



**FAKULTA
ELEKTROTECHNICKÁ
ČVUT V PRAZE**

Bakalářská práce

Analogový přeladitelný filtr se zesilovači OTA

Klára Pacalová

Vedoucí práce: Doc. Dr. Ing. Jiří Hospodka
Katedra teorie obvodů

Praha, Prosinec 2019

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Analogový přeladitelný filtr se zesilovači OTA vypracovala pod vedením vedoucího bakalářské práce samostatně za použití v práci uvedených pramenů a literatury. Dále prohlašuji, že tato bakalářská práce nebyla využita k získání jiného nebo stejného titulu.

V Praze dne 3. listopadu 2019

.....

Vysokoškolská závěrečná práce je dílo chráněné autorským zákonem. Je možné pořizovat z něj na své náklady a pro svoji osobní potřebu výpisy, opisy a rozmnoženiny. Jeho využití musí být v souladu s autorským zákonem a citační etikou.

A university thesis is a work protected by the Copyright Act. Extracts, copies and transcripts of the thesis are allowed for personal use only and at one's own expense. The use of thesis should be in compliance with the Copyright Act and the citation ethics.

© Klára Pacalová, 2019
Fakulta elektrotechnická
České vysoké učení technické v Praze
Technická 2
160 00 Praha 6
Česká republika

Abstrakt

Cílem práce je navrhnout zapojení analogového přeladitelného filtru se zesilovači OTA. Filtr je zvolen typu pásmová propust 4. řádu s Cauerovou aproximací. K realizaci byl použit LM13700 kvůli dostačující šířce pásma (2 MHz) a cenové dostupnosti. Mezní kmitočet byl zvolen v řádu stovek kHz, což umožňuje využití např. pro přenos rozhlasového vysílání v atmosféře. Mezní kmitočet lze měnit vstupním proudem tekoucím do zesilovače až v rozsahu několika dekad. Simulace pásmové propusti s OTA byla realizována v MultiSimu, výhodou zde byla možnost využití bloku LM13700 bez nutnosti modelovat obvod vstupním diferenčním stupněm a proudovými zrcadly. Syntéza filtru z matematického hlediska byla provedena v Maplu s knihovnami Syntfil a PraCAn vyvíjenými katedrou teorie obvodů. K praktické realizaci DPS byl využit KiCad z důvodu multiplatformní podpory (Linux, macOS, Windows).

Klíčová slova: *transkonduktance, OTA, OTA-C, analogový filtr, pásmová propust, dolní propust*

The purpose of this thesis is to design a schematics of an analog filter with a variable cut-off frequency using OTA. Filter to design is specified to be a band-pass of fourth-order with Cauer approximation. For the realization was used LM13700 due to its comfortable bandwidth (2 MHz) and price affordability. The cut-off frequency was chosen in the range of hundreds of kHz, which can be used i.e. for transmission of radio broadcasting in the atmosphere. The cut-off frequency can be changed by the input current flowing into the amplifier for up to several decades. Simulation of a bandpass filter with OTA was realized in MultiSim, the advantage was the possibility to use the LM13700 block without the need to model the circuit with a differential input stage and current mirrors. Mathematically, filter synthesis was performed in Maple with the Syntfil and PraCAn libraries developed by the Department of Circuit Theory. For the practical realization of PCB was used KiCad because of its cross-platform support (Linux, macOS, Windows).

Klíčová slova: *transconductance, OTA, OTA-C, analog filter, band-pass, low-pass*

Zkratky

ARC	active RC
BP	band-pass
BS	band-stop
CC	current conveyor
CCI	current conveyor (první generace)
CCII	current conveyor (druhá generace)
DIDO	differential-input, differential-output
DP	dolní propust
DPS	deska plošných spojů
GIC	general impedance converter
HP	horní propust
HP	high-pass
IC	integrated circuit
LP	low-pass
OTA	operational transconductance amplifier
PCB	printed circuit board
PP	pásmová propust
PZ	pásmová zádrž
SISO	single-input, single-output

Obsah

1	Úvod	1
1.1	Analogové filtry	1
1.2	Butterworthova aproximace	1
1.3	Čebyševova aproximace	2
1.3.1	Typ I	2
1.3.2	Typ II	2
1.4	Besselova aproximace	3
1.5	Cauerova (eliptická) aproximace	3
1.5.1	Cauerova (eliptická) aproximace typu A	4
1.5.2	Cauerova (eliptická) aproximace typu B	4
1.5.3	Cauerova (eliptická) aproximace typu C	4
1.6	Srovnání typů aproximací	4
2	Transkonduktanční zesilovače (OTA)	5
2.1	Proudový konvektor druhé generace s OTA	6
2.2	IC s OTA	8
3	Náhrada prvků	11
3.1	Základní bloky	12
3.2	Odvození DP 2. řádu	12
4	Simulace	14
4.1	Dolní a pásmová propust 2. řádu, 4. řádu	14
5	Návrh v Maple	19
5.1	Příčkové LC filtry	21
5.2	Gyrátory	22
5.3	Výpočet prvků LC filtru	22
5.4	Návrh funkční simulací	26
6	Praktická část	27
7	Závěr	28

Seznam obrázků

1	Toleranční schéma dolní propusti (DP), horní propusti (HP), pásmové propusti (PP) a pásmové zádrže	2
2	Typy aproximací (DP)	3
3	OTA - schematické značky	5
4	Linearizovaný model reálného OTA	5
5	OTA-C	6
6	Ztrátový OTA-C	6
7	CCII symbol	6
8	Integrátor s CCII a OTA	7
9	CCII s \pm výstupem založený na OTA	7
10	Základní CMOS transkonduktance a) jeden výstup b) diferenční výstup	8
11	Single input single output OTA (SISO) založený na CCII	8
12	<i>Fully differential</i> OTA (DIDO) založený na CCII a napětovém bufferu	9
13	Konfigurace pinů na LM13700M	10
14	Vnitřní schéma OTA	10
15	Náhradní obvod pro uzemněný rezistor	11
16	Náhradní obvod pro indukčnost	11
17	Náhradní obvod pro neuzemněnou indukčnost	12
18	Základní bloky s OTA	12
19	Dolní propust 2. řádu	13
20	Obecná OTA struktura pro bikvad	14
21	Schéma zapojení DP 2. řádu	15
22	Amplitudová a fázová charakteristika DP 2. řádu, PP 1. řádu	16
23	Zjednodušená verze bikvadu OTA-C	16
24	Kaskádní zapojení	17
25	Amplitudová a fázová charakteristika DP 4. řádu	17
26	Násobení přenosů	17
27	Schéma zapojení DP 4. řádu, PP 2. řádu	17
28	Amplitudová a fázová charakteristika PP 2. řádu	18
29	Schéma zapojení PP 4. řádu	18
30	Amplitudová a fázová charakteristika PP 4. řádu	18
31	Toleranční schéma navrhované pásmové propusti	20
32	Modulová frekvenční charakteristika NDP	20
33	Pasivní dolní propust n-tého řádu s π články	21
34	Pasivní dolní propust n-tého řádu s T články	21
35	Neuzemněný induktor realizovaný kapacitorem a dvěma gyrátory	22
36	Schéma LC příčkové struktury	23
37	Modulová frekvenční charakteristika NDP - LC příčkový filtr	24
38	Modulová frekvenční charakteristika LC struktury (červená) a LC struktury s konečnou hodnotou jakosti cívek (zelená)	25
39	Výsledné schéma	26
40	Amplitudová a fázová charakteristika PP 4. řádu	26

Seznam tabulek

1	Přehled aproximací podle tvaru aproximační funkce v propustném i nepropustném pásmu	4
2	Porovnání integrovaných obvodů s jedním OTA	9
3	Porovnání integrovaných obvodů se dvěma OTA	9

1 Úvod

Mezní kmitočet navrhovaného filtru byl zvolen v řádu stovek kHz, což umožňuje využití např. pro přenos rozhlasového vysílání v atmosféře. Tyto dlouhé vlny (30 – 300 kHz, čemuž odpovídá délka vlny 1 – 10 km) obtékají nerovnosti a jdou za obzor bez nutnosti odrazu. Dnes na dlouhých vlnách vysílá jen několik národních rozhlasových vysílačů velkých států a pásmo se hlavně využívá pro takové účely, kde je na prvním místě spolehlivost a výhody pozemní vlny. To jsou například frekvenční a časové standardy (DCF77), radiomajáky, případně i komunikace s ponorkami. Střední vlny (525 – 1705 kHz, což odpovídá vlnovým délkám 186 – 577 m) mají menší dosah a často u nich dochází k jednomu odrazu od atmosféry. Lépe se ohýbají za přírodními překážkami a jsou vhodné pro vysílání v okruhu stovek kilometrů. Mezní kmitočet filtru lze pomocí vstupního proudu tekoucímu do zesilovače měnit až v rozsahu několika dekád.

1.1 Analogové filtry

Filtry jsou určeny k potlačení nebo zvýraznění určité části kmitočtového spektra signálu. Jsou to obvody s kmitočtově závislou přenosovou funkcí (pro napěťový přenos $H_s(j\omega) = U_{out}(j\omega)/U_{in}(j\omega)$). Základní rozdělení je na dolní propust (DP, anglicky *low-pass* - LP), horní propust (HP, *high-pass* - HP), pásmovou propust (PP, *band-pass* - BP) a pásmovou zádrž (PZ, *band-stop* - BS).

Dolní propust nepropouští na výstup vstupní signál nad frekvencí f_s , signál v propustném pásmu zůstává beze změny nebo zesílený. Základní pasivní dvojbranné zapojení je ke vstupu sériově zapojený rezistor a k této větvi paralelně kapacitor. Tento RC člen (integrační článek) se zvyšující se frekvencí snižuje svou vstupní impedanci. Přenosová funkce má nulu v nekonečnu a pól v levé polorovině s-rovině. Ideální integrátor má pól v nule.

Horní propust nepropouští signály o nízkých frekvencích. Nejjednodušší zapojení je RC člen (derivační článek), kdy kapacitor je zapojen sériově se zdrojem a k této větvi paralelně rezistor. Pro toto zapojení reaktance kapacitoru se zvyšující se frekvencí klesá. Přenosová funkce ideálního derivátoru má pól v nekonečnu a nulu v nule. Horní propust má nulu v nule a pól v levé polorovině s-rovině.

Pásmová propust propouští pásmo určené dvěma kmitočty. Pasivní pásmové propusti nedosahují účinnosti větší než 1. Jsou složeny z integračního článku (RC - dolní propust) a derivačního článku (CR - horní propust).

Pásmová zádrž nepropouští kmitočty pásma definovaného dvěma kmitočty. Pasivní zapojení je složeno ze dvou rezistorů a kapacitorů. Má vždy ztrátový přenos. Filtry se používají k redukci nežádoucích frekvencí např. pro efektivní reprodukci zvuku reproduktory, k redukci okolního rušení - vysílače blokují harmonické frekvence, které interferují. Také v obvodech rekonstrukce signálů u D/A převodníků, k předvzorkování u A/D převodníku nebo jako anti-aliasing filtry.

Obecná přenosová funkce filtru typu dolní propust je

$$H(j\omega) = \frac{H_0}{\prod_{i=1}^n (1 + a_i s + b_i s^2)}, \quad (1)$$

kde n je řád filtru.

Obecná přenosová funkce filtru typu horní propust je

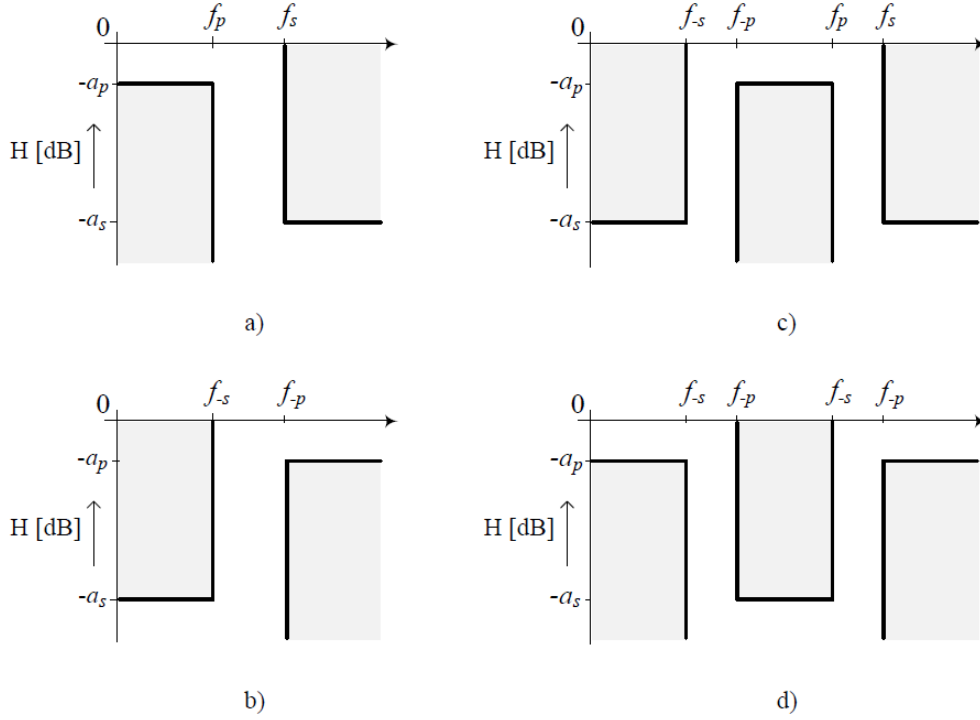
$$H(j\omega) = \frac{H_\infty}{\prod_{i=1}^n (1 + \frac{a_i}{s} + \frac{b_i}{s^2})}, \quad (2)$$

kde n je řád filtru.

Podle rozložení nul a pólů jmenovatele rozlišujeme různé aproximace. Koeficienty filtru a_i, b_i určují zesílení v propustném pásmu. Činitel jakosti je definován jako $Q = \sqrt{b_i/a_i}$. Čím větší Q je obdrženo, tím spíš bude filtr nestabilní.

1.2 Butterworthova aproximace

Butterworthova má maximálně plochou amplitudovou charakteristiku v propustném pásmu. Frekvenční charakteristika má sklon daný počtem pólů a pro její posouzení je užíváno skupinové zpoždění (derivace fáze podle frekvence). Pro Butterworthovu aproximaci je skupinové zpoždění nezměnné v propustném pásmu. Přechodová



Obrázek 1: Toleranční schéma pro a) dolní propust (DP), b) horní propust (HP), c) pásmovou propust (PP) a d) pásmovou zádrž (PZ)[1]

charakteristika má mírný překmit, zvyšující se s řádem filtru. Zesílení $G(\omega)$ je kmitočtově závislé a odpovídá absolutní hodnotě přenosové funkce $H(j\omega)$.

$$G(\omega) = |H(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \epsilon^2 \frac{\omega}{\omega_c}^{2n}}}, \quad (3)$$

kde ϵ je poměrné zvlnění kmitočtové charakteristiky v propustném pásmu (*faktor zvlnění*), n je řád filtru a ω_c mezní kmitočet (nastává při útlumu -3 dB). Pro $\omega_c = 1$ je faktor zvlnění $\epsilon = 1$.

1.3 Čebyševova aproximace

Čebyševova aproximace má strmější pokles, což vede k užití nižšího řádu filtru. Zato má ale zvlněnou frekvenční charakteristiku v propustném pásmu.

1.3.1 Typ I

Vyjádření modulové charakteristiky pro tuto aproximaci je dáno jako

$$G(\omega) = |H(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \epsilon^2 T_n^2 \frac{\omega}{\omega_c}^{2n}}}, \quad (4)$$

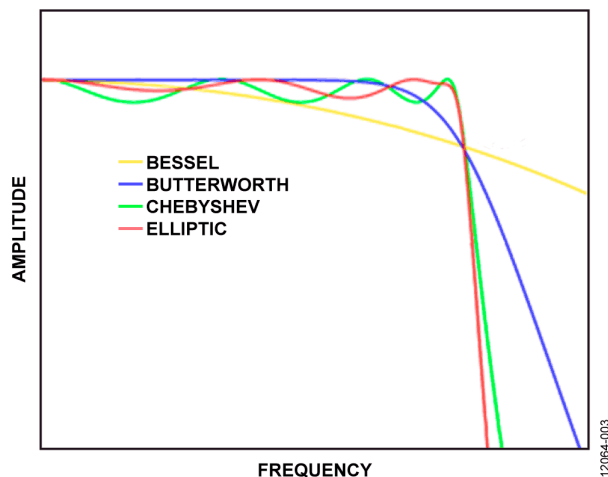
kde T_n je Čebyševův polynom, ϵ je poměrné zvlnění, n je řád filtru a ω_c mezní kmitočet. Čebyševův polynom je definován vztahem $2\omega^2 - 1$ pro $n = 2$. Obecně jsou to kořeny Chebyshevových diferenciálních rovnic

$$(1 - x^2)y'' - xy' + n^2y = 0 \quad (5)$$

$$(1 - x^2)y'' - 3xy' + n(n+2)y = 0. \quad (6)$$

1.3.2 Typ II

Typ II je nazýván také jako inverzní Čebyševova aproximace. V praxi není příliš používán, jelikož nemá tak rychlý pokles jako typ I a k jeho realizaci je třeba více prvků. Nemá zvlnění v propustném pásmu, zato v



Obrázek 2: Typy aproximací (DP)[2]

zádržném ano. Zesílení je definováno jako

$$G(\omega, \omega_c) = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{\epsilon^2 T_n^2 \frac{\omega_c}{\omega} 2n}}}, \quad (7)$$

kde T_n je Čebyševův polynom, ϵ je poměrné zvlnění, n je řád filtru a ω_c mezní kmitočet.

1.4 Besselova aproximace

Besselova aproximace se používá v telekomunikační technice v případech, kdy je požadováno zachování tvaru signálu. Amplitudová charakteristika v nepropustném pásmu je velmi plochá. Koeficienty polynomu jsou zvoleny tak, aby fázová charakteristika v pásmu okolo kritické frekvence byla maximálně lineární. Nevýhodou je poměrně malá strmost modulové charakteristiky. Ta je pro Besselovu aproximaci dána vztahem

$$G(\omega) = |H(j\omega)| = \frac{\Theta_n(0)}{\Theta_n(\frac{j\omega}{\omega_c})}, \quad (8)$$

kde Φ_n je Besselův polynom a ω_c mezní kmitočet. Besselův polynom je definován součtem řady (Grosswald 1978, Berg 2000)

$$\Theta_n(x) = x^n y_n\left(\frac{1}{x}\right) = \sum_{k=0}^n \frac{(n+k)!}{(n-k)!k!} \frac{x^{n-k}}{2^k}. \quad (9)$$

Pro filtr druhého řádu platí

$$G(\omega) = |H(j\omega)| = \frac{3}{\sqrt{\omega^4 + 3\omega^2 + 9}}. \quad (10)$$

1.5 Cauerova (eliptická) aproximace

Cauerova aproximace (eliptická) má nejstrmější pokles, při jejím užití jsou voleny nižší řády filtru. Pokud se zvlnění v zádržném pásmu blíží nule, filtr se stává Čebyševovým (výše zmíněný - typ I). Opačně je tomu v propustném pásmu - přiblížením k nule se filtr stává inverzním Čebyševovým (typ II). Pokud se obě hodnoty zvlnění blíží k nule, filtr se stává Butterworthovým. Kmitočtová charakteristika je dána vztahem

$$G(\omega) = |H(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \epsilon^2 R_n^2(\zeta, \frac{\omega}{\omega_c})}}, \quad (11)$$

kde ϵ je faktor zvlnění, R_n eliptická racionální funkce n -tého řádu, ζ selektivní faktor a ω_c mezní kmitočet. Pokud pro selektivní faktor platí $\zeta \rightarrow \infty$, filtr se stává Čebyševovým (typ I).

Protože se, podobně jako u Čebyševovy aproximace, liší odvození pro liché a sudé stupně, jsou pro ně různé postupy. Pro lichý stupeň existuje pouze jedna varianta, pro sudý tři varianty (A, B, C), které se liší průběhem aproximační funkce.

1.5.1 Cauerova (eliptická) aproximace typu A

Má stejný počet pólů a nul aproximující funkce. Je realizována jako LC filtr (Sekce 5.1) pouze s vázanými induktory.

1.5.2 Cauerova (eliptická) aproximace typu B

Jedná se o posun útlumového pólu z konečného kmitočtu k nekonečnu, tedy dále od propustného pásma. Tato úprava vede ke snížení strmosti přechodu od propustného k nepropustnému pásmu. Je to obdoba postupu u inverzní Čebyševovy aproximace.

1.5.3 Cauerova (eliptická) aproximace typu C

Vhodnou transformací, která vede na nulovou hodnotu přenosu v nulovém kmitočtu, získáme navíc proti variantám A, B i shodné zakončovací odpory v případě LC realizace (Sekce 5.1). Je to obdoba postupu u Čebyševovy aproximace.

1.6 Srovnání typů aproximací

Z hlediska zápisu přenosové funkce není rozdíl mezi Butterworthovou a Čebyševovou aproximací, přestože jedna má v propustném pásmu hladký a druhá zvlněný průběh. Přenosová funkce má v čitateli konstantu a ve jmenovateli polynom (odtud společné označení polynomiální aproximace).

Oproti tomu volba průběhu v nepropustném pásmu tvar přenosové funkce mění. Pokud je průběh monotónní (Butterworthova, Čebyševova aproximace), jedná se o podíl konstanty a polynomu. Je-li průběh v nepropustném pásmu zvlněný, tvoří přenosovou funkci podíl dvou polynomů. Pro běžné aproximace (Cauerova, inverzní Čebyševova) je v čitateli sudý polynom ve tvaru $\prod_i (p^2 + \omega_i^2)$.

Volbou kombinace hladkého a zvlněného průběhu v propustném a nepropustném pásmu získáme různé vlastnosti.

Tabulka 1: Přehled aproximací podle tvaru aproximační funkce v propustném i nepropustném pásmu [3]

Propustné pásmo	Nepropustné pásmo	Příklad aproximace
hladká	hladká	Butterworthova
zvlněná	hladká	Čebyševova
hladká	zvlněná	inverzní Čebyševova
zvlněná	zvlněná	Cauerova

2 Transkonduktanční zesilovače (OTA)

V telekomunikacích se používají filtry v rozsahu kmitočtů desítek až stovek megahertz, v bezdrátové komunikaci až v řádu gigahertz. Běžné RC filtry by neměly být užívány ve frekvenčním rozsahu nad 5–10 % ω_c - tedy v tomto rozsahu používaném v telekomunikačních technologiích nemají předvídatelné průběhy. Krom toho ve spínačích CMOS, kde rezistory běžně nejsou dostupné, jsou potřeba zesilovače s velkou šířkou pásma a zároveň vysokým zesílením. Dodržení těchto požadavků je náročné a drahé. Dalším extrémem pro analogové integrované filtry jsou telefonní linky, kde jsou kmitočtové rozsahy sice nízké, ale je požadována nízká cena a vysoká přesnost.

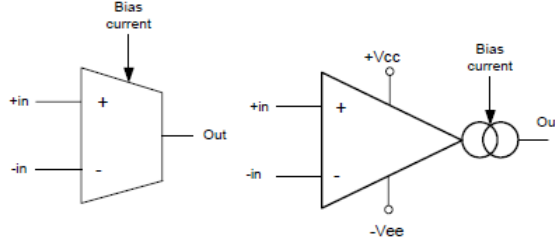
Pro nízké frekvence se ke splnění těchto požadavků používají obvody se spínanými kapacitami (SC). Přepínaný kapacitor se chová jako rezistor, tudíž časová konstanta RC je definována poměrem kapacitorů a hodinovou (CLK) frekvencí, se kterou jsou přepínány. Pro vysokofrekvenční aplikace (až v řádu gigahertz) se používají MOSFET-C filtry.

Další z možných prvků, které jsou dostupné jak pro nízkofrekvenční aplikace, tak pro kmitočtový rozsah stovek megahertz, jsou transkonduktanční zesilovače. Jejich kmitočtové vlastnosti umožňují využití při konstrukci ARC (*Active RC*) filtrů v pracovním kmitočtovém pásmu do cca 10 MHz a se speciálně konstruovanými OTA až do 100 MHz.

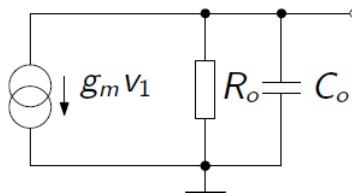
Transkonduktanční zesilovače (označují se též jako OTA (*Operational Transconductance Amplifiers*) jsou napětím řízené zesilovače s proudovým výstupem - zdroje proudu

$$i_{out} = g_m(u_+ - u_-), \quad (12)$$

kde u_+ a u_- jsou napětí invertujícího a neinvertujícího vstupu. Transkonduktance je řízena externím proudem I_{ABC} (*Bias Current*). Ideální OTA má kmitočtově nezávislou transkonduktanci g_m (na rozdíl od reálného, který je kmitočtově závislý). Připojením zátěže R_z na výstup bylo získáno napětí naprázdno



Obrázek 3: OTA - schematické značky [4]



Obrázek 4: Linearizovaný model reálného OTA [5]

$$u_{out} = R_z g_m(u_+ - u_-) = G_0(u_+ - u_-), \quad (13)$$

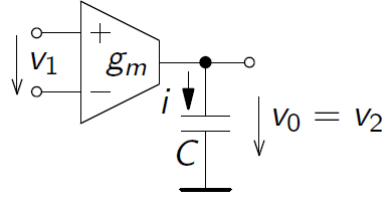
kde G_0 je zesílení. Ze vztahu 13 plyne, že zesílení je konečné a mezi vstupy je nenulové napětí. Po připojení kondenzátoru jako zátěže byl získán bezetrátový integrátor s přenosem

$$H(s) = \frac{v_2}{v_1} = \frac{g_m}{pC} \quad (14)$$

a napětím na výstupu

$$v_0(t) = \frac{1}{C} \int i(t) dt = \frac{1}{C} \int g_m v_1(t) dt. \quad (15)$$

Toto zapojení integrátoru s uzemněným kondenzátorem se označuje jako OTA-C.

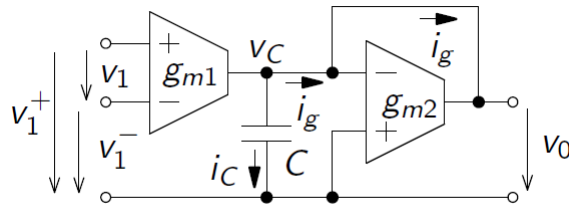


Obrázek 5: OTA-C [5]

Ztrátový integrátor lze vytvořit sériovým zapojením dalšího OTA jako odporu se zápornou zpětnou vazbou. Rozdíl mezi ideálním a ztrátovým integrátorem lze pozorovat i v modulové charakteristice - pro ztrátový je konstantní a pak teprve lineárně klesá se sklonem -20 dB/dek.

Po doplnění ztrátové vodivosti, kterou zde simuluje druhý zesilovač, paralelně k integrační kapacitě, byl obdržen vztah pro výstupní napětí

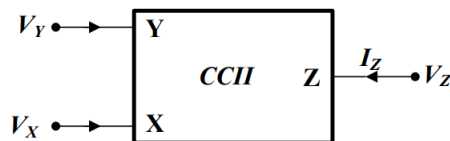
$$v_0(t) = \frac{g_{m1}}{sC + g_{m2}} (v_1^+ - v_1^-). \quad (16)$$



Obrázek 6: Ztrátový OTA-C [5]

2.1 Proudový konvektor druhé generace s OTA

Jeden z nejzákladnějších bloků v oblasti analogov obvodů v proudovém módu je proudový konvektor (*current conveyor* (CC)). Princip CC první generace byl popsán v roce 1968 (K. C. Smith, A. S. Sedra [6]). CCI byl následně nahrazen univerzálnější druhou generací v roce 1970 (CCII) [7]. Obvody s CC se používaly především v zapojeních s bipolárními tranzistory kvůli jejich vysoké transkonduktanci (v porovnání s CMOS). Jsou to operační zesilovače s proudovou zpětnou vazbou (např. MAX477, MAX4112). Proudové konvejory (*Current conveyors*) jsou používány ve vysokofrekvenčních obvodech, kde je problematické použití běžných operačních zesilovačů, protože jsou limitovány násobkem šířky pásma a zesílení (*gain-bandwidth product*). Je to struktura s třemi vstupy. Proudovým konvejorem lze také jednoduše realizovat integrátor. Pro výstupní napětí u_0 obvodu



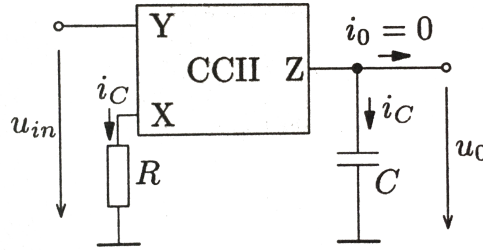
Obrázek 7: CCII symbol [8]

a z něj odvozenou přenosovou funkcí platí

$$u_0(t) = \frac{1}{C} \int i_c(t) dt = \frac{1}{RC} \int u_{in}(t) dt \quad (17)$$

$$H(p) = \frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{pCR}. \quad (18)$$

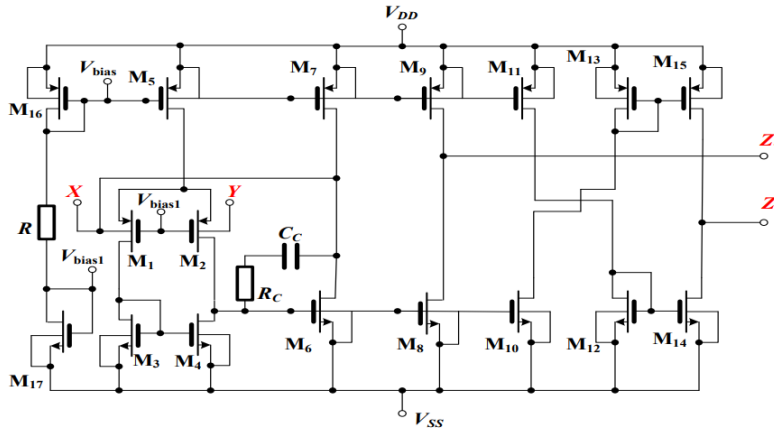
Konvektorový integrátor pracuje jako invertující nebo neinvertující. Vstupní impedance na vstupu Y je nekonečná



Obrázek 8: Integrátor s CCII a OTA [3]

(tedy proud tekoucí skrz Y je nulový) a impedance na vstupu X je nulová ($R_Y = \infty, I_Y = 0, R_X = 0$). Napětí na vstupu X je ekvivalentní k napětí na vstupu Y ($V_X = V_Y$). Proud procházející vstupem X je ekvivalentní k proudu vstupem Z ($I_Z = I_X$). Výstupní impedance vstupu Z je nekonečná ($R_Z = \infty$). Charakteristika ideálního CC je reprezentována maticí

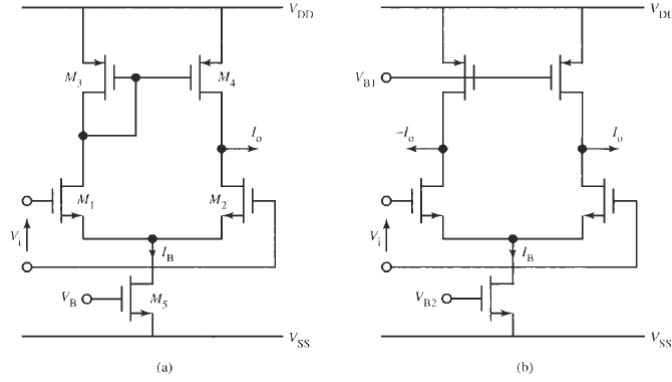
$$\begin{bmatrix} I_Y \\ V_X \\ I_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & \pm 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_Y \\ I_X \\ V_Z \end{bmatrix}. \quad (19)$$



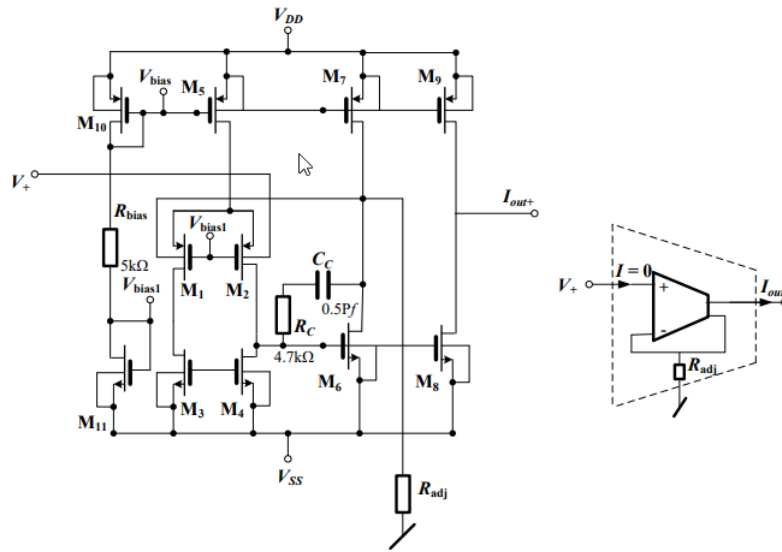
Obrázek 9: CCII s \pm výstupem založený na OTA [8]

V analogových IC je preferováno diferenční zpracování signálů, protože redukuje zkreslení a šum (diferenční stupeň vyruší kladné a záporné výchylky napětí/proudu např. na zdroji a také vyruší nelinearity způsobené zesilovačem).

Využitím zapojení na obrázku 2.2 a principů CCII lze získat modifikace klasického transkonduktančního zesilovače (s rozdílovým stupněm na vstupu a jedním výstupem). Obdržené atypické struktury obsahují jeden vstup a jeden výstup a také dva rozdílové stupně (na vstupu i výstupu). Provedení diferenčního stupně na výstupu je znázorněno na obrázku 10. Takovéto zapojení funguje jako dobrý sledovač napětí, ale zato má menší šířku pásma. Také má menší transkonduktanci, protože každou polovinou diferenčního obvodu teče jen polovina vstupního proudu (*bias current*). Problémem je také relativně nízké stejnosměrné zesílení, proto se v praxi se zapojením s OTA nepoužívá.



Obrázek 10: Základní CMOS transkonduktance a) jeden výstup b) diferenční výstup [12]

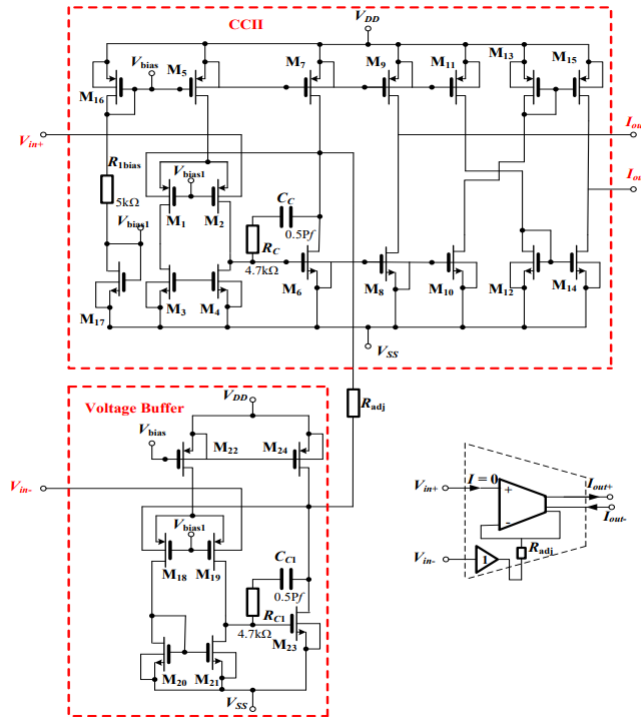


Obrázek 11: Single input single output OTA (SISO) založený na CCII [8]

2.2 IC s OTA

OTA bývá nejčastěji implementován v unipolární monolitické technologii (CMOS) a v případě, že se jedná o reálný prvek, má převážně kapacitní charakter (vstupní impedance se stává kapacitou). Integrované obvody se vyrábí buď s jedním nebo dvěma zesilovači v pouzdře. Varianty s jedním operačním zesilovačem jsou např. OPA615, OPA860 a novější OPA861. Všechny součástky s jedním OTA mají velkou šířku pásma (v řádech stovek MHz), cenově vychází na 75–280 Kč. IC s dvěma zesilovači v pouzdře mají užší šířku pásma (2 MHz), menší rychlost přeběhu (50 V/ μ s), mnohem menší výstupní proud (650 μ A) i offset vstupního napětí a operují při cca 4x nižších proudech. Cenové rozpětí je 25–65 Kč.

Pro realizaci přeladitelného filtru byl zvolen LM13700. Vnitřní zapojení LM13700 na obrázku 2.2 obsahuje symetrický rozdílový zesilovací stupeň (tranzistory Q4, Q5), který je napájen řízeným zdrojem proudu s tranzistorem Q2. Tento diferenční stupeň pracuje jako měnič vstupního rozdílového napětí na diferenční proudový signál, který je převeden proudovými zrcadly (*Current Mirror*) na výstupní svorky obvodu. Proudová zrcadla zde tvoří dvojice diod a tranzistorů - referenční proud tekoucí v jedné větvi obvodu se „zrcadlí“ v jeho druhé větvi. Principiálně jsou to zdroje proudu řízené proudem.



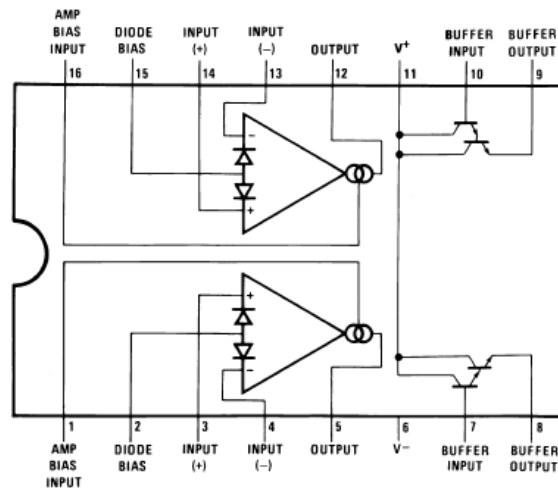
Obrázek 12: Fully differential OTA (DIDO) založený na CCII a napětovém bufferu [8]

	GBP - Gain Bandwidth Product	SR - Slew Rate	Output Current per Channel	I_b - Input Bias Current	V_{os} - Input Offset Voltage	Operating Supply Current	Forward Transconductance Min	Supply Voltage
OPA615	710 MHz	2.5 kV/ μ s	5 mA	3 μ A	40 mV	13 mA	65 mA/V	8–12.4 V
OPA860	470 MHz	3.5 kV/ μ s	15 mA	5 μ A	12 mV	11.2 mA	80 mA/V	5–13 V
OPA861	400 MHz	900 V/ μ s	15 mA	1 μ A	12 mV	5.4 mA	65 mA/V	4–12.6 V

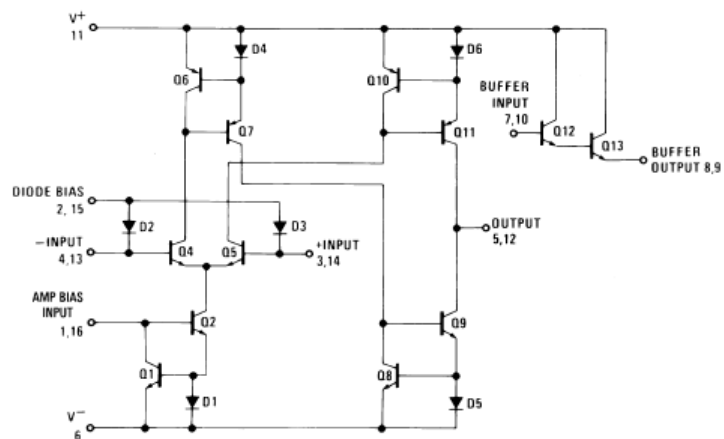
Tabulka 2: Porovnání IC s jedním OTA [9]

	GBP - Gain Bandwidth Product	SR - Slew Rate	Output Current per Channel	I_b - Input Bias Current	V_{os} - Input Offset Voltage	Operating Supply Current	Forward Transconductance - Min	Supply Voltage
LM13700	2 MHz	50 V/ μ s	650 μ A	5 μ A	4 mV	1.3 mA	6700 μ S	10–36 V
NE5517	2 MHz	50 V/ μ s	650 μ A	5 μ A	5 mV	2.6 mA	5400 μ S	4–44 V
AU5517	2 MHz	50 V/ μ s	650 μ A	5 μ A	5 mV	2.6 mA	5400 μ S	4–44 V
NJM13600	2 MHz	50 V/ μ s	650 μ A	5 μ A	5 mV	2.6 mA	6700 μ S	36 V
NJM13700	2 MHz	50 V/ μ s	650 μ A	5 μ A	4 mV	2.6 mA	6700 μ S	36 V

Tabulka 3: Porovnání IC se dvěma OTA [9]



Obrázek 13: Konfigurace pinů na LM13700M [10]



Obrázek 14: Vnitřní schéma OTA [10]

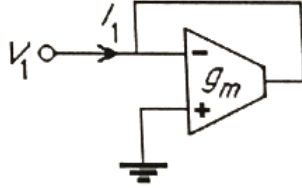
Významnou vlastností OTA je možnost změny transkonduktance g_m změnou klidového stejnosměrného pracovního proudu vstupního diferenčního stupně. Řízení může být buď napěťové nebo proudové.

3 Náhrada prvků

Pro ideální OTA zesilovač (vstupní i výstupní impedance nulové) je možno odpor nahradit obvodem s uzemněným neinvertujícím vstupem a zpětnou vazbou z invertujícího vstupu na výstup a to hodnotou

$$R_{in} = \frac{1}{g_m}, \quad (20)$$

kde g_m označuje transkonduktanci zesilovače. Prohození invertujícího a neinvertujícího vstupu vede na opačnou polaritu. Tato konfigurace jako odpor je užitečná např. k návrhu monolitických g_m -RC filtrů pouze s transkonduktancemi a kapacitami (g_m -C filtry - viz 2.2, 5), také k náhradě velmi velkých odporů. Pro nahra-



Obrázek 15: Náhradní obvod pro uzemněný rezistor [12]

zení indukčnosti o impedanci $Z_L = 1/(sC)$ lze použít obvod s třemi OTA. Uzemněny jsou invertující vstup prvního OTA a neinvertující druhého. Použita je zpětná vazba z výstupu na neinvertující vstup prvního OTA. Propojení výstupu prvního OTA na invertující vstup druhého OTA je realizován přes uzemněný kapacitor. Vyjádřením napětí a proudů v obvodu bylo získáno napětí na kapacitoru a vstupní proud

$$V_C = \frac{g_{m1}}{sC} V_1 \quad (21)$$

$$I_1 = g_{m2} V_C = \frac{g_{m1} g_{m2}}{sC} V_1. \quad (22)$$

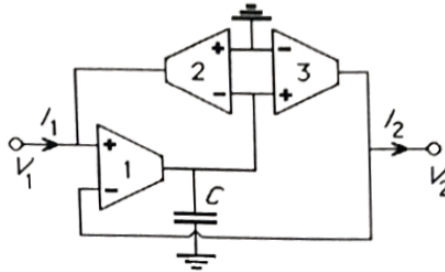
Výsledná indukčnost - impedance vstupu byla vyjádřena vztahem 21.

$$Z_{in}(s) = \frac{V_1}{I_1} = s \frac{C}{g_{m1} g_{m2}} \quad (23)$$

Byl obdržen induktor o hodnotě

$$L = \frac{C}{g_{m1} g_{m2}}. \quad (24)$$

Pro uzemněnou indukčnost o impedanci $Z_L = 1/(sC)$ byl použit obvod na Obrázku 16. Vyjádřením napětí a



Obrázek 16: Náhradní obvod pro indukčnost [12]

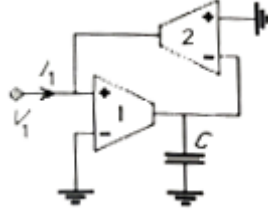
proudů v obvodu bylo získáno napětí na kapacitoru a vstupní proud

$$V_C = \frac{g_{m1}}{sC} V_1 \quad (25)$$

$$I_1 = g_{m2} V_C = \frac{g_{m1} g_{m2}}{sC} V_1. \quad (26)$$

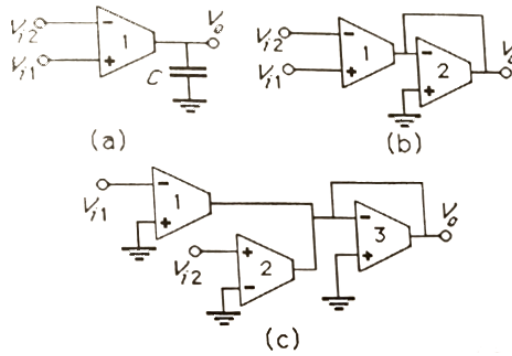
Výsledná indukčnost - impedance vstupu byla vyjádřena vztahem

$$Z_{in}(s) = \frac{V_1}{I_1} = s \frac{C}{g_{m1}g_{m2}}. \quad (27)$$



Obrázek 17: Náhradní obvod pro neuzemněnou indukčnost pro $g_{m1} = g_{m2}$ [12]

3.1 Základní bloky



Obrázek 18: Základní bloky s OTA a) integrující b) srovnávací c) sčítací [12]

Blok a) na obrázku 18 slouží k realizaci invertujícího/neinvertujícího integrátoru s výsledným napětím

$$V_O = \frac{g_{m1}}{pC} (V_1 - V_2). \quad (28)$$

Blok b) na obrázku 18 je komparátor s různou polaritou a napětím na výstupu

$$V_O = \frac{g_{m1}}{g_{m2}} (V_1 - V_2). \quad (29)$$

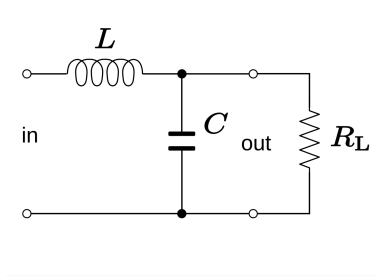
Blok c) na obrázku 18 realizuje sčítací nebo rozdílový obvod s napětím na výstupu

$$V_O = -\frac{g_{m1}}{g_{m3}} V_1 + \frac{g_{m2}}{g_{m3}} V_2. \quad (30)$$

Spojením těchto základních stavebních bloků se správnými znaménky lze získat různé funkční bloky. Základním principem uplatňovaným při návrhu s OTA je použití pouze OTA a uzemněných kapacitorů, protože při návrhu IC (*Integrated Circuit*) jsou uzemněné kapacitory méně zatíženy parazitními chybami než neuzemněné kapacitory. Pro IC použití je vhodné volit shodné transkonduktance. Parazitní vstupní a především výstupní impedance způsobují chyby ve výstupu filtru, což může vést na parazitní póly, které při vysokofrekvenčním použití nelze zanedbat. Při použití filtru pro zvukové aplikace (20 – 20 000 Hz) lze chyby způsobené parazitními součástkami zanedbat, rovněž lze zanedbat chyby způsobené konečnou šířkou pásma.

3.2 Odvození DP 2. řádu

Náhradní obvod, ze kterého bude spočítána přenosová funkce pro přenos filtru druhého řádu, popisuje Obrázek 19. Přenos obvodu byl vyjádřen jako



Obrázek 19: Dolní propust 2. řádu [11]

$$H(s) = \frac{U_{out}}{U_{in}} = \frac{Z_2}{Z_1}, \quad Z_1 = sL, \quad Z_2 = \frac{\frac{R}{pC}}{R + \frac{1}{pC}}. \quad (31)$$

Výsledný přenos je roven

$$H(s) = \frac{\frac{\frac{R}{pC}}{R + \frac{1}{pC}}}{pL + \frac{\frac{R}{pC}}{R + \frac{1}{pC}}}. \quad (32)$$

Elementárními algebraickými úpravami a následným vynásobením členem $1/(LRC)$ byl získán výsledný přenos.

$$H(s) = \frac{R}{p^2 LRC + sL + R} = \frac{\frac{1}{LC}}{p^2 + \frac{p}{RC} + \frac{1}{LC}}. \quad (33)$$

Využitím poznatků ze Sekce 3 je možno za odpor a indukčnost dosadit do vztahu 33. Byly uvažovány kapacitory o stejné hodnotě C .

$$H(s) = \frac{\frac{1}{C^2}}{p^2 + \frac{p}{\frac{g_{m1}g_{m2}}{C}} + \frac{1}{\frac{g_{m1}g_{m2}}{C}}} = \frac{\frac{g_{m1}g_{m2}}{C^2}}{p^2 + \frac{pg_{m2}}{C} + \frac{g_{m1}g_{m2}}{C^2}} = \frac{g_{m1}g_{m2}}{p^2 C^2 + pg_{m2}C + g_{m1}g_{m2}}. \quad (34)$$

Porovnáním jmenovatele se jmenovatelem přenosu filtru 2. řádu byl obdržen vztah

$$p^2 + p\frac{\omega_c}{Q} + \omega_c^2 = p^2 C^2 + pg_{m2}C + g_{m1}g_{m2} \quad (35)$$

$$p^2 + p\frac{\omega_c}{Q} + \omega_c^2 = p^2 + \frac{pg_{m2}}{C} + \frac{g_{m1}g_{m2}}{C^2}. \quad (36)$$

Z tohoto vztahu byl vyjádřen mezní kmitočet jako

$$\omega_c^2 = \frac{g_{m1}g_{m2}}{C^2} \quad (37)$$

$$\omega_c = \sqrt{\frac{g_{m1}g_{m2}}{C^2}} \quad (38)$$

a činitel jakosti dosazením za ω_c

$$Q = \frac{\omega_c}{\frac{g_{m2}}{C}} = \sqrt{\frac{g_{m1}}{g_{m2}}}. \quad (39)$$

Pokud navíc byly uvažovány stejné transkonduktance g_{m1} , $g_{m2} = g_m$, byl obdržen výsledek

$$\omega_c = \sqrt{\frac{g_m^2}{C^2}}, \quad (40)$$

$$Q = \sqrt{1} = 1. \quad (41)$$

4 Simulace

4.1 Dolní a pásmová propust 2. řádu, 4. řádu

Dolní propust druhého řádu má přenos v nekonečnu nulový $H_\infty = 0$. Přenosová funkce je

$$H(j\omega) = \frac{H_0\omega_c^2}{(j\omega)^2 + \frac{\omega_c}{Q}(j\omega) + \omega_c^2}. \quad (42)$$

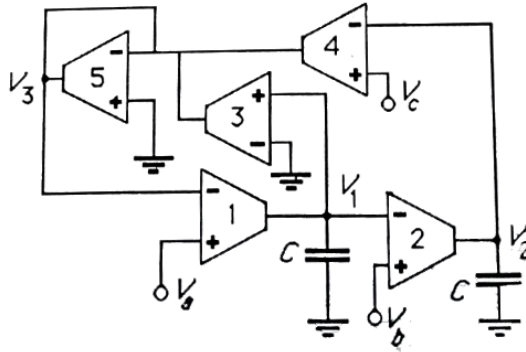
Obvodová simulace byla realizována v programu Multisim. Bylo zvoleno symetrické napájení OZ $V_{DD}, V_{SS} = \pm 15$ V. Regulací vstupního proudu je ovlivňován pracovní bod obvodu (mezní kmitočet). Vstupní externí proud $I_{ABC} = 0.5 \mu\text{A}$ byl zvolen tak, aby byl obdržén mezní kmitočet cca 100 kHz. Externím proudem $I_{ABC} \in [5 \mu\text{A} ; 500 \mu\text{A}]$ je garantováno minimální výstupní napětí $U_{OUT} = \pm 12$ V, standardně $V_{peak1} = 14.2$ V a $V_{peak2} = -14.4$ V. Při výstupním napětí v tomto intervalu je šum vzhledem k signálu zanedbatelný a nezkreslí výsledky simulace.

Bylo použito zapojení s paralelně řazeným uzemněným kapacitorem, odporem a indukčností (RLC rezonanční obvod), kde $R = 1/g_m$ a $L = C/(g_{m1}g_{m2})$ a vstupní proud $I = g_m V$. Podobně jako v sekci 3.2 bylo obrženo analogií k pasivnímu obvodu

$$\frac{V_{BP}}{g_{m3}V_i} = \frac{1}{pC + g_m^2/(pC) + g_{m3}} \quad (43)$$

$$\frac{V_{BP}}{V_i} = \frac{pg_{m3}C}{p^2C^2 + pg_{m3}C + g_m^2}. \quad (44)$$

Zapojení je popsáno na obrázku 20. Zesilovače 1 a 2 pracují jako invertující integrátory, zbývající zesilovače



Obrázek 20: Obecná OTA struktura pro bikvad [12]

vytvářejí kladnou a zápornou zpětnou vazbu z výstupu integrátorů vedoucí na sčítací vstup. Znaménko vazby je určeno volbou vstupní svorky zesilovačů 3 a 4. Výstupy obvodu jsou napěťové (na výstupu sumačního zesilovače 5, resp. integrátoru 1 a 2). Buzení může být proudové (v obrázku 20 na místě V_1 a V_2) nebo napěťové s využitím vstupních svorek transkonduktančních zesilovačů. Uvažováním napětí V_a, V_b, V_c na obrázku 20 jako vstupy byly obdrženy výstupní napětí

$$V_1 = \frac{pC_2g_{m1}(g_{m5}V_a - g_{m4}V_c) + g_{m1}g_{m2}g_{m4}V_b}{D(s)} \quad (45)$$

$$V_2 = \frac{(pC_1g_{m2}g_{m5} + g_{m1}g_{m2}g_{m3})V_b + g_{m1}g_{m2}(g_{m4}V_c - g_{m5}V_a)}{D(s)} \quad (46)$$

$$V_3 = \frac{p^2C_1C_2g_{m4}V_c + p(C_2g_{m1}g_{m3}V_a - C_1g_{m2}g_{m4}V_b) + g_{m1}g_{m2}g_{m4}V_a}{D(s)}, \quad (47)$$

kde

$$D(p) = C_1C_2g_{m5}(p^2 + p\frac{1}{C_1}\frac{g_{m1}g_{m3}}{g_{m5}} + \frac{g_{m1}g_{m2}g_{m4}}{C_1C_2g_{m5}}). \quad (48)$$

Zvolením $V_a = V_b = 0$ a $V_c = V_i$ byly obdrženy následující přenosové funkce

$$H_{BP}(p) = \frac{V_1}{V_i} = -\frac{sC_2g_{m1}g_{m4}}{D(s)} \quad (49)$$

$$H_{LP}(p) = \frac{V_2}{V_i} = \frac{g_{m1}g_{m2}g_{m4}}{D(s)} \quad (50)$$

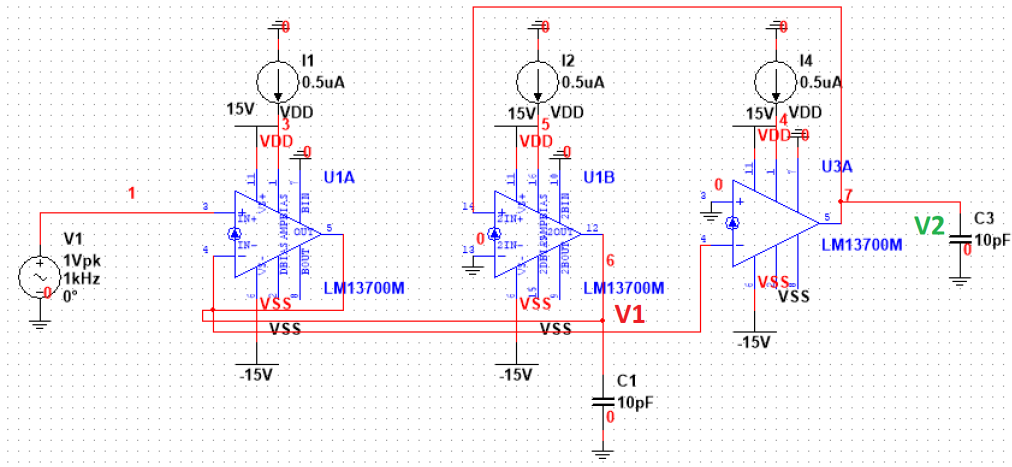
$$H_{HP}(p) = \frac{V_3}{V_i} = \frac{s^2C_1C_2g_{m4}}{D(s)}, \quad (51)$$

kde D_s odpovídá rovnici 4.1.

Obecná přenosová funkce bikvadu může být obdržena položením $V_a = V_b = V_c = V_i$ a úpravami vztahu 4.1 bylo obdrženo

$$\frac{V_3}{V_i} = \frac{p^2C_1C_2g_{m4} + p(C_2g_{m1}g_{m3} - C_1g_{m2}g_{m4}) + g_{m1}g_{m2}g_{m4}}{D(s)}. \quad (52)$$

V simulaci byl dle výše popsaných poznatků na výstupu 2. OTA (V1) obdržen filtr typu PP 1. řádu s poklesem 20 dB/dek a na výstupu 3. OTA (V2) DP 2. řádu s poklesem 40 dB/dek. V případě realizace těchto základních



Obrázek 21: Schéma zapojení DP 2. řádu

přenosů (PP, DP) lze zapojení dále zjednodušit až na obvod obsahující pouze 3 zesilovače, viz obrázek 23. Přenos tohoto obvodu s výstupem pořadí v bodu D a P je dán rovnicemi

$$U_D(p) = \frac{p \frac{g_{m3}U_3 - g_{m2}U_2}{C_2} + \frac{g_{m1}g_{m2}}{C_1C_2}U_1}{p^2 + p \frac{g_{m3}}{C_2} + \frac{g_{m1}g_{m2}}{C_1C_2}} \quad (53)$$

$$U_P(p) = \frac{p \frac{g_{m1}}{C_1}U_1 + \frac{g_{m1}}{C_1C_2}(g_{m3}U_1 + g_{m2} - g_{m3}U_3)}{p^2 + p \frac{g_{m3}}{C_2} + \frac{g_{m1}g_{m2}}{C_1C_2}}. \quad (54)$$

Elementárními úpravami lze tyto rovnice zjednodušit na

$$U_D(p) = \frac{pC_1(g_{m3}U_3 - g_{m2}U_2) + g_{m1}g_{m2}U_1}{p^2C_1C_2 + pC_1g_{m3} + g_{m1}g_{m2}} \quad (55)$$

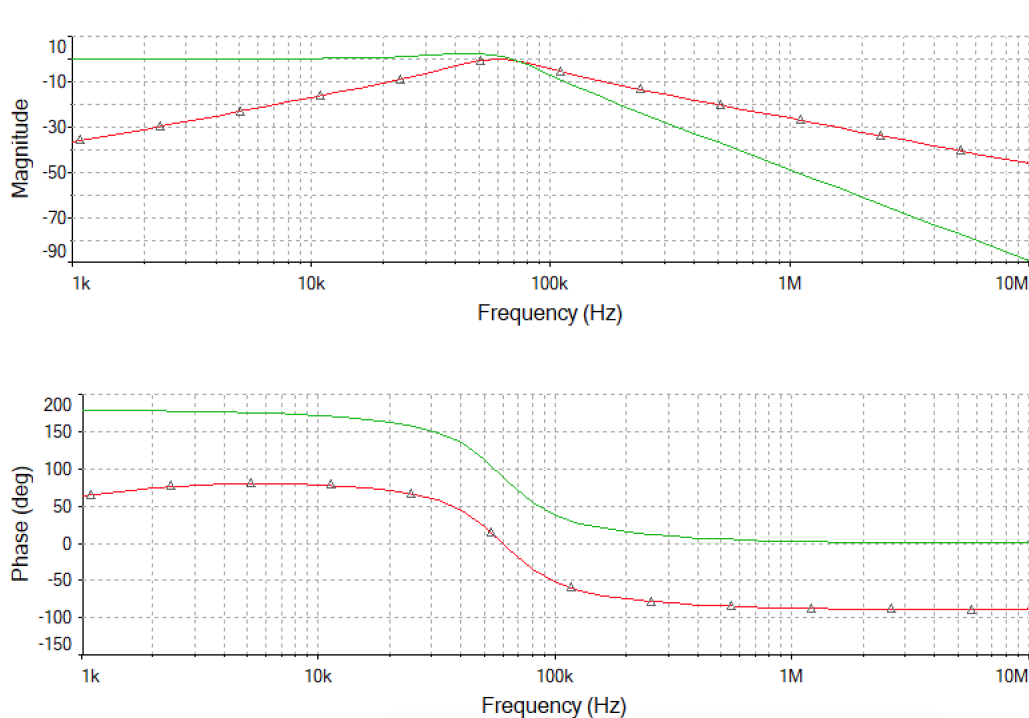
$$U_P(p) = \frac{pC_2g_{m1}U_1 + g_{m1}(g_{m3}U_1 + g_{m2} - g_{m3}U_3)}{p^2C_1C_2 + pC_1g_{m3} + g_{m1}g_{m2}}. \quad (56)$$

K sestavení dolní propusti 4. řádu bylo použito kaskádní zapojení sestávající ze sériově zapojených bloků. Přenosové funkce jednotlivých bloků se násobí

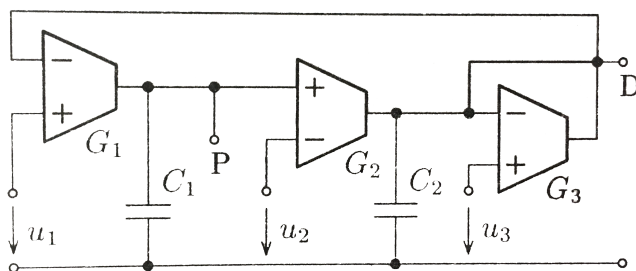
$$H_k(j\omega) = \frac{U_k(j\omega)}{U_{k-1}(j\omega)}. \quad (57)$$

Přenos posledního bloku je dán vztahem

$$H_{1 \rightarrow k}(j\omega) = \frac{U_k(j\omega)}{U_{in}(j\omega)} = \prod_{n=1}^k H_n(j\omega). \quad (58)$$



Obrázek 22: Amplitudová a fázová charakteristika DP 2. řádu, PP 1. řádu



Obrázek 23: Zjednodušená verze bikvadu OTA-C [3]

Kaskádním zapojením dvou dolních propustí ze sekce 4.1 byl obdržen filtr 4. řádu s poklesem 80 dB/dek. Pásmovou propust lze získat zapojením dolní a horní propustí.

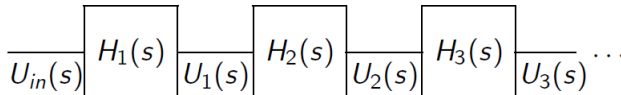
Horní propust druhého řádu má přenos v nule nulový $H_0 = 0$. Přenosová funkce je

$$H(j\omega) = \frac{H_\infty(j\omega)^2}{(j\omega)^2 + \frac{\omega_c}{Q}(j\omega) + \omega_c^2}. \quad (59)$$

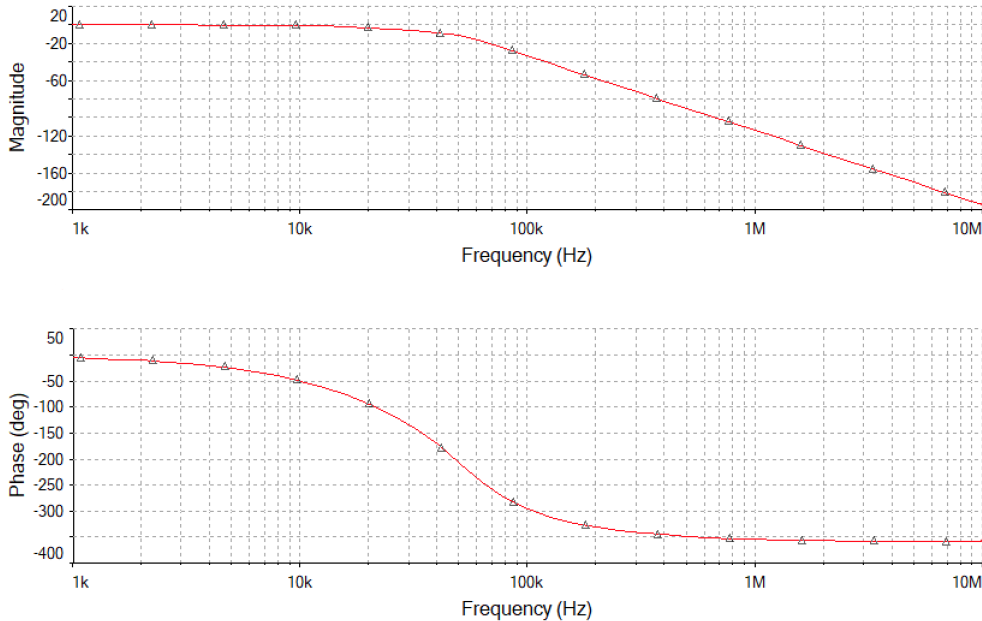
Pásmová propust má přenos v nule i nekonečnu nulový $H_0 = H_\infty = 0$. Přenosová funkce je

$$H(j\omega) = \frac{H_B \frac{\omega_c}{Q}(j\omega)}{(j\omega)^2 + \frac{\omega_c}{Q}(j\omega) + \omega_c^2}. \quad (60)$$

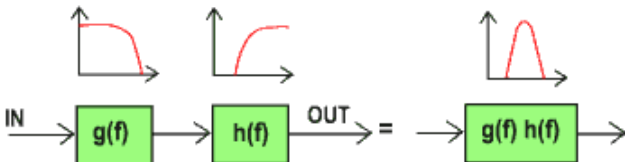
Kaskádním zapojením dvou PP 2. řádu byla obdržena PP 4. řádu s poklesem 80 dB/dek. Zapojení spočívá ve spojení dvou integrátorů, přičemž jeden z nich je neinvertující ztrátový a druhý invertující bezztrátový.



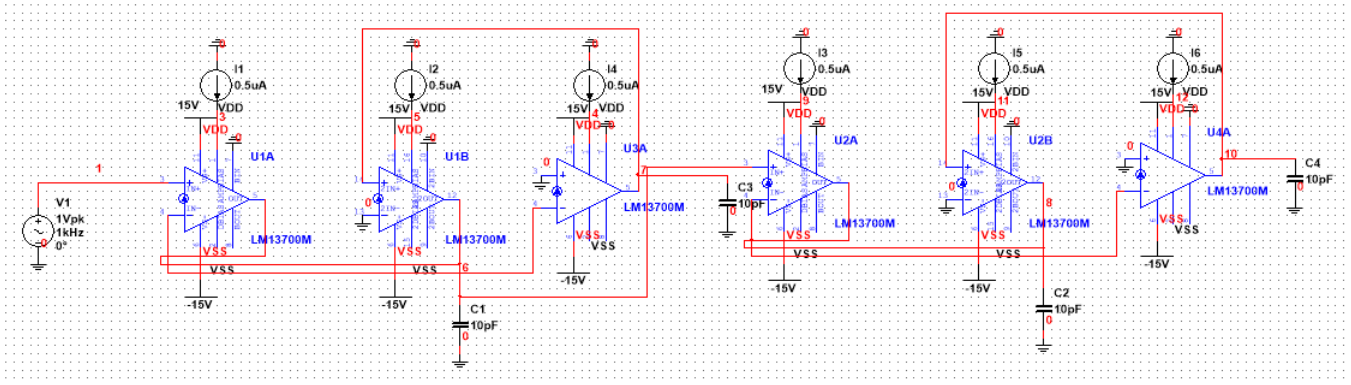
Obrázek 24: Kaskádní zapojení [5]



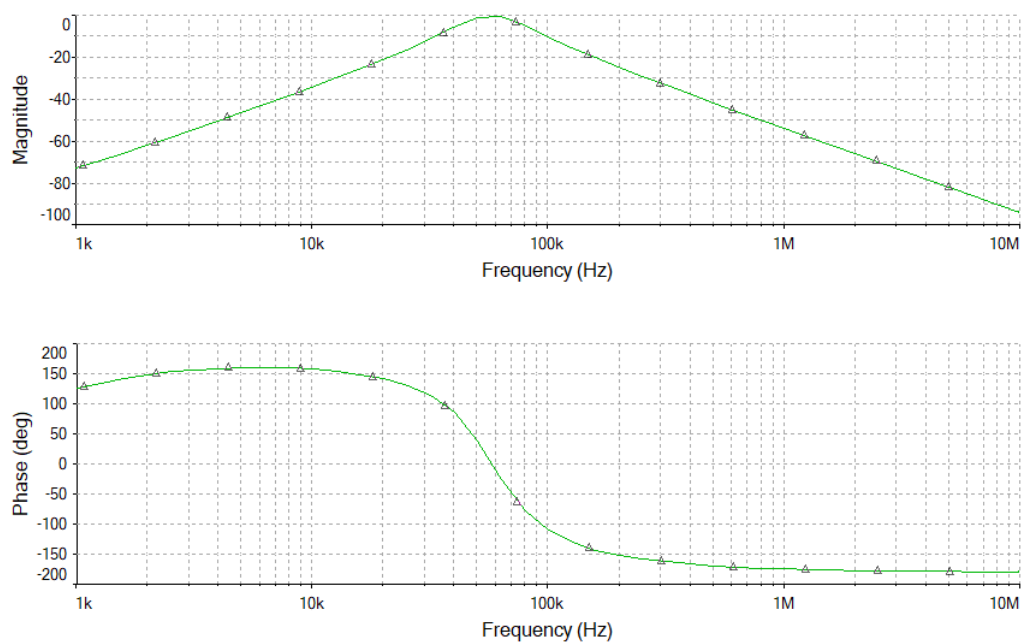
Obrázek 25: Amplitudová a fázová charakteristika DP 4. řádu



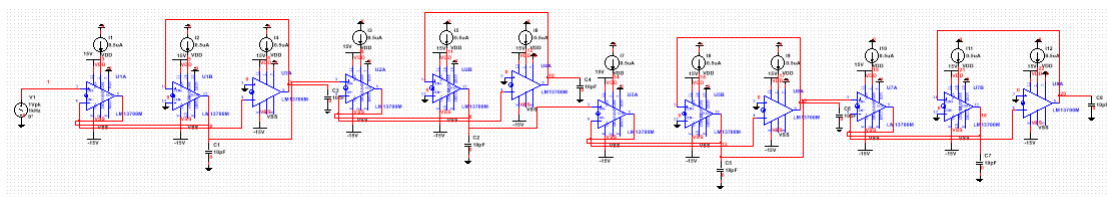
Obrázek 26: Násobení přenosů [13]



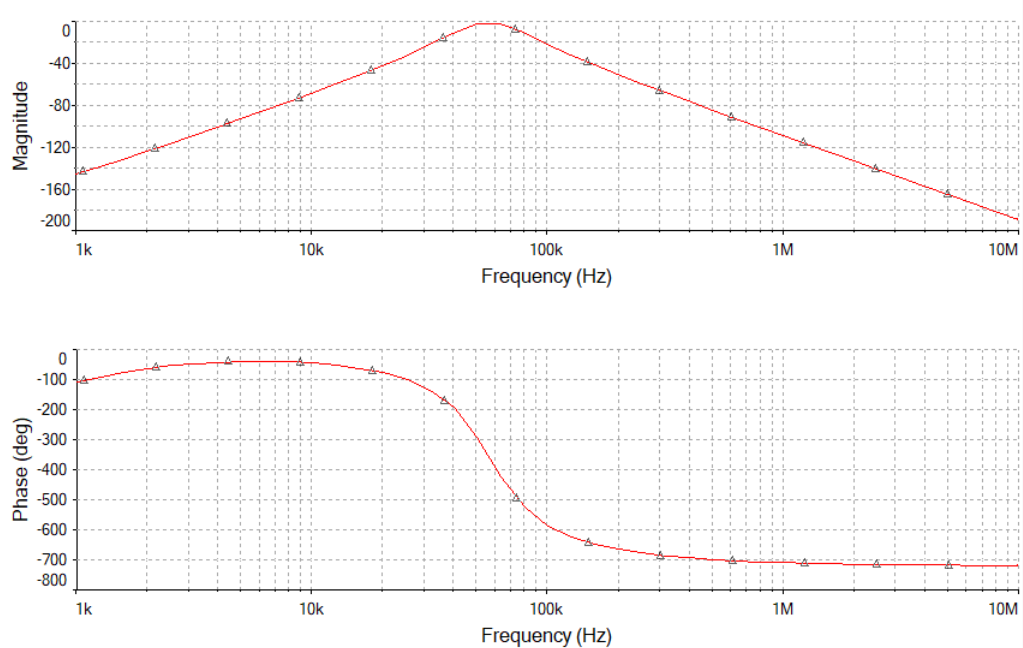
Obrázek 27: Schéma zapojení DP 4. řádu, PP 2. řádu



Obrázek 28: Amplitudová a fázová charakteristika PP 2. řádu



Obrázek 29: Schéma zapojení PP 4. řádu



Obrázek 30: Amplitudová a fázová charakteristika PP 4. řádu

5 Návrh v Maple

Pro návrh pásmové propusti 4. řádu s Caurovou aproximací typu C byly zvoleny parametry tolerančního schématu

$$f_s := 80000Hz$$

$$f_p := 100000Hz$$

$$fp := 877778Hz$$

$$fs := 100000Hz$$

$$ap := 1dB$$

$$as := 80dB,$$

kde všechny parametry musí být kladná reálná čísla a $f_s < f_p < fp < fs$ a $ap < as$. Zadána byla spodní a horní hranice nepropustného pásma f_s, fs [Hz], spodní a horní hranice propustného pásma f_p, fp [Hz], maximální útlum v propustném pásmu ap [dB] a minimální útlum v nepropustném pásmu as [dB].

$$f_s = \frac{\sqrt{\Delta fs^2 + 4f_m^2} - \Delta fs}{2} \quad (61)$$

$$f_p = \frac{\sqrt{\Delta fp^2 + 4f_m^2} - \Delta fp}{2} \quad (62)$$

$$fp = \frac{\sqrt{\Delta fp^2 + 4f_m^2} + \Delta fp}{2} \quad (63)$$

$$fs = \frac{\sqrt{\Delta fs^2 + 4f_m^2} + \Delta fs}{2} \quad (64)$$

Funkcí *BP2NLP* byla provedena transformace tolerančního schématu nesymetrické pásmové propusti (PP) na toleranční schéma normované dolní propusti (NDP). Byl spočten geometrický střed propustného pásma fm [Hz], šířka propustného pásma Δfp [Hz] a šířka nepropustného pásma Δfs [Hz].

$$fm = 141421Hz$$

$$\Delta fp = 100000Hz$$

$$\Delta fs = 877778Hz$$

Byl obdržen kmitočet hranice nepropustného pásma normované dolní propusti (NDP) Os [1/s].

$$Os = 8.777781/s$$

. Stupeň Caurovy aproximace normované dolní propusti byl určen jako $order = 4$. Dále byla funkcí *Cauer_asnew* určena nová hodnota útlumu v nepropustném pásmu NDP.

$$asnew := 105.613$$

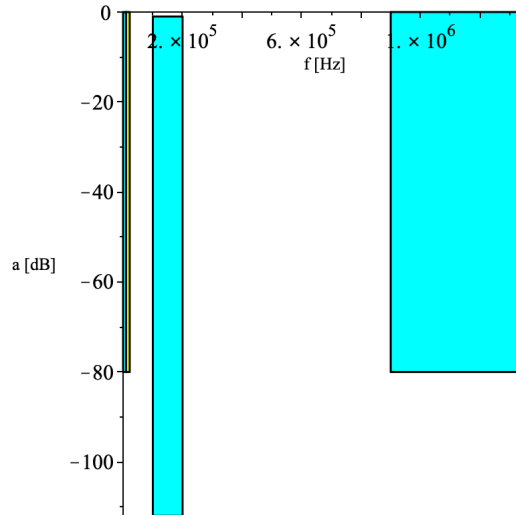
$$asnew = 10 \log_{10} \left(1 + \left(\frac{\epsilon}{kl_new} \right)^2 \right) \quad (65)$$

$$\epsilon = \sqrt{10^{0.1ap} - 1} \quad (66)$$

$$k = \frac{1}{Os} \quad (67)$$

$$kl_new = k^{order} \left(\prod_{i=1}^n JacobiCD \left(\frac{(2i-1+m) EllipticK(k)}{order}, k \right) \right)^4, \quad (68)$$

kde m je celočíselný zbytek po dělení řádu 2 a n celočíselný výsledek dělení. Jakobiho eliptických funkcí je 12 a vycházejí ze škálování na jednotkové elipse ($\cos \phi$, $\sin \phi$ se nevází k jednotkovému kruhu, ale k elipse). *JacobiCD*



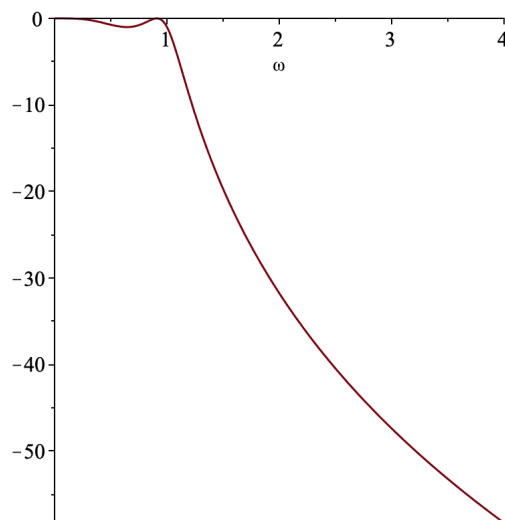
Obrázek 31: Toleranční schéma navrhované pásmové propusti

funkce je definována jako podíl cosinu Jakobiho funkce s dvěma parametry ($JacobiAM(z, k)$) a derivace této funkce podle prvního parametru z .

$$EllipticK(k) = \int_0^1 \left(\frac{1}{\sqrt{(-\alpha_1^2 + 1)}\sqrt{(-k^2 - \alpha_1^2 + 1)}} \right) d\alpha_1 \quad (69)$$

Následně byl spočten koeficient nejvyšší mocniny polynomu ve jmenovateli přenosové funkce Gc , póly a nuly přenosové funkce $poles, zeros$ pomocí funkce $CauerCPolesZeros$. Počet pólů je dán řádem filtru $order$ a počet nul pro aproximaci typu C je roven $order - 2$. Dále byla spočtena Caurerova aproximace typu C - provozní činitel přenosu G jako racionální lomená funkce $G(j\omega) = 1/H(j\omega)$, charakteristická funkce chf jako $\Phi(j\omega)$ s nulami a póly na imaginární ose a nuly přenosu. Charakteristická funkce má shodný jmenovatel s $G(j\omega)$.

$$\begin{aligned} Gc, poles, zeros &:= 376.020, \\ &[-0.475024 + 0.340009I, -0.475024 - 0.340009I, -0.162709 + 0.982758I, -0.162709 - 0.982758I], \\ &[11.2840I, -11.2840I], \\ G, chf, zer &:= \frac{376.020p^4 + 479.601p^3 + 617.689p^2 + 396.239p + 127.328}{p^2 + 127.329}, \frac{(376.020p^2 + 311.716)p^2}{p^2 + 127.329}, [11.2840I, -11.2840I] \end{aligned}$$



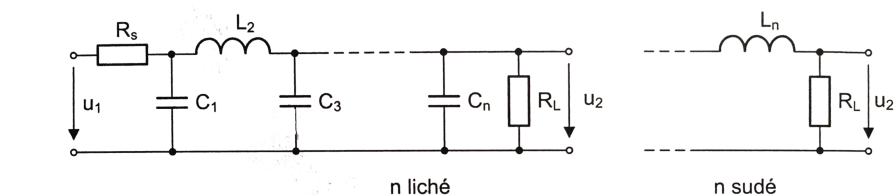
Obrázek 32: Modulová frekvenční charakteristika NDP

Charakteristika byla vykreslena z přenosu funkcí $MagnitudeHdB$, která vypočte modul přenosu podle předpisu $|H(j\omega)|$.

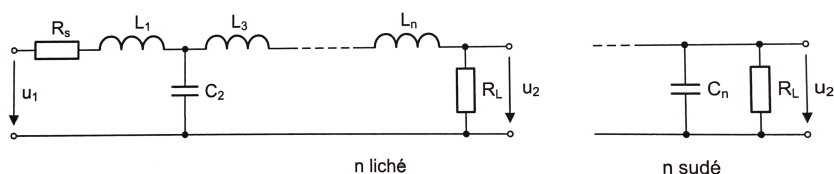
5.1 Příčkové LC filtry

Pasivní dolní propust je realizována zapojením induktoru ke vstupnímu napětí a k této větvi je následně zapojen paralelně rezistor. Pasivní horní propust má ke vstupu připojený sériově rezistor a poté k této větvi paralelně induktor.

K realizaci filtrů vyšších řádů se užívají π nebo T články s LC prvky. Při návrhu filtru musí být zohledněn vnitřní odpor zdroje R_s a zatěžovací odpor R_L . LC filtry jsou tedy dvojité zakončeny. Indukčnosti a kapacity prvků se určí z rovnic pro normované kapacity a indukčnosti. Normované hodnoty budou vypočteny pro mezní kmitočet $\omega_c = 1/\sqrt{LC}$ a pro zatěžovací odpor R_L . Hodnoty prvků lze pro požadovanou aproximaci odečíst z tabulek.



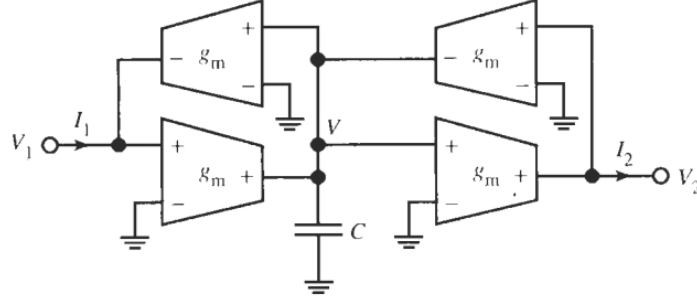
Obrázek 33: Pasivní dolní propust n-tého řádu s π články [14]



Obrázek 34: Pasivní dolní propust n-tého řádu s T články [14]

5.2 Gyrátory

K převodu induktoru na zapojení s kapacitorem byla použita struktura označovaná jako gyrátor. Jde o náhradu původního obvodu s induktorem vhodným uspořádáním rezistorů a kapacitorů tak, že výsledná impedance vypadá jako induktor. Gyrátor nelze dobře realizovat s obyčejnými operačními zesilovači, běžně se používají General Impedance Converters (GIC). Převod induktoru na jiné zapojení s ekvivalentní impedancí má praktické využití v integrovaných obvodech, kde jsou kapacitory preferovány nad induktory kvůli malým rozměrům. Gyrátor je principiálně spojení invertujícího a neinvertujícího napětím řízeného zdroje proudu, a proto ho lze realizovat snadno s transkonduktančními zesilovači. Na obrázku 35 jsou znázorněny dva gyrátory s kapacitorem. Obvodovou analýzou v uzlu V byla obdržena rovnice



Obrázek 35: Neuzemněný induktor realizovaný kapacitorem a dvěma gyrátory [12]

$$pCV = g_m V_1 - g_m V_2 \quad (70)$$

a dva proudy na výstupu

$$I_1 = I_2 = g_m V. \quad (71)$$

Zkombinování rovnic a eliminace V vede k rovnici neuzemněného induktoru mezi napětími V_1 a V_2 .

$$I_1 = I_2 = \frac{g_m^2}{pC} (V_1 - V_2) = \frac{1}{pL} (V_1 - V_2) \quad (72)$$

Z rovnice lze snadno odvodit, že kapacita kondenzátoru použitého při zapojení induktoru s OTA je rovna $C_L = Lg_m^2$.

5.3 Výpočet prvků LC filtru

Funkcí *DroppNLP* byly vypočteny prvky LC příčkového filtru typu normovaná dolní propust (NDP). Zakončení bylo zvoleno standardní (common), odpory o hodnotě 1 Ω , směr zpracování od posledního prvku (rear), s T strukturou (začíná zepředu podélným induktorem). Standardní (common) zakončení je oboustranné ($R_1 \neq 0, R_z \neq \infty$). Výstupem funkce je LC struktura s orientací prvků ve větvi podélně (direct) nebo příčně (shunt).

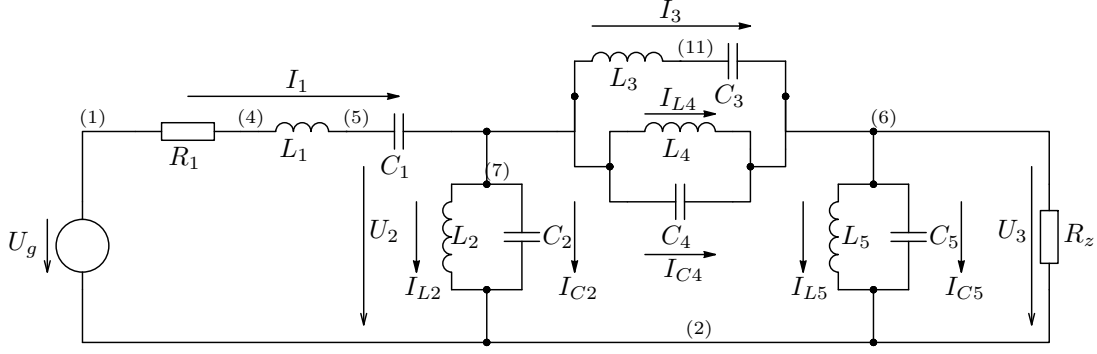
$$\text{block}(1), [\text{orientation} = \text{direct}, \text{elements} = L1 = -0.40652, Z = pL1]$$

$$\text{block}(2), [\text{orientation} = \text{shunt}, \text{elements} = C1 = 2.4732, Z = \frac{1}{pC1}]$$

$$\text{block}(3), [\text{orientation} = \text{direct}, \text{elements} = C1 = 0.0081309, L1 = 0.96591, Z = \frac{1}{\frac{1}{pL1} + pC1}]$$

$$\text{block}(4), [\text{orientation} = \text{shunt}, \text{elements} = C1 = 1.5489, Z = \frac{1}{pC1}]$$

Vygenerovaná struktura je popsána na obrázku 36. Analýzou LC struktury z Maplu byly obdrženy obvodové



Obrázek 36: Schéma LC příčkové struktury

rovnice, kde R je volitelný (fiktivní) rezistor:

$$I_1 = \frac{1}{R_1 + pL_1 + \frac{1}{pC_1}}(U_G - U_2) \quad (73)$$

$$v_1 = \frac{R}{R_1 + pL_1 + \frac{1}{pC_1}}(U_G - U_2) \quad (74)$$

$$U_2 = \frac{1}{\frac{1}{pL_2} + pC_2}(I_1 - I_3 - I_{L4} - pC_4 v_{L4}) \quad (75)$$

$$U_2 = \frac{1}{\frac{R}{pL_2} + RpC_2}(v_1 - v_{L3} - v_{L4} - RpC_4 U_{L4}) \quad (76)$$

$$I_3 = \frac{1}{pL_3 + \frac{1}{pC_3}}(U_2 - U_3) \quad (77)$$

$$v_{L3} = \frac{R}{pL_3 + \frac{1}{pC_3}}(U_2 - U_3) \quad (78)$$

$$v_{L4} = \frac{1}{\frac{1}{pL_4} + pC_4}(I_1 - I_{L2} - pC_2 U_2 - I_3 - pC_4(U_2 - U_3)) \quad (79)$$

$$v_{L4} = \frac{1}{\frac{R}{pL_4} + RpC_4}(v_1 - v_{L2} - RpC_2 U_2 - v_{L3} - RpC_4(U_2 - U_3)) \quad (80)$$

$$U_3 = \frac{1}{\frac{1}{R_z} + pC_5 + \frac{1}{pL_5}}(I_1 - I_{L2} - pC_2 U_2) \quad (81)$$

$$U_3 = \frac{1}{\frac{R}{R_z} + RpC_5 + \frac{R}{pL_5}}(v_1 - U_2 - RpC_2 U_2). \quad (82)$$

To odpovídá realizační struktuře s pěti bloky o přenosech H_1, \dots, H_5

$$H_1 = \frac{R}{R_1 + pL_1 + \frac{1}{pC_1}} \quad (83)$$

$$H_2 = \frac{1}{\frac{R}{pL_2} + RpC_2} \quad (84)$$

$$H_3 = \frac{R}{pL_3 + \frac{1}{pC_3}} \quad (85)$$

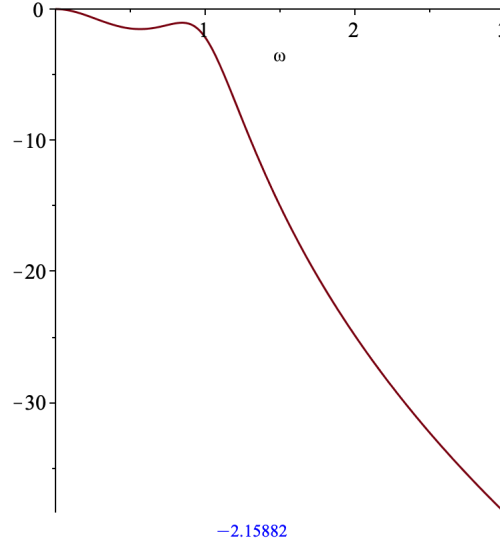
$$H_4 = \frac{1}{\frac{R}{pL_4} + RpC_4} \quad (86)$$

$$H_5 = \frac{1}{\frac{R}{R_z} + RpC_5 + \frac{R}{pL_5}}. \quad (87)$$

Uvedené přenosy budou použity v analýze Pracanem. Přenosová funkce pasivních a aktivních struktur filtru byla spočtena funkcí *MakeH*. Byl spočten napěťový i výkonový přenos.

$$H_NLPV := \frac{p^2 + 127.329}{-193.159p^4 + 352.072p^3 + 286.065p^2 + 582.791p + 253.653}$$

$$H_NLP := \frac{p^2 + 127.330}{-96.9631p^4 + 176.735p^3 + 143.601p^2 + 292.553p + 127.330}$$



Obrázek 37: Modulová frekvenční charakteristika NDP - LC příčkový filtr

Hodnota přenosové funkce v 1 byla vyhodnocena jako -2.15882 .

Byla provedena transformace hodnot prvků normované dolní propusti (NDP) na pásmovou propust (PP). Zakoňčovací rezistor byl zvolen 1Ω , další dva parametry funkce značí spodní a horní hranici propustného pásma.

$$block(1), [Z = pL1 + \frac{1}{pC1}, orientation = direct, elements = C1 = -7.8301 * 10^{-6}, L1 = -3.2350 * 10^{-7}]$$

$$block(2), [Z = \frac{1}{\frac{1}{pL1} + pC1}, orientation = shunt, elements = C1 = 1.9681 * 10^{-6}, L1 = 1.2871 * 10^{-6}]$$

$$block(3), [Z = \frac{1}{pC1 + \frac{1}{\frac{1}{pL1} + \frac{1}{pL2 + \frac{1}{pC2}}}}, orientation = direct, elements = C1 = 6.4704 * 10^{-9},$$

$$C2 = 3.2954 * 10^{-6}, L1 = 3.9148 * 10^{-4}, L2 = 7.6864 * 10^{-7}]$$

$$block(4), [Z = \frac{1}{\frac{1}{pL1} + pC1}, orientation = shunt, elements = C1 = 1.2326 * 10^{-6}, L1 = 2.0551 * 10^{-6}]$$

Byly nastaveny jakosti cívek v LC příčkové struktuře na konečnou hodnotu. Funkce *MakeRealL* zařadí do výsledné LC příčkové struktury sériové rezistory k induktorům podle zadaného činitele jakosti Q a zadaného kmitočtu (ten odpovídá u pásmové propusti geometrickému středu propustného pásma - nebo je možno zadat obě hranice propustného pásma). Výpočet sériového odporu je proveden podle předpisu $R_s = L1 \cdot 2\pi f / Q$.

$$block(1), [Z = pL1 + Rs1 + \frac{1}{pC1}, orientation = direct, elements = C1 = -7.8301 * 10^{-6}, L1 = -3.2350 * 10^{-7},$$

$$Rs1 = -0.57490 * 10^{-2}]$$

$$block(2), [Z = \frac{1}{\frac{1}{pL1 + Rs1} + pC1}, orientation = shunt, elements = C1 = 1.9681 * 10^{-6}, L1 = 1.2871 * 10^{-6},$$

$$Rs1 = 0.22873 * 10^{-1}]$$

$$block(3), [Z = \frac{1}{pC1 + \frac{1}{\frac{1}{pL1 + Rs1} + \frac{1}{pL2 + Rs2 + \frac{1}{pC2}}}}, orientation = direct, elements = C1 = 6.4704 * 10^{-9},$$

$$C2 = 3.2954 * 10^{-6}, L1 = 0.39148 * 10^{-3}, L2 = 7.6864 * 10^{-7}, Rs1 = 6.9572, Rs2 = 0.13660 * 10^{-1}]$$

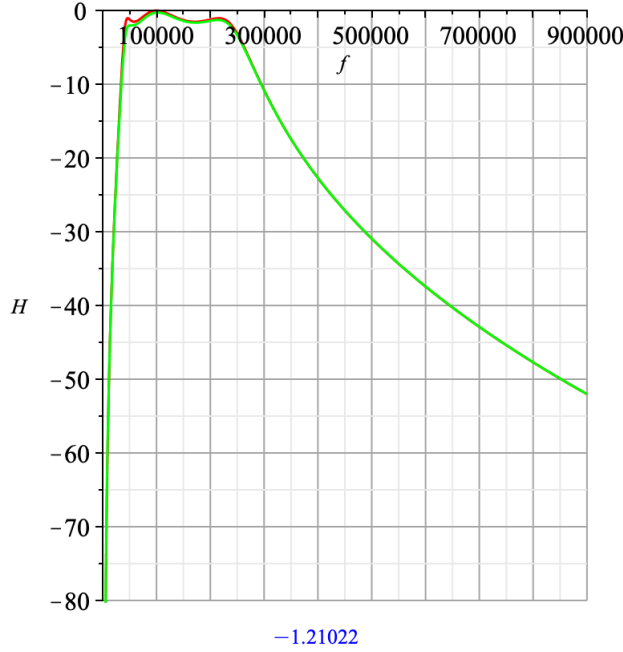
$$block(4), [Z = \frac{1}{\frac{1}{pL1 + Rs1} + pC1}, orientation = shunt, elements = C1 = 1.2326 * 10^{-6}, L1 = 2.0551 * 10^{-6},$$

$$Rs1 = 0.36522 * 10^{-1}]$$

Byl spočten přenos pro LC strukturu bez a s přidáními sériovými rezistory. Pro oba přenosy byla vykreslena modulová frekvenční charakteristika.

$$H_{BP} := \frac{p^6 + 2.01858 \cdot 10^{14} p^4 + 1.55854 \cdot 10^{23} p^2}{-6.1402610 \cdot 10^{-11} p^8 + 0.000140640 p^7 + 46.6376 p^6 + 5.34196 \cdot 10^8 p^5 + 2.57033 \cdot 10^{14} p^4 + 2.1089310^{20} p^3 + 7.26886 \cdot 10^{24} p^2 + 8.65337 \cdot 10^{30} p - 1.49149 \cdot 10^{36}}$$

$$H_{BPQ} := \frac{p^7 + 71085.7 p^6 + 2.01860 \cdot 10^{14} p^5 + 1.07620 \cdot 10^{19} p^4 + 3.47110 \cdot 10^{23} p^3 + 6.67244 \cdot 10^{27} p^2 + 4.92223 \cdot 10^{31} p}{-6.14027 \cdot 10^{-11} p^9 + 0.000135185 p^8 + 55.5676 p^7 + 5.37714 \cdot 10^8 p^6 + 2.85360 \cdot 10^{14} p^5 + 2.25089 \cdot 10^{20} p^4 + 1.49149 \cdot 10^{25} p^3 + 8.97641 \cdot 10^{30} p^2 - 1.38919 \cdot 10^{36} p - 2.74611 \cdot 10^{40}}$$



Obrázek 38: Modulová frekvenční charakteristika LC struktury (červená) a LC struktury s konečnou hodnotou jakostí cívek (zelená)

Vyčíslením v $200000 \cdot 2\pi$ Hz byl obdržen útlum 1.21022 dB.

Odnormované prvky byly vyčísleny následovně:

$$\begin{aligned} ele_{BP} := C1 &= -7.83010 \cdot 10^{-6}, C2 = 1.96808 \cdot 10^{-6}, C3 = 3.29545 \cdot 10^{-6}, C4 = 6.47035 \cdot 10^{-9}, \\ C5 &= 1.23258 \cdot 10^{-6}, L1 = -3.235 \cdot 10^{-7}, L2 = 1.28706 \cdot 10^{-6}, L3 = 7.68645 \cdot 10^{-7}, L4 = 0.391484 \cdot 10^{-3}, \\ L5 &= 2.05508 \cdot 10^{-6}, R1 = 1, Rz = 1.00796 \end{aligned}$$

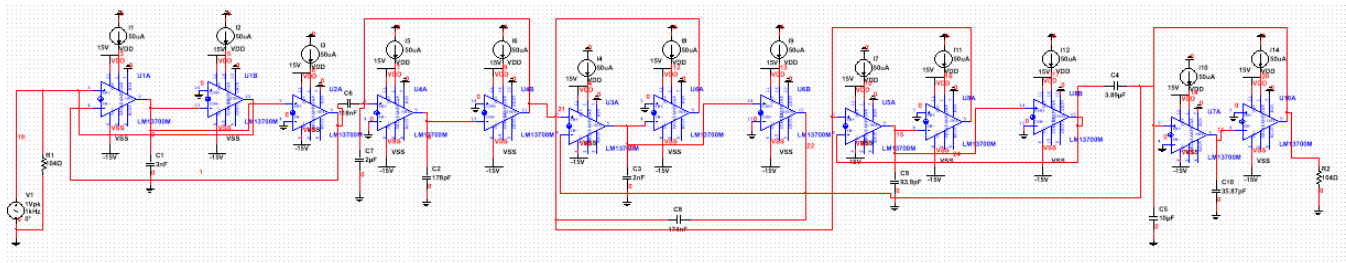
Využitím poznatků ze sekce 5.2 byly s uvažováním minimální transkonduktance z datasheetu LM13700 ($g_m = 9600 \mu S$) získány kapacity $C_{L1} = 3.08002$ nF, $C_{L2} = 17.8354$ nF, $C_{L3} = 938.613$ nF, $C_{L4} = 2.10114$ nF, $C_{L5} = 358.667$ nF. Převrácenou hodnotou transkonduktance byly vypočteny frekvenčně a impedančně odnormované odpory

$$R_N = R_1 = R_z = \frac{1}{g_m} = 104.16667 \Omega. \quad (88)$$

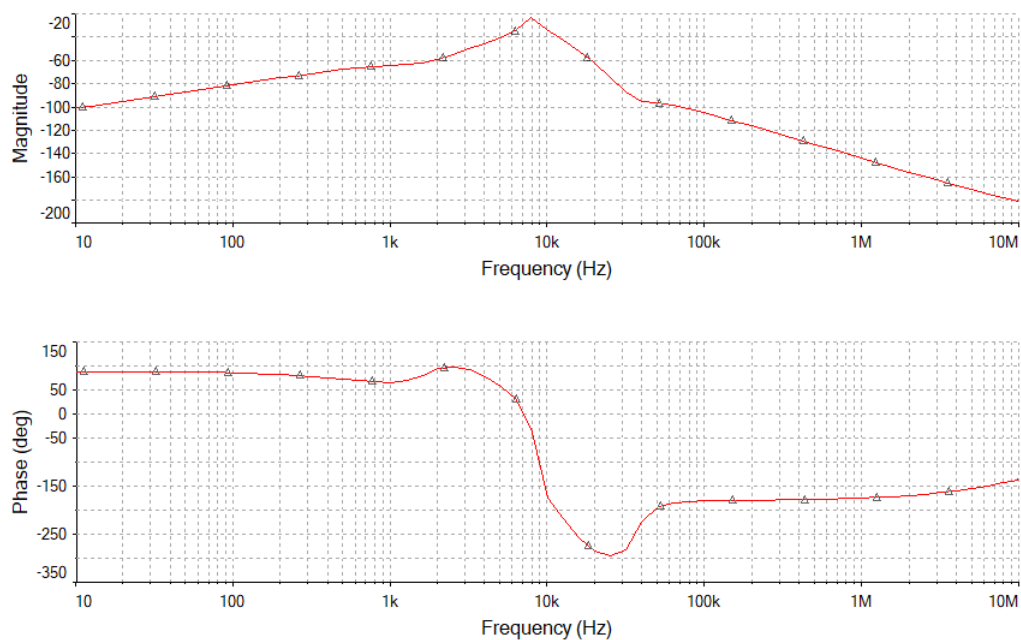
Kapacity vyšly již se Syntfilu $C1 = -7.8301 \mu F$, $C2 = 1.96808 \mu F$, $C3 = 3.29545 \mu F$, $C4 = 6.47035$ nF, $C5 = 1.23258 \mu F$.

5.4 Návrh funkční simulací

Zapojení s OTA vychází z již uvedených principů v Sekci 3. K simulaci byly použity vypočtené hodnoty ze sekce 5.3. Mezní kmitočet lze přeladit změnou vstupního proudu. Bylo použito zapojení se vstupním odporem R_0 řazeným paralelně ke zdroji (vhodnější pro funkční simulaci - Schaumann (2001) str. 639). Napětí na zdroji poté bude V_0/R_0 .



Obrázek 39: Výsledné schéma



Obrázek 40: Amplitudová a fázová charakteristika PP 4. řádu

6 Praktická část

V KiCadu byla vytvořena DPS s hodnotami součástek vypočtenými v Maplu.

7 Závěr

Cílem práce bylo navrhnout pásmovou propust 4. řádu s Cauerovou aproximací. Po seznámení s principy OTA 2.2 a náhradou prvků v obvodech s nimi 3 byla provedena simulace. V sekci 4.1 bylo v MultiSimu realizováno zapojení filtru typu dolní propust 2. řádu s poklesem 40 dB/dek, pásmová propust 1. řádu s poklesem 20 dB/-dek. Poté byl kaskádním zapojením obdržén filtr typu dolní propust 4. řádu s poklesem 80 dB/dek, pásmová propust 2. řádu s poklesem 40 dB/dek. Dalším kaskádním blokem byla obdržena požadovaná pásmová propust 4. řádu s poklesem 80 dB/dek.

V sekci 5 byla knihovnou Syntfil provedena matematická syntéza filtru a zapojení bylo převedeno na LC příčkovou strukturu. Mezní kmitočet a parametry propustného a zádržného pásma byly zvoleny v řádech stovek kHz. Mezikrokem byl převod pásmové propusti na normovanou dolní propust. Pro LC strukturu byly obdrženy odnormované hodnoty prvků, které byly dosazeny do zapojení s OTA a byla provedena simulace s vypočtenými prvky (sekce ??). Protože výsledné zapojení ze sekce 4.1 obsahovalo 8 kapacitorů a syntézou přes LC příčkový filtr a následným převodem indukčností na kapacity bylo získáno 10 kapacitorů, byla zvolena alternativní metoda spočívající v náhradě indukčností v LC struktuře gyrátory. V simulaci vycházející z LC struktury byl vstupní odpor řazen paralelně ke zdroji. Je nutné dbát na to, že toto zapojení obsahuje neuzemněné kapacity a nebude vhodné pro krátké vlny (frekvence v řádech MHz, což odpovídá vlnovým délkám 10 – 100 m).

Dalším krokem byl návrh v KiCadu (sekce 6), praktická realizace a odzkoušení navrhnutého obvodu.

Pro lepší návrh by bylo vhodné třeba analyzovat výslednou strukturu popsanou přenosy gyrátorů (sekce 5) a získat z ní zapojení s OTA, nebo také analyzovat výsledný obvod knihovnou Pracan.

Reference

- [1] KAŠPER, Ladislav. *Návrh kmitočtového filtru* [online]. Ostrava, 2012 [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/92901/KAS279_FEI_N2647_2601T013_2012.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Diplomová práce. VŠB-TU Ostrava, FEL. Strana 18.
- [2] *High-pass filtering pre-processing before computing audio features*. Stack Exchange Inc [online]. 2019 [cit. 2019-04-22]. Dostupné z: <https://dsp.stackexchange.com/questions/27586/high-pass-filtering-pre-processing-before-computing-audio-features>
- [3] MARTINEK, Pravoslav, Petr BOREŠ a Jiří HOSPODKA. *Elektrické filtry*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN 80-01-02765-1. Strana 74, obrázek 4.17. Strana 141, obrázek 5.43.
- [4] MICHAL, Vratislav. *Vybrané vlastnosti obvodů pracujících v proudovém módu a napěťovém módu* [online]. Brno, 2017 [cit. 2019-03-30]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/43256146-Vybrane-vlastnosti-obvodu-pracujicich-v-proudovem-modu-a-napetovem-modu.html>. Článek. Brno University of Technology. Strana 5.
- [5] HOSPODKA, Jiří. *Úvod do analogových filtrů* [online]. Praha, 2018 [cit. 2019-03-30]. Dostupné z: <https://moodle.fel.cvut.cz/course/view.php?id=1434>. Přednáška. ČVUT FEL. Strana 21, 24.
- [6] SMITH, K.C., SEDRA, A.S. *The current conveyor: a new circuit building block*. New York, 1968. Článek. IEEE Proc. Vol. 56, no. 3. Strana 1368 - 1369.
- [7] SMITH, K.C., SEDRA, A.S. *A second generation current conveyor and its application*. New York, 1970. Článek. IEEE Trans., CT-17. Strana 132 - 134.
- [8] SHAKTOUR, Mahmoud. *Nekonvenční obvodové prvky pro návrh příčkových filtrů* [online]. Brno, 2010 [cit. 2019-10-25]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=35975. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Dalibor Bielek. Strana 8, obrázek 3-1 (a).
- [9] *Transconductance Amplifiers* [online]. 2019 [cit. 2019-03-30]. Dostupné z: https://cz.mouser.com/Semiconductors/Integrated-Circuits-ICs/Amplifier-ICs/Transconductance-Amplifiers/_/N-6j731?P=1y95od0
- [10] LM13700: Dual Operational Transconductance Amplifiers With Linearizing Diodes and Buffers. In: *Texas Instruments* [online]. Dallas, Texas: Texas Instruments Incorporated, 2018 [cit. 2019-03-30]. Dostupné z: www.ti.com/lit/ds/symlink/lm13700.pdf Strana 1. Strana 9, obrázek 16.
- [11] Low-pass filter. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-03-30]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Low-pass_filter
- [12] SCHAUMANN, Rolf a Mac E. Van VALKENBURG. *Design of Analog Filters*. New York: Oxford University Press, 2001. ISBN 0195118774. Obrázek 4-13, 4-35 a), b), 4-36 a), b), 16-2 a), b).
- [13] RAMSDEN, Ed. *An Introduction to Analog Filters*. Sensors Online [online]. 3 Speen Street, Suite 300, Framingham, MA 01701: Questex, 2019, 1/7/2001 [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://www.sensorsmag.com/components/introduction-to-analog-filters>
- [14] VEDRAL, Josef a Jakub SVATOŠ. *Zpracování a digitalizace analogových signálů v měřicí technice*. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2018. ISBN 978-80-01-06424-5. Strana 136, obrázek 5.3.9, 5.3.10.

Seznam příložených souborů na CD

readme.txt.....	soubor s popisem obsahu CD
Doc	dokumentace
└─ lm13700.pdf	datasheet k LM13700
Images.....	obrázky použité v textu
KiCad.....	adresář se schématem DPS
LaTeX.....	adresář s \LaTeX zdrojovými kódy
Maple	adresář s Maple skriptem
└─ bandpass.mw.....	Maple skript
Multisim	soubory se schématy v Multisimu
└─ BP4.ms14	pásmová propust 4. řádu
└─ LP2.ms14	dolní propust 2. řádu
└─ LP4BP2.ms14	dolní propust 4. řádu, pásmová propust 2. řádu
└─ MapleOutput.ms14	výsledné schéma s výsledky z Maplu
Thesis Text.....	adresář s textem práce
└─ BP_Pacalova_Klara_2019.pdf	práce v PDF formátu