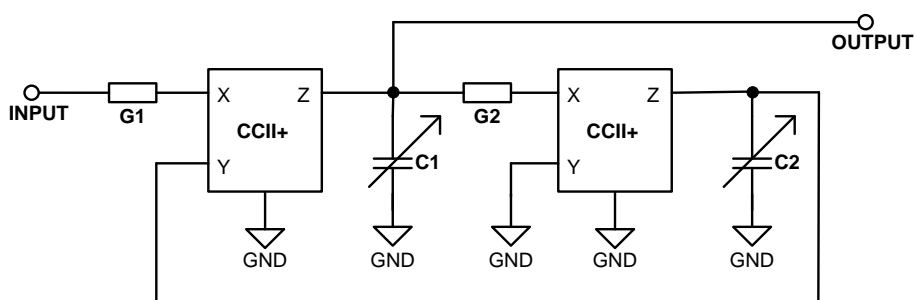
2.5.1 TOPOLOGIE FILTRŮ VHODNÉ PRO PŘELAŽOVÁNÍ

Pro přelažování jsou vhodná zapojení, u kterých je potřebný nejmenší počet přeladitelných komponent a mají pokud možno všechny přeladované komponenty zemněné.

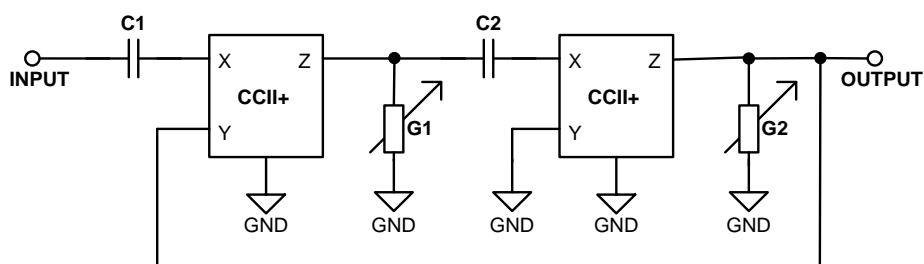
Nejdříve jsem začal experimentovat se zapojeními se dvěma konvejsory. Vytvořil jsem zapojení vhodná pro elektronické přelažování metodou napěťového bootstrapu. Sestrojil přeladitelné filtry druhého řádu typu DP, PP, HP. Schémata zapojení použitých konfigurací je na Obr.2.29., Obr.2.30. a Obr.2.31.



Obr.2.26 Laditelná dolní propust se dvěma konvejsory.



Obr.2.27. Laditelná pásmová propust se dvěma konvejsory.



Obr.2.28. Laditelná horní propust se dvěma konvejsory.

Velkou výhodou těchto obvodů je to, že je možno pro přeladování použít pouze zemněné komponenty. To znamená, že lze využít tyto filtry pro relativně vysoké kmitočty. Limitujícím faktorem u přeladitelných filtrů tohoto typu je v kmitočtové oblasti šířka pásma konvektorů a analogových násobiček. Tuto konfiguraci jsem použil při řešení rozvojového projektu FRVŠ u laboratorního přípravku pro výuku a u dolní propusti čtvrtého řádu nastavitelné od 0.7Hz do 350kHz v šesti rozsazích.

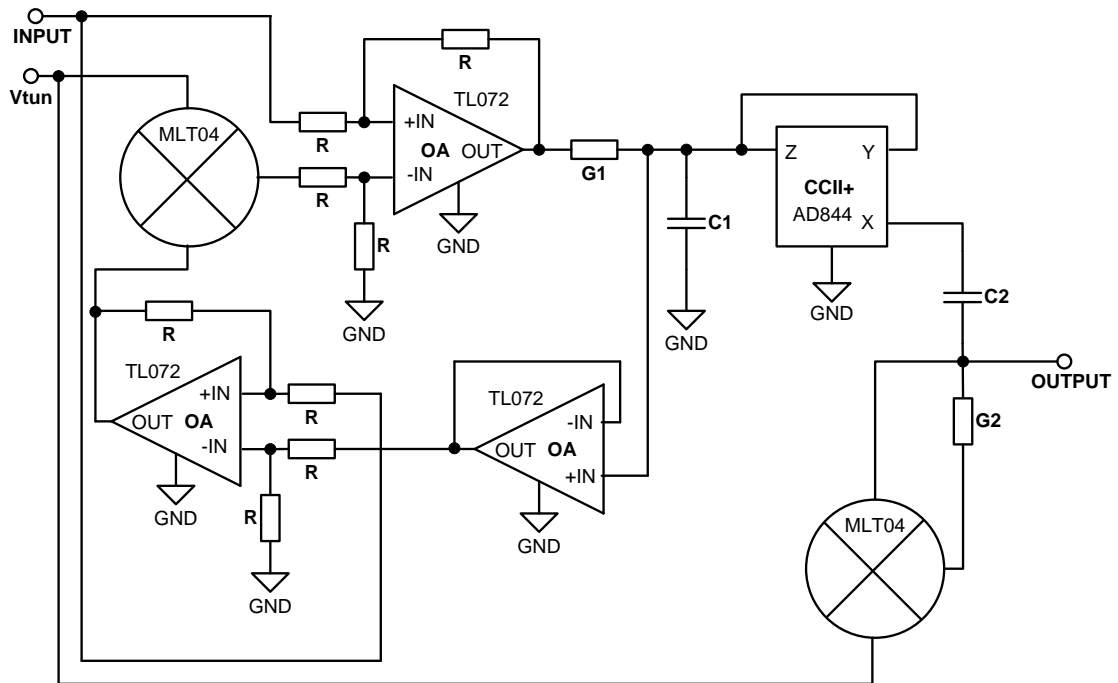
Dále jsou pro přeladování pouze zemněnými prvky vhodné filtry DP a HP s jedním konvektorem. Vhodné zapojení je na Obr.2.9., kde je zapojení dolní propusti a kde se jako proměnný prvek použijí kondenzátory C1 a C2. Vzhledem k tomu, že C1 i C2 jsou zemněné součástky, tak v tomto případě může být pro přeladování použita pouze konfigurace se zemněnými prvky znázorněna na Obr.2.27.

V případě horní propusti Obr.2.12. se jako proměnné prvky použijí vodivosti G1 a G2. Poněvadž G1 i G2 jsou také zemněné komponenty, tak lze pro změnu parametrů také použít konfiguraci z Obr.2.27.

Pro ostatní mnou vytvořené zapojení filtrů je nutno k přeladování použít navíc konfiguraci z Obr.2.28. Jedná se o filtry typu PP, PZ, FČ, DPN a HPN z Obr.2.10., Obr.2.11., Obr.2.13., Obr.2.14., Obr.2.19 a Obr.2.22.

Příklad zapojení laditelné pásmové propusti je z Obr.2.34. je na Obr.2.38. Je zde ukázáno použití obou metod přeladování. Zemněná vodivost G2 je přeladována principem z Obr.2.27 a vodivost G1 je přeladována principem z Obr.2.28.

Nevýhodou těchto zapojení je nutnost použití principu na Obr.2.28. pro přeladování, protože se použitím dalších aktivních prvků (operačních zesilovačů) redukuje maximální kmitočet pólu. Tato zapojení jsou tudíž použitelná pro nižší kmitočtový rozsah než filtry obsahující pouze přeladovací princip z Obr.2.27.



Obr.2.29. Příklad změny parametrů na pásmové propusti druhého řádu.

3 OVĚŘENÍ REALIZOVATELNOSTI FILTRŮ DRUHÉHO ŘÁDU S KONVEJORY

Filtry druhého řádu s konvejory, které jsem vytvořil, jsem ověřil simulacemi s ideálními prvky v programech SNAP, PSpice nebo praktickou realizací. Pro praktickou realizaci jsem použil integrované obvody obsahující proudový konvektor CCII+. Jsou to obvody AD844 a MAX435. K ověření lze použít také další integrované obvody jako například OPA660 nebo OPA2662, které také obsahují proudový konvektor CCII+.

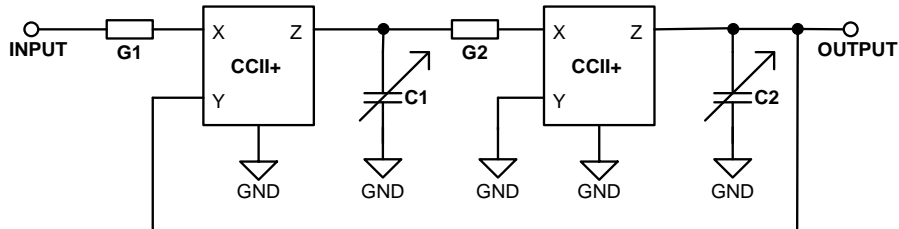
Praktickou realizaci jsem provedl sestavením filtrů na nepájivém kontaktním poli nebo konstrukcí na plošném spoji. Až na výjimky jsem zkoušel filtry v akustickém kmitočtovém pásmu z důvodu snadné realizovatelnosti. Pro měření jsem použil buď obvodový analyzátor od firmy Hewlett Packard nebo automatizované měřicí pracoviště na osobním počítači.

3.1 Ověření filtrů se dvěma konvejory pro realizaci přenosových funkcí DP, PP a HP

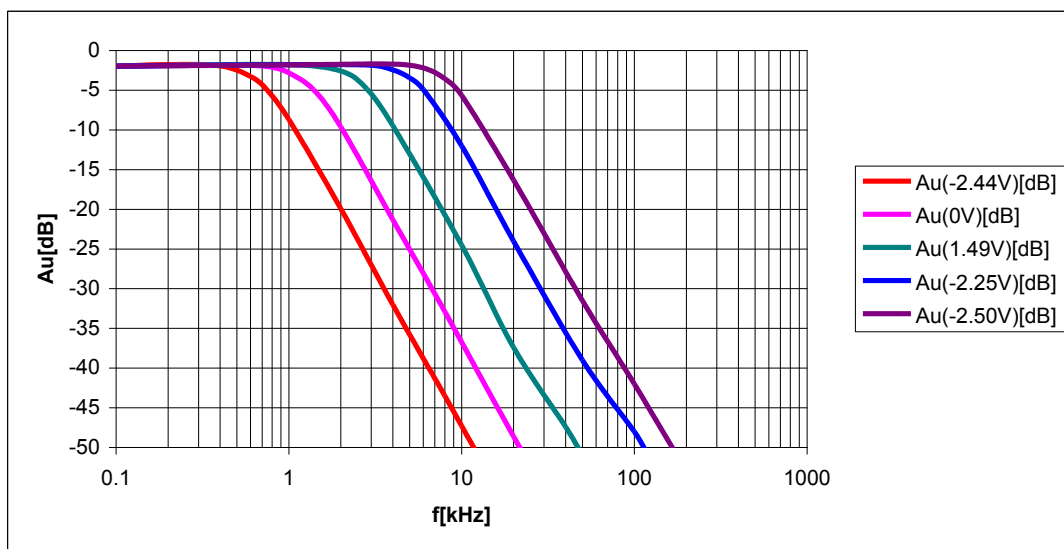
Filtry se dvěma konvejory typu DP, PP a HP jsem ověřil na dvou konstrukcích laditelných filtrů. Konstrukce dolní propusti je ukázána na Obr.3.1. a byla vytvořena při řešení rozvojového projektu FRVŠ číslo 1928. V tomto projektu byla ověřena realizovatelnost všech tří typů filtrů a výsledkem byl laboratorní přípravek pro měření přeladitelných filtrů.

Při realizaci těchto filtrů jsem zároveň zkoumal vliv ladicího zesilovače (analogové násobičky) na výsledných vlastnostech filtru. Modulové charakteristiky dolní propusti jsou na Obr.3.2. Ladicí charakteristika je znázorněna na Obr.3.3. Princip měření parazitního výstupního odporu ladicího zesilovače je zobrazen na Obr.3.4. Grafická závislost vlivu parazitního výstupního odporu ladicího zesilovače je znázorněna na Obr.3.5. Princip měření vlivu mezní frekvence ladicího zesilovače je znázorněn na Obr.3.6. Grafická závislost vlivu mezní frekvence ladicího zesilovače na charakteristiky filtru je znázorněna na Obr.3.7.

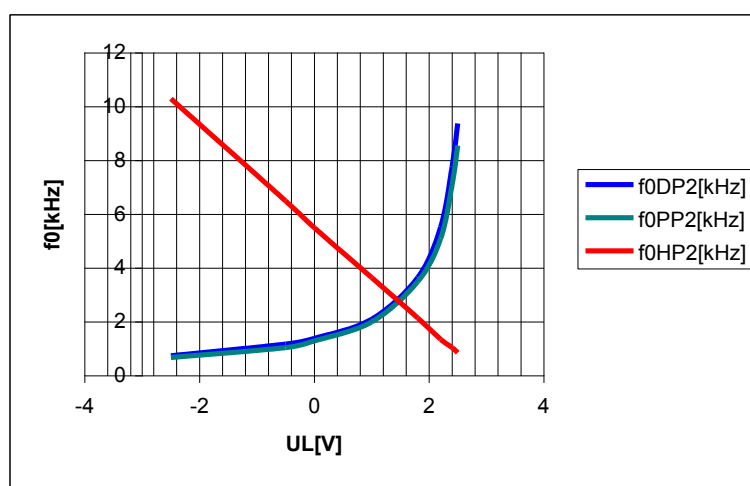
Jako aktivních prvků jsem použil proudové konvejory obsažené v integrovaném obvodu AD844 a oddělovací zesilovače s obvody TL072. Jako ladicího zesilovače jsem použil analogovou násobičku MLT04 spolu s operačními zesilovači TL072. Pro názornost zde uvádím pouze přenosové charakteristiky pro dolní propust. Ostatní charakteristiky (horní propust a pásmová propust) jsou uvedeny ve výše zmíněném projektu FRVŠ.



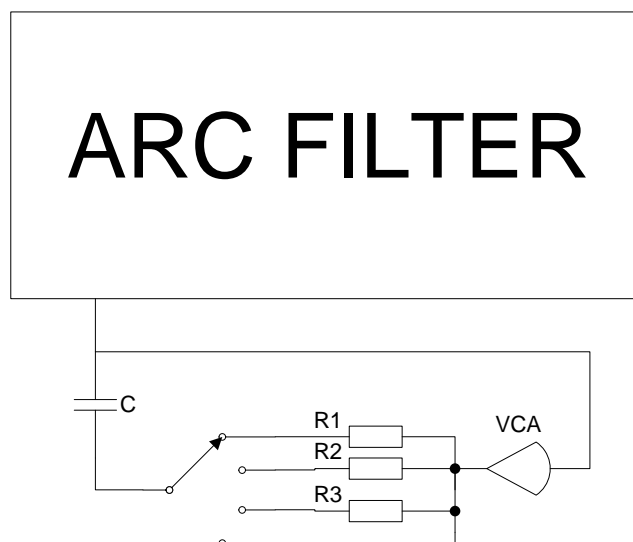
Obr.3.1. Schéma zapojení dolní propusti pro ověření realizovatelnosti.



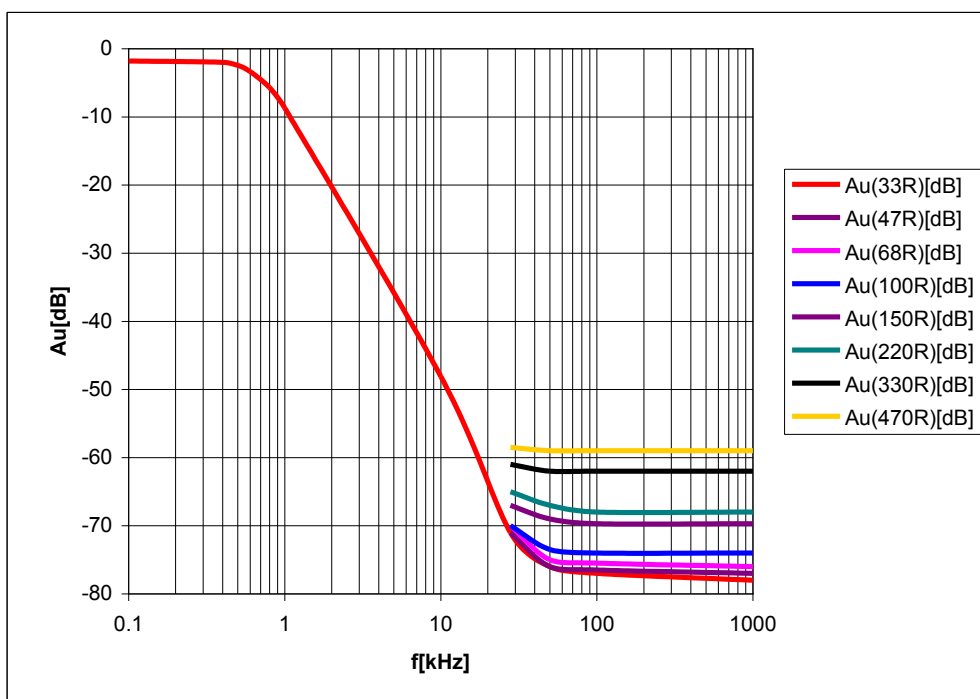
Obr.3.2. Výsledné modulové charakteristiky realizace s obvodem AD844 a MLT04



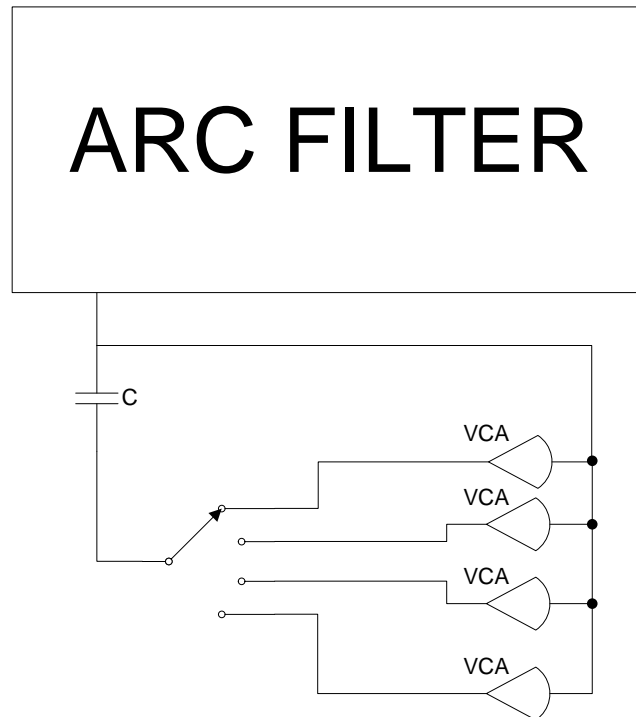
Obr.3.3. Ladicí charakteristika obvodů DP, PP, HP.



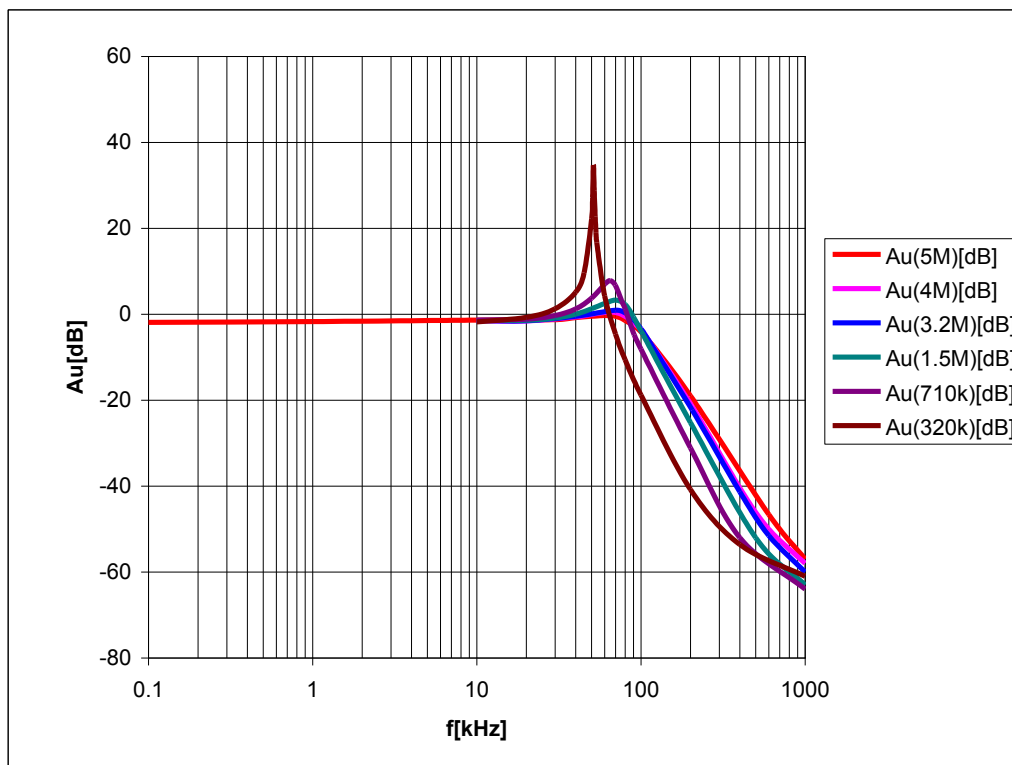
Obr.3.4. Realizace měření vlivu parazitního výstupního odporu ladicího zesilovače.



Obr.3.5. Měření vlivu parazitního výstupního odporu ladicího zesilovače na modulovou charakteristiku DP.



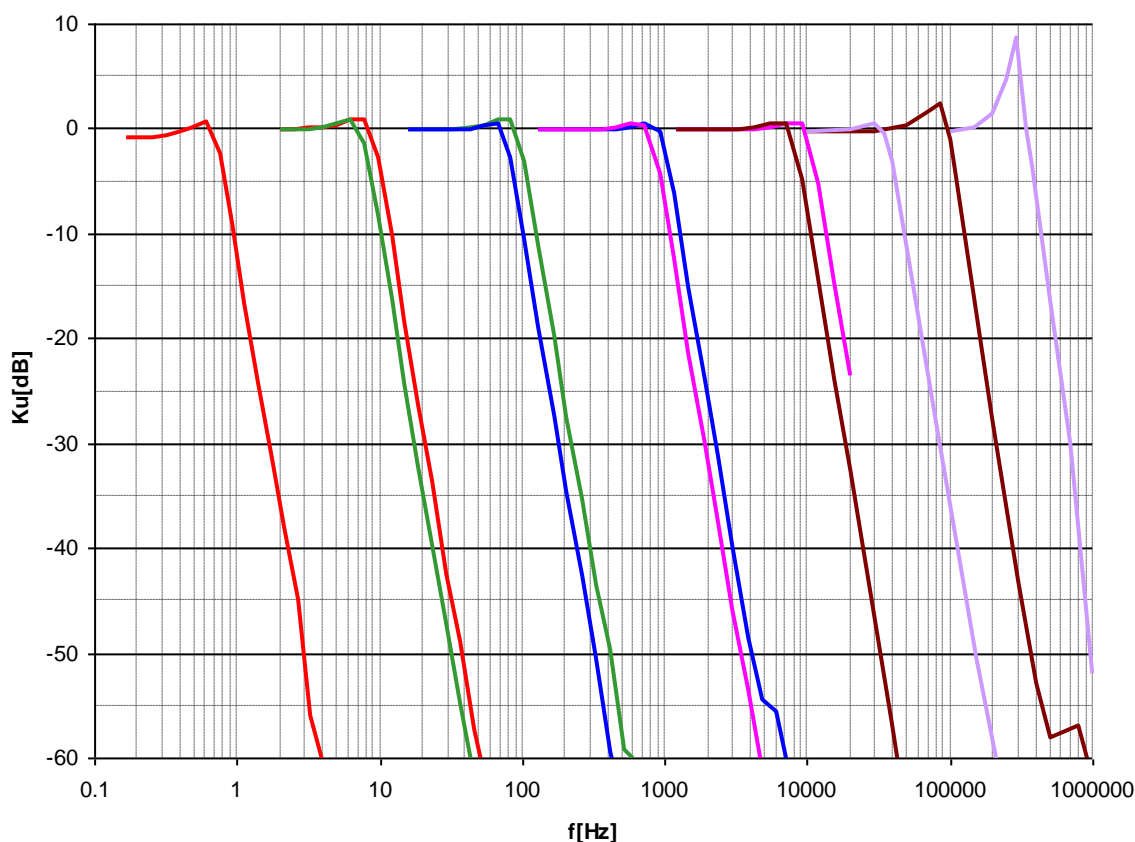
Obr.3.6. Princip měření vlivu šířky pásma ladícího zesilovače na modulovou charakteristiku.



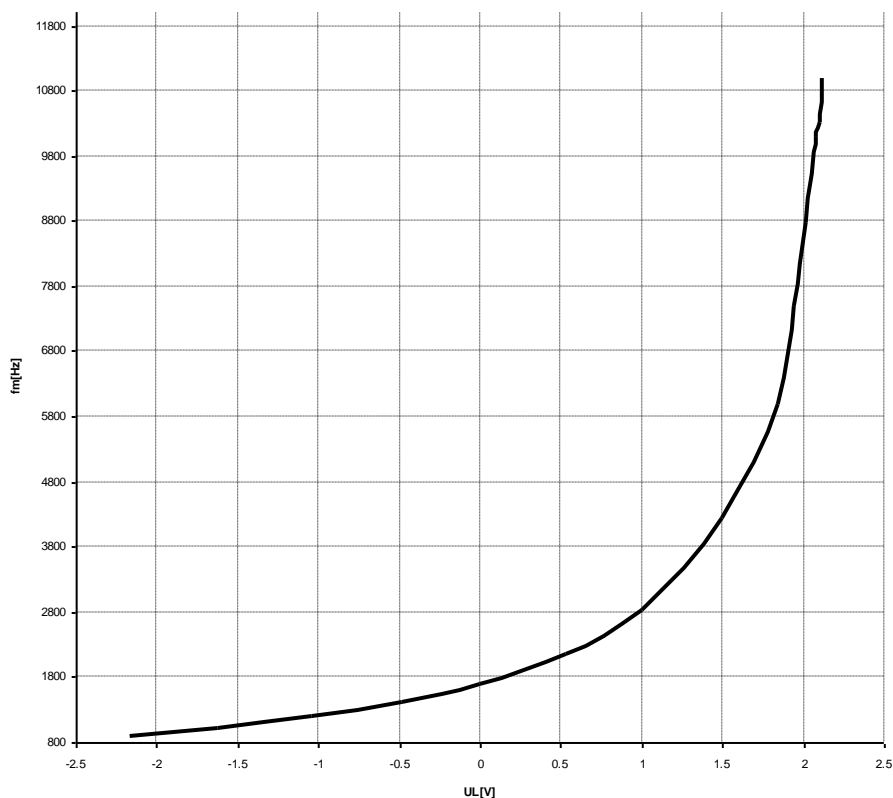
Obr.3.7. Měření vlivu mezního kmitočtu analogové násobičky na přenosové vlastnosti filtru

Realizoval jsem také nastavitelnou dolní propust v rozsahu 1Hz až 100kHz. Zapojení je totožné se zapojením v předešlém případě (Obr.3.1.). Jako konvektorů jsem využil obvod AD844 a jako ladící zesilovač jsem využil analogovou násobičku MLT04. Jedná se o filtr čtvrtého řádu. To znamená, že se skládá ze čtyř obvodů AD844 a jednoho obvodu MLT04. Přenosové charakteristiky filtru jsou na Obr.3.8. Filtr obsahuje šest podrozsahů s přeladěním přibližně 1:10 tak, aby se rozsahy překrývaly. U kmitočtů nad 100kHz je patrné převýšení přenosové charakteristiky, které je dáno konečnou šířkou pásma použitých aktivních prvků (analogové násobičky MLT04 a operačních zesilovačů TL072).

Pokud by byla použita násobička a operační zesilovače s větším kmitočtovým rozsahem, tak by bylo možné rozšířit šířku pásma filtru až na jednotky MHz. Ladicí charakteristika podrozsahu 1kHz až 10kHz je znázorněna na Obr.3.9. a platí pro všechny podrozsahy kromě nejvyššího, u kterého se již značně projevuje omezená šířka pásma použitých aktivních prvků.



Obr.3.8. Měření napětím laditelného filtru 1Hz až 100kHz.



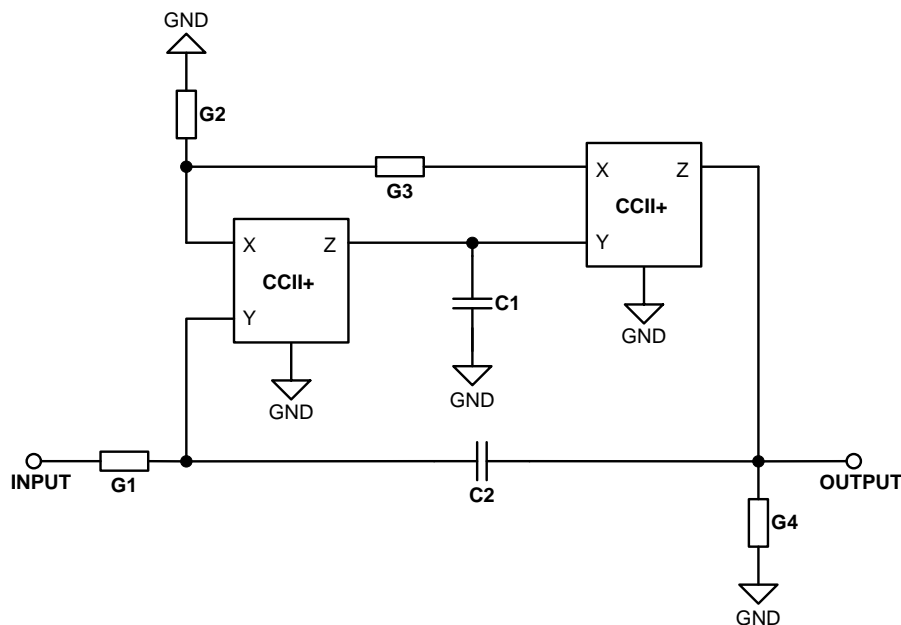
Obr.3.9. Ladicí charakteristika napětím laditelného filtru 1Hz až 100kHz.

3.2 Ověření zapojení filtrů se dvěma konvejory pro realizaci přenosových funkcí s nulou přenosu

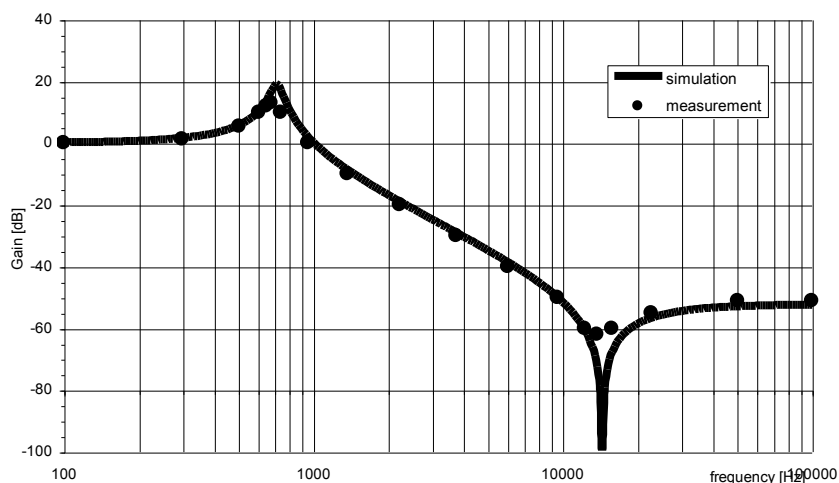
Pro ověření realizovatelnosti tohoto typu filtru jsem použil simulaci v programu SNAP, v programu PSpice a praktickou realizaci na nepájivém kontaktním poli. Schéma zapojení ověřovaného obvodu je na Obr.3.10. a výsledky simulace a měření jsou na Obr.3.11.

Realizace byla provedena s integrovanými obvody AD844 v akustickém kmitočtovém pásmu. Přenosová charakteristika odpovídá simulované charakteristice v programu SNAP. Rozdíly mezi průběhy modulu přenosu jsou dány tolerancemi použitých pasivních prvků.

Tato topologie filtru není vhodná pro elektronické ladění metodou napěťového bootstrapu, poněvadž se vždy najde uzel, na který nejde metoda aplikovat. To platí jak pro rezistory, tak pro kondenzátory v obvodu.



Obr.3.10. Schéma zapojení dolní propusti s nulou přenosu pro ověření realizovatelnosti.



Obr.3.11. Simulovaná a měřená charakteristika dolní propusti z Obr.3.10.

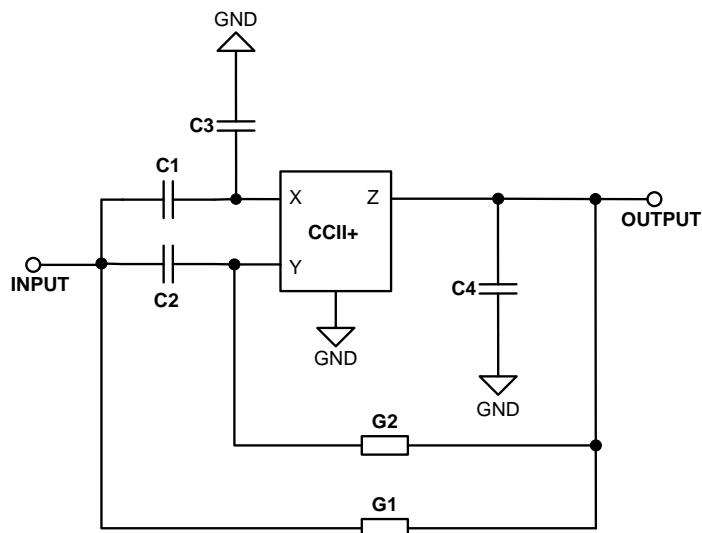
3.3 Ověření zapojení filtrů jedním konvejorem a šesti pasivními prvky

Dobrych výsledků jsem dosáhl s realizací filtru druhého řádu a jedním konvejorem a šesti pasivními prvky. Zapojení dolní propusti s nulou přenosu na Obr.3.12. jsem ověřil simulacemi v programu SNAP, v programu PSpice a praktickou realizací na desce plošných spojů.

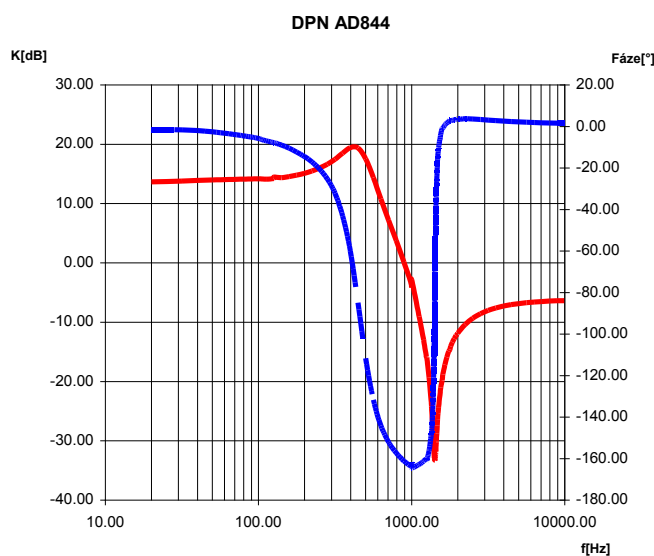
Měření bylo provedeno na automatizovaném měřicím pracovišti pro měření nízkofrekvenčních obvodů.

Naměřená charakteristika odpovídá simulované. Změřená charakteristika je na Obr.3.13. Nevýhodou zapojení je připojení kondenzátoru na svorku X konveju, což může činit problémy na vyšších kmitočtech z důvodu parazitního rezistoru na této svorce.

Horní propust se dá realizovat prohozením rezistorů a kondenzátorů v obvodu. V tomto případě lze parazitní rezistor na svorce X zařadit do zapojení a vykompenzovat ho.



Obr.3.12. Schéma zapojení dolní propusti s nulou přenosu pro ověření realizovatelnosti.

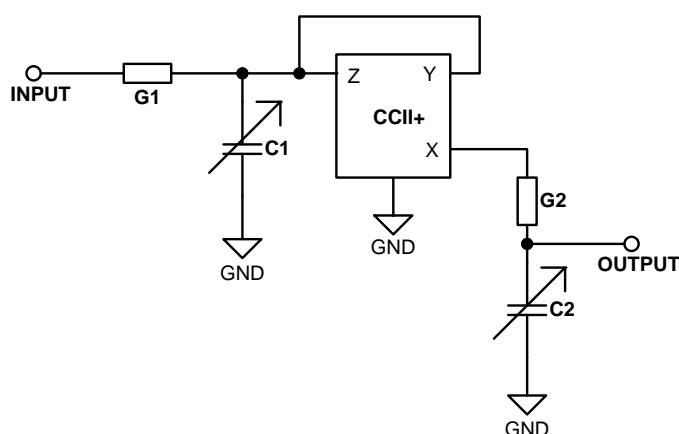


Obr.3.13. Naměřená charakteristika dolní propusti z Obr.3.12.

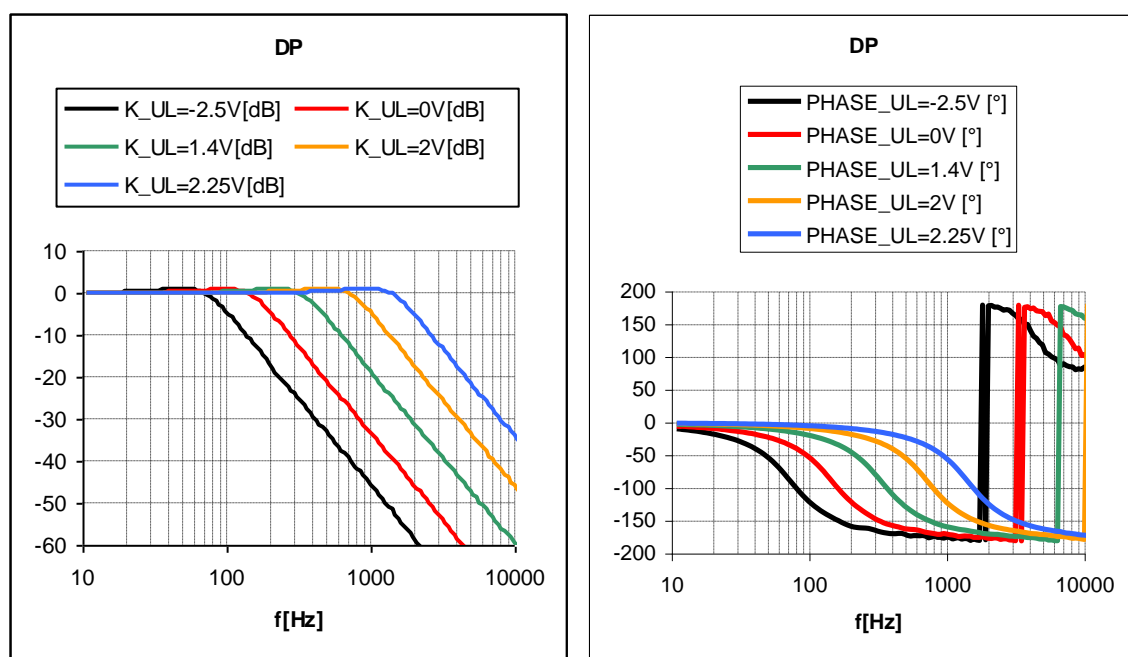
3.4 Ověření filtrů s jedním konvejorem a čtyřmi pasivními prvky

Pro ověření filtrů s jedním konvejorem a čtyřmi pasivními prvky jsem použil simulace v programu SNAP, simulace v programu PSpice a praktickou realizaci v oblasti akustických kmitočtů.

Dolní propust jsem realizoval jako přeladitelnou v rozsahu přibližně 100Hz až 1kHz. Jako aktivních prvků jsem použil CCII+ AD844 a analogovou násobičku MLT04. Schéma zapojení dolní propusti je na Obr.3.14. a výsledné modulové a fázové charakteristiky jsou na Obr.3.15.. Pro elektronickou změnu parametrů pasivních prvků jsem použil metodu napěťového bootstrapu podle Obr.2.24. Změřená charakteristika odpovídá simulacím v programu PSpice se stejnými hodnotami součástek.



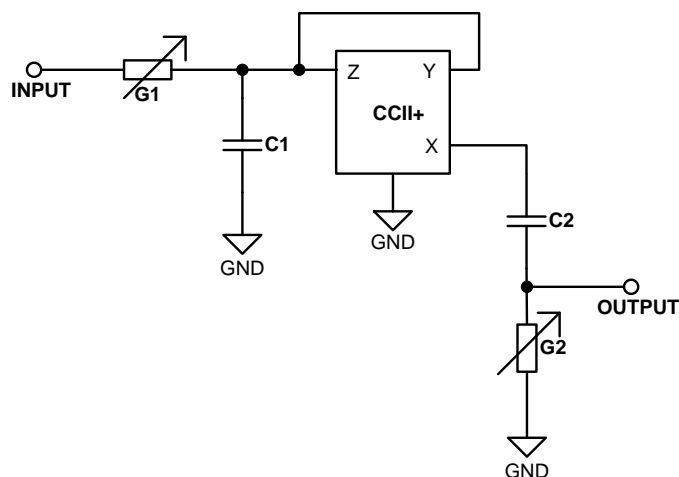
Obr.3.14. Schéma zapojení dolní propusti pro ověření realizovatelnosti.



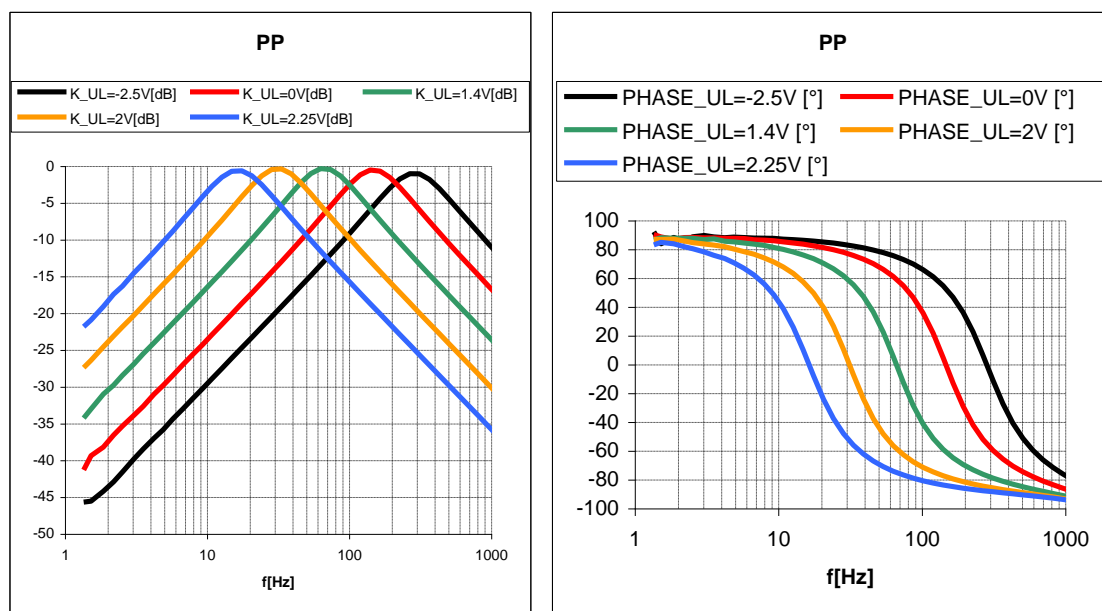
Obr.3.15. Naměřené charektistiky dolní propusti z Obr.3.14.

Pásmovou propust jsem také simuloval v programu SNAP a PSpice. Pro praktickou realizaci jsem použil univerzální desku plošných spojů. V tomto případě jsem pro metodu napět'ového bootstrapu využil zapojení z Obr.2.25. pro admitanci G_1 a zapojení z Obr.2.24. pro admitanci G_2 .

Pásmovou propust jsem realizoval jako přeladitelnou v rozsahu přibližně 20Hz až 2kHz. Schéma zapojení je ukázáno na Obr.3.16., výsledná modulová a fázová charakteristika je na Obr.3.17.. Jako aktivní prvky jsem použil AD844, MLT04 a TL074



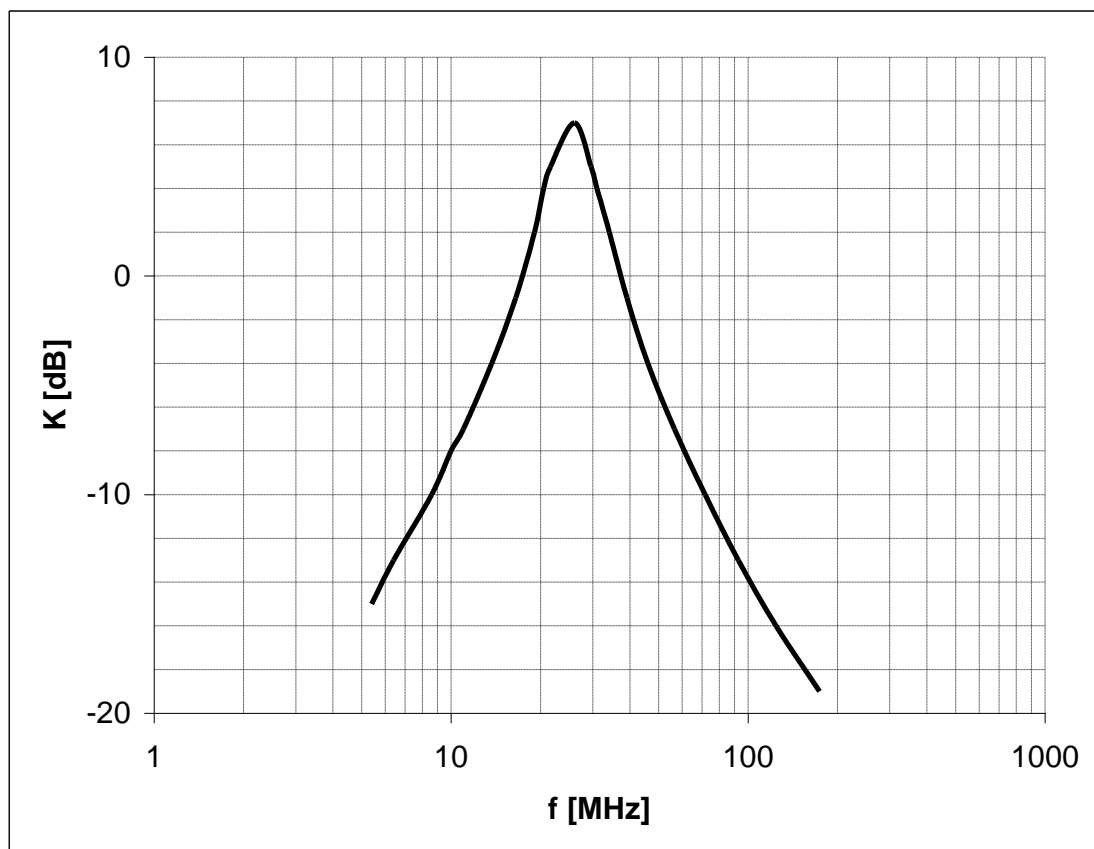
Obr.3.16. Schéma zapojení pásmové propusti pro ověření realizovatelnosti.



Obr.3.17. Naměřené charakteristiky pásmové propusti z Obr.3.16.

U pásmové propusti jsem ověřil možnost využití na vyšších kmitočtech. Zkonstruoval jsem pásmovou propust na kmitočtu 25MHz. Jako aktivní prvek jsem použil polovinu obvodu

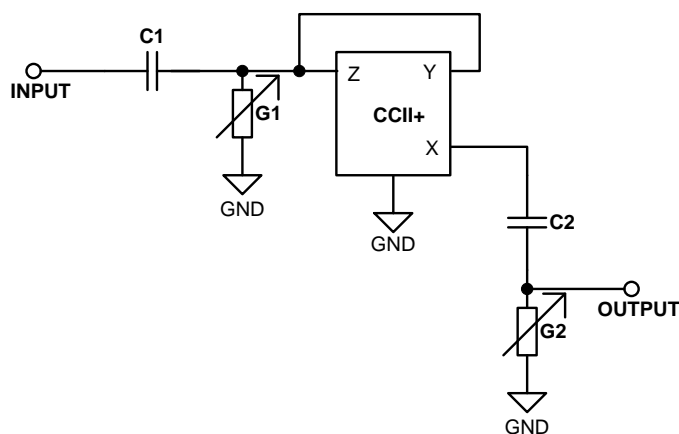
MAX435. Celá konstrukce byla navržena tak, aby byla přizpůsobena na impedanci 50 Ohmů. Výsledná charakteristika pásmové propusti je znázorněna na Obr.3.18..



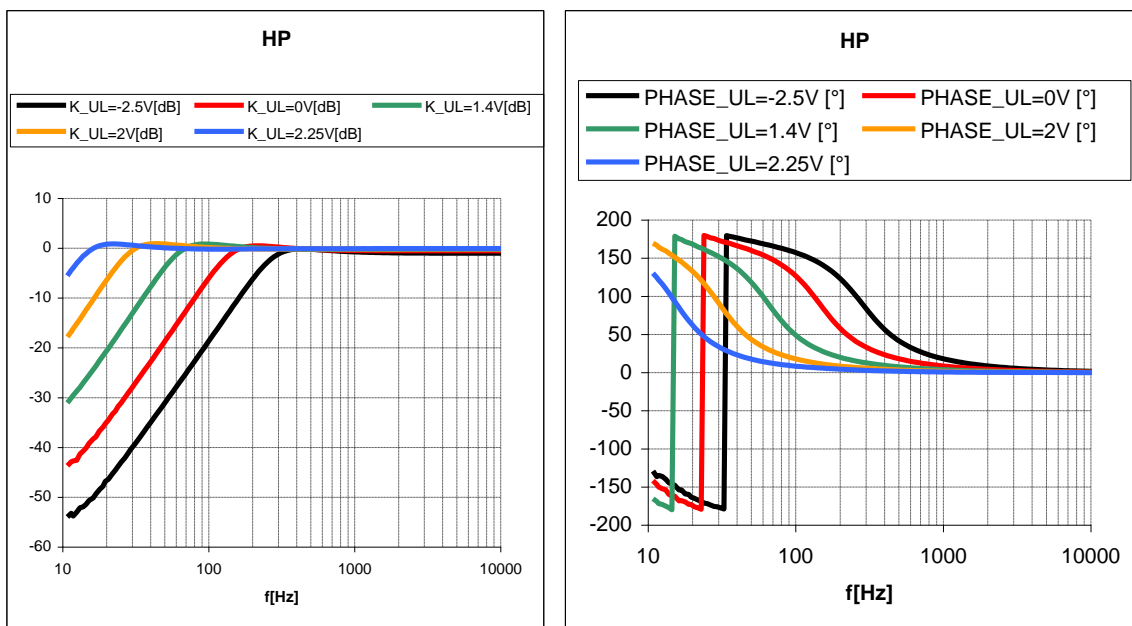
Obr.3.18. Naměřená charakteristika pásmové propusti z Obr.3.16. na vyšším kmitočtu.

Schéma realizace přeladitelné horní propusti je znázorněno na Obr.3.19.. I v tomto případě jako u dolní propusti se k přeladování využívá zemněných prvků (vodivosti $G1$ a $G2$).

Přenosové modulové a fázové charakteristiky přeladitelné horní propusti jsou zobrazeny na Obr.3.20..



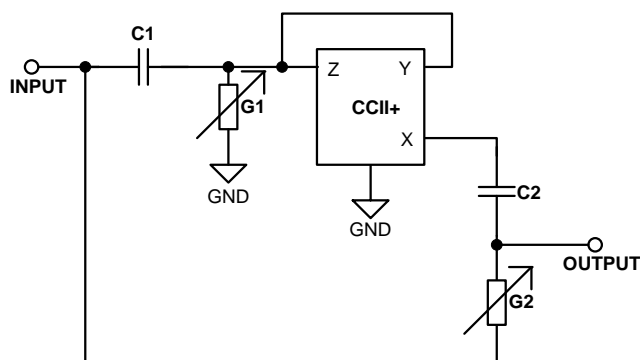
Obr.3.19. Schéma zapojení horní propusti pro ověření realizovatelnosti.



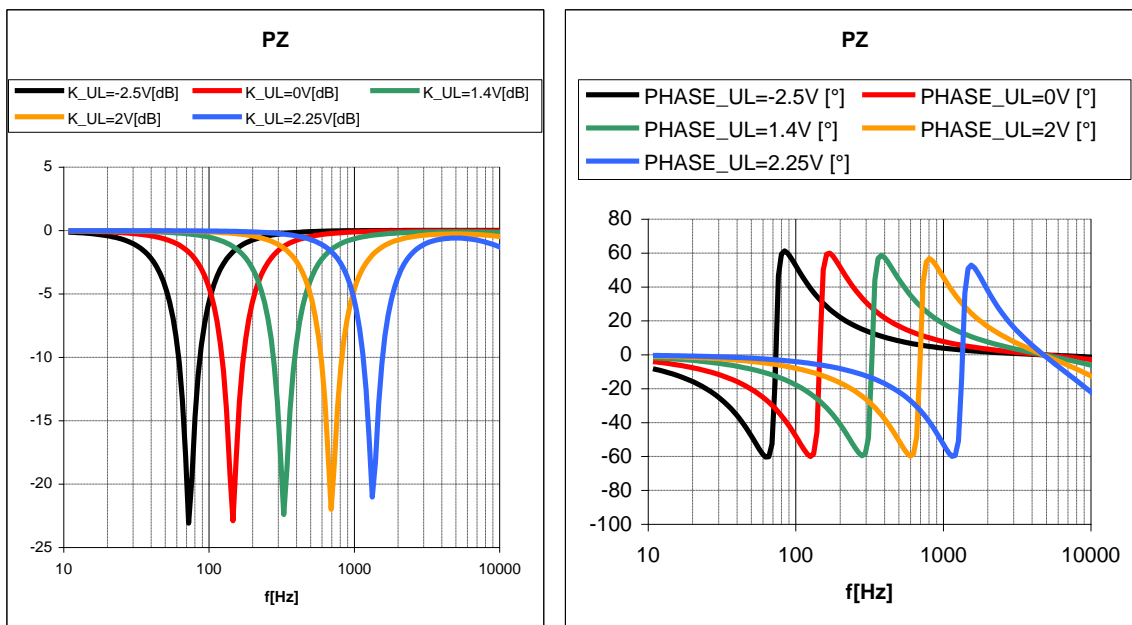
Obr.3.20. Naměřené charakteristiky horní propusti z Obr.3.19.

Jako poslední z této skupiny obvodů je filtr realizující funkci pásmové zadržky nebo fázovacího článku. Schéma zapojení tohoto filtru je na Obr.3.21. Na rozdíl od předešlých zapojení zde je zavedena zpětná vazba z výstupu na vstup filtru. Přenosové charakteristiky jsou znázorněny na Obr.3.22 a Obr.3.23. Případné odchylky od ideálních průběhů jsou dány tolerancemi součástek.

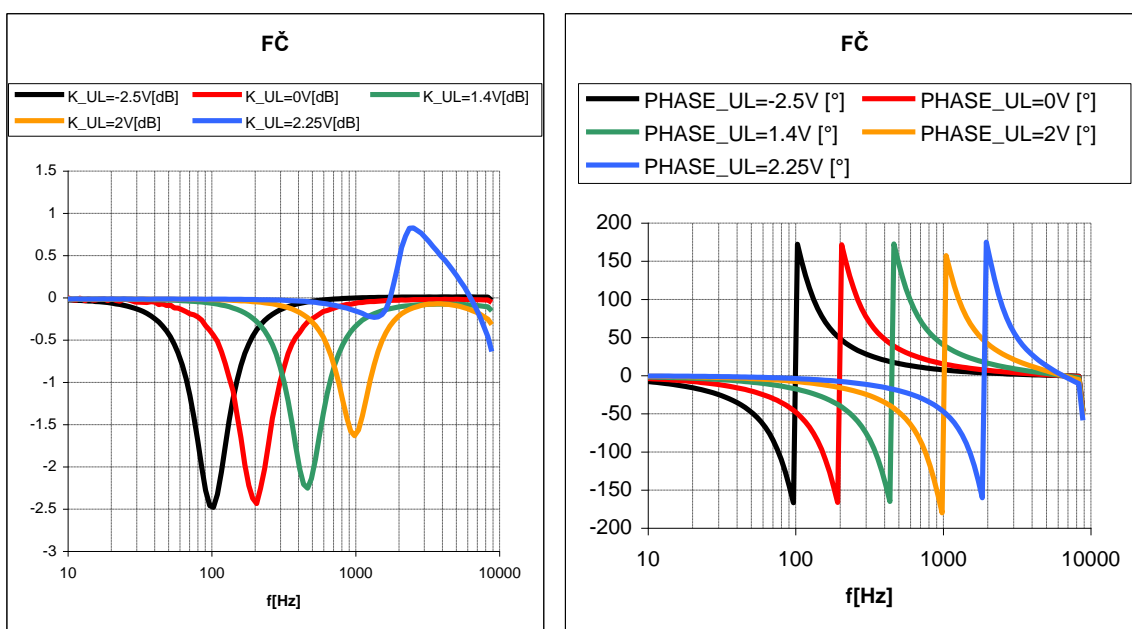
Na Obr.3.24. je ukázána charakteristika vykompenzovaného fázovacího článku. Z porovnání nekompenzovaných a kompenzovaných charakteristik vyplývá, že lze obvod vykompenzovat poměrně přesně.



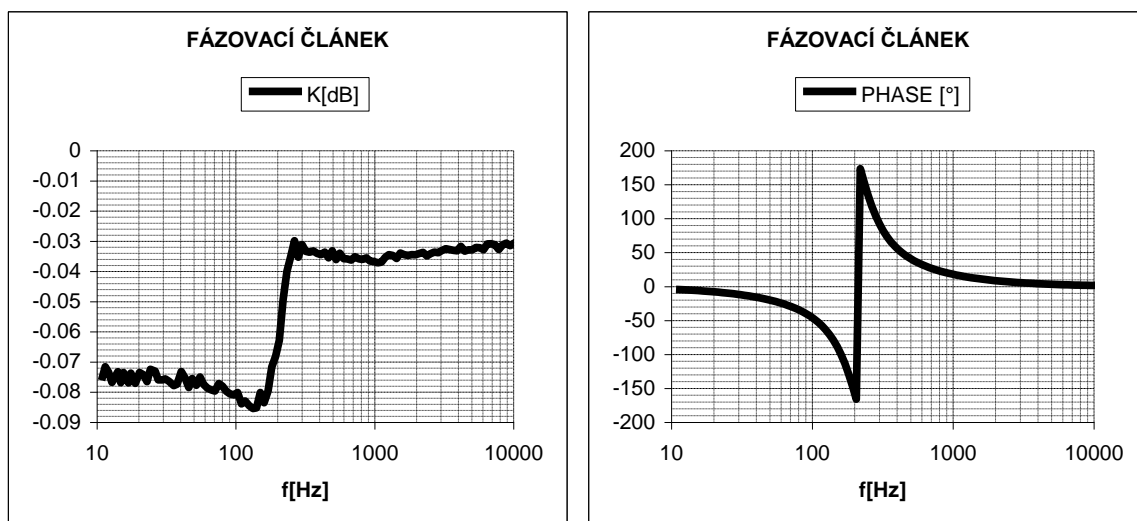
Obr.3.21. Schéma zapojení pásmové zadržky a fázovacího článku pro ověření realizovatelnosti.



Obr.3.22. Naměřené charakteristiky pásmové zadržky z Obr.3.21.



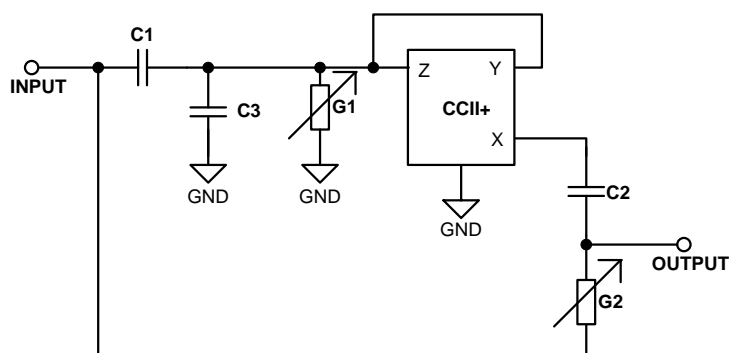
Obr.3.23. Naměřené charakteristiky fázovacího článku z Obr.3.21.



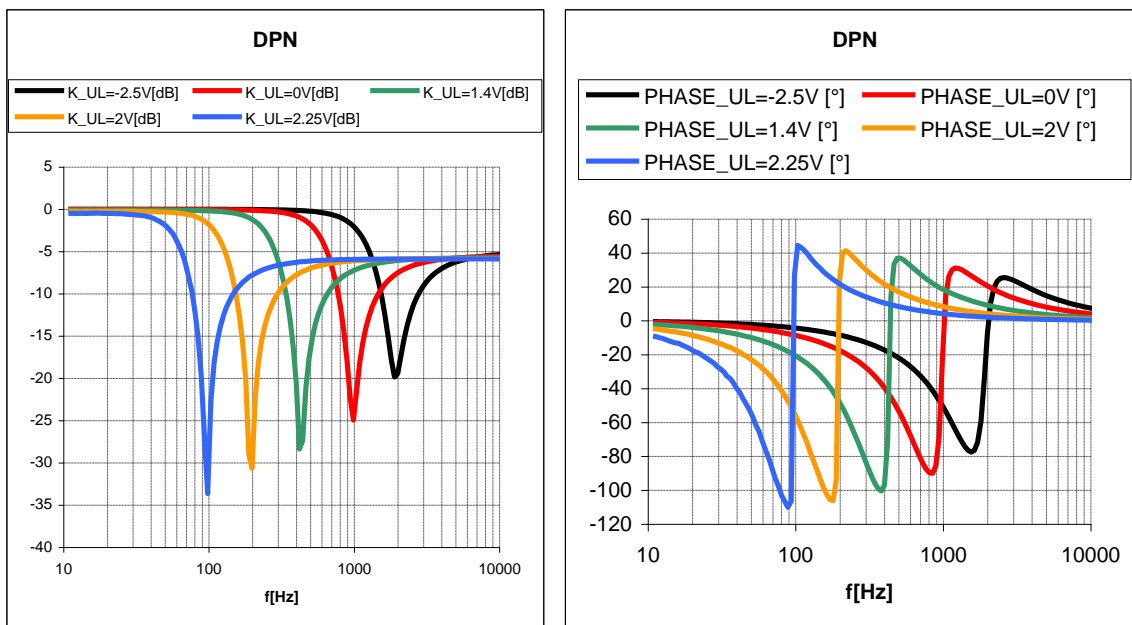
Obr.3.24. Naměřené charakteristiky vykompenzovaného fázovacího článku z Obr.3.21.

3.5 Ověření filtrů s jedním konvejorem a pěti pasivními prvky pro realizaci přenosových funkcí s nulami přenosu

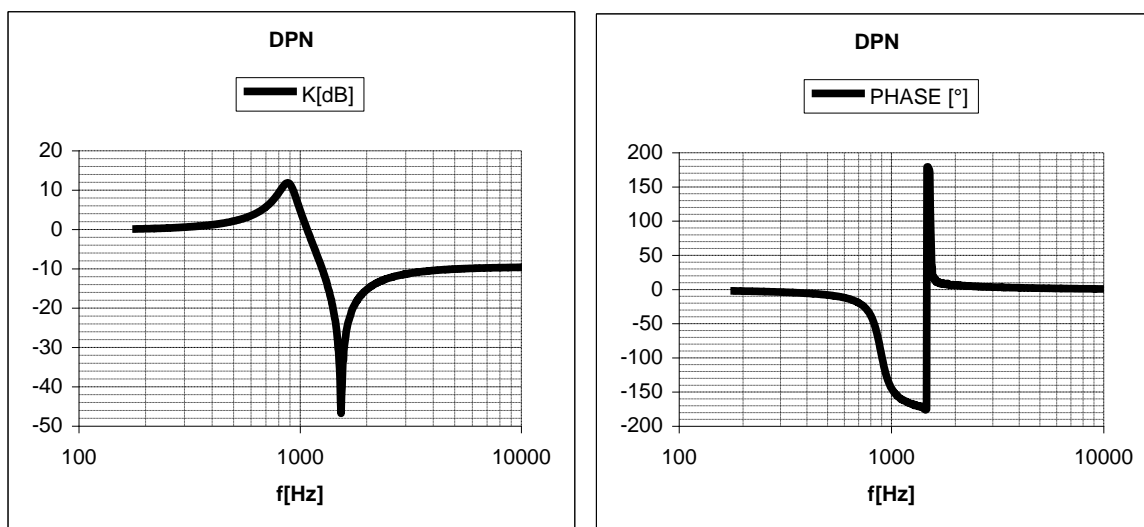
Ze tří variant dolní propusti s nulou přenosu jsem pro ověření funkčnosti vybral variantu zobrazenou na Obr.3.25. Tuto variantu lze také elektronicky přeladovat metodou napěťového bootstrapu jako filtry v předchozí kapitole. Vodivost G1 se přeladuje pomocí zapojení z Obr.24., vodivost G2 se přeladuje pomocí zapojení z Obr.25. Ze změřených charakteristik na Obr.3.26. je zřetelně vidět malá jakost nuly v přenosové funkci obvodu. To je dáno tolerancí součástek ve měřeném vzorku. Jakost nuly se dá v tomto případě vykompenzovat, což je ukázáno na Obr.3.27..



Obr.3.25. Schéma zapojení dolní propusti s nulou přenosu pro ověření realizovatelnosti.

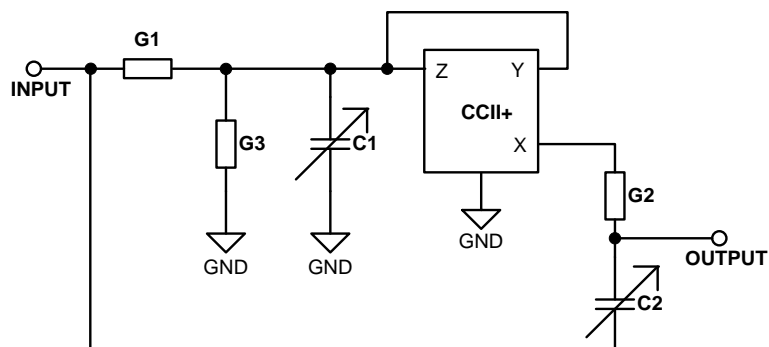


Obr.3.26. Naměřené charakteristiky dolní propusti s nulou přenosu.

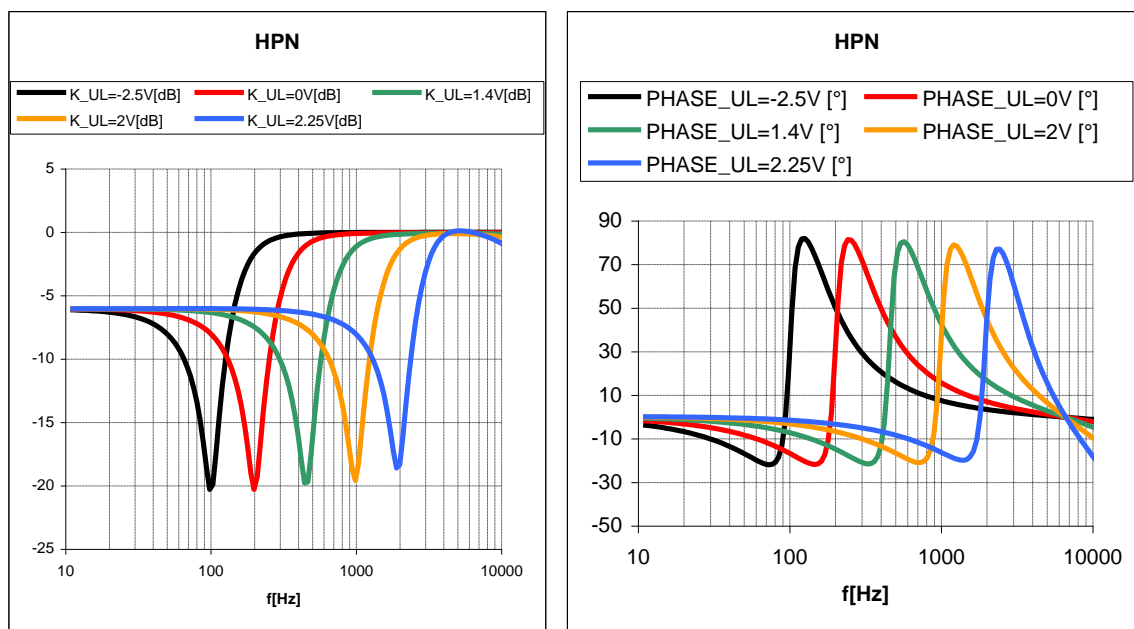


Obr.3.27. Naměřené charakteristiky vykompenzované dolní propusti s nulou přenosu.

Ze tří variant horní propusti s nulou přenosu jsem pro ověření funkčnosti vybral variantu zobrazenou na Obr.3.28. Tuto variantu lze také elektronicky přeladovat metodou napěťového bootstrapu jako filtry v předchozí kapitole. Kondenzátor C1 se přeladuje pomocí zapojení z Obr.24., kondenzátor C2 se přeladuje pomocí zapojení z Obr.25. Ze změřených charakteristik na Obr.3.29. je zřetelně vidět malá jakost nuly v přenosové funkci obvodu. To je dáno tolerancí součástek ve měřeném vzorku. Jakost nuly se dá v tomto případě opět vykompenzovat stejně jako v předešlém případě.



Obr.3.28. Schéma zapojení horní propusti s nulou přenosu pro ověření realizovatelnosti.



Obr.3.29. Naměřené charakteristiky horní propusti s nulou přenosu.

4 ZÁVĚR

Vytvořil jsem nová zapojení filtrů s jedním a dvěma konvejory pro realizaci filtrů druhého řádu. Schémata zapojení a tvary přenosových funkcí jsou uvedeny ve druhé kapitole této disertační práce. Za zmínku stojí čtyři topologie filtrů druhého řádu s konvejory.

Nejprve jsem ve druhé kapitole uvedl topologii pro konstrukci filtrů se dvěma proudovými konvejory druhé generace CCII+. Tato topologie je vhodná pro konstrukci filtrů typu DP, PP, HP. Tato zapojení lze také použít pro konstrukci elektricky laditelných filtrů. Tyto filtry jsem také použil při konstrukci laboratorního přípravku pro měření elektronicky laditelných filtrů s konvejory. Tato zapojení jsem publikoval v [X].

Dále jsem se zaměřil na možnosti konstrukce filtrů druhého řádu s nulami přenosu. Vytvořil jsem několik možných zapojení pro realizaci těchto filtrů se dvěma konvejory a nakonec i s jedním konvejorem. Z těchto možností jsem nakonec zvolil zapojení s jedním konvejorem a šesti pasivními prvky. Tyto filtry nejsou vhodné pro realizaci PZ a FČ. Jsou vhodné pouze pro konstrukci filtrů DPN a HPN. Tyto filtry nejsou vhodné pro elektronické ladění z důvodu nevhodné topologie zapojení. Tato zapojení jsem publikoval v [X].

Dále jsem vytvořil zapojení filtrů typu DP, HP, PP s jedním konvejorem a čtyřmi pasivními prvky. Tato zapojení jsou velice vhodná pro konstrukci filtrů na vyšších kmitočtech (řádově desítky MHz). Jedná se o jednoduchá zapojení velice vhodná pro elektronické ladění. Z těchto zapojení jsem odvodil zapojení pro PZ a FČ druhého řádu, které lze také elektronicky přeladovat. Tato zapojení jsem publikoval v [X].

Z předešlé topologie filtrů jsem odvodil zapojení pro realizaci filtrů DPN a HPN v několika konfiguracích. Jednotlivé konfigurace jsem uvedl ve druhé kapitole. Velikou výhodou těchto filtrů je možnost elektronického ladění. Jedná se o jedinou topologii filtrů s nulou přenosu, na bázi konvejořů, kterou lze elektronicky přeladovat. Tato zapojení jsem publikoval v [X].

Všechna uvedená zapojení jsem otestoval simulacemi v programu SNAP (ověření s ideálními prvky) v programu SPICE (ověření s modely reálných prvků AD844, MAX435) a praktickou realizací v oblasti nízkých kmitočtů. Výsledky praktického ověření jsou uvedeny ve třetí kapitole této disertační práce.

Jako aktivního prvku jsem používal převážně obvod AD844, který obsahuje jeden proudový konvejoř CCII+ a napěťový sledovač vstupem připojený na svorku Z proudového konvejořu. S tímto aktivním prvkem lze konstruovat filtry do mezního kmitočtu jednotek Mhz. Při hledání dalších vhodných aktivních prvků jsem našel možnost použití obvodů MAX435 a

MAX436 jako proudových konvektorů druhé generace CCII+ a CCII-. S těmito obvody již lze konstruovat aktivní filtry na desítkách MHz.

Použitá literatura

- [1] K. C. Smith, A. Sedra, The current conveyor – A new circuit building block, *Proc. IEEE (Lett.)*, vol.56, Aug. 1968, pp. 1368 – 1369.
- [2] Gary G. A. Black, Roger T. Friedmann, Adel S. Sedra, Gyrator Implementation With Integrable Current Conveyors, *IEEE Journal*, December 1971, vol. Sc-6, no. 6.
- [3] Vimal Singh, An Implementation of CCII- Current Conveyor, With Application, *IEEE Journal*, september 1989, vol. 36, no. 9.
- [4] Wanlop Surakampon, Vanchai Riewruja, Kiattisak Kumwachara, Kobchai Dejhan, Accurate CMOS-based Current Conveyors, *IEEE Journal*, August 1991, vol. 40, no. 4.
- [5] Shen - Iuan Liu, Hen - Wai Tsao, The Single CCII Biquads with High-Input Impedance, *IEEE Journal*, April 1991, vol.38, no. 4.
- [6] R. Nandi, Insensitive Current Mode Realization of Third-Order Butterworth Characteristic Using Current Conveyors, *IEEE Journal*, december 1994, vol. 41, no. 12.
- [7] Alain Fabre, Mustapha Alami, Universal Current Mode Biquad Implemented from Two Second Generation Current Conveyors, *IEEE Journal*, july 1995, vol. 42, no.7.
- [8] Shen – Iuan Liu, Dong – Shiuh Wu, New Current-Feedback Amplifier-Based Universal Biquadratic filter, *IEEE Journal*, august 1995, vol.44, no 4.
- [9] P. V. Ananda Mohan, New Current-Mode Biquad on Friend-Deliyannis Active RC Biquad, *IEEE Journal*, march 1995, vol. 42, no. 3.
- [10] S. Celma, P. A. Martinez, J. sabadell, A Transformation Method For Equivalent Infinite-Gain Op Amp to Unity-Gain CCII Networks, *IEEE Journal*, january 1996, vol. 43, no.1.
- [11] Hassan O. Elwan, Ahmed M. Soliman, A Novel CMOS Current Conveyor Realization with an Electronically Tunable Current Mode Filter Suitable for VLSI, *IEEE Journal*, september 1996, vol. 43, no. 9.
- [12] Alain Fabre, Omar Saaid, Francis Wiest, Christophe Boucheron, High Frequency Application Based on a New Current Controlled Conveyor, *IEEE Journal*, february 1996, vol. 43, no. 2.
- [13] Muhammad Taher Abuelma'atti, Abdallah Al - Ali Al - Ghumaiz, Novel CCI-Based Single-Element-Controlled Oscillators Employing Grounded Resistors and Capacitors, *IEEE Journal*, february 1996, vol. 43, no. 2.
- [14] Chun – Ming Chang, Multifunction Biquadratic Filters Using Current Conveyors, *IEEE Journal*, november 1997, vol.44, no. 11.

- [15] K. Vrba, J. Čajka, V. Zeman, New RC-Active Networks Using Current Conveyors, *Radioengineering*, june 1997, vol. 6, no. 2.
- [16] J. Čajka, T. Dostál, K. Vrba, Realization of Nth-Order Voltage Transfer Function Using Current Conveyors CCII, *Radioengineering*, june 1997, vol.6, no. 2.
- [17] T. Dostál, ARC Filters With Diamond Transistors and Buffers, *Radioengineering*, december 1998, vol. 7, no. 4.
- [18] K. Vrba, J. Čajka, V. Zeman, N-th Order Filters Using Balanced-Output CCII+/- Conveyors, *Radioengineering*, september 1998, vol. 7, no. 3.
- [19] T. Dostál, High Frequency State-Variable Biquadratic Active Filters, *Radioengineering*, april 1998, vol. 7, no. 1.
- [20] Chun – Ming Chang, Ming – Jye Lee, Voltage-Mode Multifunction Filter with Single Input and Three Outputs Using Two Compound Current Conveyors, *IEEE Journal*, november 1999, vol. 46, no. 11.
- [21] Pedro A. Martinez, Justo Sabadell, Concepción Aldea, Santiago Celma, Variable Frequency Sinusoidal Oscillator Based on CCII+, *IEEE Journal*, november 1999, vol. 46, no. 11.
- [22] C. A. Karybakas, C. A. Papazoglou, Low-Sensitive CCII-Based Biquadratic Filters Offering Electronic Frequency Shifting, *IEEE Journal*, april 1999, vol. 46, no. 4.
- [23] T. Dostál, ARC Filters Using Only Followers, *Radioengineering*, april 1999, vol. 8, no. 1.
- [24] K. Vrba, T. Dostál, J. Čajka, Adjoint Networks With Inverting And Noninverting Current Conveyors, *Radioengineering*, april 2000, vol. 9, no. 1.
- [25] Jiun – Wei Horng, New Configuration for Realizing Universal Voltage Mode Filter Using Two Current Feedback Amplifiers, *IEEE Journal*, october 2000, vol. 49, no. 5.
- [26] Giuseppe Ferri, Nicola Guerrini, High-Valued Passive Element Simulation Using Low-Voltage Low-Power Current Conveyors for Fully Integrated Application, *IEEE Journal*, april 2001, vol. 48, no. 4.
- [27] Fabrice Seugin, Alain Fabre, New Second Generation Current Conveyor with Reduced Parasitic Resistance and Bandpass Filter Application, *IEEE Journal*, june 2001, vol. 48, no. 6.
- [28] Jiun – Wei Horng, High Input Impedance Voltage-Mode Universal Biquadratic Filter Using Three Plus-Type CCII, *IEEE Journal*, october 2001, vol. 48, no. 10.
- [29] J. Čajka, T. Dostál, K. Vrba, High-Order Lowpass Filters Using DVCC Elements, *Radioengineering*, june 2002, vol. 11, no. 2.

- [30] Jiří Pospíšil, Zdeněk Kolka, Stanislav Hanus, Tomáš Dostál, Jaromír Brzobohatý, New Second-Order Optimized Filter Design, *Radioengineering*, 2003
- [31] Tomáš Dostál, All-Pass Filters in Current Mode, *Radioengineering*, 2005, p. 48 – 53.
- [32] Datasheet AD844 – Analog Devices
- [33] Datasheet OPA660 – Texas Instruments
- [34] Datasheet OPA2662 – Texas Instruments

Seznam symbolů a zkratek

- ARC – aktivní RC filtry
C – kondenzátor
CCI+ – pozitivní proudový konvejer první generace
CCI- – negativní proudový konvejer první generace
CCII+ – pozitivní proudový konvejer druhé generace
CCII- – negativní proudový konvejer druhé generace
DP – dolní propust
DPN – dolní propust s nulou přenosu
FČ – fázovací článek
G – vodivost
HP – horní propust
HPN – horní propust s nulou přenosu
K(p) – přenosová funkce obvodu
OZ – operační zesilovač
PP – pásmová propust
PZ – pásmová zádrž
Q_N – jakost nuly
Q_P – jakost pólu
Y – admitance
 ω_P – kmitočet pólu obvodu
 ω_N – kmitočet nuly obvodu