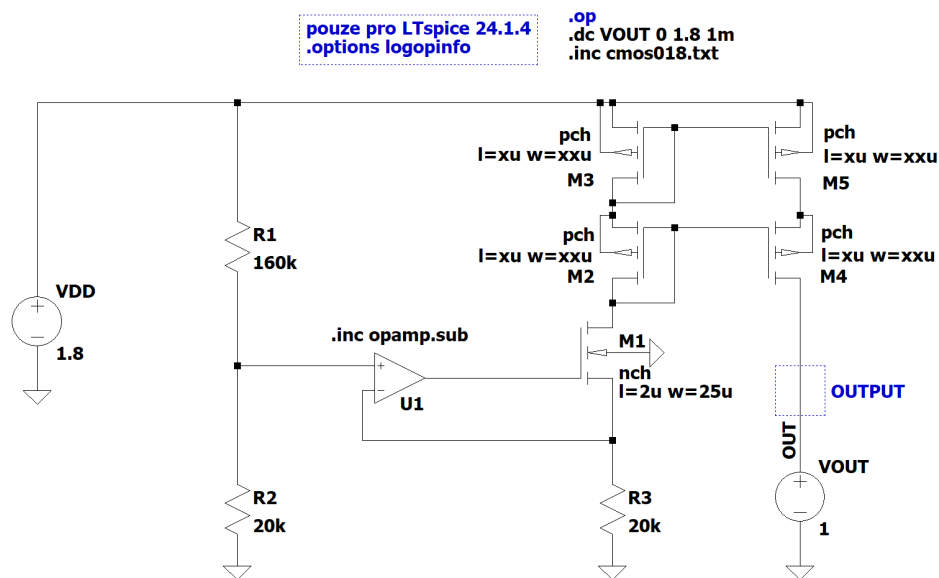


Návrh analogových integrovaných obvodů Ústav mikroelektroniky FEKT VUT v Brně	Jméno Tomáš Vavrinec		ID 240893
	Ročník	Obor MET	Skupina
Název zadání 1. Proudová zrcadla			Č. úlohy 2

ZADÁNÍ ÚLOHY

Simulacemi zjistíte tyto parametry tranzistorů NMOS a PMOS:

1. Navrhněte kaskodové proudové zrcadlo na výstupu proudové reference podle obr. 1. (schéma z LTspice je součástí zadání)



Obr. 1: Proudový zdroj s kaskádovým PZ

- (a) Vypočítejte rozměry tranzistorů M2 - M5, výstupní odpor a výstupní rozsah proudového zrcadla (P - výpočty ve formátu obecná rovnice, dosazení, výsledek).
 - (b) Ověřte správný výpočet pomocí simulace .op (P - schéma se zvýrazněnými U/I dle předlohy + printscreen pracovních bodů M2-M5 ze Spice Output Log)
 - (c) Simulací .dc zjistíte výstupní odpor a ověřte výstupní rozsah (P - křivka s kurzory + viditelnou tabulkou pozic kurzorů)
2. Navrhněte (popř. modifikované) Wilsonovo proudové zrcadlo s tranzistory NMOS s výstupním proudem $20\mu A$. Vstupní je $10\mu A$.
 - Vypočítejte parametry všech součástek, výstupní odpor a výstupní rozsah proudového zrcadla (P - výpočty ve formátu obecná rovnice, dosazení, výsledek).
 - Ověřte správný výpočet pomocí simulace .op (P - schéma se zvýrazněnými U/I + printscreen pracovních bodů tranzistorů ze Spice Output Log)
 - Simulací .dc zjistíte výstupní odpor a ověřte výstupní rozsah (P - křivka s kurzory + viditelnou tabulkou pozic kurzorů)

1 Vypracování

1.1 Kaskodové proudové zrcadlo

Jako první určíme rozměry tranzistoru zrcadla. Volím délku kanálu $L = 2[\mu m]$ jako kompromis mezi velikostí a parametrem λ , která pro $L = 2\mu m$ nabývá hodnoty $\lambda = 0.0787698[V^{-1}]$. Dále musíme zvolit napětí U_{OV} , které volím s ohledem na rozsah napájecího napětí $U_{OV} = 0.2[V]$. Z toho následně můžeme určit šířku kanálu W , tranzistorů $M2$ a $M3$ jako:

$$W_{M2} = W_{M3} = L \cdot \frac{2 \cdot I_1}{K_P \cdot U_{OV}^2} = 2\mu \cdot \frac{2 \cdot 10\mu}{50\mu \cdot 0.2^2} = 20[\mu m]$$

Z toho snadno určíme W_{M4} a W_5 jako:

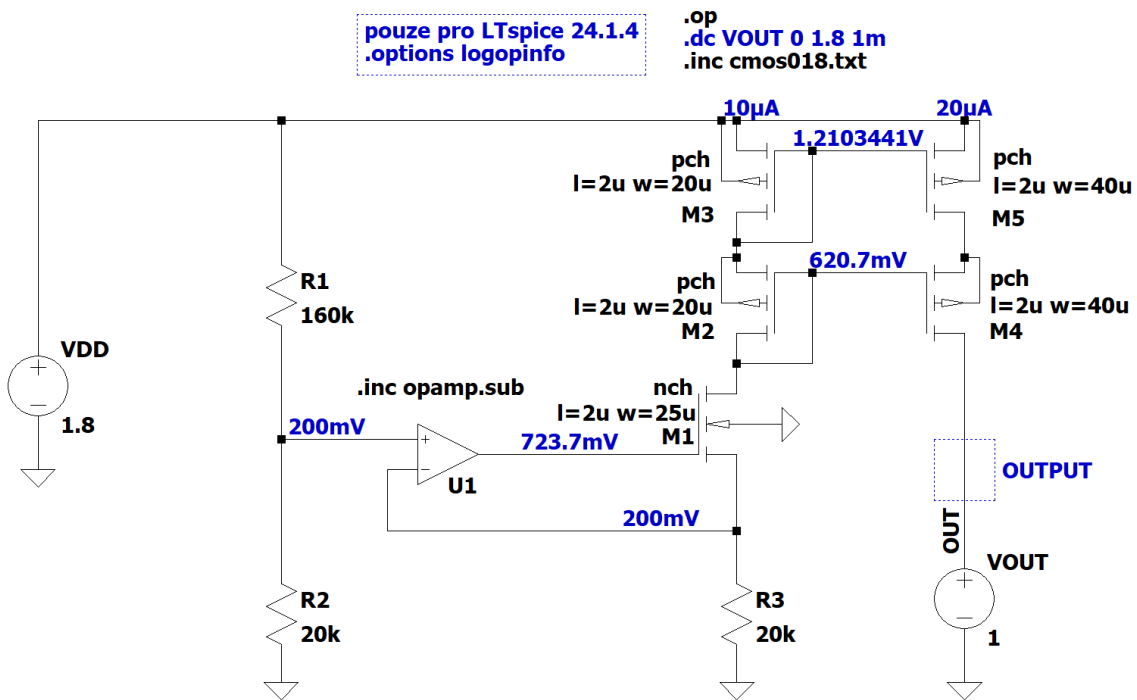
$$W_{M4} = W_{M5} = W_{M2} \cdot \frac{I_2}{I_1} = 20\mu \cdot \frac{20\mu}{10\mu} = 40[\mu m]$$

Výstupní odpor pak můžeme určit jako:

$$r_{out} = g_{m-M4} \cdot r_{DS-M4} \cdot r_{DS-M5} = g_{m-M4} \cdot \frac{1}{\lambda_{M4} \cdot I_{M4}} \cdot \frac{1}{\lambda_{M5} \cdot I_{M5}} = 73.2\mu \cdot \frac{1}{0.0787698 \cdot 20\mu} \cdot \frac{1}{0.0787698 \cdot 20\mu} = 29.5[M\Omega]$$

A výstupní rozsah jako:

$$U_{out} = U_{CC} - (U_{OV-M5} + U_{OV-M4} + U_{TH-M4}) = 1.8 - (0.2 + 0.2 + 0.427) = 0.97[V]$$



Obr. 2: zobrazení napětí a proudu ve schématu

--- BSIM3 MOSFETS ---					
Name:	m1	m2	m3	m4	m5
Model:	nch	pch	pch	pch	pch
Id:	1.00e-05	-1.00e-05	-1.00e-05	-2.00e-05	-2.00e-05
Vgs:	5.24e-01	-5.90e-01	-5.90e-01	-5.94e-01	-5.90e-01
Vds:	4.21e-01	-5.90e-01	-5.90e-01	-2.15e-01	-5.85e-01
Vbs:	-2.00e-01	0.00e+00	0.00e+00	0.00e+00	0.00e+00
Vth:	4.45e-01	-4.04e-01	-4.04e-01	-4.06e-01	-4.04e-01
Vdsat:	8.14e-02	-1.57e-01	-1.57e-01	-1.60e-01	-1.58e-01
Gm:	1.86e-04	1.01e-04	1.01e-04	1.95e-04	2.02e-04
Gds:	3.59e-07	8.32e-07	8.32e-07	7.21e-06	1.67e-06
Gmb:	4.91e-05	3.19e-05	3.19e-05	6.23e-05	6.41e-05
Cbd:	0.00e+00	0.00e+00	0.00e+00	0.00e+00	0.00e+00
Cbs:	0.00e+00	0.00e+00	0.00e+00	0.00e+00	0.00e+00
Cgsov:	1.76e-14	1.37e-14	1.37e-14	2.74e-14	2.74e-14
Cgdov:	1.74e-14	1.38e-14	1.38e-14	2.75e-14	2.75e-14
Cgbov:	1.98e-18	1.96e-18	1.96e-18	1.96e-18	1.96e-18
dQgdVgb:	3.50e-13	2.94e-13	2.94e-13	5.98e-13	5.89e-13
dQgdVdb:	-1.76e-14	-1.33e-14	-1.33e-14	-3.66e-14	-2.66e-14
dQgdVsb:	-3.04e-13	-2.69e-13	-2.69e-13	-5.40e-13	-5.37e-13
dQddVgb:	-1.43e-13	-1.23e-13	-1.23e-13	-2.54e-13	-2.46e-13
dQddVdb:	1.76e-14	1.35e-14	1.35e-14	3.57e-14	2.71e-14
dQddVsb:	1.62e-13	1.45e-13	1.45e-13	2.92e-13	2.91e-13
dQbdVgb:	-6.42e-14	-4.81e-14	-4.81e-14	-8.93e-14	-9.59e-14
dQbdVdb:	-1.15e-16	-1.34e-17	-1.34e-17	-7.21e-15	-3.04e-17
dQbdVsb:	-3.70e-14	-3.53e-14	-3.53e-14	-7.25e-14	-7.11e-14

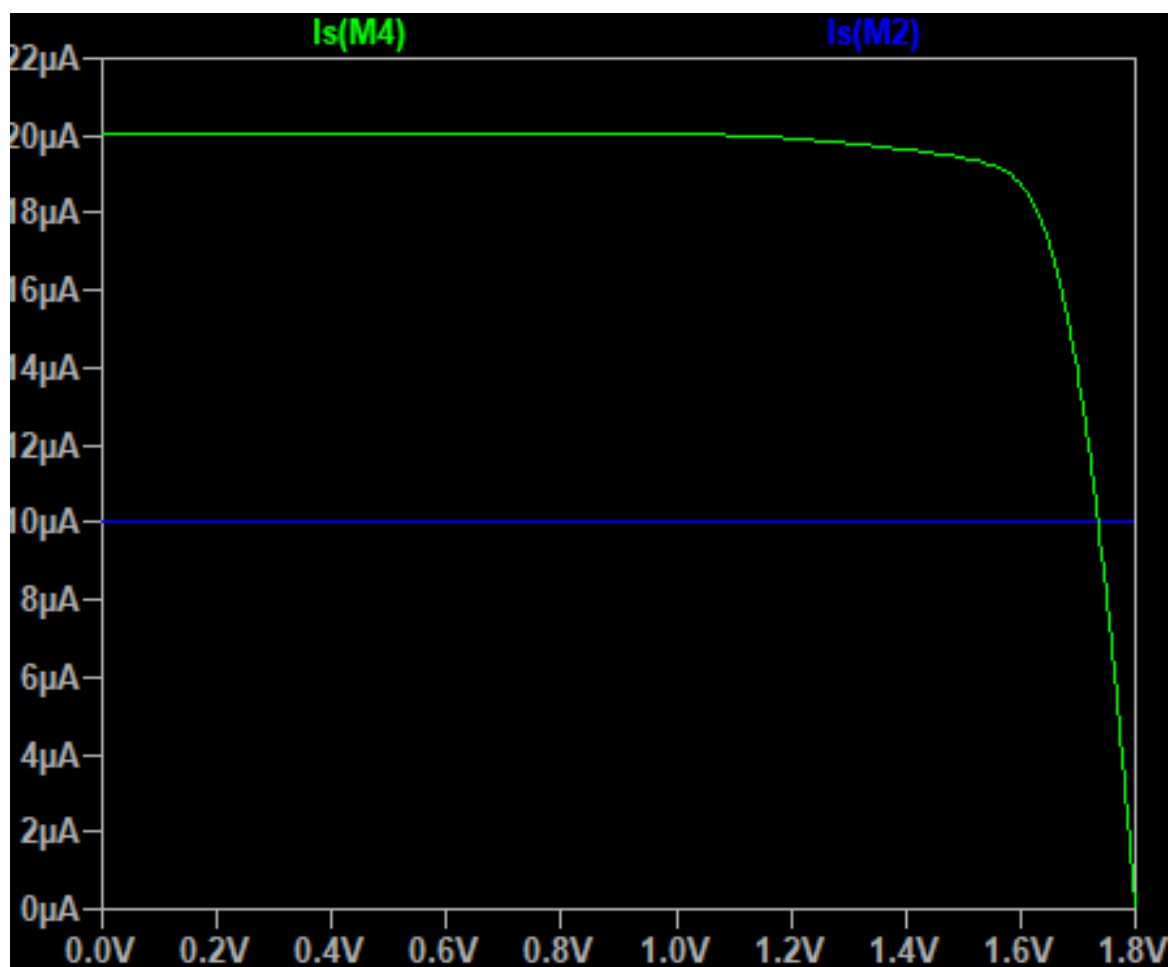
Obr. 3: Pracovní body jednotlivých tranzistorů

Z grafu 5 můžeme odečíst pokles hodnoty proudu na obou stranách pracovního rozsahu a i přímo jejich změny $\Delta I = 14.14[nA]$ při změně napětí $\Delta U = 970.7[mV]$. Výstupní odpor tak můžeme určit jako:

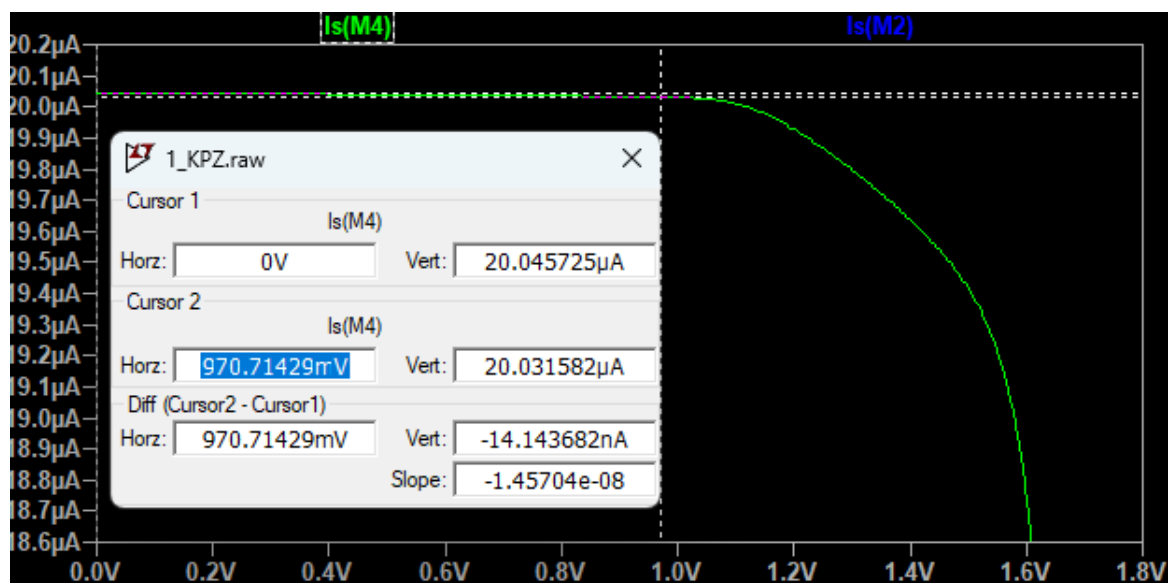
$$r_{out} = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{970.7m}{14.14n} = 68.2[M\Omega]$$

Tato hodnota je cca poloviční ve srovnání s výpočtem, původně jsem předpokládal, že mám špatné hodnoty λ , ale ani po kontrole a opravě jsem nedošel k výsledkům podobným simulaci.

Výstupní rozsah odpovídá naproti tomu výpočtu velmi přesně a na průběhu je i vidět dvě místa, kde dochází ke změnám výstupního odporu. Nejdřív menší změna hned za koncem rozsahu, když začne $M4$ přecházet do lineárního režimu a následně větší změna, když začne vstupovat do lineárního režimu i $M5$.



Obr. 4: Simulovaná závislost výstupního proudu na výstupním napětí



Obr. 5: Simulovaná závislost výstupního proudu na výstupním napětí v detailu

1.2 Wilsonovo proudové zrcadlo

Jako první určíme rozměry tranzistoru zrcadla. Volím délku kanálu $L = 2[\mu m]$ jako kompromis mezi velikostí a parametrem λ , která pro $L = 2\mu m$ nabývá hodnoty $\lambda = 0.0441692[V^{-1}]$. Dále musíme zvolit napětí U_{OV} , které volím s ohledem na rozsah napájecího napětí $U_{OV} = 0.2[V]$ Z toho následně můžeme určit šířku kanálu W , tranzistorů $M1$ jako:

$$W_{M1} = L \cdot \frac{2 \cdot I_1}{K_P \cdot U_{OV}^2} = 2\mu \cdot \frac{2 \cdot 10\mu}{200\mu \cdot 0.2^2} = 5[\mu m]$$

Z toho snadno určíme W_{M4} a W_5 jako:

$$W_{M2} = W_{M3} = W_{M1} \cdot \frac{I_2}{I_1} = 5\mu \cdot \frac{20\mu}{10\mu} = 10[\mu m]$$

Při určování hodnoty odporu nastavujícího proud I_1 musíme vzít v potas bulk efekt tranzistoru a určíme jako:

$$R = \frac{V_{CC} - (U_{TH-M2} + U_{OV-M2} + U_{TH-M3} + U_{OV-M3})}{I_1} = \frac{1.8 - (0.384 + 0.2 + 0.541 + 0.2)}{10\mu} = 47.4[k\Omega]$$

Výstupní rozsah můžeme určit jako:

$$U_{out} = U_{CC} - (U_{TH-M2} + U_{OV-M2} + U_{OV-M3}) = 1.8 - (0.363 + 0.2 + 0.2) = 1.037[V]$$

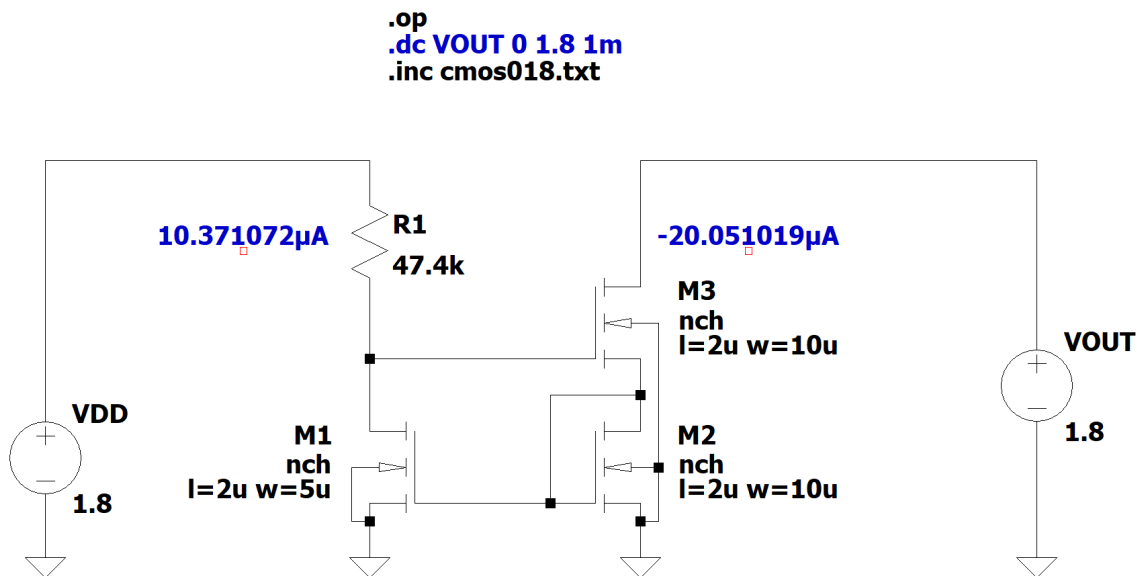
Následně můžeme určit výstupní odpor jako:

$$R_{out} = r_{ds3} \left[1 + g_{m1} \cdot \frac{r_{ds1} \cdot R}{r_{ds1} + R} \right] = \frac{1}{\lambda \cdot I_2} \left[1 + g_{m1} \cdot \frac{\frac{1}{\lambda \cdot I_1} \cdot R}{\frac{1}{\lambda \cdot I_1} + R} \right]$$

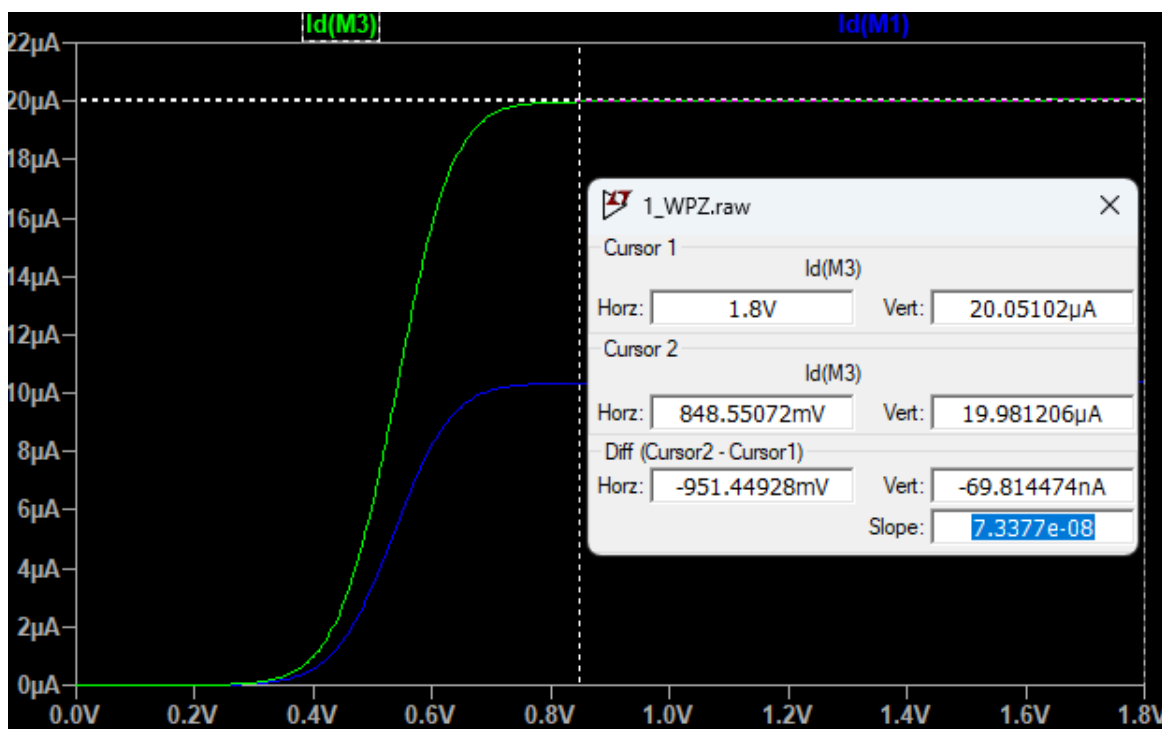
$$R_{out} = \frac{1}{0.0441692 \cdot 20\mu} \cdot \left[1 + 140.8\mu \cdot \frac{\frac{1}{0.0441692 \cdot 10\mu} \cdot 47.4k}{\frac{1}{0.0441692 \cdot 10\mu} + 47.4k} \right] = 8.532[M\Omega]$$

--- BSIM3 MOSFETS ---			
Name:	m1	m2	m3
Model:	nch	nch	nch
Id:	1.04e-05	2.01e-05	2.01e-05
Vgs:	5.81e-01	5.81e-01	7.27e-01
Vds:	1.31e+00	5.81e-01	1.22e+00
Vbs:	0.00e+00	0.00e+00	-5.81e-01
Vth:	3.80e-01	3.83e-01	5.46e-01
Vdsat:	1.56e-01	1.54e-01	1.59e-01
Gm:	1.07e-04	2.10e-04	2.15e-04
Gds:	4.70e-07	1.02e-06	3.43e-07
Gmb:	1.53e-04	1.66e-04	4.92e-05
Cbd:	0.00e+00	0.00e+00	0.00e+00
Cbs:	0.00e+00	0.00e+00	0.00e+00
Cgsov:	3.50e-15	7.02e-15	7.02e-15
Cgdov:	3.48e-15	6.97e-15	6.97e-15
Cgbov:	1.98e-18	1.98e-18	1.98e-18
dQgdVgb:	7.51e-14	1.51e-13	1.47e-13
dQgdVdb:	-3.35e-15	-6.77e-15	-6.97e-15
dQgdVsb:	-1.24e-13	-1.85e-13	-1.32e-13
dQddVgb:	-3.11e-14	-6.23e-14	-6.22e-14
dQddVdb:	3.40e-15	6.88e-15	6.97e-15
dQddVsb:	6.89e-14	1.02e-13	6.88e-14
dQbdVgb:	-1.30e-14	-2.59e-14	-2.24e-14
dQbdVdb:	1.87e-17	-1.88e-17	-3.80e-18
dQbdVsb:	-1.77e-14	-2.59e-14	-1.25e-14

Obr. 6: Pracovní body jednotlivých tranzistorů



Obr. 7: Výsledné schéma s vyznačenými proudy I_1 a I_2



Obr. 8: Závislost vstupního a výstupního proudu na výstupním napětí

Ze simulace můžeme určit výstupní odpor jako:

$$r_{out} = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{951.4m}{69.814474n} = 14.285[M\Omega]$$

Což je téměř dvojnásobek oproti výpočtu, výstupní rozsah naproti tomu sedí poměrně přesně.

2 Závěr

Podle zadání jsem provedl ruční návrh dvou proudových zrcadel (Kaskodové a Wilsonovo). Všechny tři zrcadla jsem následně odsimuloval a uvedl výsledky simulací.

Typ zrcadla	výpočet R_{out} [M Ω]	simulace R_{out} [M Ω]
Kaskodové	29.5	68.2
Wilsonovo	8.53	14.285

Tabulka 1: Porovnání výpočtu a simulace výstupního odporu zrcadel