

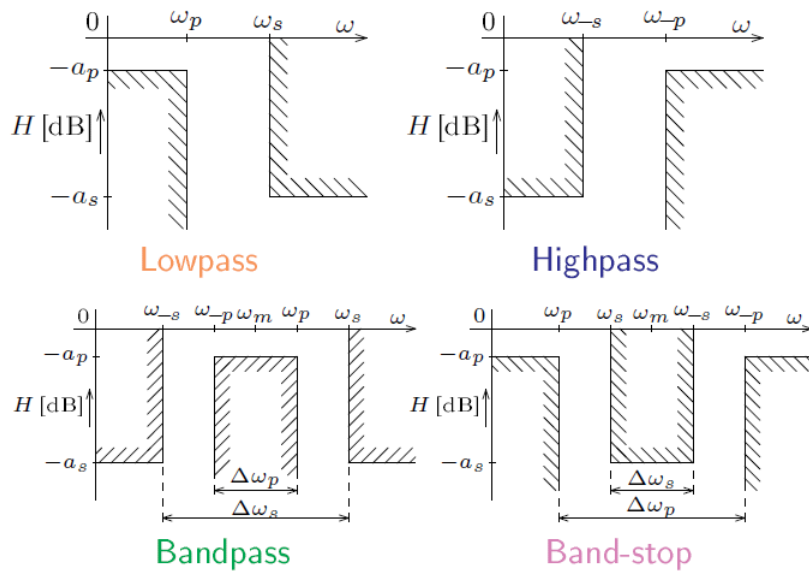
Analogový přeladitelný filtr se zesilovači OTA

Klára Pacalová

3. dubna 2019

1 Typy filtrů a jejich aplikace

Filtr je obvod, jehož přenosová funkce (poměr výstupu ku vstupu) je kmitočtově závislá. Základní rozdělení je na dolní propust (LP), horní propust (HP), pásmovou propust (BP) a pásmovou zadrž (BS). Dolní propust propouští vstupní signál s frekvencí pod charakteristickým kmitočtem ω_0 na výstup (signál zůstává beze změny nebo zesílený). Horní propust propouští signály nad ω_0 , pásmová propust v rozmezí daném dvěma kmitočty a pásmová zadrž naopak nepropouští kmitočty definovaného pásma.



Obrázek 1: Toleranční schéma pro dolní (LP), horní (HP), pásmovou propust (BP) a pásmovou zadrž (BS)[?]

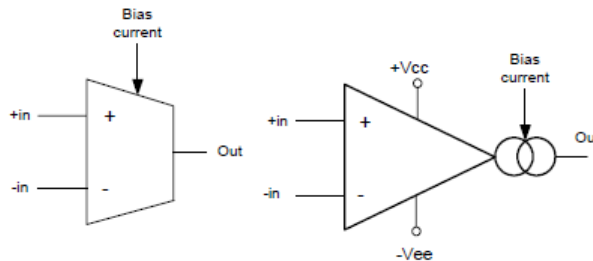
Filtry se používají k redukci šumu, okolního rušení (např. vysílače blokují harmonické frekvence, které interferují) nebo jako anti-aliasing filtry (např. pro nastavení priority bitu u ADC převodníku, vzorkování a rekonstrukci u DAC převodníku - využití v audio přehrávačích), pro efektivní reprodukci zvuku v subwooferech a reproduktorech.

2 Transkonduktanční zesilovače (OTA)

Transkonduktanční zesilovače jsou zesilovače s proudovým výstupem. Označují se též jako OTA (*Operational Transconductance Amplifiers*). Jsou to v podstatě napětím řízené zdroje proudu

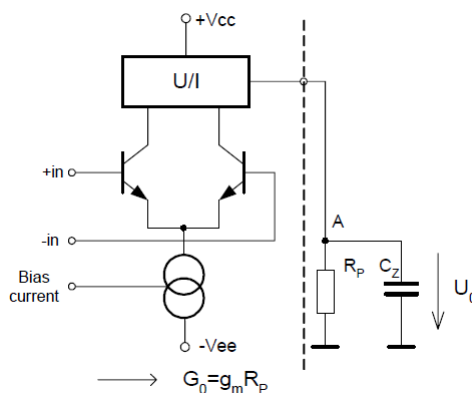
$$i_{out} = g_m(u_+ - u_-), \quad (1)$$

kde u_+ a u_- jsou napětí invertujícího a neinvertujícího vstupu. Transkonduktance je řízena externím proudem I_{ABC} (*Bias current*).



Obrázek 2: OTA zesilovač - schematické značky [?]

Na obrázku 3 je vyobrazena vnitřní struktura transkonduktančního zesilovače - vstupní obvod je tvořen diferenciálním vstupem a převodníkem U/I .



Obrázek 3: OTA zesilovač - vnitřní struktura se zátěží na výstupu [?]

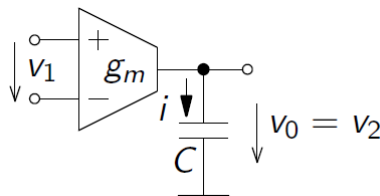
Připojením zátěže R_z na výstup bylo získáno napětí naprázdno

$$u_{out} = R_z g_m (u_+ - u_-) = G_0 (u_+ - u_-), \quad (2)$$

kde G_0 je zesílení. Ze vztahu (2) plyne, že zesílení je konečné a mezi vstupy je nenulové napětí. Připojením kondenzátoru jako zátěže byl získán bezztrátový integrátor s přenosem

$$H(s) = \frac{v_2}{v_1} = \frac{g_m}{sC}. \quad (3)$$

$$v_0(t) = \frac{1}{C} \int i(t) dt = \frac{1}{C} \int g_m v_1(t) dt \quad (4)$$



Obrázek 4: OTA integrátor [?]

Toto zapojení integrátoru s uzemněným kondenzátorem se označuje jako OTA-C. Ztrátový integrátor lze utvořit připojením paralelního rezistoru R , což vede na dolní propust 1. řádu s mezním kmitočtem RC . Toto je ekvivalentní se sériovým zapojením dalšího OTA 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.

3 Integrované obvody s OTA zesilovači

Integrované obvody se vyrábí buď s jedním nebo dvěma zesilovači v pouzdře. Varianty s jedním operačním zesilovačem jsou např. OPA615, OPA860 a novější OPA861 a jejich varianty.

	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

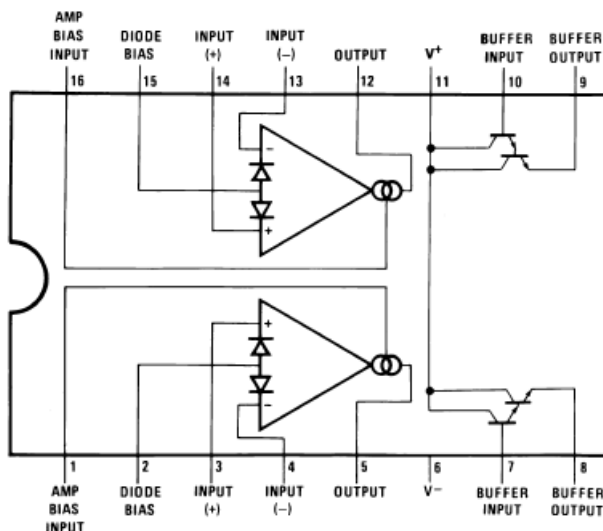
Tabulka 1: Porovnání IO s jedním transkonduktančním OZ [?]

Všechny součástky s jedním OZ mají velkou šířku pásma (v řádech stovek MHz), cenově vychází na 75-280 Kč. Pro realizaci dolní propusti byly zvoleny vhodnější součástky s dvěma OZ - srovnání níže.

	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

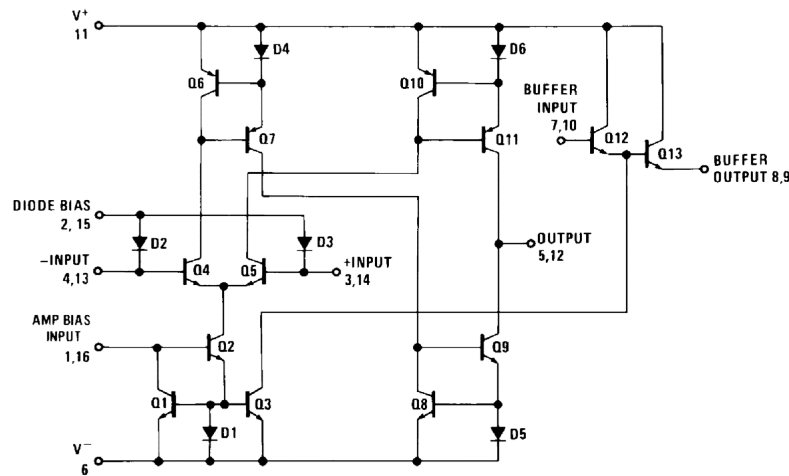
Tabulka 2: Porovnání IO s dvěma transkonduktančními OZ [?]

Integrované obvody s dvěma OZ 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 účely realizace filtru byla zvolena součástka LM13700M.



Obrázek 5: Konfigurace pinů na LM13700M [?]

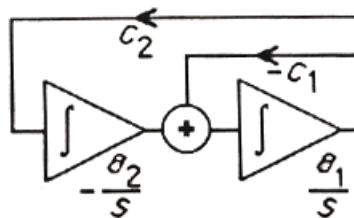
Vnitřní zapojení LM13700 na obrázku 6 obsahuje symetrický rozdílový stupeň (tranzistory Q4, Q5), který je napájen řízeným zdrojem proudu s tranzistorem Q2. Dvojice diod a tranzistorů tvoří proudová zrcadla.



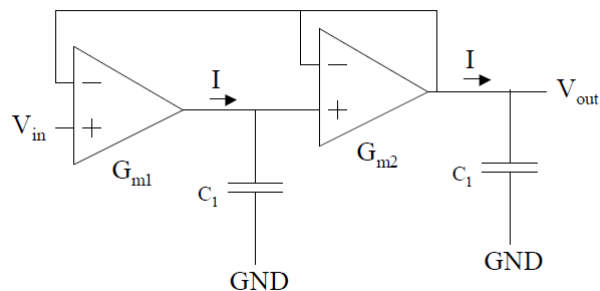
Obrázek 6: Schéma transkonduktančního zesilovače [?]

4 Dolní propust 2. řádu - teoretické odvození

Využitím záporné zpětné vazby z výstupu a zapojením OTA zesilovačů sériově jako dva integrátory, byl obdržen dolnoproustní filtr 2. řádu.

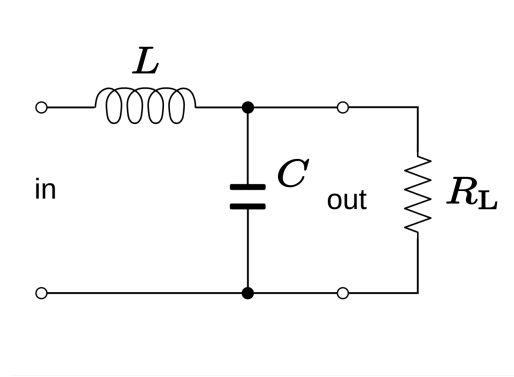


Obrázek 7: Schéma s dvěma integrátory a zpětnou vazbou pro simulaci bikvadu [?]



Obrázek 8: Dolní propust 2. řádu s OTA [?]

Náhradní obvod, ze kterého bude spočítána přenosová funkce, popisuje obrázek 9.



Obrázek 9: Dolní propust 2. řádu (RLC obvod) [?]

Přenos obvodu byl vyjádřen jako

$$H(s) = \frac{U_{out}}{U_{in}} = \frac{Z_2}{Z_1}, \quad (5)$$

kde $Z_1 = sL$ a $Z_2 = \frac{R}{R + \frac{1}{sC}}$. Tedy

$$H(s) = \frac{\frac{R}{R + \frac{1}{sC}}}{sL + \frac{R}{R + \frac{1}{sC}}}. \quad (6)$$

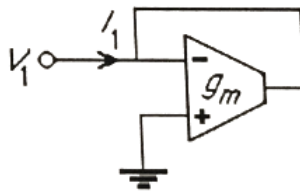
Elementárními algebraickými úpravami a následným vynásobením členem $\frac{1}{LRC}$ byl získán výsledný přenos.

$$H(s) = \frac{R}{s^2 LRC + sL + R} = \frac{\frac{1}{LC}}{s^2 + \frac{s}{RC} + \frac{1}{LC}}. \quad (7)$$

Pro ideální OTA zesilovač (vstupní i výstupní impedance nulové) je možno odpor nahradit obvodem na obrázku 10 a to hodnotou

$$R_{in} = \frac{1}{g_{m1}}, \quad (8)$$

kde g_{m1} označuje transkonduktanci zesilovače. Prohození invertujícího a neinvertujícího vstupu vede na opačnou polaritu.



Obrázek 10: Obvod pro simulaci uzemněného rezistoru [?]

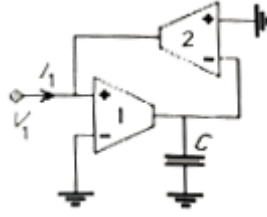
Pro uzemněnou indukčnost o impedanci $Z_L = \frac{1}{sC}$ byl použit obvod na obrázku 11. Vyjádřením napětí a proudů v obvodu bylo získáno

$$V_C = \frac{g_{m1}}{sC} V_1 \quad (9)$$

$$I_1 = g_{m2} V_C = \frac{g_{m1} g_{m2}}{sC} V_1. \quad (10)$$

Výsledná indukčnost - impedance vstupu byla vyjádřena vztahem (11).

$$Z_{in}(s) = \frac{V_1}{I_1} = s \frac{C}{g_{m1} g_{m2}} \quad (11)$$

Obrázek 11: Obvod pro simulaci uzemněné indukčnosti pro $g_{m1} = g_{m2}$ [?]

Pro obdržení plovoucí indukčnosti je nutné zrušit uzemnění invertujícího vstupu prvního OTA zesilovače a zachovat $I_1 = I_2$ (obrázek 12). Přidáním další transkonduktance g_{m3} bylo získáno

$$V_C = \frac{g_{m1}}{sC} (V_1 - V_2). \quad (12)$$

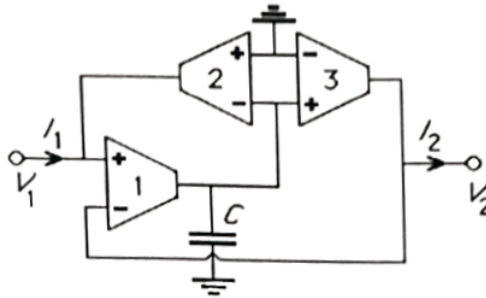
Pro proudy I_1, I_3 platí

$$I_1 = g_{m2}V_C = \frac{g_{m1}g_{m2}}{sC} (V_1 - V_2) \quad (13)$$

$$I_3 = g_{m3}V_C = \frac{g_{m1}g_{m3}}{sC} (V_1 - V_2). \quad (14)$$

Pro ekvivalentní transkonduktance $g_{m1} = g_{m2} = g_{m3}$ byl obdržen plovoucí induktor o hodnotě

$$L = \frac{C}{g_{m1}g_{m2}}. \quad (15)$$

Obrázek 12: Obvod pro simulaci neuzemněné indukčnosti pro $g_{m1} = g_{m2} = g_{m3}$ [?]

Nyní je možno za odpor a indukčnost dosadit do vztahu (7). Byly uvažovány kapacitory o stejné hodnotě C .

$$H(s) = \frac{\frac{1}{C^2}}{\frac{1}{g_{m1}g_{m2}} + \frac{s}{C} + \frac{1}{g_{m1}g_{m2}}} = \frac{\frac{g_{m1}g_{m2}}{C^2}}{s^2 + \frac{sg_{m2}}{C} + \frac{g_{m1}g_{m2}}{C^2}} = \frac{g_{m1}g_{m2}}{s^2C^2 + sg_{m2}C + g_{m1}g_{m2}}. \quad (16)$$

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

$$s^2 + s\frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2 = s^2C^2 + sg_{m2}C + g_{m1}g_{m2} \quad (17)$$

$$s^2 + s\frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2 = s^2 + \frac{sg_{m2}}{C} + \frac{g_{m1}g_{m2}}{C^2}. \quad (18)$$

Z tohoto vztahu byl vyjádřen mezní kmitočet jako

$$\omega_0^2 = \frac{g_{m1}g_{m2}}{C^2} \quad (19)$$

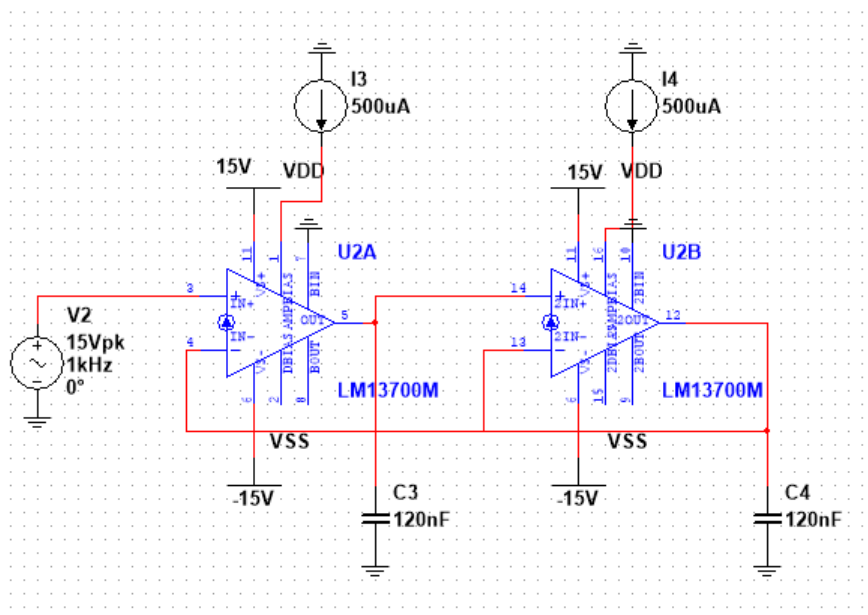
$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g_{m1}g_{m2}}{C^2}} \quad (20)$$

a činitel jakosti dosazením za ω_0

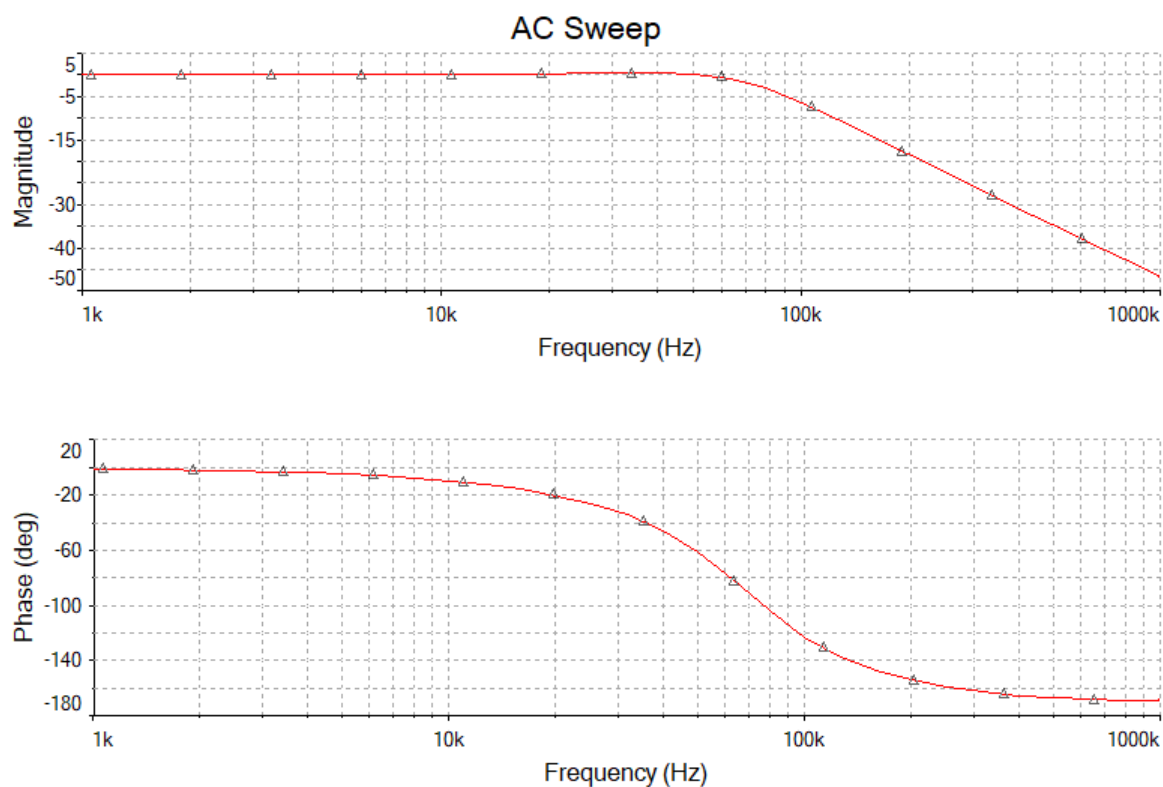
$$Q = \frac{\omega_0}{\frac{g_{m2}}{C}} = \sqrt{\frac{g_{m1}}{g_{m2}}}. \quad (21)$$

5 Dolní propust 2. řádu - simulace

Zapojení dvou transkonduktančních zesilovačů v sérii jako integrátorů vede na dolní propust druhého řádu. Symetrické napájení operačních zesilovačů $V_{DD}, V_{SS} = \pm 15$ V a vstupní externí proud $I_{ABC} = 500 \mu\text{A}$ jsou zvoleny podle dokumentace k integrovanému obvodu LM13700M. Regulací vstupního proudu je ovlivňován pracovní bod obvodu, tzn. hodnota mezního kmitočtu. Při externím proudu $I_{ABC} \in < 5 \mu\text{A} ; 500 \mu\text{A} >$ je výrobcem 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 nezkrslí výsledky simulace. Volbou mezního kmitočtu $\omega_0 = 100$ kHz a dosazením $g_m = 9600 \mu\text{S}$ do vztahu (21) byly obdrženy hodnoty kondenzátorů $C = C_1 = C_2 = 120$ nF.



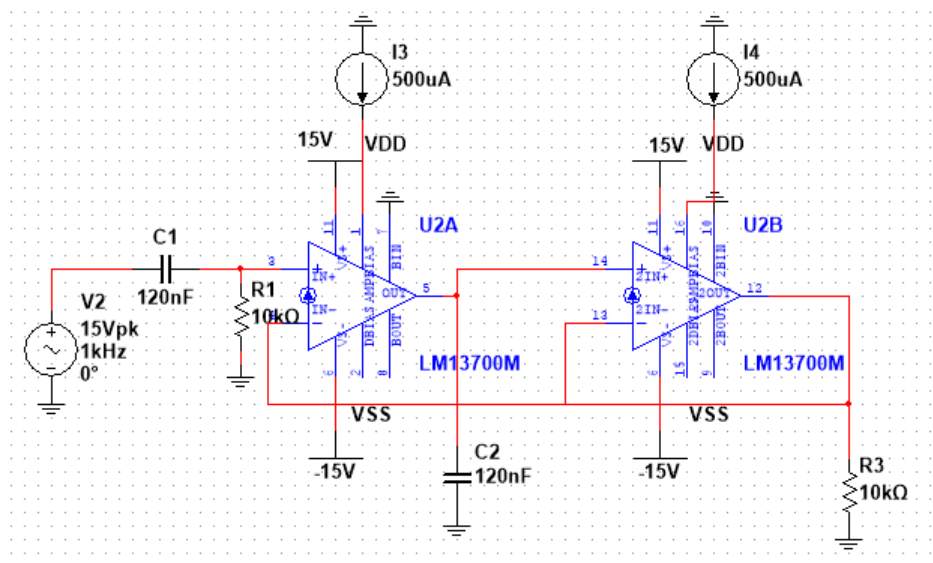
Obrázek 13: Schéma zapojení dolní propusti 2. řádu s LM13700M



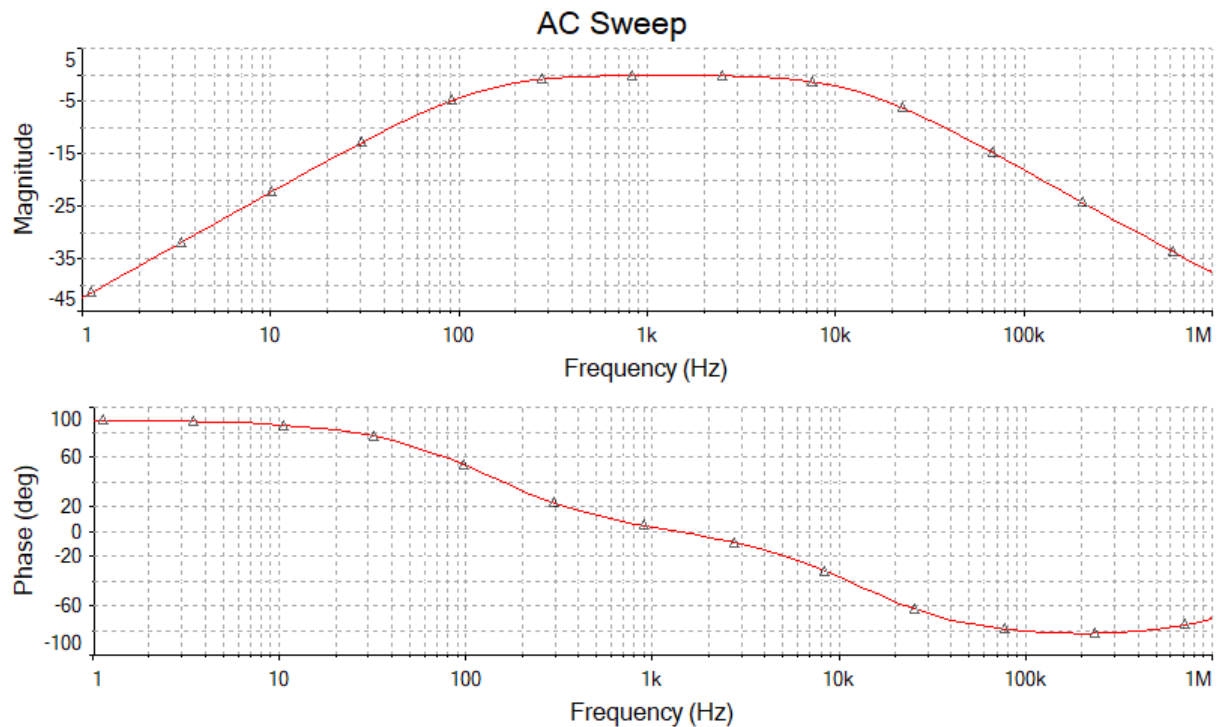
Obrázek 14: Amplitudová a fázová charakteristika dolní propusti 2. řádu

6 Pásmová propust

Umístěním dvou kapacitorů a dvou rezistorů do základního obvodu byla obdržena pásmová propust. Napájecí napětí a vstupní klidový proud byl zvolen obdobně jako pro zapojení dolní propusti.

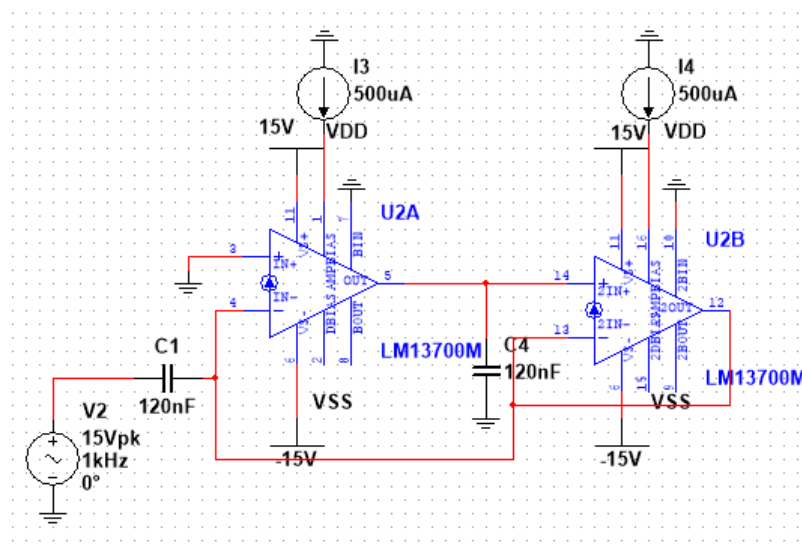


Obrázek 15: Schéma zapojení pásmové propusti s LM13700M

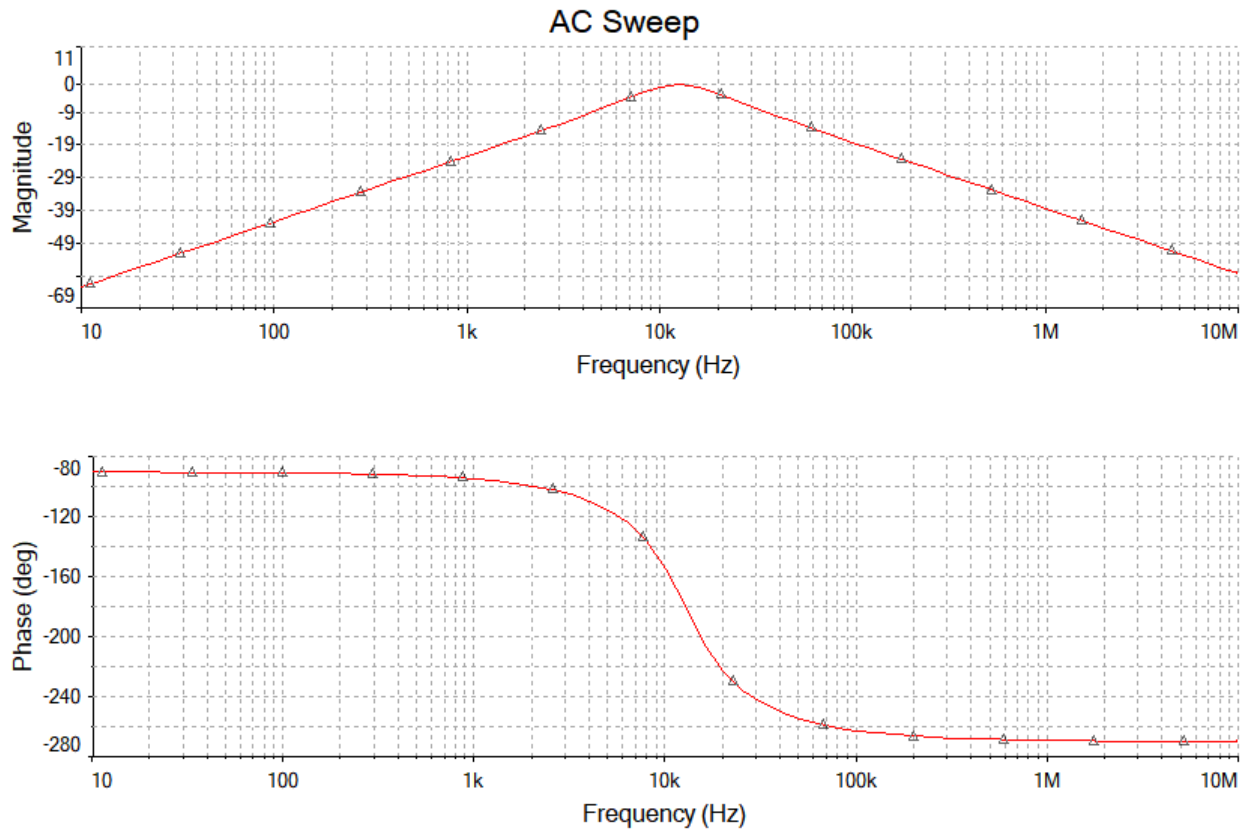


Obrázek 16: Amplitudová a fázová charakteristika pásmové propusti

Pokud bude požadována úzká šířka pásma, k realizaci bude postačovat obvod s dvěma kapacitami. Volbě propustného pásma $\omega_0 = 12 - 14$ kHz odpovídá modulová charakteristika na obrázku 18. Oproti předchozímu zapojení byl obdržen vyšší činitel jakosti (def.: činitel jakosti $Q = \frac{1}{B}$, kde B je šířka pásma definovaná rozdílem kmitočtů, při kterých klesne přenos cca o -3dB).



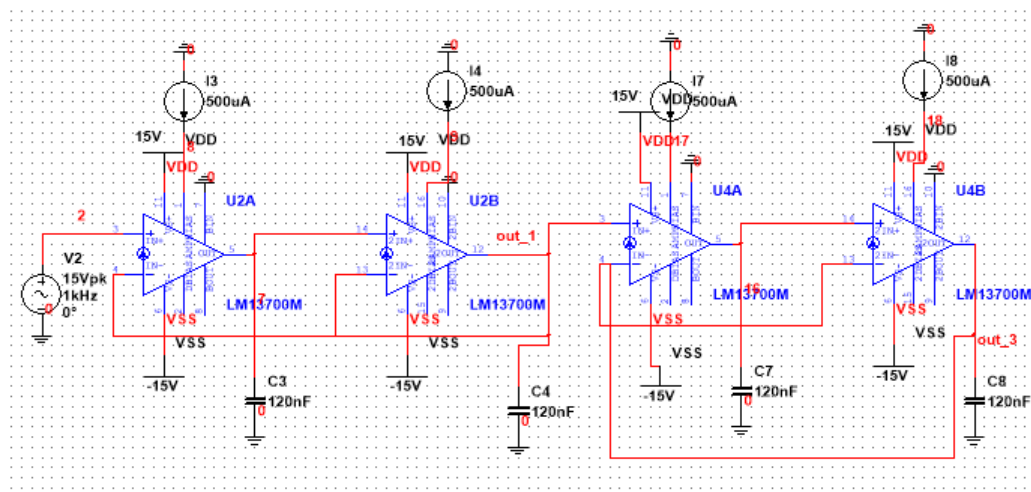
Obrázek 17: Schéma zapojení pásmové propusti s užší šířkou propustného pásma (LM13700M)



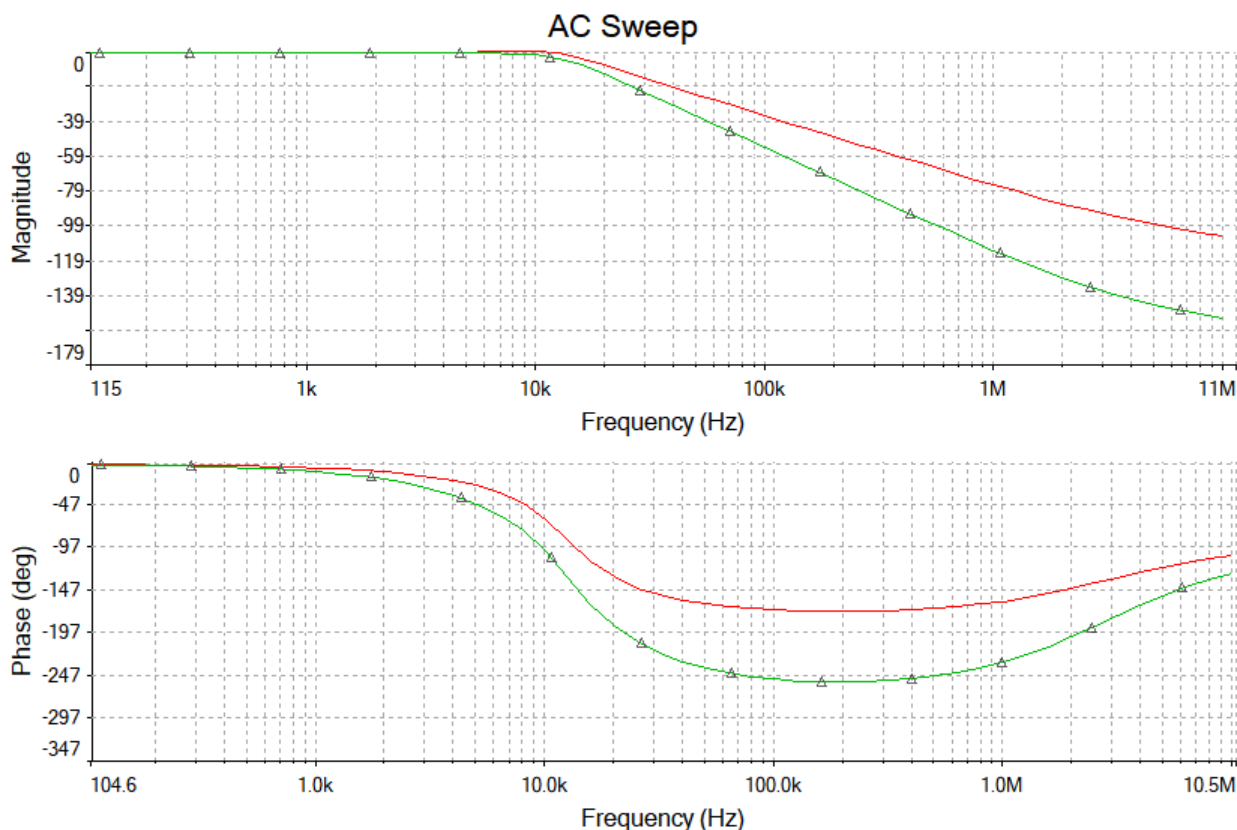
Obrázek 18: Amplitudová a fázová charakteristika pásmové propusti s užší šířkou propustného pásma

7 Dolní propust vyšších řádů - simulace

Kaskádním zapojením dolní propusti ze sekce 5 byly obdrženy následující výsledky. Byl obdržen filtr 3. řádu s poklesem -60 dB/dek.



Obrázek 19: Schéma kaskádního zapojení dolní propusti



Obrázek 20: Amplitudová a fázová charakteristika kaskádního zapojení dolní propusti

Reference

- [1] HOSPODKA, Jiří. *Úvod do syntézy kmitočtových filtrů* [online]. Praha, 2018 [cit. 2019-03-30]. Dostupné z: <https://moodle.fel.cvut.cz/course/view.php?id=2670>. Přednáška. ČVUT FEL. Slide 23/24.
- [2] 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.
- [3] 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. Slide 24/41.
- [4] *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
- [5] 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 1/37.
- [6] ZUMCHAK, Gene. *A Short Discussion of the Operational Transconductance Amplifier (OTA)*. Synthesizer DIY pages of René Schmitz [online]. 1999 [cit. 2019-03-30]. Dostupné z: <https://www.schmitzbits.de/ota3080.html> Obrázek 5.
- [7] SCHAUMANN, Rolf a Mac E. Van VALKENBURG. *Design of Analog Filters*. New York: Oxford University Press, 2001. ISBN 0195118774. Pořadí obrázků 5-33 b), 4-13, 4-36 a), b).
- [8] HASLER, Paul. *Basics of Transconductance – Capacitance Filters*. In: *Integrated Computational Electronics Laboratory (ICE)* [online]. 2019 [cit. 2019-03-30]. Dostupné z: hasler.ece.gatech.edu/Courses/ECE6414/Unit3/gmCFilter01.pdf Slide 21/27.

- [9] 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