

Návrh analogových integrovaných obvodů Ústav mikroelektroniky FEKT VUT v Brně	Jméno Tomáš Vavrinec		ID 240893
	Ročník	Obor MET	Skupina
Název zadání 4. Dvoustupňový zesilovač			Č. úlohy 4

ZADÁNÍ ÚLOHY

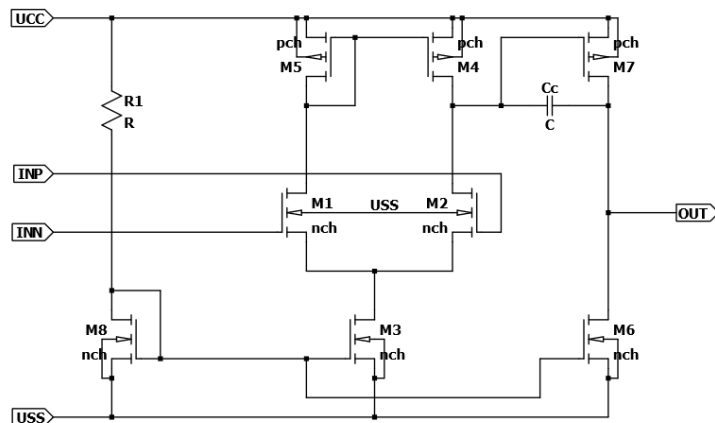
Navrhněte dvoustupňový operační zesilovač se vstupními tranzistory typu NMOS podle obr. 1, který bude navržen pro tyto vstupní parametry s $CL = 10 \text{ pF}$.

Tabulka 1: Požadované parametry

parametr	hodnota	Vypočítané	Simulace
zesílení (A_{u0})	$\geq 60 \text{ dB}$		
šířka pásma (GBW)	$\geq 10 \text{ MHz}$		
fázová rezerva (PM)	$\geq 60^\circ$	60°	
amplitudová rezerva (AM)	$- \text{dB}$	Nepočítá se	
rychlost přeběhu (SR)*	$\geq 10 \text{ V}/\mu\text{s}$		
systematický offset (U_{OFF})	$\leq 500 \mu\text{V}$	0	
spotřeba (P_{diss})	$- \text{mW}$		
vstupní napěťový rozsah ($ICMR$)	$- \text{V}$		
výstupní napěťový rozsah (OVS)	$- \text{V}$		

* pro nástupnou i sestupnou hranu

Vypočítejte a následně simulací zjistěte dosažené parametry z tab. 1. Zobrazte SPICE Output log s parametry všech tranzistorů a vložte jej do protokolu. Zkontrolujte především gm vstupních tranzistorů a gm_7 , zda odpovídá výpočtu. Dále vložte do protokolu simulační schémata a výstupy simulací ukazující odsimulované hodnoty. orovnejte výsledky s ručními výpočty - vytvořte tabulku odsimulovaných a vypočítaných parametrů (viz. Tab. 1 - stejná bude v závěru).



Obr. 1: Schéma zesilovače

1 Vypracování

1.1 Zesilovač s odporovou zátěží

Jako první určíme proud I_d , to uděláme dvěma způsoby, podle požadovaného SR a podle požadovaného GBW a vybereme ten větší.

Pro oba výpočty budeme potřebovat určit kompenzační kapacitu C_c , kterou určíme ze zadané kapacity na výstupu jako $C_c = 0.3 \cdot C_L = 3[pF]$.

Podle SR

$$I_d = SR \cdot C_L = 10\mu \cdot 3p = 30[\mu A]$$

Podle GBW

$$I_d = GBW \cdot U_{OV} \cdot \pi \cdot C_L = 10\mu \cdot 0.2 \cdot \pi \cdot 3p = 18.84[\mu A]$$

Proud tedy bude $I_{d1} = 30[\mu A]$.

Dále můžeme určit rozměry tranzistorů M_1 až M_5 , s tím že $I_{dM3} = 2 \cdot I_{d1}$. Také budeme muset zvolit napětí U_{OV} , která jsme s ohledem na pracovní rozsah už v minulém kroku zvolili jako $U_{OV} = 0.2[V]$. Délku tranzistoru L zvolím s ohledem na parametr λ $L = 2[\mu m]$.

$$W_{M1} = W_{M2} = L \cdot \frac{2 \cdot I_{d1}}{K_{PN} \cdot U_{OV}^2} = 2\mu \cdot \frac{2 \cdot 30\mu}{200\mu \cdot 0.2^2} = 15[\mu m]$$

$$W_{M3} = L \cdot \frac{2 \cdot I_{d1}}{K_{PN} \cdot U_{OV}^2} = 2\mu \cdot \frac{2 \cdot 60\mu}{200\mu \cdot 0.2^2} = 30[\mu m]$$

$$W_{M4} = W_{M5} = L \cdot \frac{2 \cdot I_d}{K_{PP} \cdot U_{OV}^2} = 2\mu \cdot \frac{2 \cdot 30\mu}{50\mu \cdot 0.2^2} = 60[\mu m]$$

Dále můžeme určit proud výstupním stupněm jako desetinásobek proudu diferenčním stupněm, tedy $I_{dM7} = 300[\mu A]$, z čehož můžeme určit rozměry tranzistorů $M6$ až $M7$.

$$W_{M6} = L \cdot \frac{2 \cdot I_d}{K_{PN} \cdot U_{OV}^2} = 2\mu \cdot \frac{2 \cdot 300\mu}{200\mu \cdot 0.2^2} = 150[\mu m]$$

$$W_{M7} = L \cdot \frac{2 \cdot I_d}{K_{PP} \cdot U_{OV}^2} = 2\mu \cdot \frac{2 \cdot 300\mu}{50\mu \cdot 0.2^2} = 600[\mu m]$$

Tranzistor M_8 zvolíme třetinový oproti tranzistoru M_3 , abychom šetřili proudem, tedy $L = 2[\mu m]$ $W = 10[\mu m]$ a zbývá určit jen rezistor R_1 jako:

$$R_1 = \frac{U_{CC} - (U_{OV} + U_{TH})}{I_{dM3}} = \frac{1.8 - (0.2 + 0.4)}{20\mu} = 60[k\Omega]$$

Zesílení bychom mohli určit jako:

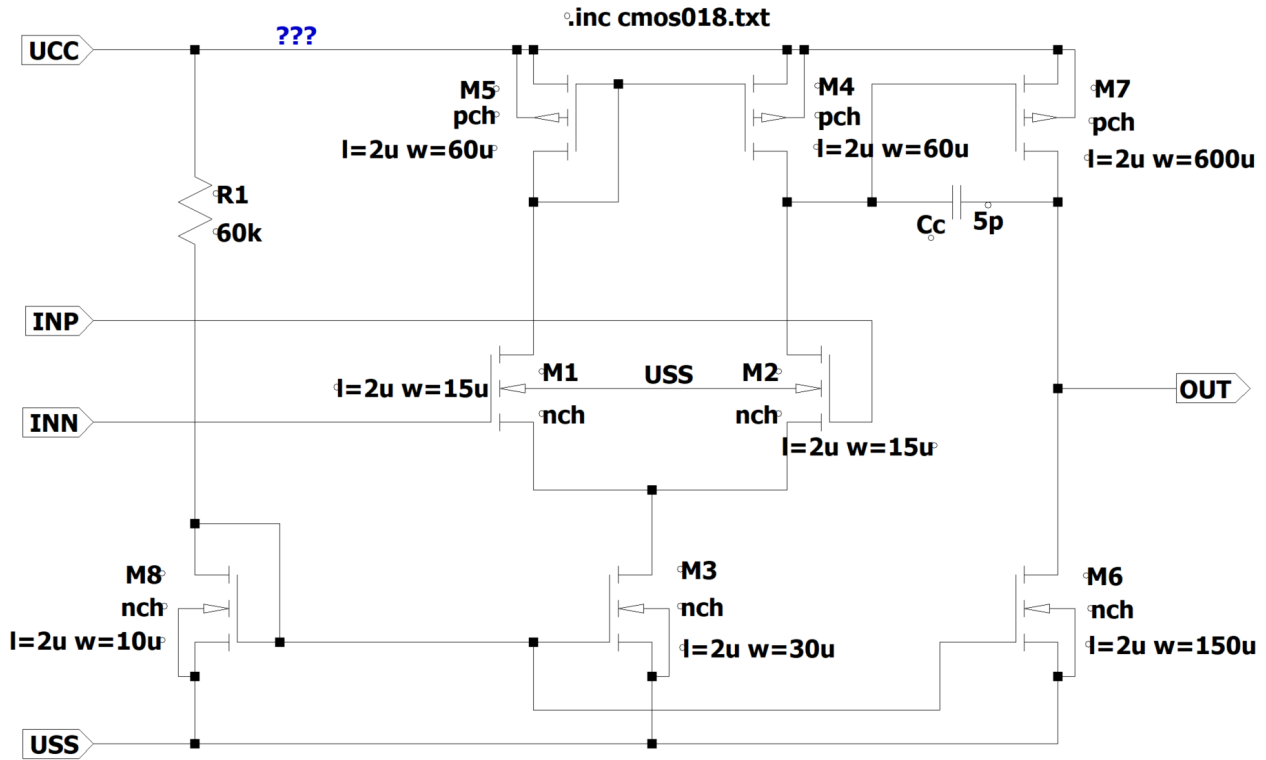
$$\begin{aligned} A_{U0} &= A_1 \cdot A_2 = g_{m1} \cdot R_{01} \cdot g_{m6} \cdot R_{02} = \\ &= \frac{2 \cdot I_{D1}}{U_{OV}} \frac{\frac{1}{\lambda_{M1,2} \cdot I_{M1,2}} \cdot \frac{1}{\lambda_{M4,5} \cdot I_{M4,5}}}{\frac{1}{\lambda_{M1,2} \cdot I_{M1,2}} + \frac{1}{\lambda_{M4,5} \cdot I_{M4,5}}} \frac{2 \cdot I_{D6}}{U_{OV}} \frac{\frac{1}{\lambda_{M1,2} \cdot I_{M1,2}} \cdot \frac{1}{\lambda_{M7} \cdot I_{M6}}}{\frac{1}{\lambda_{M7} \cdot I_{M6}}} = \\ &= \frac{2 \cdot 30\mu}{0.2} \frac{\frac{1}{0.0441692 \cdot 30\mu} \cdot \frac{1}{0.0787698 \cdot 30\mu}}{\frac{1}{0.0441692 \cdot 30\mu} + \frac{1}{0.0787698 \cdot 30\mu}} \frac{2 \cdot 30\mu}{0.2} \frac{\frac{1}{0.0441692 \cdot 30\mu} \cdot \frac{1}{0.0787698 \cdot 30\mu}}{\frac{1}{0.0441692 \cdot 30\mu}} = 10326.438 \end{aligned}$$

V decibelech tedy:

$$A_{U0-dB} = 20 \cdot \log_{10}(10326.438) = 80.3[dB]$$

Výsledné SR bychom mohli odhadnout jako:

$$SR = \frac{I_{D-M7}}{C_L} = \frac{300\mu}{10p} = 30[V/\mu s]$$



Obr. 2: Výslední schéma

Spotřebu zesilovače jako:

$$P = I_{IN} \cdot U_{CC} = (I_{D-M3} + I_{D-M6} + I_{D-M8}) \cdot U_{CC} = (300\mu + 60\mu + 20\mu) \cdot 1.8 = 684[\mu W]$$

GBW odhadneme jako:

$$GBW = \frac{I_d}{U_{OV} \cdot \pi \cdot C_L} = \frac{300\mu}{0.2 \cdot \pi \cdot 10p} = 47.8[MHz]$$

rozsah pak odhadneme následovně:

$$U_{OUT-min} = U_{OUT7} = 0.2[V] \quad U_{OUT-max} = U_{CC} - U_{OV6} = 1.8 - 0.2 = 1.6[V]$$

$$U_{IN-min} = U_{GS5} + U_{OV1} - U_{GS1} = 0.6 + 0.2 - 0.6 = 0.2[V]$$

$$U_{IN-max} = U_{CC} - U_{GS1} - U_{OV3} = 1.8 - 0.6 - 0.2 = 1[V]$$

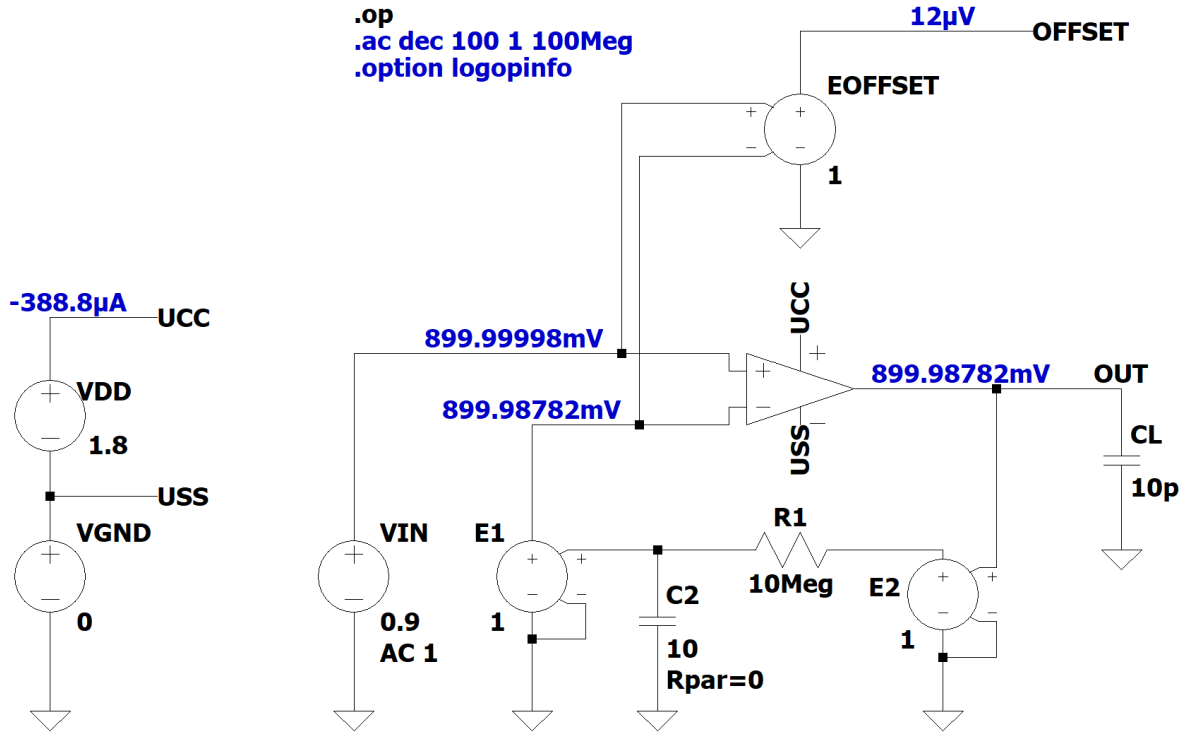
Z charakteristiky 4 je vidět, že stejnosměrné zesílení víc než splňuje, zesílení přes 78[dB] oproti požadovanému minimu 60[dB].

Obdobně vychází i $GBW \approx 10.2[MHz]$. Přestože GBW splňuje zadání, dalo by se čekat, že bude splněno s větší rezervou vzhledem k odstupu proudu určenému splnění GBW a SR . To je pravděpodobně způsobeno zanedbáním kapacity tranzistoru M_7 , která tak prodlužuje časovou konstantu obvodu a tedy zmenšuje propustné pásmo.

Fázová rezerva vychází $PM = 31^\circ$, což zadání poměrně výrazně nesplňuje. Jak je ale vidět na časovém průběhu 5 výstup je i přesto téměř úplně stabilní.

Amplitudová rezerva pak vychází na $AM = -9.12[dB]$.

Z provedené .OP analýzy plyne hodnota offsetu $U_{OFF} = 12[\mu V]$, což splňuje zadání s řadovou rezervou. Na stejném místě můžeme zjistit i spotřebu obvodu $P_{diss} = 388.8\mu \cdot 1.8 = 700[\mu W]$.



Obr. 3: .OP analýza obvodu

Name:	m1	m2	m3	m6	m8	m4	m5	m7
Model:	nch	nch	nch	nch	nch	pch	pch	pch
Id	$2.97 \cdot 10^{-5}$	$2.97 \cdot 10^{-5}$	$5.94 \cdot 10^{-5}$	$3.09 \cdot 10^{-4}$	$2.03 \cdot 10^{-5}$	$-2.97 \cdot 10^{-5}$	$-2.97 \cdot 10^{-5}$	$-3.09 \cdot 10^{-4}$
Vgs	$6.48 \cdot 10^{-1}$	$6.48 \cdot 10^{-1}$	$5.82 \cdot 10^{-1}$	$5.82 \cdot 10^{-1}$	$5.82 \cdot 10^{-1}$	$-5.88 \cdot 10^{-1}$	$-5.88 \cdot 10^{-1}$	$-5.90 \cdot 10^{-1}$
Vds	$9.59 \cdot 10^{-1}$	$9.58 \cdot 10^{-1}$	$2.52 \cdot 10^{-1}$	$9.00 \cdot 10^{-1}$	$5.82 \cdot 10^{-1}$	$-5.90 \cdot 10^{-1}$	$-5.90 \cdot 10^{-1}$	$-9.00 \cdot 10^{-1}$
Vbs	$-2.52 \cdot 10^{-1}$	$-2.52 \cdot 10^{-1}$	$0.00 \cdot 10^0$	$0.00 \cdot 10^0$	$0.00 \cdot 10^0$	$0.00 \cdot 10^0$	$0.00 \cdot 10^0$	$0.00 \cdot 10^0$
Vth	$4.59 \cdot 10^{-1}$	$4.59 \cdot 10^{-1}$	$3.83 \cdot 10^{-1}$	$3.82 \cdot 10^{-1}$	$3.83 \cdot 10^{-1}$	$-4.04 \cdot 10^{-1}$	$-4.04 \cdot 10^{-1}$	$-4.04 \cdot 10^{-1}$
Vdsat	$1.56 \cdot 10^{-1}$	$1.56 \cdot 10^{-1}$	$1.54 \cdot 10^{-1}$	$1.56 \cdot 10^{-1}$	$1.56 \cdot 10^{-1}$	$-1.57 \cdot 10^{-1}$	$-1.57 \cdot 10^{-1}$	$-1.57 \cdot 10^{-1}$
Gm	$3.17 \cdot 10^{-4}$	$3.17 \cdot 10^{-4}$	$6.16 \cdot 10^{-4}$	$3.42 \cdot 10^{-3}$	$2.15 \cdot 10^{-4}$	$3.01 \cdot 10^{-4}$	$3.01 \cdot 10^{-4}$	$2.49 \cdot 10^{-3}$
Gds	$5.32 \cdot 10^{-7}$	$5.32 \cdot 10^{-7}$	$1.06 \cdot 10^{-6}$	$1.19 \cdot 10^{-5}$	$3.12 \cdot 10^{-7}$	$2.48 \cdot 10^{-7}$	$2.48 \cdot 10^{-7}$	$2.49 \cdot 10^{-6}$
Gmb	$8.02 \cdot 10^{-5}$	$8.02 \cdot 10^{-5}$	$3.09 \cdot 10^{-4}$	$3.43 \cdot 10^{-3}$	$1.67 \cdot 10^{-4}$	$9.56 \cdot 10^{-5}$	$9.56 \cdot 10^{-5}$	$9.84 \cdot 10^{-4}$
Cbd	$0.00 \cdot 10^0$	$0.00 \cdot 10^0$	$0.00 \cdot 10^0$	$0.00 \cdot 10^0$	$0.00 \cdot 10^0$	$0.00 \cdot 10^0$	$0.00 \cdot 10^0$	$0.00 \cdot 10^0$
Cbs	$0.00 \cdot 10^0$	$0.00 \cdot 10^0$	$0.00 \cdot 10^0$	$0.00 \cdot 10^0$	$0.00 \cdot 10^0$	$0.00 \cdot 10^0$	$0.00 \cdot 10^0$	$0.00 \cdot 10^0$
Cgsov	$1.05 \cdot 10^{-14}$	$1.05 \cdot 10^{-14}$	$1.12 \cdot 10^{-14}$	$1.05 \cdot 10^{-14}$	$7.02 \cdot 10^{-15}$	$4.11 \cdot 10^{-14}$	$4.11 \cdot 10^{-14}$	$4.13 \cdot 10^{-14}$
Cgdov	$1.05 \cdot 10^{-14}$	$1.05 \cdot 10^{-14}$	$2.09 \cdot 10^{-14}$	$1.05 \cdot 10^{-14}$	$1.05 \cdot 10^{-14}$	$4.13 \cdot 10^{-14}$	$4.13 \cdot 10^{-14}$	$4.12 \cdot 10^{-14}$
Cgbov	$9.18 \cdot 10^{-18}$	$9.18 \cdot 10^{-18}$	$9.18 \cdot 10^{-18}$	$9.18 \cdot 10^{-18}$	$1.98 \cdot 10^{-18}$	$1.99 \cdot 10^{-18}$	$1.99 \cdot 10^{-18}$	$1.98 \cdot 10^{-18}$
qgDqVgb	$-2.23 \cdot 10^{-13}$	$-2.23 \cdot 10^{-13}$	$4.56 \cdot 10^{-13}$	$2.12 \cdot 10^{-12}$	$-6.77 \cdot 10^{-13}$	$8.83 \cdot 10^{-13}$	$8.83 \cdot 10^{-13}$	$8.82 \cdot 10^{-12}$
qgDqVdb	$-2.10 \cdot 10^{-13}$	$-2.10 \cdot 10^{-13}$	$-4.24 \cdot 10^{-13}$	$-1.56 \cdot 10^{-12}$	$-1.85 \cdot 10^{-12}$	$-8.01 \cdot 10^{-13}$	$-8.01 \cdot 10^{-13}$	$-8.00 \cdot 10^{-12}$
qgDqVsb	$-2.03 \cdot 10^{-13}$	$-2.03 \cdot 10^{-13}$	$-4.73 \cdot 10^{-13}$	$-1.96 \cdot 10^{-12}$	$-1.56 \cdot 10^{-12}$	$-8.05 \cdot 10^{-13}$	$-8.05 \cdot 10^{-13}$	$-8.01 \cdot 10^{-12}$
qdDqVgb	$-3.92 \cdot 10^{-14}$	$-3.92 \cdot 10^{-14}$	$-1.93 \cdot 10^{-13}$	$-9.56 \cdot 10^{-13}$	$-6.23 \cdot 10^{-14}$	$-7.04 \cdot 10^{-13}$	$-7.04 \cdot 10^{-13}$	$-6.99 \cdot 10^{-12}$
qdDqVdb	$1.01 \cdot 10^{-13}$	$1.01 \cdot 10^{-13}$	$2.59 \cdot 10^{-13}$	$3.77 \cdot 10^{-12}$	$2.01 \cdot 10^{-13}$	$3.98 \cdot 10^{-13}$	$3.98 \cdot 10^{-13}$	$4.02 \cdot 10^{-12}$
qdDqVsb	$-6.16 \cdot 10^{-14}$	$-6.16 \cdot 10^{-14}$	$-6.59 \cdot 10^{-13}$	$-1.77 \cdot 10^{-12}$	$-1.38 \cdot 10^{-13}$	$-1.07 \cdot 10^{-13}$	$-1.07 \cdot 10^{-13}$	$-1.07 \cdot 10^{-12}$

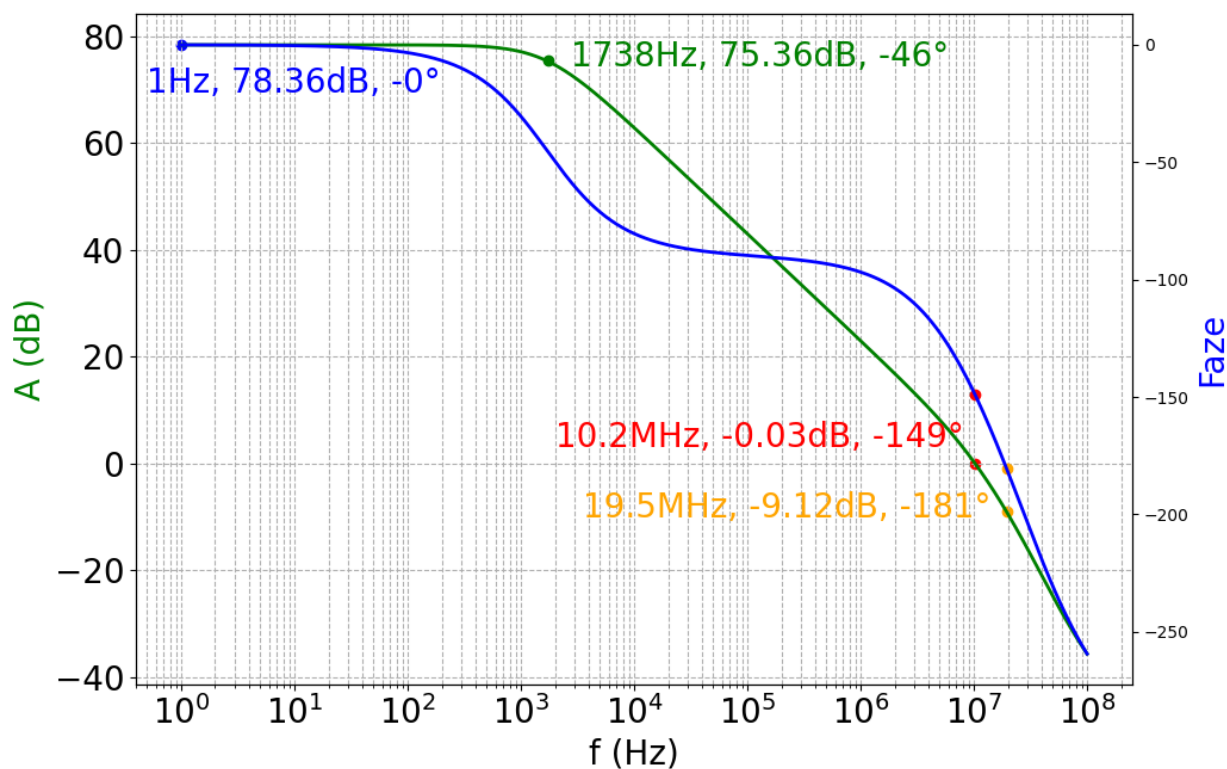
Tabulka 2: Pracovní parametry tranzistorů

Z průběhu na obrázku 5 můžeme odečíst časy bodu deset devadesát pro sestupnou i vzestupnou hranu a spočítat tak SR jako:

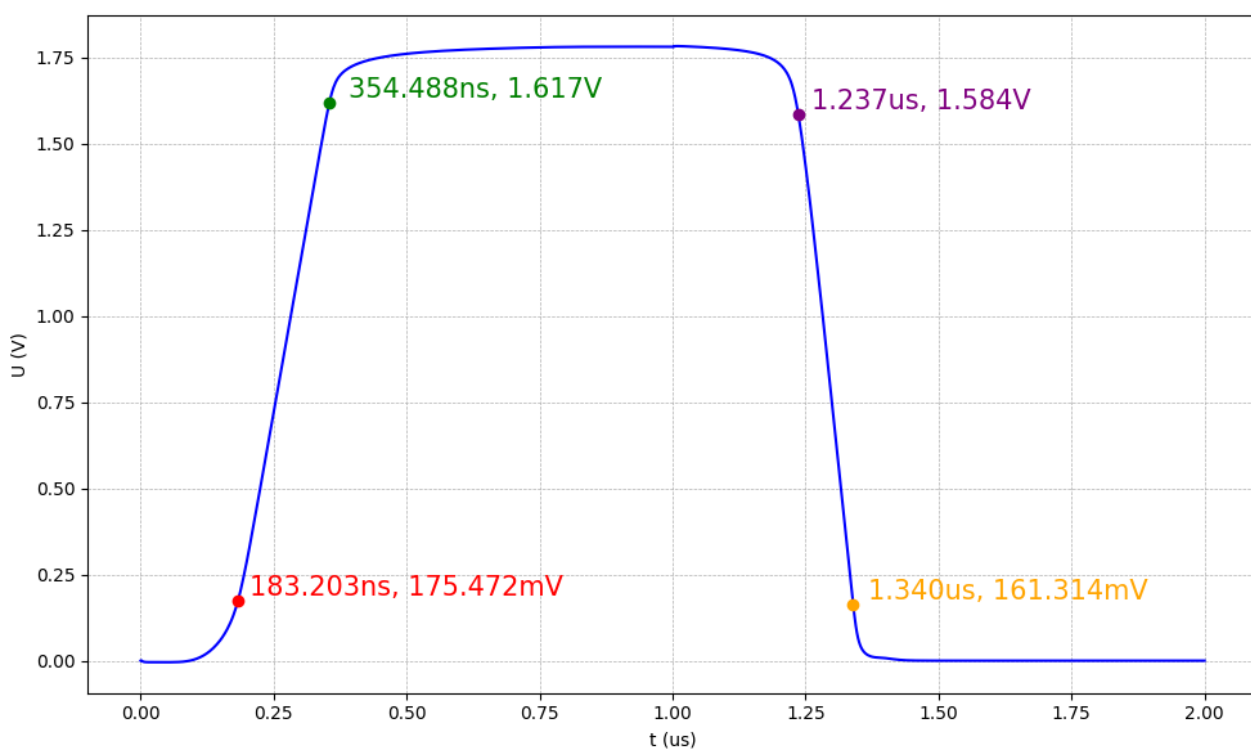
$$SR_{rise} = \frac{\Delta U}{\Delta t} = \frac{1.617 - 0.175}{354.5n - 183.2n} = 8.42[V/\mu s]$$

$$SR_{fell} = \frac{\Delta U}{\Delta t} = \frac{1.584 - 0.161}{1.340\mu - 1.237\mu} = 13.8[V/\mu s]$$

Požadované SR je tedy splněné jen u sestupné hrany, kde je tranzistor M_7 zavřený a celý proud I_{D-M6} je využit na vypití výstupní kapacity.

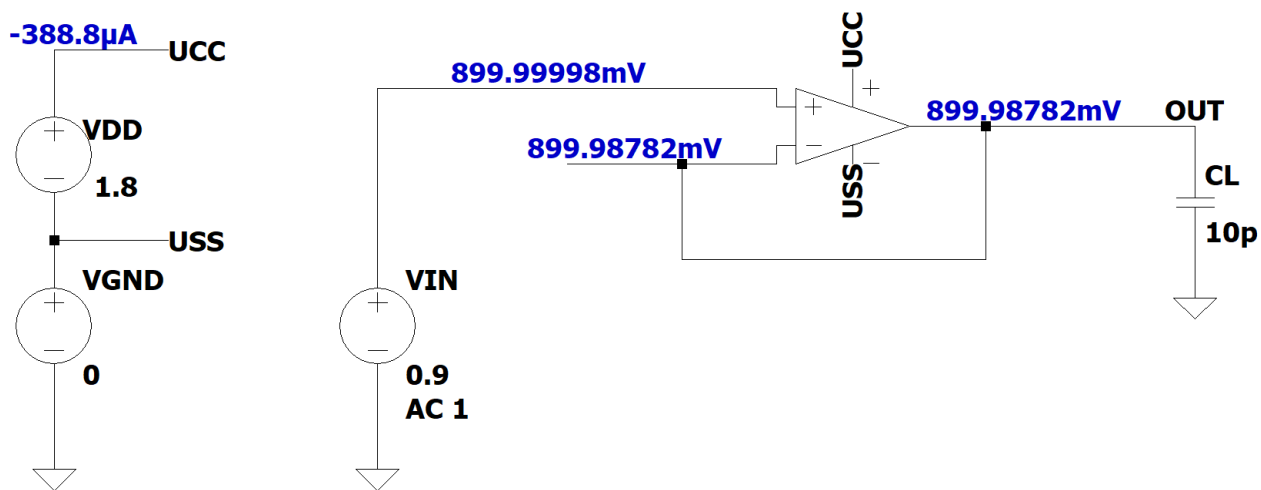


Obr. 4: **.AC** analýza výsledného zesilovače

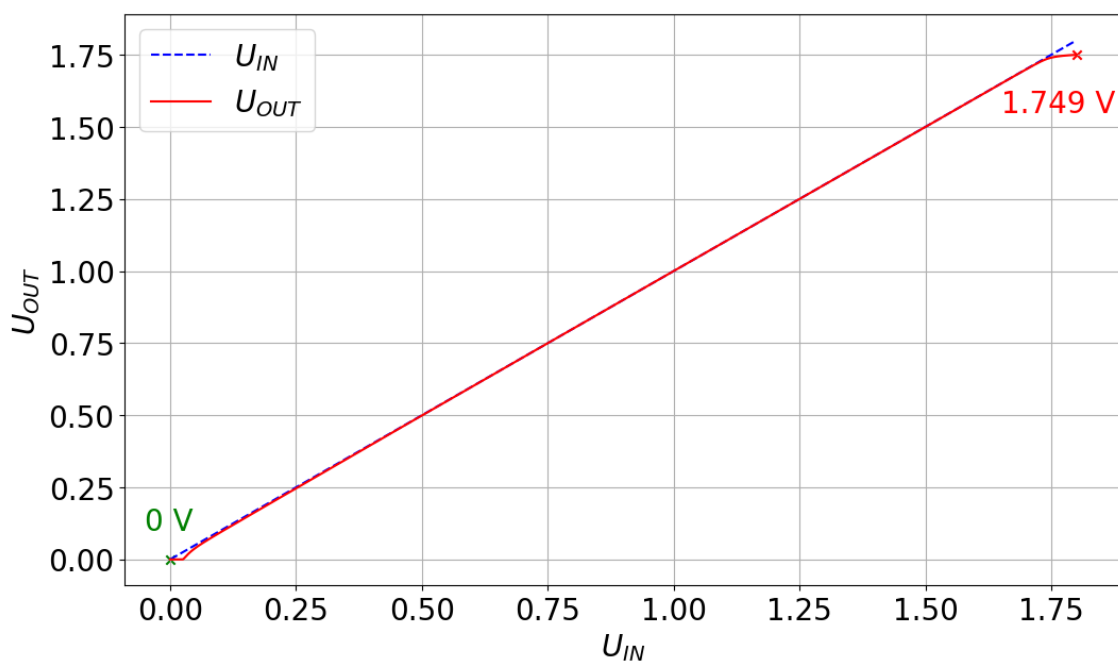


Obr. 5: **.TRAN** analýza výsledného zesilovače

Pro určení vstupního a výstupního rozsahu budeme potřebovat dvě různá zapojení. Zapojení pro simulaci vstupního rozsahu najdete na obrázku 6 a pro simulaci výstupního rozsahu 9

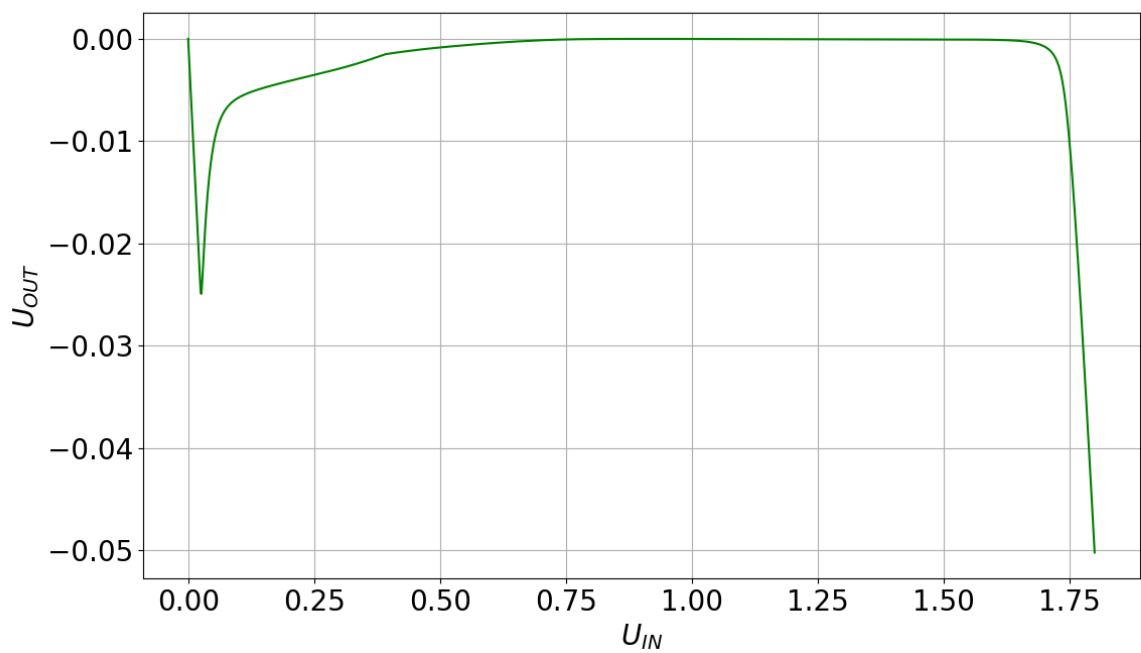


Obr. 6: Zapojení pro .DC analýzu vstupního rozsahu

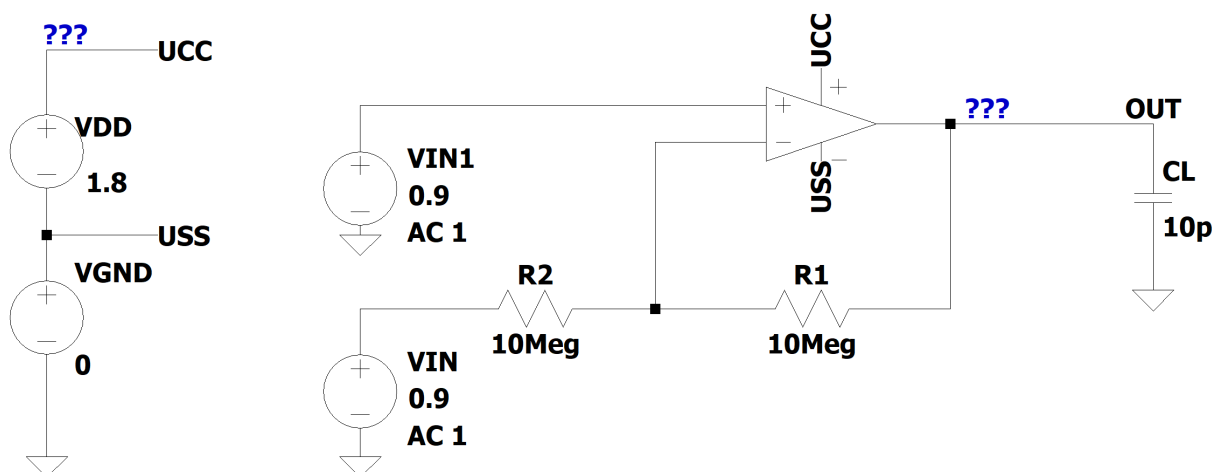


Obr. 7: .DC analýza vstupního rozsahu

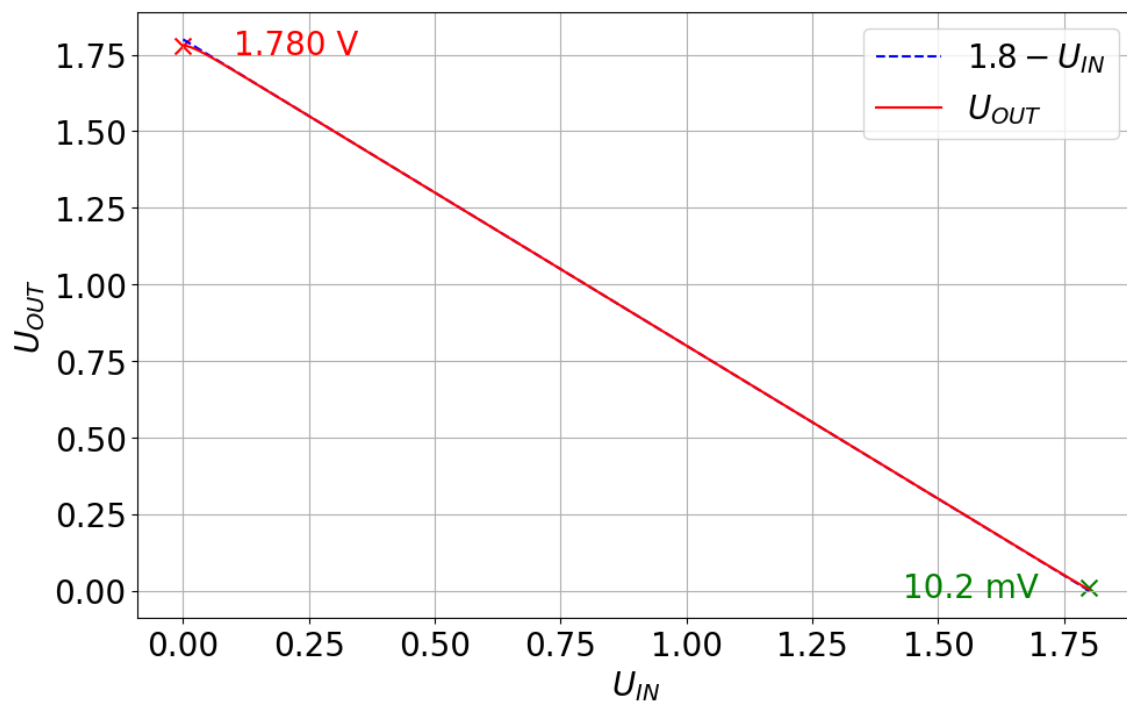
Z .DC charakteristiky 7 můžeme odečíst výstupní rozsah $ICMR = 0 - > 1.749[V]$. Obdobně pak z .DC charakteristiky 10 můžeme odečíst vstupní rozsah $OVS = 0.01 - > 1.78[V]$



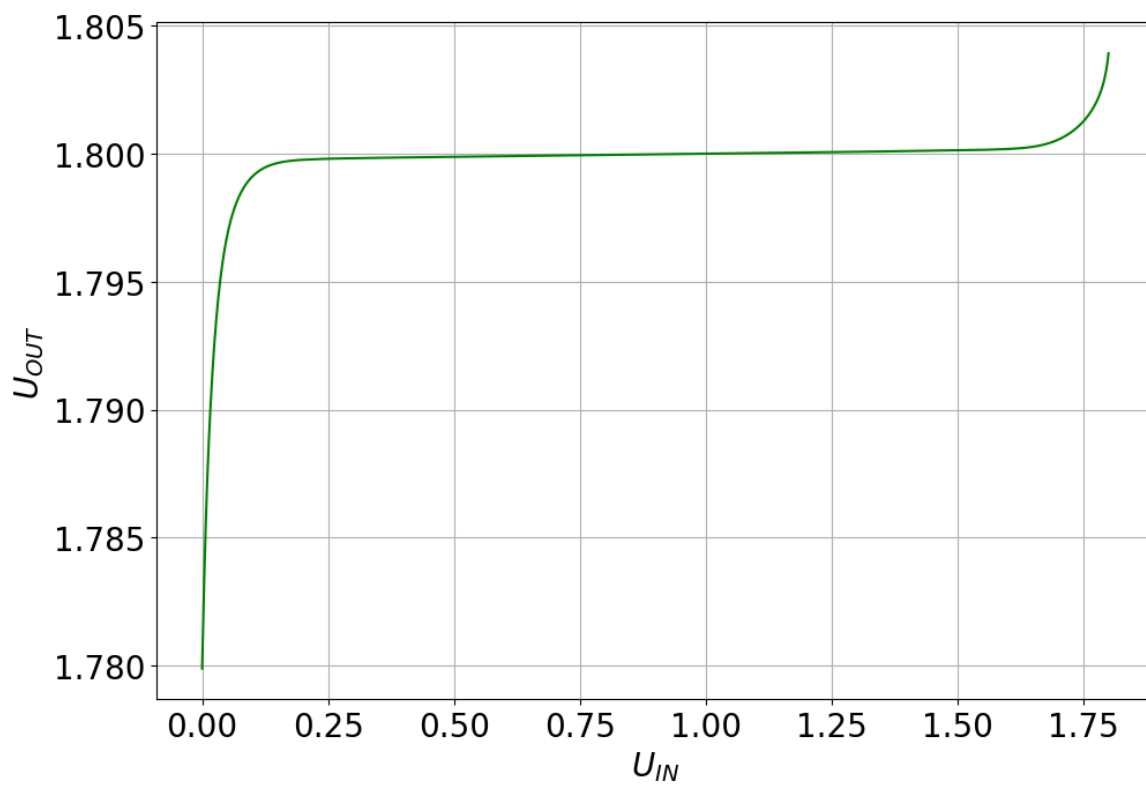
Obr. 8: Odchylka výstupního napětí od vstupního ($U_{IN} - U_{OUT}$), z průběhu 7



Obr. 9: Zapojení pro .DC analýzu výstupního rozsahu



Obr. 10: .DC analýza výstupního rozsahu s upraveným zobrazením vstupního napětí



Obr. 11: Odchylka výstupního napětí od vstupního ($U_{IN} + U_{OUT}$), z průběhu 10

2 Závěr

Tabulka 3: Požadované parametry

parametr	hodnota	Vypočítané	Simulace
zesílení (A_{u0})	≥ 60 dB	80.3[dB]	78[dB]
šířka pásma (GBW)	≥ 10 MHz	47.8[MHz]	10.2[MHz]
fázová rezerva (PM)	$\geq 60^\circ$	60°	31°
amplitudová rezerva (AM)	– dB	Nepočítá se	-9.12 [dB]
rychlost přeběhu (SR)*	≥ 10 V/ μ s	30[V/ μ s]	8.42[V/ μ s] resp. 13.8[V/ μ s]
systematický offset (U_{OFF})	≤ 500 μ V	0	12[μ V]
spotřeba (P_{diss})	– mW	684[μ W]	700[μ W]
vstupní napěťový rozsah ($ICMR$)	– V	0.2– > 1[V]	0– > 1.749[V]
výstupní napěťový rozsah (OVS)	– V	0.2– > 1.6[V]	0.01– > 1.78[V]