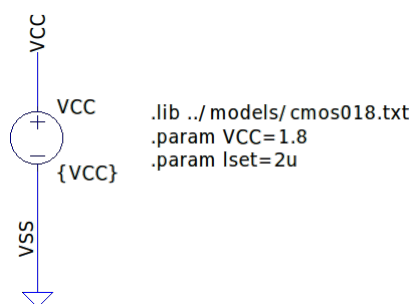


Návrh analogových integrovaných obvodů Ústav mikroelektroniky FEKT VUT v Brně			Jméno Jakub Charvot	ID 240844
			Ročník 3.	Obor MET
Spolupracoval –	Měřeno dne 08.04. 2024	Odevzdáno dne 28.04. 2024	Hodnocení	
Název zadání Návrh dvoustupňového zesilovače				Č. úlohy 5

1 Vypracování



Obr. 1: Společná část SPICE kódu a napájecí zdroj.

1.1 Ruční návrh

Označení součástek v této kapitole odpovídá Obr. 2.

Nejprve zvolíme hodnotu kompenzační kapacity:

$$C_C = 0,3 \cdot C_L = 0,3 \cdot 5 \cdot 10^{-12} = 1,5 \text{ pF}$$

Dále je potřeba stanovit minimální potřebné proudy v obvodu:

$$GBW = \frac{\frac{2 \cdot I_1}{U_{OV1}}}{2 \cdot \pi \cdot C_C}$$

$$I_1 = U_{OV1} \cdot \pi \cdot C_C \cdot GBW$$

$$I_1 = 0,2 \cdot \pi \cdot 1,5 \cdot 10^{-12} \cdot 10 \cdot 10^6$$

$$I_1 = 9,42 \text{ }\mu\text{A}$$

$$SR_{int} = \frac{I_{p3}}{C_C}$$

$$I_{p3} = SR_{int} \cdot C_C$$

$$I_{p3} = 5 \cdot 10^6 \cdot 1,5 \cdot 10^{-12}$$

$$I_{p3} = 7,5 \text{ }\mu\text{A}$$

Aby bylo vyhověno všem parametrům a zachována jistá návrhová rezerva byl zvolen proud $I_{p3} = 20 \text{ }\mu\text{A}$ a proudy $I_1 = I_2 = 10 \text{ }\mu\text{A}$.

Ze stanovených proudů lze vypočítat rozměry tranzistorů:

$$\frac{W_{p3}}{L} = \frac{2 \cdot I_{p3}}{KP_P \cdot (U_{GS} - U_{TH})^2}$$

$$\frac{W_{p3}}{L} = \frac{2 \cdot 20 \cdot 10^{-6}}{60 \cdot 10^{-6} \cdot 0,2^2}$$

$$\frac{W_{p3}}{L} = 16,67$$

Tedy $W_{p3} = 33,33 \text{ }\mu\text{m}$. Proud touto větví se dále dělí na půl, tedy platí $W_{p1,2} = W_{p3}/2 = 16,67 \text{ }\mu\text{m}$.

Ekvivalentní výpočet pro tranzistorů typu N:

$$\frac{W_{n1,2}}{L} = \frac{2 \cdot I_{n1,2}}{KP_N \cdot (U_{GS} - U_{TH})^2}$$

$$\frac{W_{n1,2}}{L} = \frac{2 \cdot 10 \cdot 10^{-6}}{220 \cdot 10^{-6} \cdot 0,2^2}$$

$$\frac{W_{n1,2}}{L} = 2,27$$

Tedy $W_{n1,2} = 4,54 \mu\text{m}$.

Z podmínky pro fázovou bezpečnost alespoň 60° vyplývá pro druhý stupeň desetkrát větší proud než pro první stupeň. Tedy i rozměry tranzistorů ve výstupní větvi budou desetkrát větší, platí:

$$W_{p4} = 10 \cdot W_{p2} = 166,7 \mu\text{m}$$

$$W_{n3} = 10 \cdot W_{n2} = 45,4 \mu\text{m}$$

Pro poslední tranzistor M_{p5} zvolíme stejný proud (a tedy i rozměry) jako pro M_{p3} , zbývá dopočít hodnotu R_1 :

$$R_1 = \frac{U_{CC} - (U_{DSp5min} + U_{TH0p5})}{I_{p5}}$$

$$R_1 = \frac{1,8 - (0,2 + 0,43)}{20 \cdot 10^{-6}}$$

$$R_1 = 58,5 \text{ k}\Omega$$

1.1.1 Předpokládané hodnoty parametrů

Na základě zvolených hodnot proudů a rozměrů součástek je potřeba znovu přepočítat některé parametry:

$$GBW = \frac{\frac{2 \cdot I_1}{U_{OV1}}}{2 \cdot \pi \cdot C_C}$$

$$GBW = \frac{\frac{2 \cdot 10 \cdot 10^{-6}}{0,2}}{2 \cdot \pi \cdot 1,5 \cdot 10^{-12}}$$

$$GBW = 10,61 \text{ MHz}$$

$$SR_{int} = \frac{I_{p3}}{C_C}$$

$$SR_{int} = \frac{20 \cdot 10^{-6}}{1,5 \cdot 10^{-12}}$$

$$SR_{int} = 13,33 \text{ V}/\mu\text{s}$$

Odhadovaná spotřeba zařízení:

$$P = U_{CC} \cdot (I_{p5} + I_{p3} + I_{p4})$$

$$P = 1,8 \cdot (20 \cdot 10^{-6} + 20 \cdot 10^{-6} + 100 \cdot 10^{-6})$$

$$P = 252,00 \mu\text{W}$$

Vstupní rozsah souhlasného napětí:

$$U_{ICMRmin} = U_{TH,n} - U_{TH,p} + U_{OV3}$$

$$U_{ICMRmin} = 387,106 \cdot 10^{-3} - 443,3 \cdot 10^{-3} + 0,2$$

$$U_{ICMRmin} = 143,8 \text{ mV}$$

$$U_{ICMRmax} = U_{TH,p} + U_{OV1} + U_{OV5}$$

$$U_{ICMRmax} = 443,3 \cdot 10^{-3} + 0,2 + 0,2$$

$$U_{ICMRmax} = 843,3 \text{ mV}$$

Výstupní napěťový rozsah:

$$OVS = U_{CC} - U_{OV7} - U_{OV6}$$

$$OVS = 1,8 - 0,2 - 0,2$$

$$OVS = 1,4 \text{ V}$$

Zesílení:

$$A_{U0} = g_{m1} \cdot (r_{DS2} || r_{DS4}) \cdot g_{m6} \cdot (r_{DS6} || r_{DS7})$$

$$A_{U0} = \frac{2 \cdot I_1}{U_{OV1}} \cdot \left(\frac{\frac{1}{\lambda_2 I_2} \cdot \frac{1}{\lambda_4 I_4}}{\frac{1}{\lambda_2 I_2} + \frac{1}{\lambda_4 I_4}} \right) \cdot \frac{2 \cdot I_6}{U_{OV6}} \cdot \left(\frac{\frac{1}{\lambda_6 I_6} \cdot \frac{1}{\lambda_7 I_7}}{\frac{1}{\lambda_6 I_6} + \frac{1}{\lambda_7 I_7}} \right)$$

$$A_{U0} = \frac{2 \cdot 10 \cdot 10^{-6}}{0,2} \cdot \left(\frac{\frac{1}{0,08 \cdot 10 \cdot 10^{-6}} \cdot \frac{1}{0,04 \cdot 10 \cdot 10^{-6}}}{\frac{1}{0,08 \cdot 10 \cdot 10^{-6}} + \frac{1}{0,04 \cdot 10 \cdot 10^{-6}}} \right) \cdot \frac{2 \cdot 100 \cdot 10^{-6}}{0,2} \cdot \left(\frac{\frac{1}{0,04 \cdot 100 \cdot 10^{-6}} \cdot \frac{1}{0,08 \cdot 100 \cdot 10^{-6}}}{\frac{1}{0,04 \cdot 100 \cdot 10^{-6}} + \frac{1}{0,08 \cdot 100 \cdot 10^{-6}}} \right)$$

$$A_{U0} = 6944,44 = 76,83 \text{ dB}$$

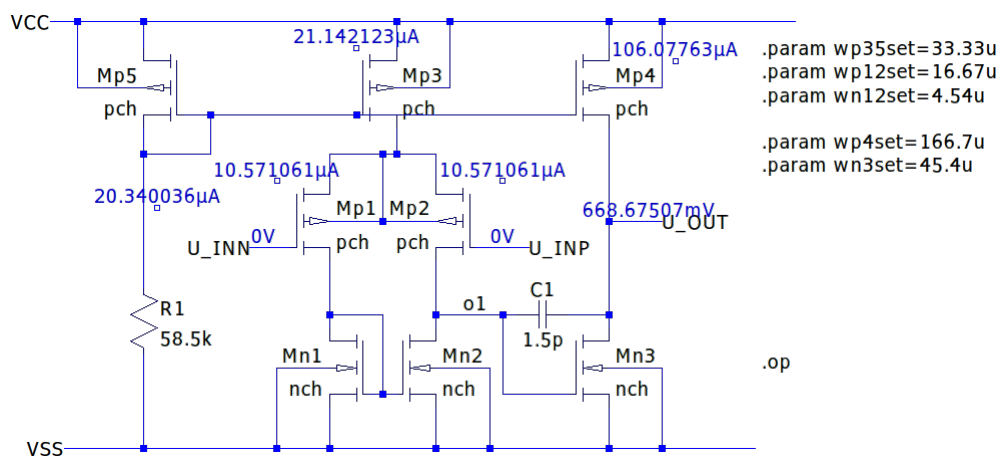
1.1.2 Zapojení na tranzistorové úrovni

Z analýzy .OP lze vypočítat spotřebu zapojení:

$$P = U_{CC} \cdot (I_{p5} + I_{p3} + I_{p4})$$

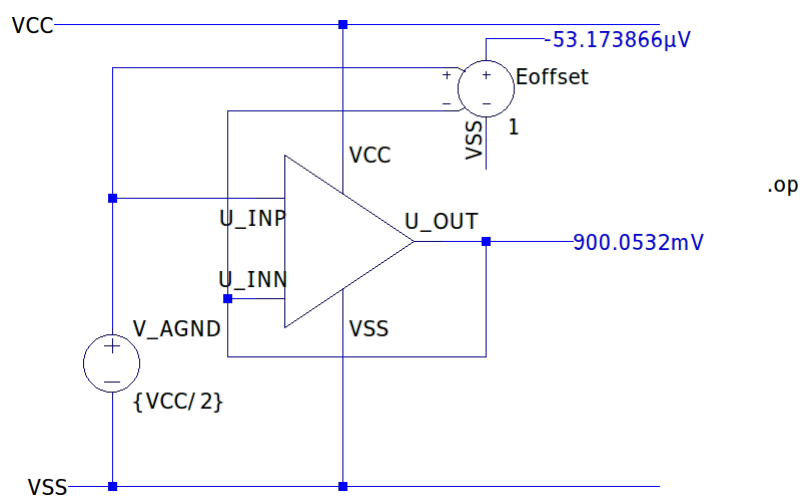
$$P = 1,8 \cdot (20,34 \cdot 10^{-6} + 21,142 \cdot 10^{-6} + 106,07 \cdot 10^{-6})$$

$$P = 265,59 \text{ } \mu\text{W}$$



Obr. 2: Vnitřní zapojení OTA zesilovače.

1.2 Zapojení pro .OP analýzu



Obr. 3: Zapojení pro .OP analýzu.

1.3 Analýza .AC

Natevení filtru typu DP pro $f_m = 10 \mu\text{Hz}$:

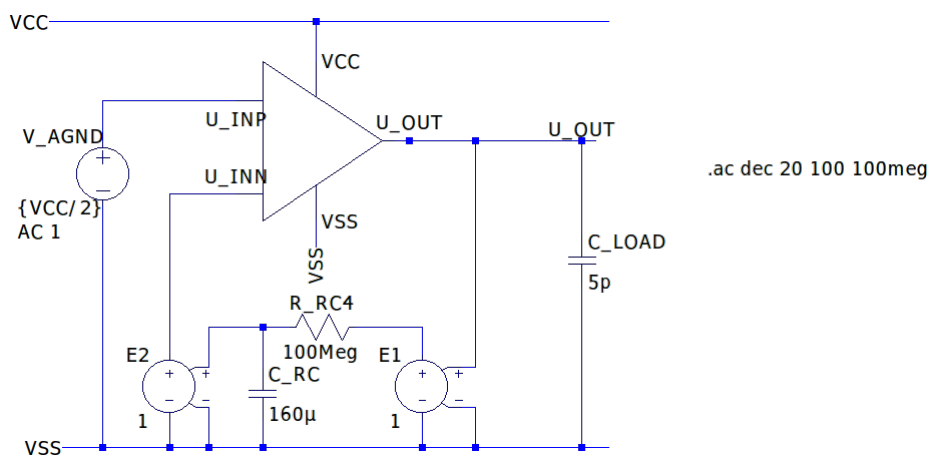
$$\tau = \frac{1}{\omega}$$

$$R \cdot C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_{RC}}$$

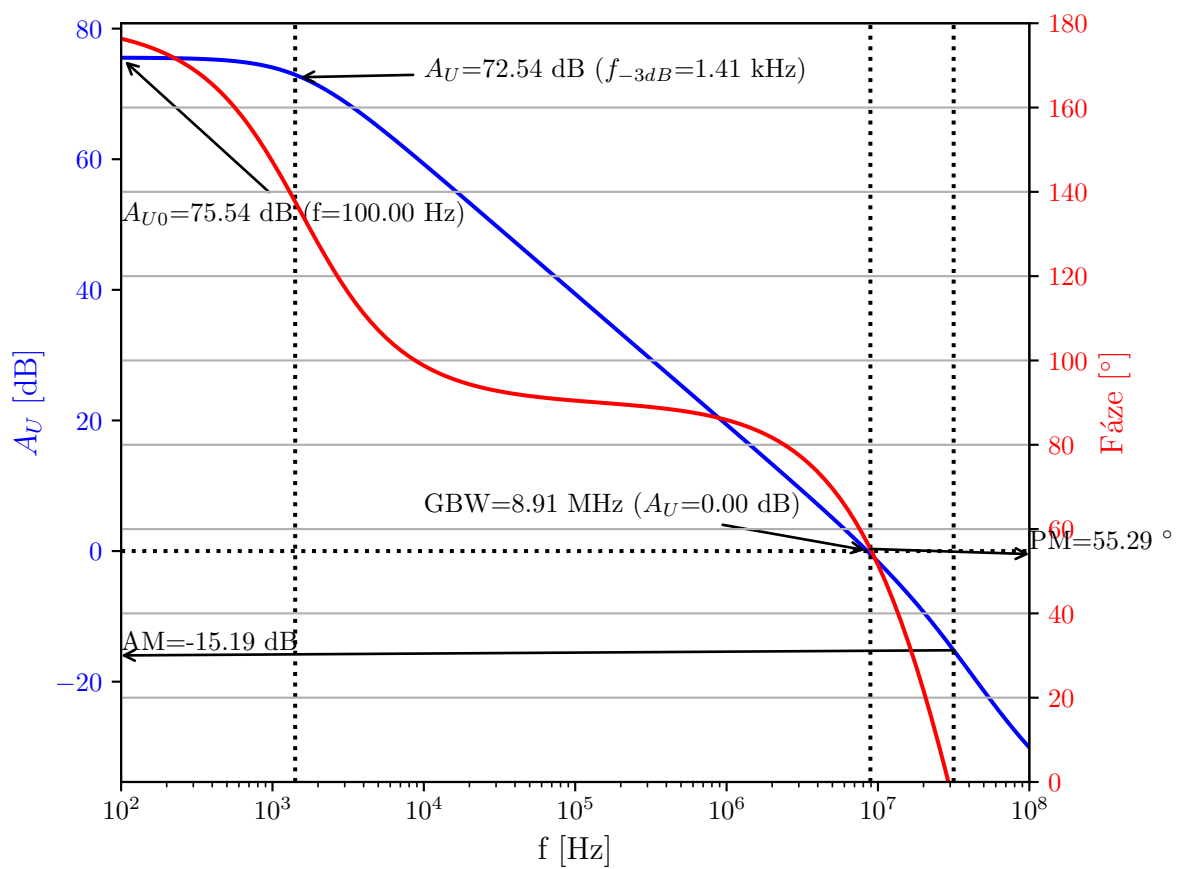
$$R \cdot C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 10 \cdot 10^{-6}}$$

$$R \cdot C = 16 \cdot 10^3$$

Pokud zvolíme $R = 100 \text{ M}\Omega$, pro kondenzátor vychází $C = 16 \cdot 10^3 / 100 \cdot 10^6 = 160 \mu\text{F}$

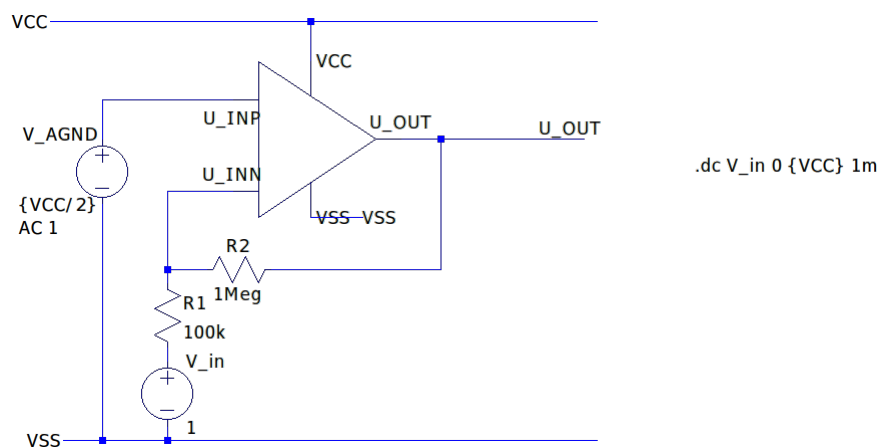


Obr. 4: Zapojení pro .AC analýzu.

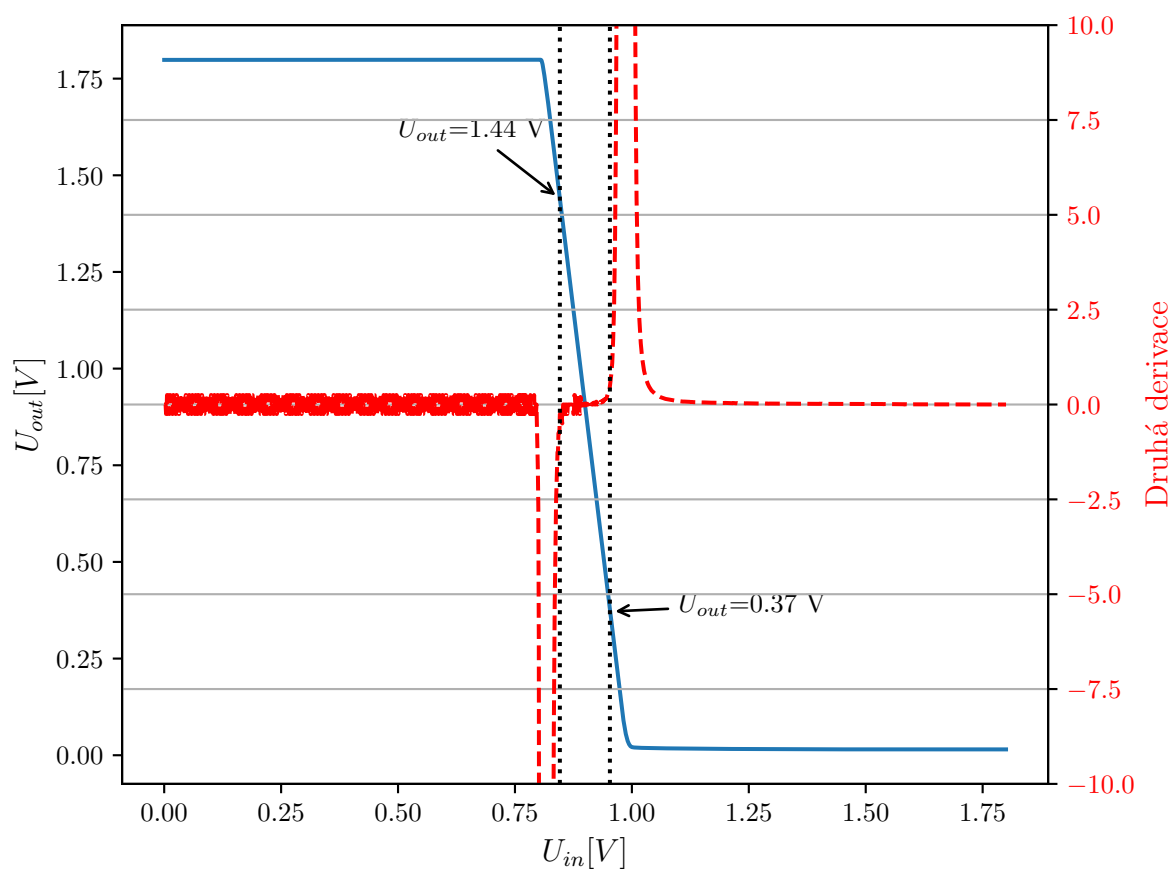


Obr. 5: Výsledky .AC analýzy.

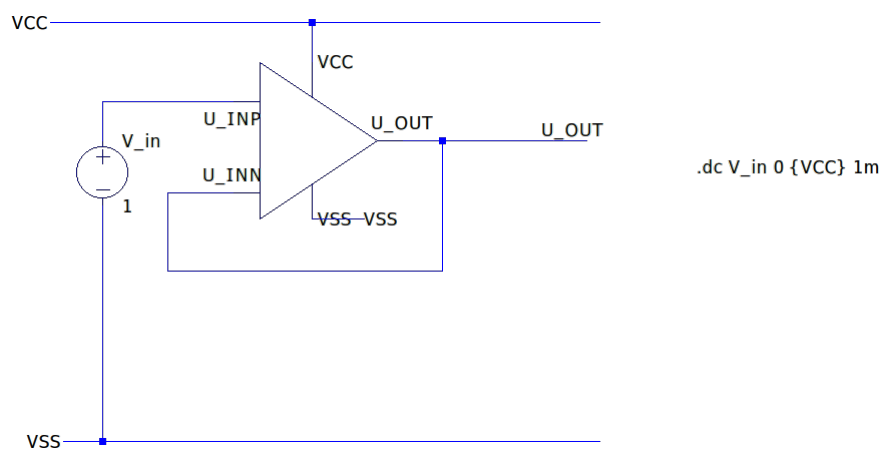
1.4 Analýza .DC



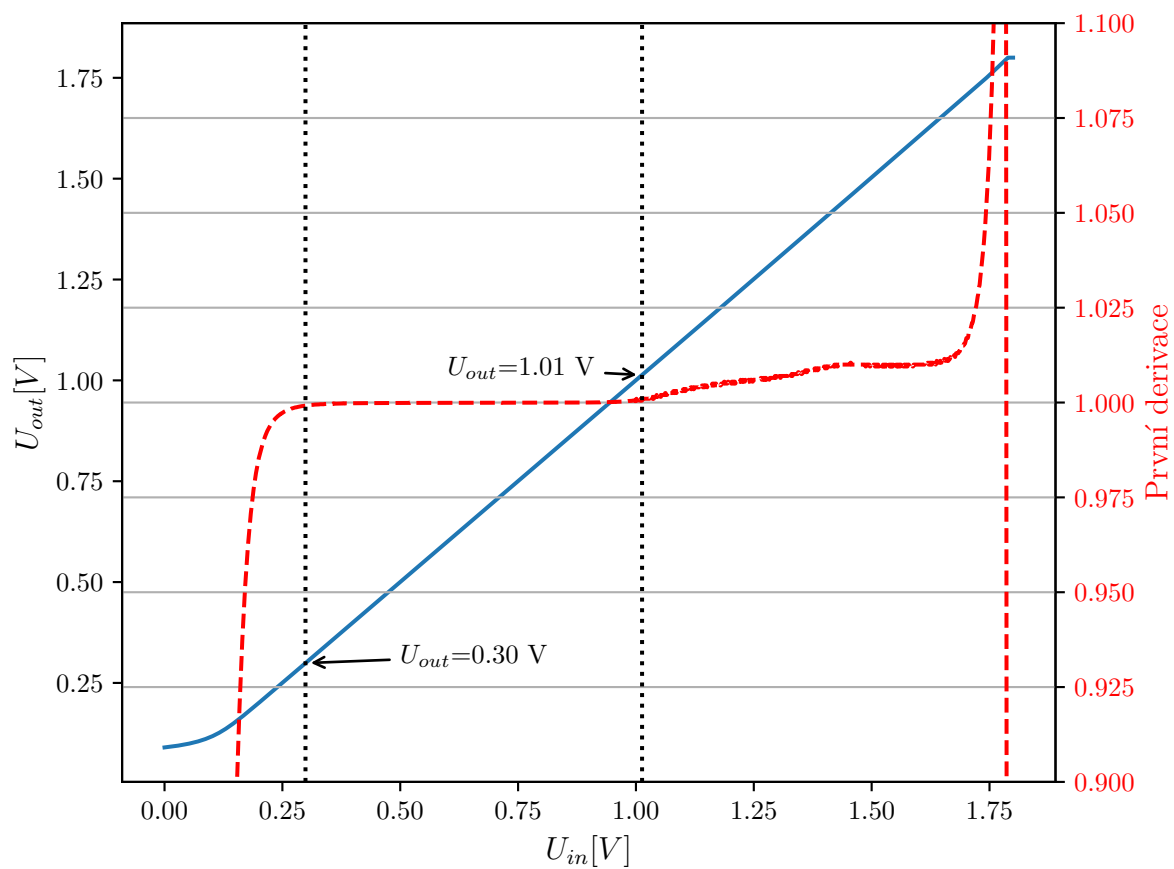
Obr. 6: Zapojení pro .DC analýzu OVS.



Obr. 7: Výsledky .DC analýzy pro měření OVS.

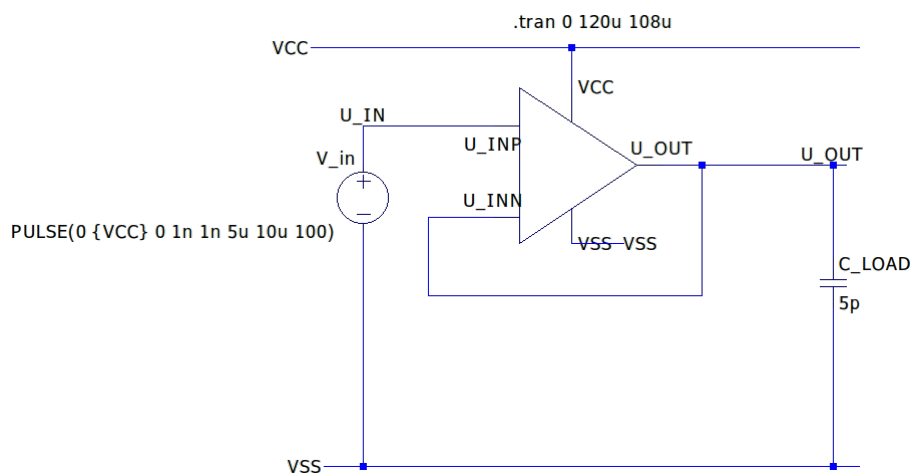


Obr. 8: Zapojení pro .DC analýzu ICMR.

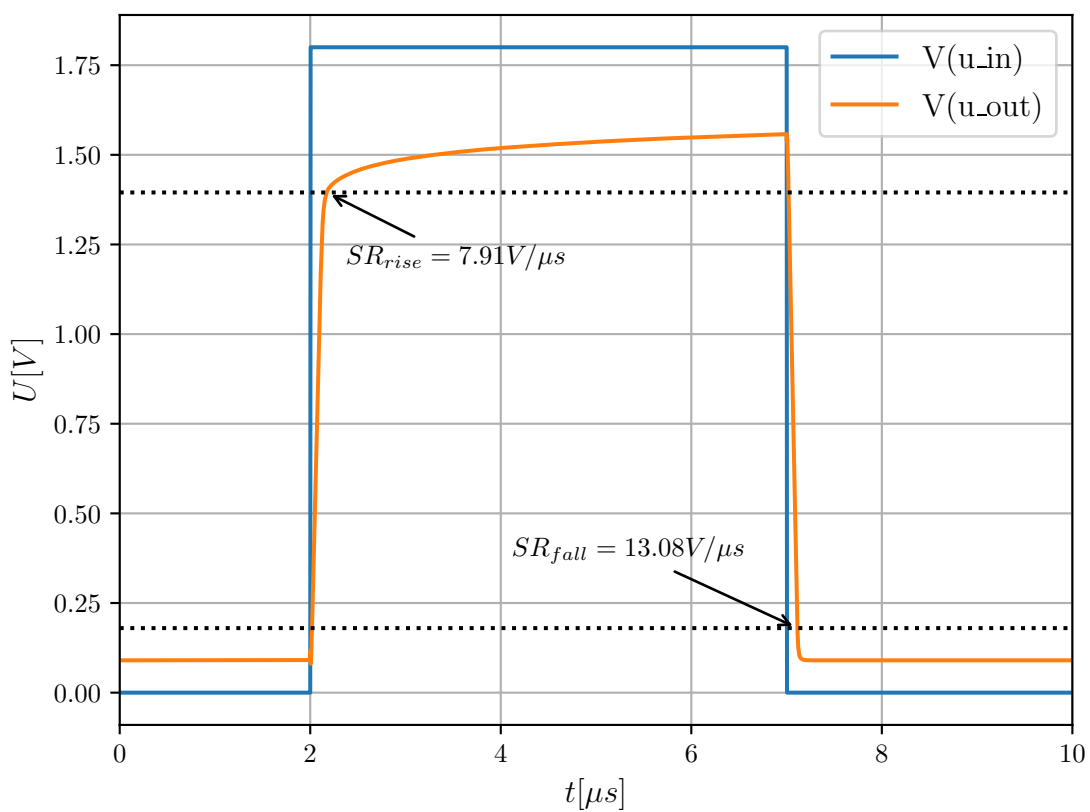


Obr. 9: Výsledky .DC analýzy pro měření ICMR.

1.5 Analýza .TRAN



Obr. 10: Zapojení pro .TRAN analýzu.



Obr. 11: Výsledky .TRAN analýzy pro měření SR.

2 Závěr

Cílem úlohy bylo navrhnout dvoustupňový zesilovač splňující požadovaná kritéria. Na základě požadavků byl proveden ruční návrh a také ruční výpočet předpokládaných výstupních parametrů, následně byl návrh prověřen simulacemi. Porovnání získaných hodnot se nachází v Tab. 2.

Pro všechny parametry vyšla simulace o něco hůře, než byl předpoklad na základě výpočtů. S jistou rezervou (oproti požadavkům) vyšlo zesílení, SR a amplitudová rezerva. Naopak šířka pásma a fázová rezerva nedosahují požadovaných hodnot.

Tabulka 1: Požadované parametry dvoustupňového OTA

Parametr	Hodnota	Vypočítané	Simulace
Zesílení (A_{U0})	≥ 60 dB	76,83 dB	75,54 dB
Šířka pásma (GBW)	≥ 10 MHz	10,61 MHz	8,91 MHz
Fázová rezerva (PM)	$\geq 60^\circ$	60°	$55,29^\circ$
Amplitudová rezerva (AM)	$- * 2$ dB	nepoč.	$-15,19$ dB
Rychlost přeběhu (SR)* ¹	≥ 5 V/ μ s	13,33 V/ μ s	7,91 V/ μ s
Systematický offset při $U_{IN} = U_{ANGD} (U_{OFF})$	$\leq 500 \mu$ V	0	53,17 μ V
Spotřeba (P_{DISS})	$- * 2$ W	252,00 μ W	265,59 μ W
Vstupní rozsah souhlasného napětí ($ICMR$)	$- * 2$ V	0,14 - 0,84 V	0,3 - 1,01 V
Výstupní napěťový rozsah (OVS)	$- * 2$ V	1,4 V	0,37 - 1,44 V

*¹ Pro nástupnou i sestupnou hranu (SR_{rise} , SR_{fall})

*² Není stanovena požadovaná hodnota