

**FAKULTA  
ELEKTROTECHNICKÁ  
ČVUT V PRAZE**

# Analogový přeladitelný filtr se zesilovači OTA

**Klára Pacalová**

Bakalářská práce

Vedoucí práce: Doc. Dr. Ing. Jiří Hospodka  
Katedra teorie obvodů  
Fakulta elektrotechnická  
České vysoké učení technické v Praze  
Technická 2  
160 00 Praha 6  
Česká republika

Praha, Prosinec 2019

## Abstrakt

Cílem práce je navrhnout zapojení analogového přeladitelného filtru se zesilovači OTA. Filtr je zvolen typu pásmová propust 4. řádu s Cauerovou aproximací.

**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 Caue approximation.

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

## Zkratky

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
GIC	general impedance converter
HP	horní propust
HP	high-pass
LP	low-pass
OTA	operational transconductance amplifier
PP	pásmová propust
PZ	pásmová zádrž
SISO	single-input, single-output

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>7</b>
1.1	Analogové filtry	7
1.2	Butterworthova aproximace	8
1.3	Čebyševova aproximace	8
1.3.1	Typ I	8
1.3.2	Typ II	9
1.4	Besselova aproximace	9
1.5	Cauerova (eliptická) aproximace	9
1.5.1	Cauerova (eliptická) aproximace typu A	9
1.5.2	Cauerova (eliptická) aproximace typu B	10
1.5.3	Cauerova (eliptická) aproximace typu C	10
1.6	Srovnání typů aproximací	10
<b>2</b>	<b>Transkonduktanční zesilovače (OTA)</b>	<b>11</b>
2.1	Current Conveyor of Second Generation (CCII) s OTA	12
2.2	Integrované obvody s OTA	14
<b>3</b>	<b>Náhrada prvků</b>	<b>15</b>
3.1	Odvození DP 2. řádu	16
<b>4</b>	<b>Simulace</b>	<b>18</b>
4.1	Dolní propust 2. řádu	18
4.2	Dolní propust 4. řádu	18
4.3	Pásmová propust 2. řádu	19
4.4	Pásmová propust 4. řádu	19
<b>5</b>	<b>Návrh v Maple</b>	<b>20</b>
5.1	Příčkové LC filtry	22
5.2	Gyrátory	24
5.3	Výpočet prvků LC filtru	25
5.4	Návrh funkční simulací	30
<b>6</b>	<b>Závěr</b>	<b>31</b>

## Seznam obrázků

1	Toleranční schéma pro a) dolní propust (DP), b) horní propust (HP), c) pásmovou propust (PP) a d) pásmovou zádrž (PZ)[1]	7
2	Typy aproximací (DP)[2]	8
3	OTA - schematické značky [4]	11
4	Linearizovaný model reálného OTA [5]	11
5	OTA-C [5]	12
6	Ztrátový OTA-C [5]	12
7	CCII symbol [8]	12
8	CCII s $\pm$ výstupem založený na OTA [8]	13
9	Single input single output OTA (SISO) založený na CCII [8]	13
10	fully differential OTA (DIDO) založený na CCII a napěťovém bufferu [8]	14
11	Konfigurace pinů na LM13700M [10]	15
12	Vnitřní schéma OTA [10]	16
13	Náhradní obvod pro uzemněný rezistor [12]	16
14	Náhradní obvod pro indukčnost [12]	17
15	Náhradní obvod pro neuzemněnou indukčnost pro $g_{m1} = g_{m2}$ [12]	17
16	Dolní propust 2. řádu [11]	18
17	Schéma zapojení DP 2. řádu	18
18	Amplitudová a fázová charakteristika DP 2. řádu, PP	19
19	Kaskádní zapojení [5]	19
20	Schéma zapojení DP 4. řádu	20
21	Amplitudová a fázová charakteristika DP 4. řádu	20
22	Násobení přenosů [13]	21
23	Schéma zapojení PP 2. řádu	21
24	Amplitudová a fázová charakteristika PP 2. řádu	22
25	Schéma zapojení PP 4. řádu	22
26	Amplitudová a fázová charakteristika PP 4. řádu	23
27	Toleranční schéma navrhované pásmové propusti	24
28	Modulová frekvenční charakteristika NDP	24
29	Pasivní dolní propust n-tého řádu s $\pi$ články [14]	25
30	Pasivní dolní propust n-tého řádu s T články [14]	25
31	Neuzemněný induktor realizovaný kapacitorem a dvěma gyrátory [12]	26
32	Schéma LC příčkové struktury	26
33	Modulová frekvenční charakteristika NDP - LC příčkový filtr	27
34	Modulová frekvenční charakteristika LC struktury (červená) a LC struktury s konečnou hodnotou jakostí cívek (zelená)	28
35	Výsledné schéma	30
36	Amplitudová a fázová charakteristika PP 4. řádu	30

## Seznam tabulek

1	Přehled aproximací podle tvaru aproximační funkce v propustném i nepropustném pásmu [3] . .	10
2	Porovnání integrovaných obvodů s jedním OTA [9] . . . . .	14
3	Porovnání integrovaných obvodů se dvěma OTA [9] . . . . .	15

# 1 Úvod

## 1.1 Analogové filtry

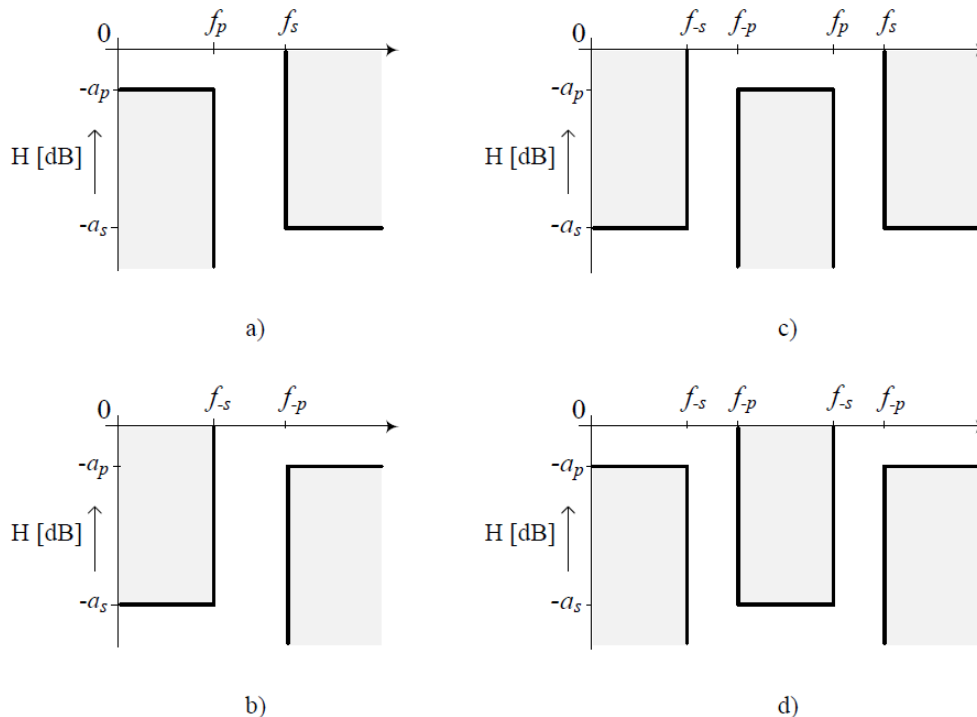
Filtry jsou určeny k potlačení nebo zvýraznění určité části kmitočtového spektra signálu. Jsou to obvody s kmitočtově závislou přenosovou funkcí (pro napěťový přenos  $H_s(j\omega) = U_{out}(j\omega)/U_{in}(j\omega)$ ). Základní rozdělení je na dolní propust (DP, anglicky *low-pass* - LP), horní propust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

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 zadrž 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



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

efektivní reprodukci zvuku reproduktory, k redukci okolního rušení - vysílače blokují harmonické frekvence, které interferují. Také v obvodech rekonstrukce signálu u D/A převodníků, k předvzorkování u A/D převodníku nebo jako anti-aliasing filtry.

Obecná přenosová funkce filtru typu dolní propust je

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

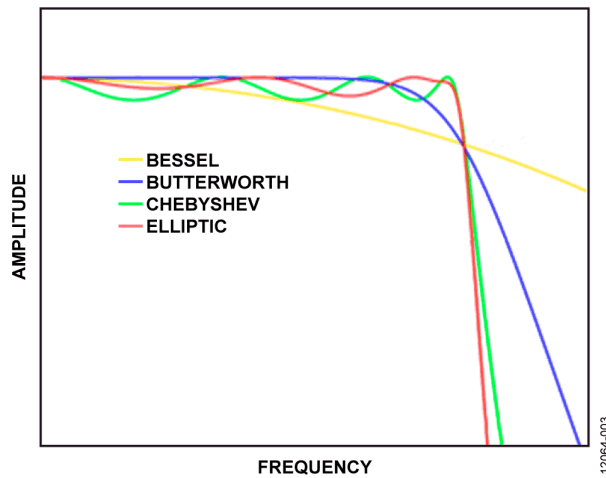
kde  $n$  je řád filtru.

Obecná přenosová funkce filtru typu horní propust je

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

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.



Obrázek 2: Typy aproximací (DP)[2]

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

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

kde  $\epsilon$  je poměrné zvlnění kmitočtové charakteristiky v propustném pásmu (*faktor zvlnění*),  $n$  je řád filtru a  $\omega_c$  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

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



kde  $T_n$  je Čebyševův polynom,  $\epsilon$  je poměrné zvlnění,  $n$  je řád filtru a  $\omega_c$  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 Čebeševova 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 zádržném ano. Zesílení je definováno jako

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

kde  $T_n$  je Čebyševův polynom,  $\epsilon$  je poměrné zvlnění,  $n$  je řád filtru a  $\omega_c$  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

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

kde  $\Phi_n$  je Besselův polynom a  $\omega_c$  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

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

kde  $\epsilon$  je faktor zvlnění,  $R_n$  eliptická racionální funkce  $n$ -tého řádu,  $\zeta$  selektivní faktor a  $\omega_c$  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 %  $\omega_c$  - 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.

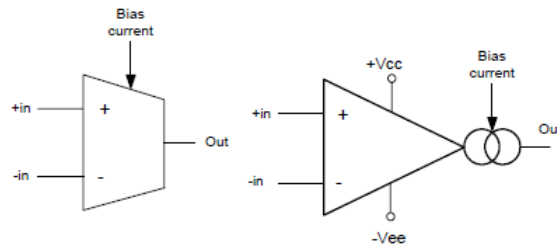
Pro nízké frekvence se ke splnění těchto požadavků používají obvody se spínanými kapacitami (SC). Přepínaný kapacitor se chová jako rezistor, tudíž časová konstanta RC je definována poměrem kapacitorů a hodinovou (CLK) frekvencí, se kterou jsou přepínány. Pro vysokofrekvenční aplikace (až v řádu gigahertz)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

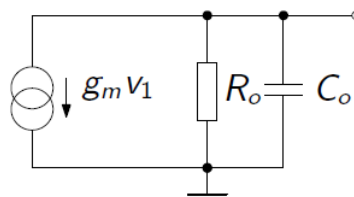
Transkonduktanční zesilovače (označují se též jako OTA (*Operational Transconductance Amplifiers*)) jsou napětím řízené zesilovače s proudovým výstupem - zdroje proudu

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

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]

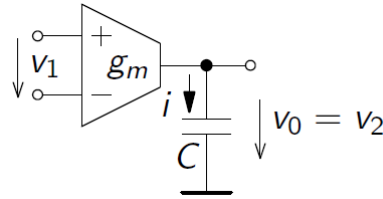
$$u_{out} = R_z g_m(u_+ - u_-) = G_0(u_+ - u_-), \quad (13)$$

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

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

a napětím na výstupu

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

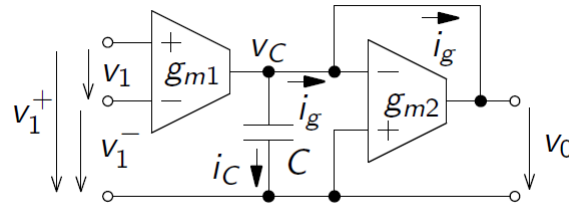


Obrázek 5: OTA-C [5]

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

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.

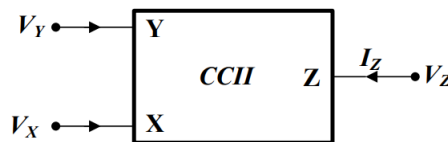
$$v_0(t) = \frac{g_{m1}}{sC + g_{m2}}(v_1^+ - v_1^-) \quad (16)$$



Obrázek 6: Ztrátový OTA-C [5]

## 2.1 Current Conveyor of Second Generation (CCII) s OTA

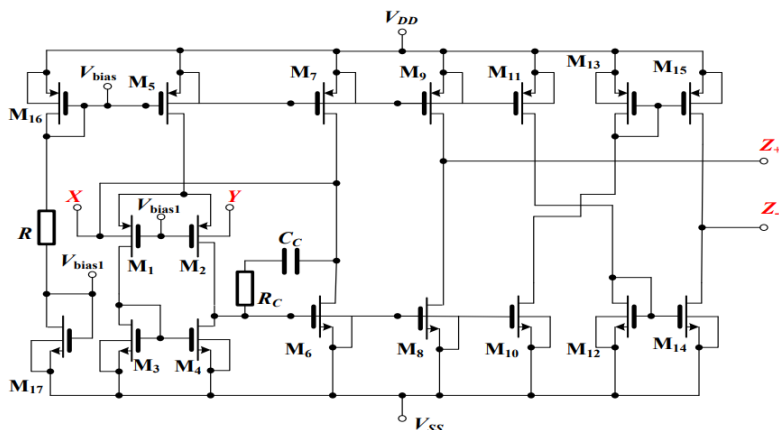
Jeden z nejzákladnějších bloků v oblasti analogov obvodů v proudovém módu je *current conveyor* (CC). Princip CC první generace byl popsán v roce 1968 (K. C. Smith, A. S. Sedra [6]). CCI byl následně nahrazen univerzálnější druhou generací v roce 1970 (CCII)[7]. Obvody s CC se používaly především v zapojeních s bipolárními tranzistory kvůli jejich vysoké transkonduktanci (v porovnání s CMOS). Jsou to operační zesilovače s proudovou zpětnou vazbou (např. MAX477, MAX4112). *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. Vstupní impedance na vstupu Y je



Obrázek 7: CCII symbol [8]

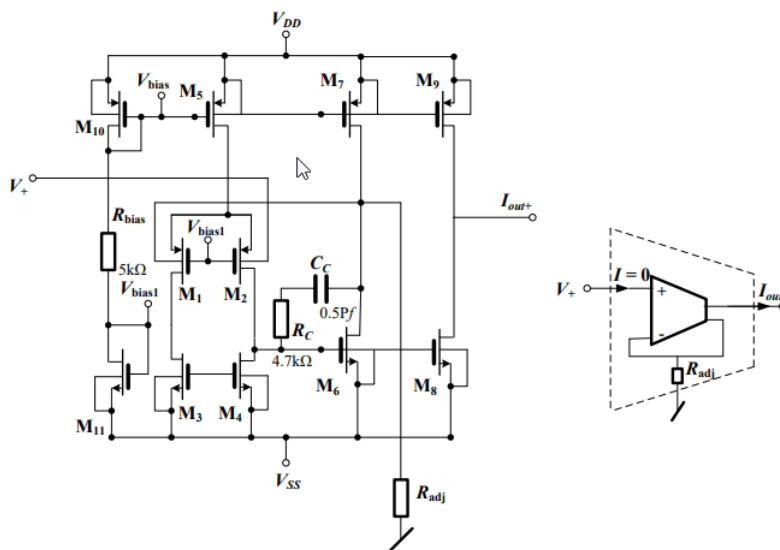
nekonečná (tedy proud tekoucí skrz Y je nulový) a impedance na vstupu X je nulová (\$R\_Y = \infty, I\_Y = 0, R\_X = 0\$). Napětí na vstupu X je ekvivalentní k napětí na vstupu Y (\$V\_X = V\_Y\$). Proud procházející vstupem X je ekvivalentní k proudu vstupem Z (\$I\_Z = I\_X\$). Výstupní impedance vstupu Z je nekonečná (\$R\_Z = \infty\$). Charakteristika ideálního CC je reprezentována maticí

$$\begin{bmatrix} I_Y \\ V_X \\ I_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & \pm 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_Y \\ I_X \\ V_Z \end{bmatrix}. \quad (17)$$

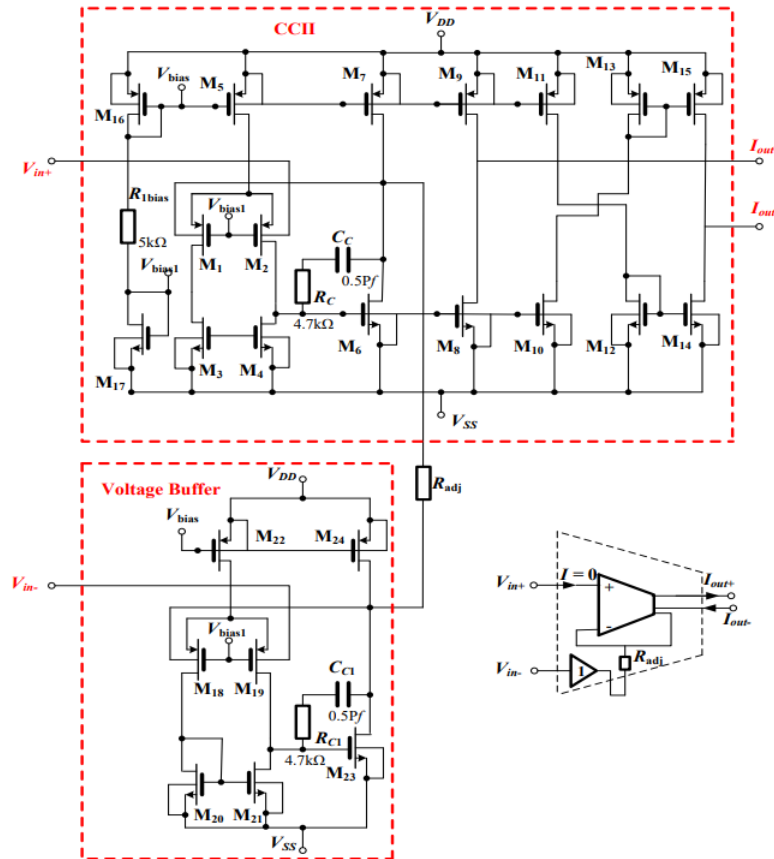
Obrázek 8: CCII s  $\pm$  výstupem založený na OTA [8]

Takovéto zapojení funguje jako dobrý sledovač napětí, ale zato má menší šířku pásma.

Využitím zapojení na obrázku ?? 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).



Obrázek 9: Single input single output OTA (SISO) založený na CCII [8]

Obrázek 10: *fully differential* OTA (DIDO) založený na CCII a napětovém bufferu [8]

## 2.2 Integrované obvody s OTA

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. Integrované obvody s dvěma zesilovači v pouzdře mají užší šířku pásma (2 MHz), menší rychlost přeběhu (50 V/ $\mu$ s), mnohem menší výstupní proud (650  $\mu$ A) i offset vstupního napětí a operují při cca 4x nižších proudech. Cenové rozpětí je 25–65 Kč.

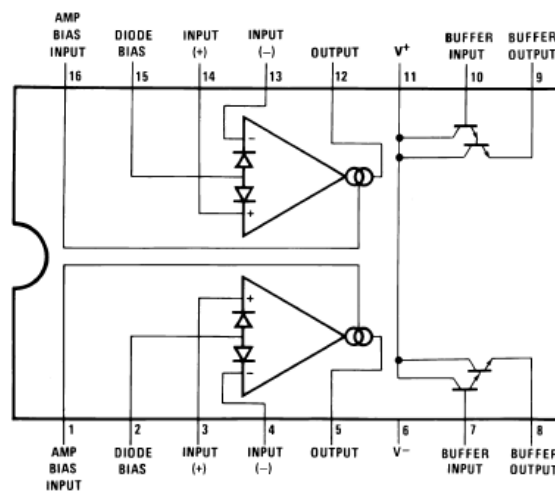
	GBP - Gain Bandwidth Product	SR - Slew Rate	Output Current per Channel	$I_b$ - Input Bias Current	$V_{os}$ - Input Offset Voltage	Operating Supply Current	Forward Transconductance Min	Supply Voltage
OPA615	710 MHz	2.5 kV/ $\mu$ s	5 mA	3 $\mu$ A	40 mV	13 mA	65 mA/V	8–12.4 V
OPA860	470 MHz	3.5 kV/ $\mu$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

Tabulka 2: Porovnání integrovaných obvodů s jedním OTA [9]

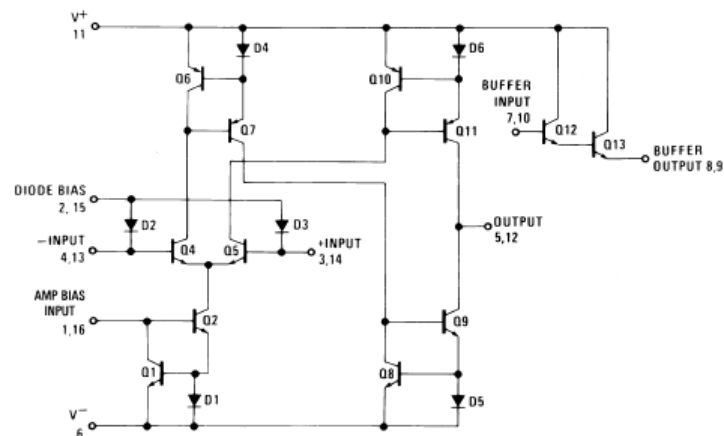
Pro realizaci přeladitelného filtru byl zvolen LM13700. Vnitřní zapojení LM13700 na obrázku ?? obsahuje symetrický rozdílový stupeň (tranzistory Q4, Q5), který je napájen řízeným zdrojem proudu s tranzistorem Q2. Dvojice diod a tranzistorů tvoří proudová zrcadla (*Current Mirror*) - referenční proud tekoucí v jedné větvi obvodu se „zrcadlí“ v jeho druhé větvi. Principiálně jsou to zdroje proudu řízené proudem.

	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/ $\mu$ s	650 $\mu$ A	5 $\mu$ A	4 mV	1.3 mA	6700 $\mu$ S	10–36 V
NE5517	2 MHz	50 V/ $\mu$ s	650 $\mu$ A	5 $\mu$ A	5 mV	2.6 mA	5400 $\mu$ S	4–44 V
AU5517	2 MHz	50 V/ $\mu$ s	650 $\mu$ A	5 $\mu$ A	5 mV	2.6 mA	5400 $\mu$ S	4–44 V
NJM13600	2 MHz	50 V/ $\mu$ s	650 $\mu$ A	5 $\mu$ A	5 mV	2.6 mA	6700 $\mu$ S	36 V
NJM13700	2 MHz	50 V/ $\mu$ s	650 $\mu$ A	5 $\mu$ A	4 mV	2.6 mA	6700 $\mu$ S	36 V

Tabulka 3: Porovnání integrovaných obvodů se dvěma OTA [9]



Obrázek 11: Konfigurace pinů na LM13700M [10]



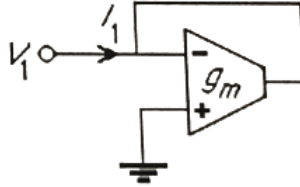
Obrázek 12: Vnitřní schéma OTA [10]

### 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

$$R_{in} = \frac{1}{g_m}, \quad (18)$$

kde  $g_m$  označuje transkonduktanci zesilovače. Prohození invertujícího a neinvertujícího vstupu vede na opačnou polaritu. Pro nahrazení indukčnosti o impedanci  $Z_L = 1/(sC)$  lze použít obvod s třemi OTA. Uzemněny jsou



Obrázek 13: Náhradní obvod pro uzemněný rezistor [12]

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

$$V_C = \frac{g_{m1}}{sC} V_1 \quad (19)$$

$$I_1 = g_{m2} V_C = \frac{g_{m1} g_{m2}}{sC} V_1. \quad (20)$$

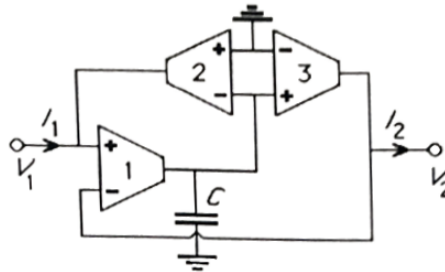
Výsledná indukčnost - impedance vstupu byla vyjádřena vztahem 19.

$$Z_{in}(s) = \frac{V_1}{I_1} = s \frac{C}{g_{m1} g_{m2}} \quad (21)$$

Byl obdržen induktor o hodnotě

$$L = \frac{C}{g_{m1} g_{m2}}. \quad (22)$$

Pro uzemněnou indukčnosti o impedanci  $Z_L = 1/(sC)$  byl použit obvod na Obrázku 14. Vyjádřením napětí a



Obrázek 14: Náhradní obvod pro indukčnost [12]

proudů v obvodu bylo získáno napětí na kapacitoru a vstupní proud

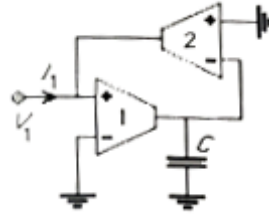
$$V_C = \frac{g_{m1}}{sC} V_1 \quad (23)$$

$$I_1 = g_{m2} V_C = \frac{g_{m1} g_{m2}}{sC} V_1. \quad (24)$$



Výsledná indukčnost - impedance vstupu byla vyjádřena vztahem

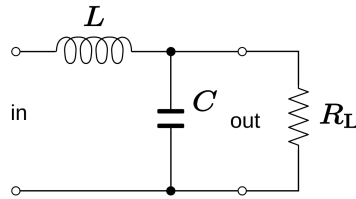
$$Z_{in}(s) = \frac{V_1}{I_1} = s \frac{C}{g_{m1}g_{m2}}. \quad (25)$$



Obrázek 15: Náhradní obvod pro neuzemněnou indukčnost pro  $g_{m1} = g_{m2}$  [12]

### 3.1 Odvození DP 2. řádu

Náhradní obvod, ze kterého bude spočítána přenosová funkce pro přenos filtru druhého řádu, popisuje Obrázek 16. Přenos obvodu byl vyjádřen jako



Obrázek 16: Dolní propust 2. řádu [11]

$$H(s) = \frac{U_{out}}{U_{in}} = \frac{Z_2}{Z_1}, \quad Z_1 = sL, \quad Z_2 = \frac{\frac{R}{sC}}{R + \frac{1}{sC}}. \quad (26)$$

Výsledný přenos je roven

$$H(s) = \frac{\frac{\frac{R}{sC}}{R + \frac{1}{sC}}}{sL + \frac{\frac{R}{sC}}{R + \frac{1}{sC}}}. \quad (27)$$

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

$$H(s) = \frac{R}{s^2 LRC + sL + R} = \frac{\frac{1}{LC}}{s^2 + \frac{s}{RC} + \frac{1}{LC}}. \quad (28)$$

Využitím poznatků ze Sekce 3 je možno za odpor a indukčnost dosadit do vztahu 28. Byly uvažovány kapacitory o stejné hodnotě C.

$$H(s) = \frac{\frac{1}{C^2}}{s^2 + \frac{s}{\frac{g_{m1}g_{m2}}{C^2}} + \frac{1}{\frac{g_{m1}g_{m2}}{C^2}}} = \frac{\frac{g_{m1}g_{m2}}{C^2}}{s^2 + \frac{sg_{m2}}{C} + \frac{g_{m1}g_{m2}}{C^2}} = \frac{g_{m1}g_{m2}}{s^2 C^2 + sg_{m2}C + g_{m1}g_{m2}}. \quad (29)$$

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

$$s^2 + s \frac{\omega_c}{Q} + \omega_c^2 = s^2 C^2 + sg_{m2}C + g_{m1}g_{m2} \quad (30)$$

$$s^2 + s \frac{\omega_c}{Q} + \omega_c^2 = s^2 + \frac{sg_{m2}}{C} + \frac{g_{m1}g_{m2}}{C^2}. \quad (31)$$

Z tohoto vztahu byl vyjádřen mezní kmitočet jako

$$\omega_c^2 = \frac{g_{m1}g_{m2}}{C^2} \quad (32)$$

$$\omega_c = \sqrt{\frac{g_{m1}g_{m2}}{C^2}} \quad (33)$$

a činitel jakosti dosazením za  $\omega_c$

$$Q = \frac{\omega_c}{\frac{g_{m2}}{C}} = \sqrt{\frac{g_{m1}}{g_{m2}}}. \quad (34)$$

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

$$\omega_c = \sqrt{\frac{g_m^2}{C^2}}, \quad (35)$$

$$Q = \sqrt{1} = 1. \quad (36)$$

## 4 Simulace

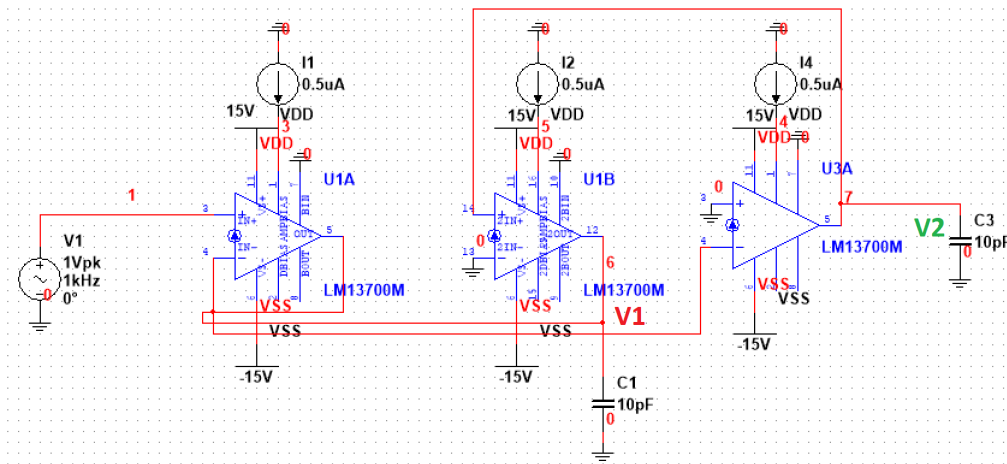
### 4.1 Dolní propust 2. řádu

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

$$H(j\omega) = \frac{H_0 \omega_c^2}{(j\omega)^2 + \frac{\omega_c}{Q}(j\omega) + \omega_c^2}. \quad (37)$$

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 (mezí kmitočet). Vstupní externí proud  $I_{ABC} = 0.5 \mu\text{A}$  byl zvolen tak, aby byl obdržén mezí 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 a odporem a indukčností. Na výstupu 2. OTA (V1) byl obdržén filtr typu PP 1. řádu. Na výstupu 3. OTA (V2) pak DP 2. řádu.



Obrázek 17: Schéma zapojení DP 2. řádu

### 4.2 Dolní propust 4. řádu

Kaskádní zapojení sestává ze sériově zapojených bloků. Přenosové funkce jednotlivých bloků se násobí

$$H_k(j\omega) = \frac{U_k(j\omega)}{U_{k-1}(j\omega)}. \quad (38)$$

Přenos posledního bloku je dán vztahem

$$H_{1 \rightarrow k}(j\omega) = \frac{U_k(j\omega)}{U_{in}(j\omega)} = \prod_{n=1}^k H_n(j\omega). \quad (39)$$

Kaskádním zapojením dvou dolních propustí ze sekce 4.1 byl obdržén filtr 4. řádu s poklesem -80 dB/dek.

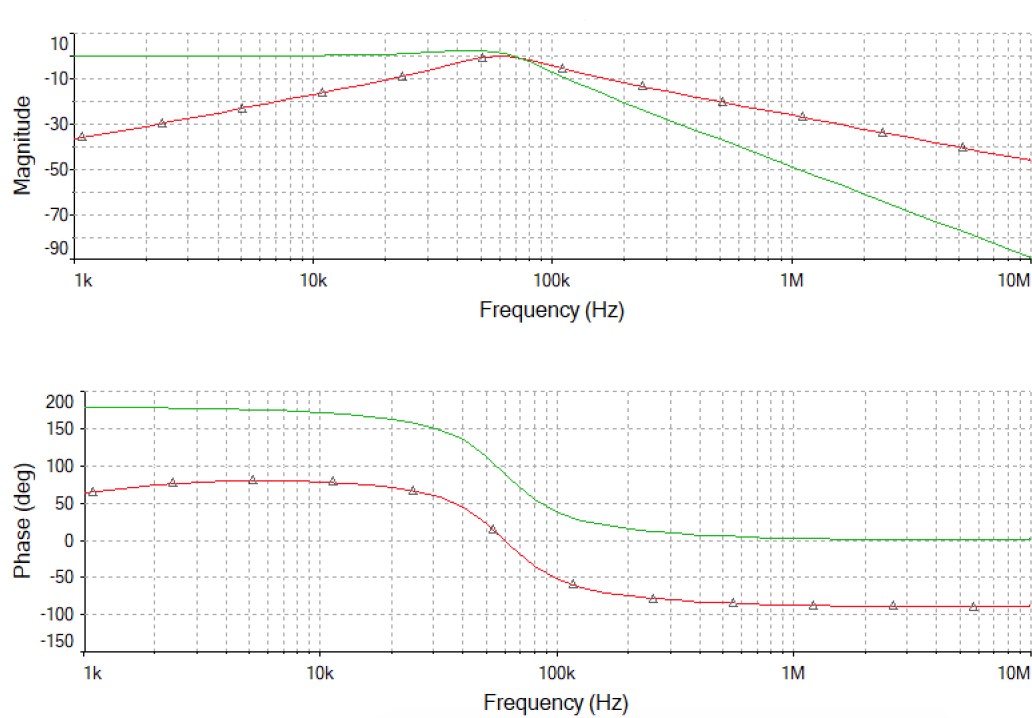
### 4.3 Pásmová propust 2. řádu

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

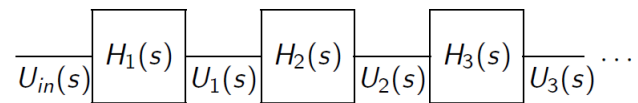
$$H(j\omega) = \frac{H_\infty(j\omega)^2}{(j\omega)^2 + \frac{\omega_c}{Q}(j\omega) + \omega_c^2}. \quad (40)$$

Pásmovou propust lze získat zapojením dolní a horní propustí. Pásmová propust má přenos v nule i nekonečnu nulový  $H_0 = H_\infty = 0$ . Přenosová funkce je

$$H(j\omega) = \frac{H_B \frac{\omega_c}{Q}(j\omega)}{(j\omega)^2 + \frac{\omega_c}{Q}(j\omega) + \omega_c^2}. \quad (41)$$



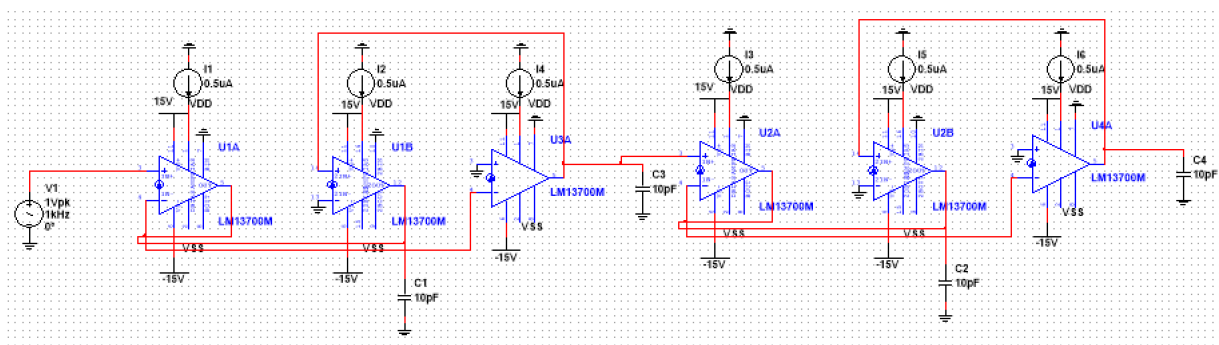
Obrázek 18: Amplitudová a fázová charakteristika DP 2. řádu, PP



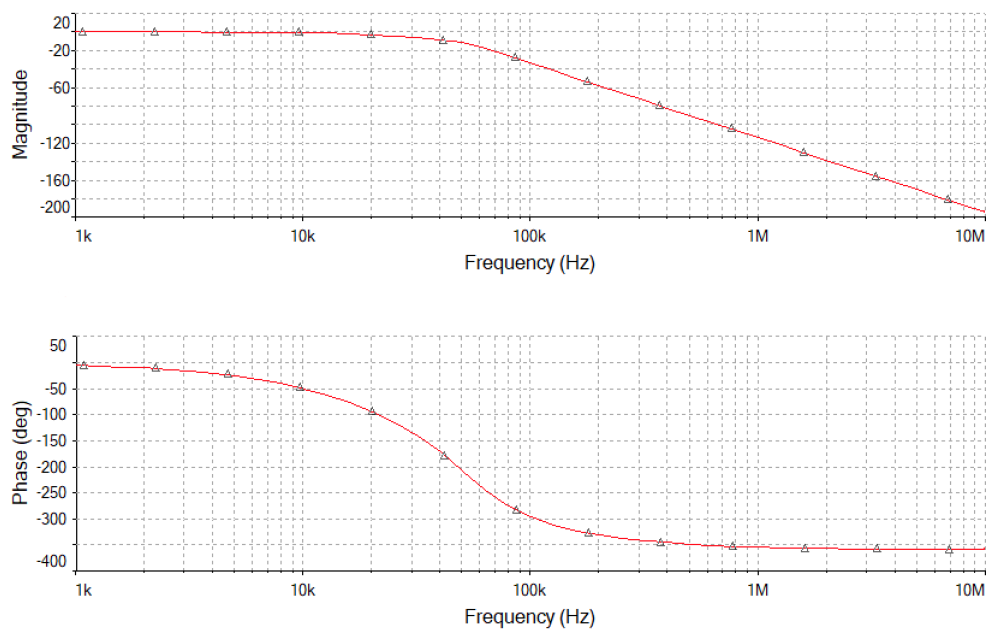
Obrázek 19: Kaskádní zapojení [5]

#### 4.4 Pásmová propust 4. řádu

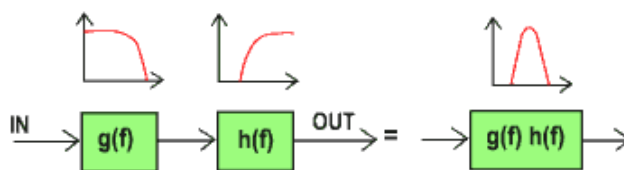
Zapojením dvou PP 2. řádu byla obdržena PP 4.řádu s poklesem -80 dB/dek.



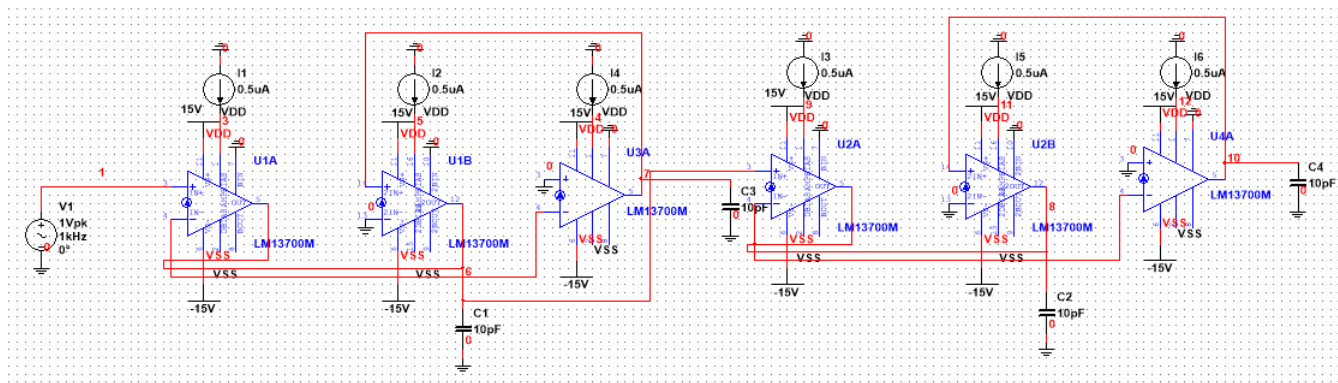
Obrázek 20: Schéma zapojení DP 4. řádu



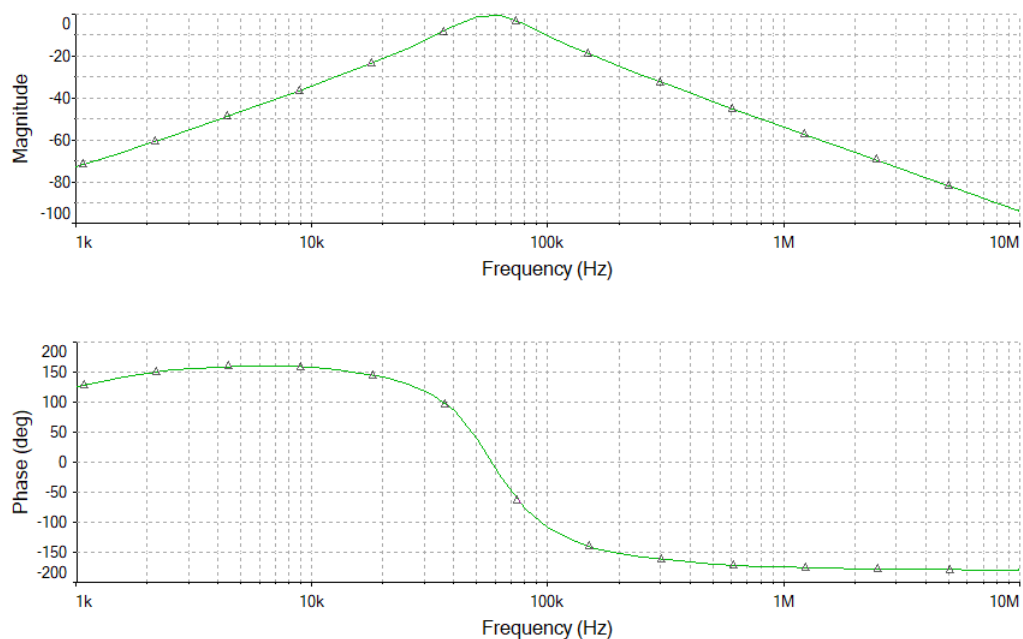
Obrázek 21: Amplitudová a fázová charakteristika DP 4. řádu



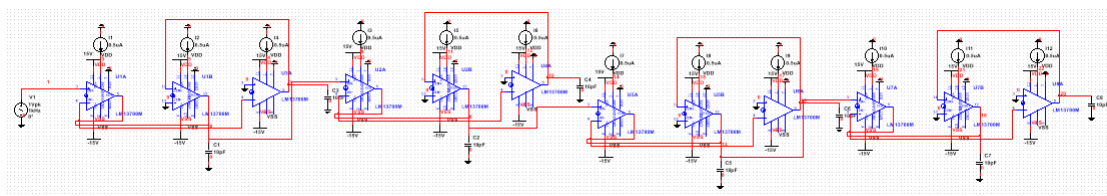
Obrázek 22: Násobení přenosů [13]



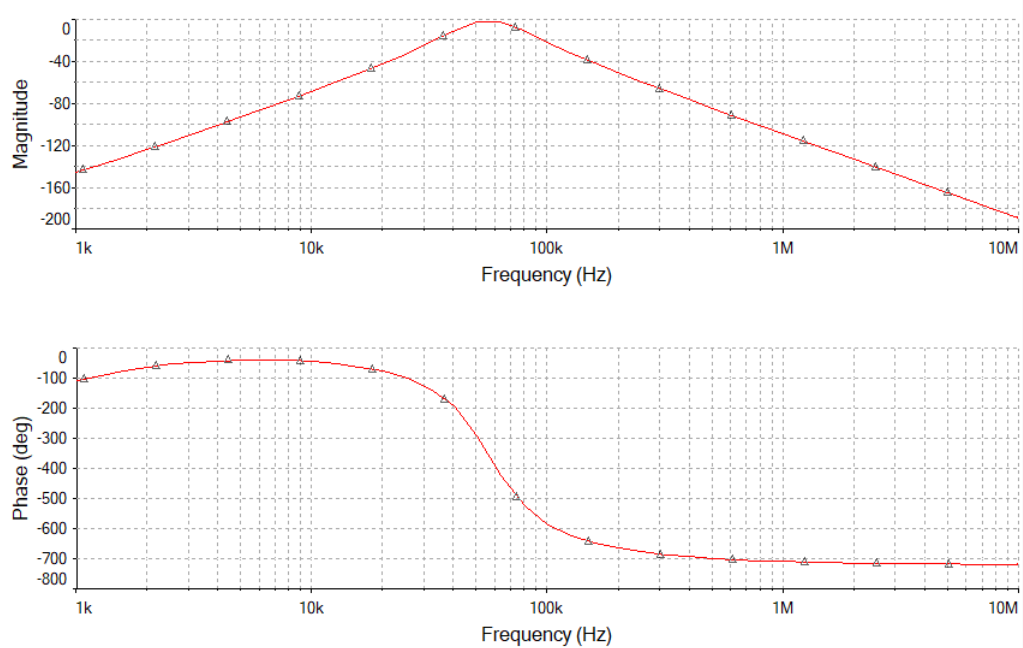
Obrázek 23: Schéma zapojení PP 2. řádu



Obrázek 24: Amplitudová a fázová charakteristika PP 2. řádu



Obrázek 25: Schéma zapojení PP 4. řádu



Obrázek 26: 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].

$$f\_s = \frac{\sqrt{\Delta fs^2 + 4f\_m^2} - \Delta fs}{2} \quad (42)$$

$$f\_p = \frac{\sqrt{\Delta fp^2 + 4f\_m^2} - \Delta fp}{2} \quad (43)$$

$$fp = \frac{\sqrt{\Delta fp^2 + 4f\_m^2} + \Delta fp}{2} \quad (44)$$

$$fs = \frac{\sqrt{\Delta fs^2 + 4f\_m^2} + \Delta fs}{2} \quad (45)$$

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  $\Delta fp$  [Hz] a šířka nepropustného pásma  $\Delta fs$  [Hz].

$$fm = 141421Hz$$

$$\Delta fp = 100000Hz$$

$$\Delta fs = 877778Hz$$

Byl obdržén 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.

$$asnew := 105.613$$

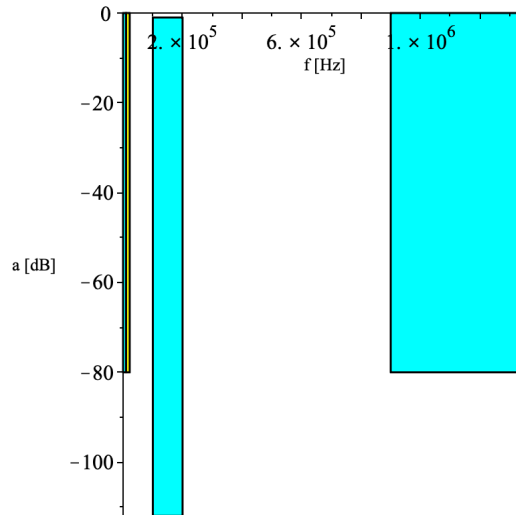
$$asnew = 10 \log_{10} \left( 1 + \left( \frac{\epsilon}{kl\_new} \right)^2 \right) \quad (46)$$

$$\epsilon = \sqrt{10^{0.1ap} - 1} \quad (47)$$

$$k = \frac{1}{Os} \quad (48)$$

$$kl\_new = k^{order} \left( \prod_{i=1}^n \text{JacobiCD} \left( \frac{(2i-1+m) \text{EllipticK}(k)}{order}, k \right) \right)^4, \quad (49)$$

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 nevážá k jednotkovému kruhu, ale k elipse). *JacobiCD*



Obrázek 27: 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  $z$ .

$$EllipticK(k) = \int_0^1 \left( \frac{1}{\sqrt{(-\alpha_1^2 + 1)} \sqrt{(-k^2 - \alpha_1^2 + 1)}} \right) d\alpha_1 \quad (50)$$

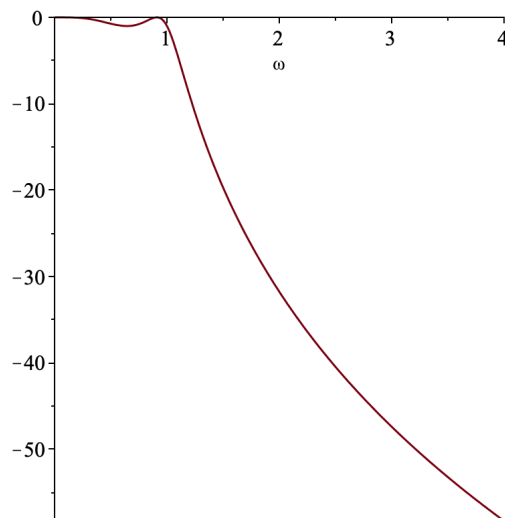
Následně byl spočten koeficient nejvyšší mocniny polynomu ve jmenovateli přenosové funkce  $Gc$ , póly a nuly přenosové funkce  $poles, zeros$  pomocí funkce  $CauerCPolesZeros$ . Počet pólů je dán řádem filtru  $order$  a počet nul pro aproximaci typu C je roven  $order - 2$ . Dále byla spočtena Caurerova 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  $G(j\omega)$ .

$$Gc, poles, zeros := 376.020,$$

$$[-0.475024 + 0.340009I, -0.475024 - 0.340009I, -0.162709 + 0.982758I, -0.162709 - 0.982758I],$$

$$[11.2840I, -11.2840I],$$

$$G, chf, zer := \frac{376.020p^4 + 479.601p^3 + 617.689p^2 + 396.239p + 127.328}{p^2 + 127.329}, \frac{(376.020p^2 + 311.716)p^2}{p^2 + 127.329}, [11.2840I, -11.2840I]$$



Obrázek 28: Modulová frekvenční charakteristika NDP

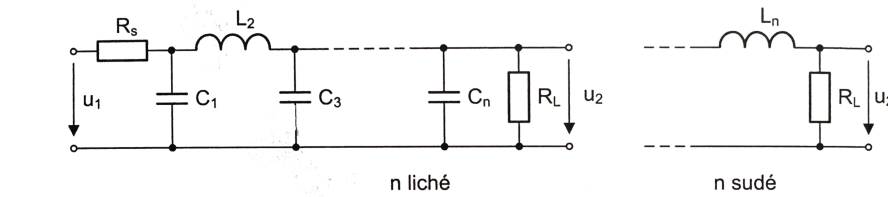
Charakteristika byla vykreslena z přenosu funkcí  $MagnitudeHdB$ , která vypočte modul přenosu podle předpisu  $|H(j\omega)|$ .



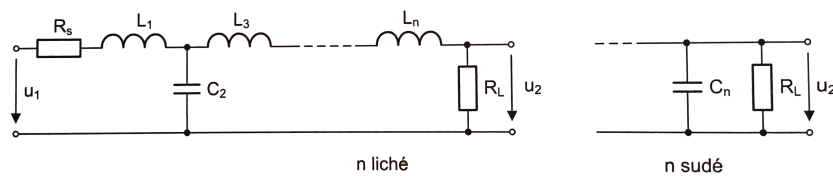
## 5.1 Příčkové LC filtry

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  $\pi$  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.



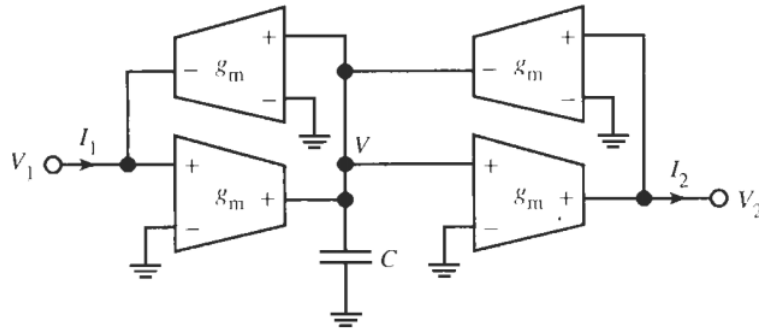
Obrázek 29: Pasivní dolní propust n-tého řádu s  $\pi$  články [14]



Obrázek 30: Pasivní dolní propust n-tého řádu s T články [14]

## 5.2 Gyrátory

K převodu induktoru na zapojení s kapacitou 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 31 jsou znázorněny dva gyrátory s kapacitou. Obvodovou analýzou v uzlu V byla obdržena rovnice



Obrázek 31: Neuzemněný induktor realizovaný kapacitou a dvěma gyrátory [12]

$$pCV = g_m V_1 - g_m V_2 \quad (51)$$

a dva proudy na výstupu

$$I_1 = I_2 = g_m V. \quad (52)$$

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

$$I_1 = I_2 = \frac{g_m^2}{pC} (V_1 - V_2) = \frac{1}{pL} (V_1 - V_2) \quad (53)$$

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  $1 \Omega$ , 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).

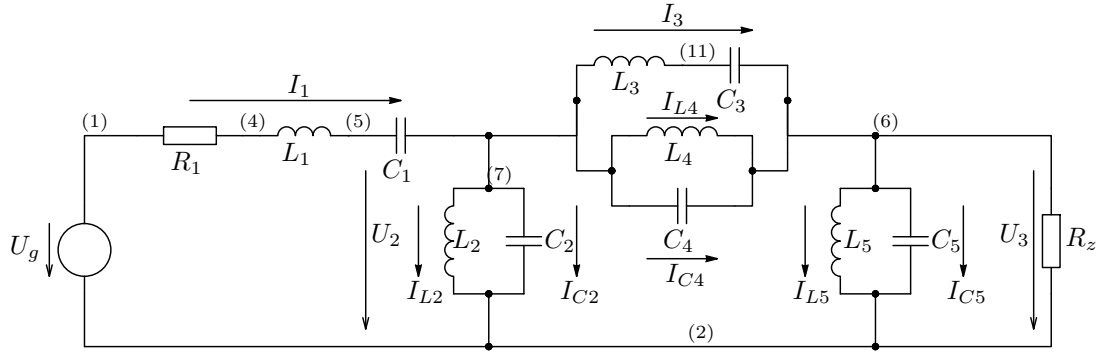
$$\text{block}(1), [\text{orientation} = \text{direct}, \text{elements} = L1 = -0.40652, Z = pL1]$$

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

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

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

Vygenerovaná struktura je popsána na Obrázku 32. Analýzou LC struktury z Maplu byly obdrženy obvodové



Obrázek 32: Schéma LC příčkové struktury

rovnice, kde  $R$  je volitelný (fiktivní) rezistor:

$$I_1 = \frac{1}{R_1 + pL_1 + \frac{1}{pC_1}} (U_G - U_2) \quad (54)$$

$$v_1 = \frac{R}{R_1 + pL_1 + \frac{1}{pC_1}} (U_G - U_2) \quad (55)$$

$$U_2 = \frac{1}{\frac{1}{pL_2} + pC_2} (I_1 - I_3 - I_{L4} - pC_4 v_{L4}) \quad (56)$$

$$U_2 = \frac{1}{\frac{R}{pL_2} + RpC_2} (v_1 - v_{L3} - v_{L4} - RpC_4 U_{L4}) \quad (57)$$

$$I_3 = \frac{1}{pL_3 + \frac{1}{pC_3}} (U_2 - U_3) \quad (58)$$

$$v_{L3} = \frac{R}{pL_3 + \frac{1}{pC_3}} (U_2 - U_3) \quad (59)$$

$$v_{L4} = \frac{1}{\frac{1}{pL_4} + pC_4} (I_1 - I_{L2} - pC_2 U_2 - I_3 - pC_4 (U_2 - U_3)) \quad (60)$$

$$v_{L4} = \frac{1}{\frac{R}{pL_4} + RpC_4} (v_1 - v_{L2} - RpC_2 U_2 - v_{L3} - RpC_4 (U_2 - U_3)) \quad (61)$$

$$U_3 = \frac{1}{\frac{1}{R_z} + pC_5 + \frac{1}{pL_5}} (I_1 - I_{L2} - pC_2 U_2) \quad (62)$$

$$U_3 = \frac{1}{\frac{R}{R_z} + RpC_5 + \frac{R}{pL_5}} (v_1 - U_2 - RpC_2 U_2). \quad (63)$$

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

$$H_1 = \frac{R}{R_1 + pL_1 + \frac{1}{pC_1}} \quad (64)$$

$$H_2 = \frac{1}{\frac{R}{pL_2} + RpC_2} \quad (65)$$

$$H_3 = \frac{R}{pL_3 + \frac{1}{pC_3}} \quad (66)$$

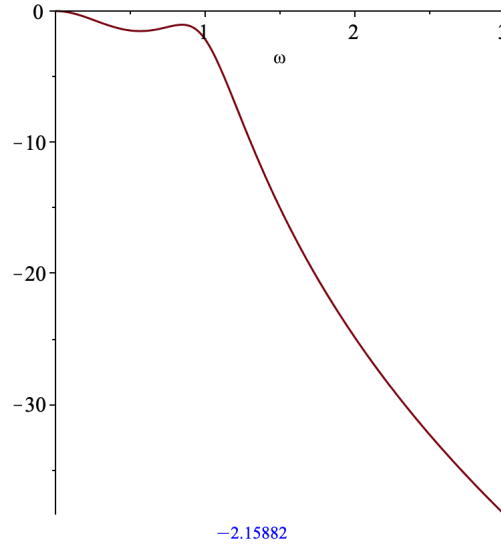
$$H_4 = \frac{1}{\frac{R}{pL_4} + RpC_4} \quad (67)$$

$$H_5 = \frac{1}{\frac{R}{R_z} + RpC_5 + \frac{R}{pL_5}}. \quad (68)$$

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 33: 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). Zakoňovací rezistor byl zvolen  $1 \Omega$ , další dva parametry funkce značí spodní a horní hranici propustného pásma.

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

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

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

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

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

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  $R_s = L1 \cdot 2\pi f / Q$ .

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

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

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

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

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

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

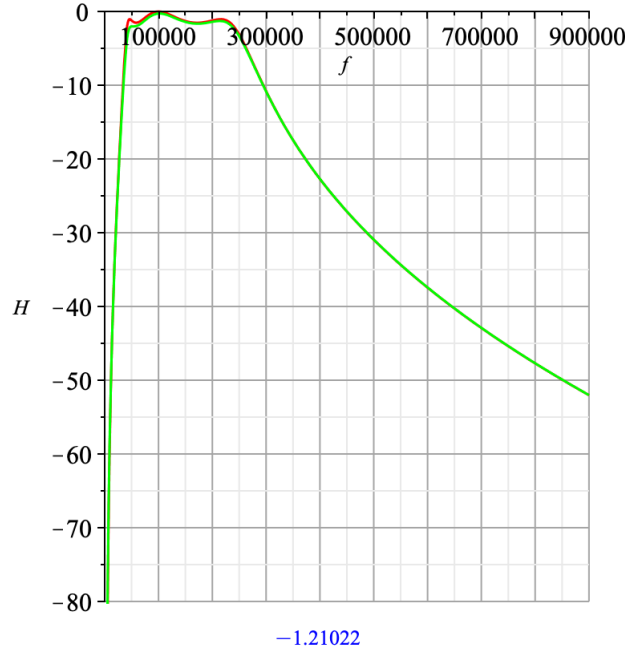
$$block(4), [Z = \frac{1}{pL1 + Rs1 + pC1}, orientation = shunt, elements = C1 = 1.2326 * 10^{-6}, L1 = 2.0551 * 10^{-6},$$

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

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 34: 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:

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

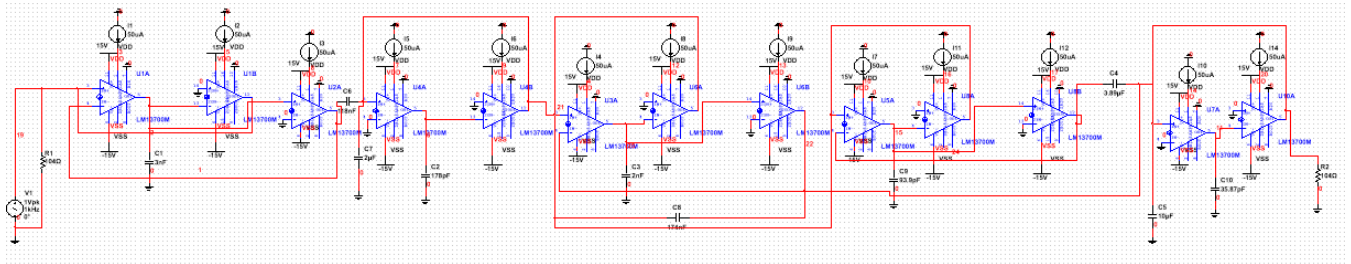
Využitím poznatků ze Sekce 5.2 byly s uvažováním minimální transkonduktance z datasheetu LM13700 ( $g_m = 9600 \mu S$ ) získány kapacity  $C_{L1} = 3.08002$  nF,  $C_{L2} = 17.8354$  nF,  $C_{L3} = 938.613$  nF,  $C_{L4} = 2.10114$  nF,  $C_{L5} = 358.667$  nF. Převrácenou hodnotou transkonduktance byly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

$$R_N = R_1 = R_z = \frac{1}{g_m} = 104.16667 \Omega. \quad (69)$$

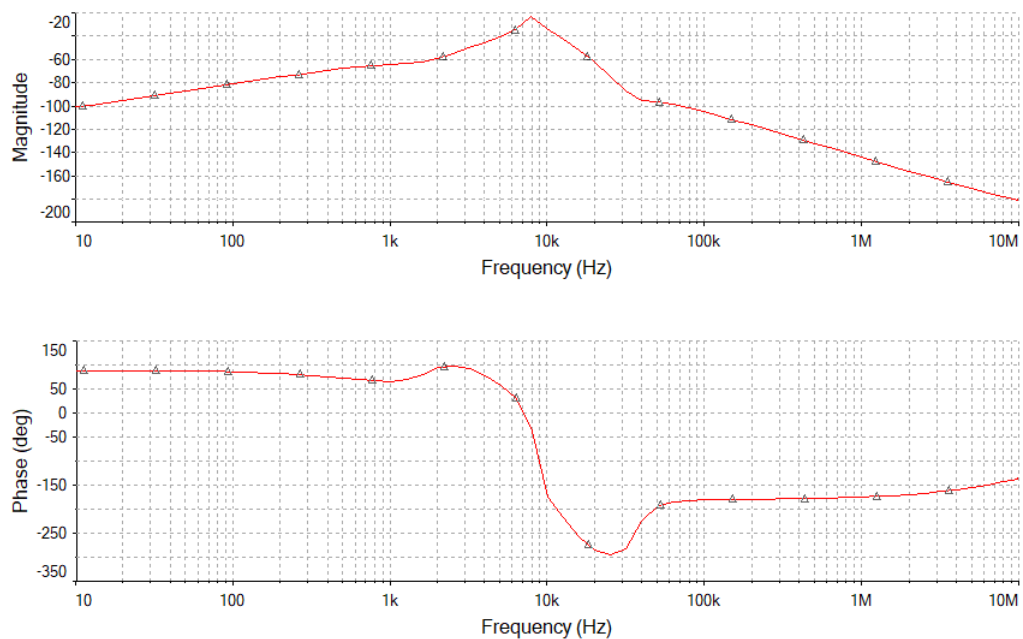
Kapacity vyšly již se Syntfilu  $C1 = -7.8301 \mu F$ ,  $C2 = 1.96808 \mu F$ ,  $C3 = 3.29545 \mu F$ ,  $C4 = 6.47035$  nF,  $C5 = 1.23258 \mu F$ .

## 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. 656/758). Napětí na zdroji poté bude  $\frac{V_0}{R_0}$ .



Obrázek 35: Výsledné schéma



Obrázek 36: Amplitudová a fázová charakteristika PP 4. řádu

## 6 Závěr

Cílem práce bylo navrhnout pásmovou propust 4. řádu. Prvním krokem bylo odzkoušení zapojení OTA v Multisimu. Bylo realizováno zapojení filtru typu dolní propust 2. řádu (Sekce 4.1), poté byl kaskádním zapojením filtrů 2. řádu obdržen filtr typu dolní propust 4. řádu (Sekce 4.2). Následně byla zapojením horní a dolní propusti obdržena pásmová propust 2. řádu (Sekce 4.3) a 4. řádu (Sekce 4.4).

Pomocí knihovny Syntfil navržena pásmová propust 4. řádu a její zapojení pomocí LC příčkové struktury. Mezikrokem byl převod pásmové propusti na normovanou dolní propust. Pro LC strukturu byly obdrženy odnormované hodnoty prvků. LC struktura byla převedena na zapojení s OTA a byla provedena simulace s vypočtenými prvky.

Bude třeba analyzovat výslednou strukturu popsanou přenosy gyrátorů (Sekce 5) s využitím knihovny Pracan a Maplu. Dalším krokem bude pak praktická realizace a odzkoušení navrhnutého obvodu.

## 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](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 18/69.
- [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.
- [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 5/6.
- [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. Pořadí slide 24/41, 21/41.
- [6] SMITH, K.C., SEDRA, A.S. *The current conveyor: a new circuit building block*. IEEE Proc. CAS, 1968, vol. 56, no. 3, pp. 1368-1369.
- [7] SMITH, K.C., SEDRA, A.S. *A second generation current conveyor and its application*. IEEE Trans., 1970, CT-17, pp. 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](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 8/39 - 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](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](http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm13700.pdf) Strana 1/37. Strana 9/37 - 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](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. Pořadí obrázek 4-13, 4-36 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 měřící technice*. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2018. ISBN 978-80-01-06424-5. Strana 136, Obrázek 5.3.9, 5.3.10.