

Návrh analogových integrovaných obvodů Ústav mikroelektroniky FEKT VUT v Brně			Jméno Tomáš Vavrínek	ID 240893
			Ročník 3.	Obor MET
Spolupracoval –	Měřeno dne –	Odevzdáno dne –	Hodnocení	
Název zadání Extrakce parametrů tranzistorů MOSFET ze SPICE modelu				Č. úlohy 1

ZADÁNÍ ÚLOHY

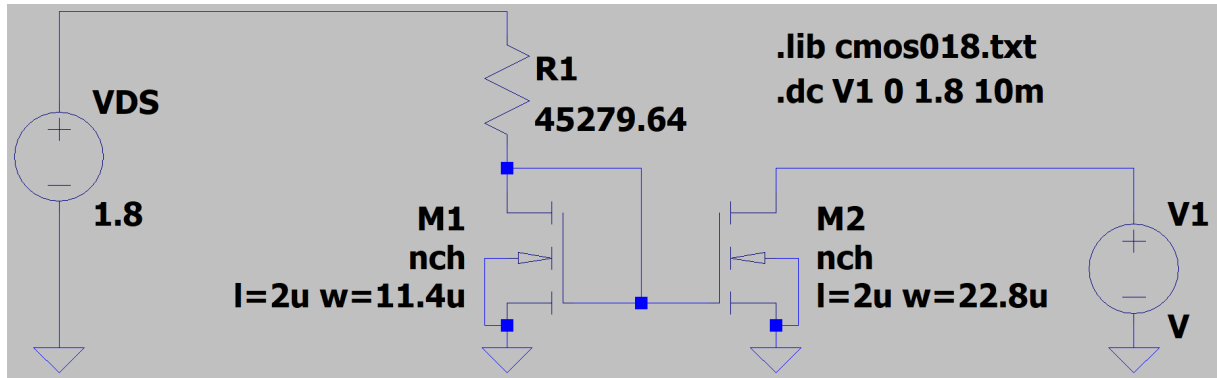
Detailní popis jednotlivých úloh s návodem najdete v NAO_PC.pdf, který je dostupný v E-learningu.

- **Navrhněte jednoduché proudové zrcadlo s tranzistorem NMOS (proudová nora), kdy proud vstupní větve je $25[\mu A]$ a výstupní proud $50[\mu A]$. Požadovaný výstupní dynamický rozsah je $1.6[0]$ (od $0.2[V]$ až k napájecímu napětí).**
 - Vypočítejte rozměry W a L obou tranzistorů a odpor pro nastavení vstupního proudu. Vypočítejte výstupní dynamický odpor r_{OUT} .
 - Simulacemi ověřte zadané i vypočítané parametry.
- **Navrhněte kaskodové proudové zrcadlo s tranzistorem PMOS (proudový zdroj), kdy proud vstupní větve je $50[\mu A]$ a výstupní proud $100[\mu A]$. Zvolte $U_{GS} - U_{TH} (= U_{OV}) = 0.2[V]$.**
 - Vypočítejte rozměry W a L všech tranzistorů a vstupní odpor pro nastavení vstupního proudu. Vypočítejte výstupní dynamický odpor r_{OUT} a výstupní rozsah, kdy obvod dosahuje maximálního výstupního odporu (tj. všechny tranzistory jsou v saturaci).
 - Simulacemi ověřte zadané i vypočítané parametry.
- **Navrhněte modifikované Wilsonovo proudové zrcadlo s tranzistorem NMOS (proudový zdroj), kdy proud vstupní větve je $50[\mu A]$ a výstupní proud $100[\mu A]$. Zvolte $U_{GS} - U_{TH} (= U_{OV}) = 0.25[V]$.**
 - Vypočítejte rozměry W a L všech tranzistorů a vstupní odpor pro nastavení vstupního proudu. Vypočítejte výstupní dynamický odpor r_{OUT} a výstupní rozsah, kdy obvod dosahuje maximálního výstupního odporu (tj. všechny tranzistory jsou v saturaci).
 - Simulacemi ověřte zadané i vypočítané parametry.

Bonusové otázky (1 b.)

- Navrhněte modifikované kaskádové proudové zrcadlo s tranzistorem PMOS tak, aby bylo dosaženo většího výstupního dynamického rozsahu - úbytek na tranzistorech pouze $0.4[V]$, tj. $2 \cdot 0.2[V]$. Nakreslete schéma a vypočítejte rozměry všech součástek.

1 Jednoduché proudové zrcadlo



Obr. 1: Schéma zapojení, s výslednými hodnotami

Proud tranzistorem v saturaci můžeme určit jako:

$$I_D = \frac{1}{2} \cdot K P_n \cdot \frac{W}{L} (U_{GS} - U_{TH})^2 \quad (1)$$

Tranzistorem M_1 má téct proud $I_{M1} = 25[\mu A]$ a tranzistorem M_2 proud $I_{M2} = 50[\mu A]$. Můžeme tedy říct:

$$I_{M1} = \frac{I_{M2}}{2} \quad (2)$$

Tedy:

$$\frac{1}{2} \cdot K_{M1} P_{nM1} \cdot \frac{W_{M1}}{L_{M1}} (U_{GSM1} - U_{THM1})^2 = \left(\frac{1}{2} \cdot K_{M2} P_{nM2} \cdot \frac{W_{M2}}{L_{M2}} (U_{GSM1} - U_{THM1})^2 \right) \quad (3)$$

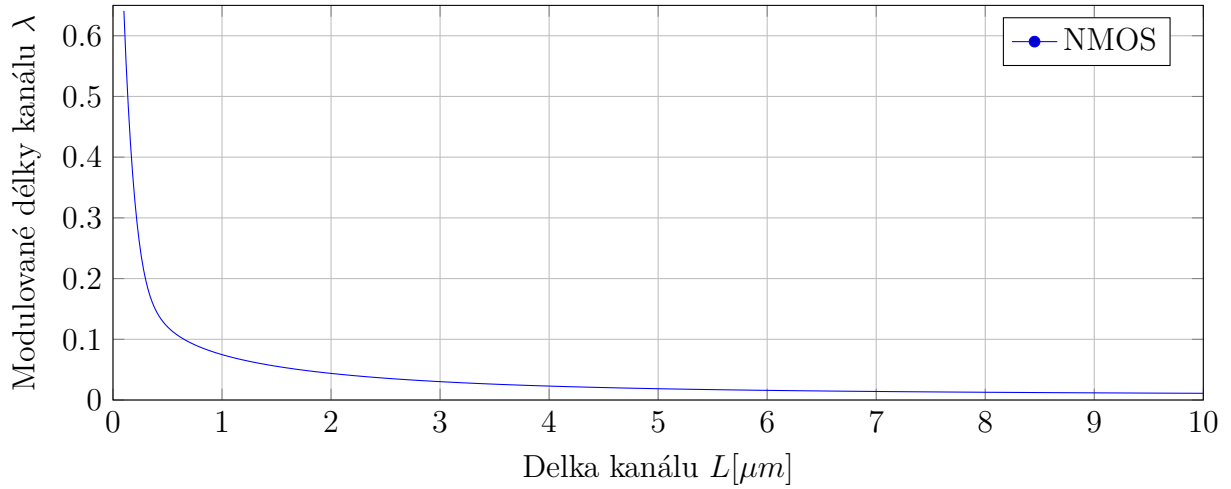
Protože tranzistory se můžou lišit jen parametry L a W (rozměry), můžeme prohlásit:

$$\frac{W_{M2}}{L_{M2}} = \frac{I_{M1}}{I_{M2}} \cdot \frac{W_{M1}}{L_{M1}} \quad (4)$$

Protože U_{TH} tranzistoru je ovlivněno víc rozměrem W než L , zvolíme pro oba tranzistory stejnou délku kanálu L a měnit budeme jen šířku kanálu W . To proto, aby měly oba tranzistory stejné prahové napětí U_{TH} .

Z toho nám tedy plyne:

$$\frac{W_{M2}}{W_{M1}} = \frac{I_{M1}}{I_{M2}} \quad (5)$$



Obr. 2: Závislost modulované délky kanálu λ na délce kanálu L pro NMOS tranzistor

Na grafu 2 je vidět, že pokles modulované délky kanálu λ je zpočátku velký, ale okolo $\lambda = 2[\mu m]$ se již téměř nemění. Abychom tedy dosáhli malé modulované délky kanálu λ a zároveň malých rozměrů tranzistoru, zvolíme délku kanálu na $L = 2[\mu m]$.

Z rovnice 5 nám tedy plyne, že poměr proudů I_{M1} a I_{M2} je roven poměru šířek kanálů W_{M1} a W_{M2} . V našem případě tedy tranzistor M_1 bude mít šířku kanálu oproti M_2 poloviční. W_{M1} tedy zvolím na základě požadovaného proudu I_{M1} a vztahy 1 takto:

$$W_{M1} = \frac{2 \cdot I_D \cdot L}{K P_{NM1} (U_{GSM1} - U_{THM1})^2} \quad (6)$$

Kde:

$$U_{GSM1} - U_{THM1} = U_{OV} = 0.2[V] \quad (7)$$

a tedy:

$$W_{M1} = \frac{2 \cdot I_D \cdot L}{K P_{NM1} U_{OV}^2} = \frac{2 \cdot 25 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^{-6}}{220 \cdot 10^{-6} \cdot 0.2^2} [m] = 11.4 \cdot 10^{-6} [m] = 11.4 [\mu m] \quad (8)$$

Hodnotu rezistoru R_1 zvolíme tak, aby $I_{M1} = 25[\mu A]$. Napájecí napětí $U_{CC} = 1.8[V]$ a pro transistor M_1 platí $U_{TH0} = 0.368009[V]$, U_{R1} tedy určíme jako:

$$U_{R1} = U_{CC} - (U_{TH0} + U_{OV}) = (1.8 - (0.368009 + 0.2)) [V] = 1.131991[V] \quad (9)$$

Tedy:

$$R_1 = \frac{U_{R1}}{I_{M1}} = \frac{1.131991}{25 \cdot 10^{-6}} [\Omega] = 45279.64 [\Omega] \quad (10)$$

Výsledek simulace s rozměry 1 je na grafu 3.

	$L[\mu m]$	$W[\mu m]$
M_1	2	11.4
M_2	2	22.8

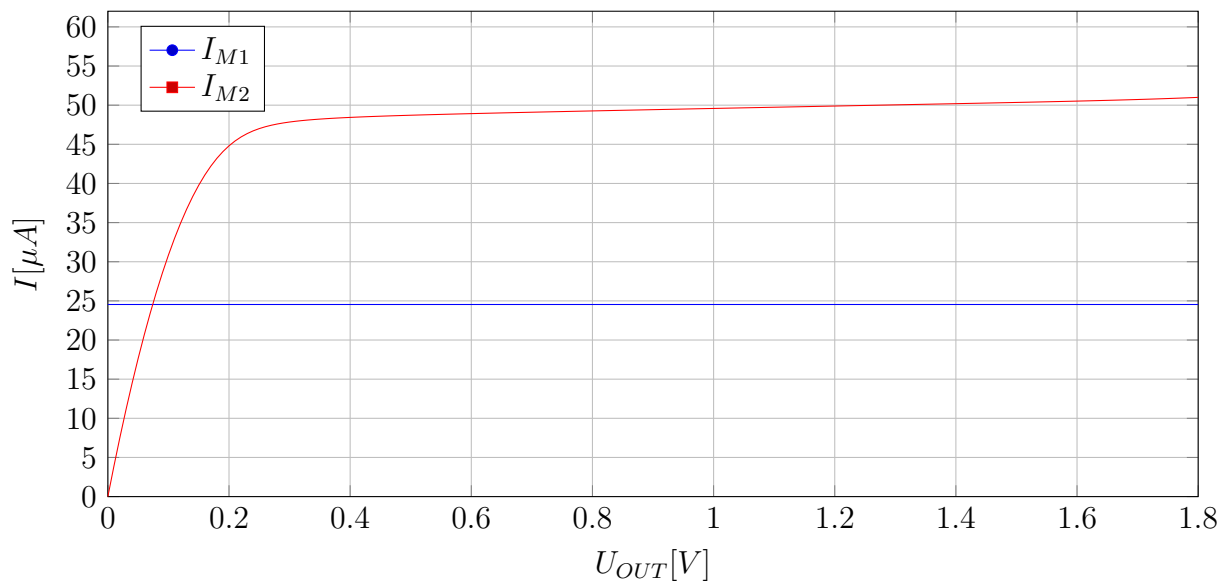
Tabulka 1: Rozměry tranzistorů

Výstupní odpor lze teoreticky určit jako:

$$R_{OUT} = \frac{1}{\lambda \cdot I_{M2}} \quad (11)$$

Tedy:

$$R_{OUT} = \frac{1}{0.0438342 \cdot 50 \cdot 10^{-6}} [\Omega] = 456265 [\Omega] = 456 [k\Omega] \quad (12)$$



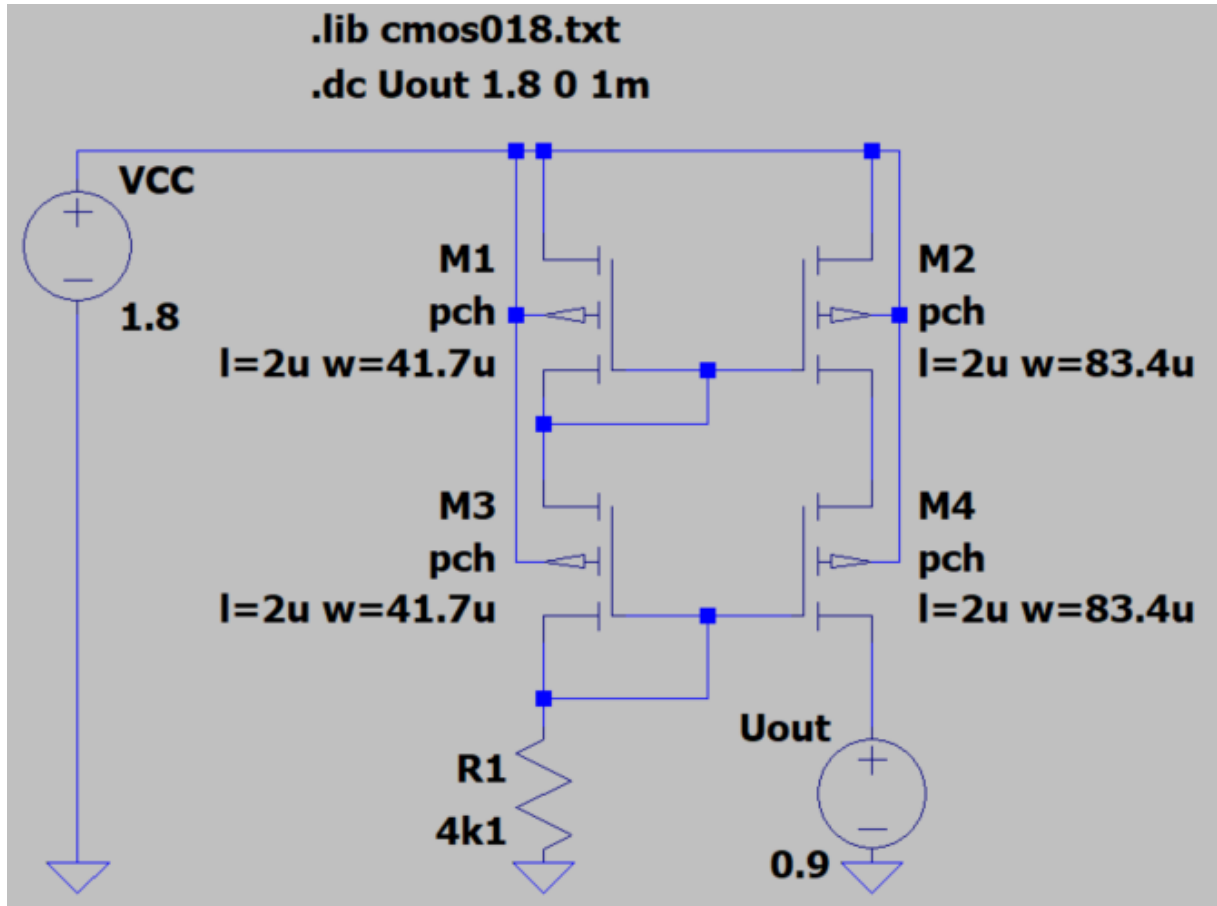
Obr. 3: Závislost proudu tranzistorem I_{M2} na napětí na zrcadle U_{OUT}

Z grafu 3 plyne, že saturaci dosáhneme při napětí cca $U_{OUT} = 0.4[V]$, při kterém tranzistorem M_2 teče proud $I_{M2} = 48.4[\mu A]$.

Nakonec výstupní odpor R_{OUT} určíme jako:

$$R_{OUT} = \frac{1}{\lambda \cdot I_{M2}} = \frac{1}{0.0438342 \cdot 50 \cdot 10^{-6}} [\Omega] = 456265 [\Omega] = 456 [k\Omega] \quad (13)$$

2 Kaskodové proudové zrcadlo



Obr. 4: Schéma zapojení, s výslednými hodnotami

Rozměry L a W můžeme určit stejně jako v předchozím příkladu $L = 2[\mu m]$ a W podle vztahu ??.

$$W_{M1} = \frac{2 \cdot I_D \cdot L}{K P_{PM1} U_{OV}^2} = \frac{2 \cdot 25 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^{-6}}{60 \cdot 10^{-6} \cdot 0.2^2} [m] = 41.7 [\mu m] \quad (14)$$

	$L[\mu m]$	$W[\mu m]$
M_1	2	41.7
M_2	2	83.4
M_3	2	41.7
M_4	2	83.4

Tabulka 2: Rozměry tranzistorů pro Kaskodové proudové zrcadlo

Hodnotu odporu R_1 můžeme určit podobně jako v předchozím příkladu, ale s tím rozdílem že nyní započítáváme úbytek napětí na dvou tranzistorech M_1 a M_3 . Tedy:

$$R_1 = \frac{V_{CC} - (U_{GSM1} + U_{GSM3})}{I_{M1,3}} \quad (15)$$

Kde:

$$U_{GSM1} = U_{TH0} + U_{OV} = (0.432227 + 0.2) [V] = 0.632227[V] \quad (16)$$

U M_3 musíme započítat bulk efekt a tedy hodnotu U_{TH} odečteme z grafu z předchozí ulohy, tedy $U_{TH,M3} = 1.257[V]$.

V této části extrakce parametrů jsem pravděpodobně udělal nějakou chybu, bohužel ji nemohu najít. Pokud by totiž U_{TH} PMOS tranzistoru, zatíženého buklefem $U_{SB} = 0.63[V]$ bylo $U_{TH} = 1.257[V]$ znamenalo by to:

$$U_{GSM3} = U_{TH} + U_{OV} = (1.257 + 0.2) [V] = 1.457[V] \quad (17)$$

a tedy:

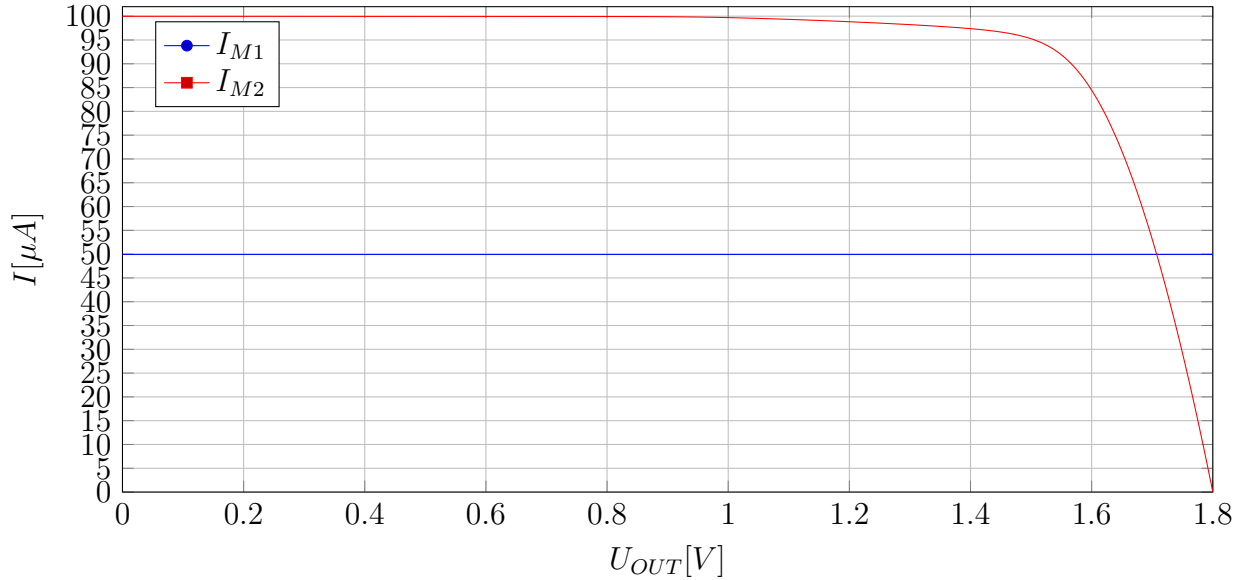
$$U_{CC} = 1.8[V] < U_{GSM1} + U_{GSM3} = (0.632227 + 1.457) [V] = 2.089227[V] \quad (18)$$

Což by znamenalo, že napájecí napětí U_{CC} je menší než napěťový úbytek na tranzistorech a tedy nedostačuje k provozu tohoto zrcadla.

Každopádně když přesto provedeme simulaci s iteračně určenou hodnotou $R_1 = 4[k\Omega]$, dostaneme graf 9.

Výstupní odpor pak můžeme určit jako:

$$r_{OUT} = \frac{1}{\lambda I_{out}} = \frac{1}{\lambda I_{M2}} = \frac{1}{0.0787029 \cdot 100 \cdot 10^{-6}} [\Omega] = 127060 [\Omega] = 127[k\Omega] \quad (19)$$

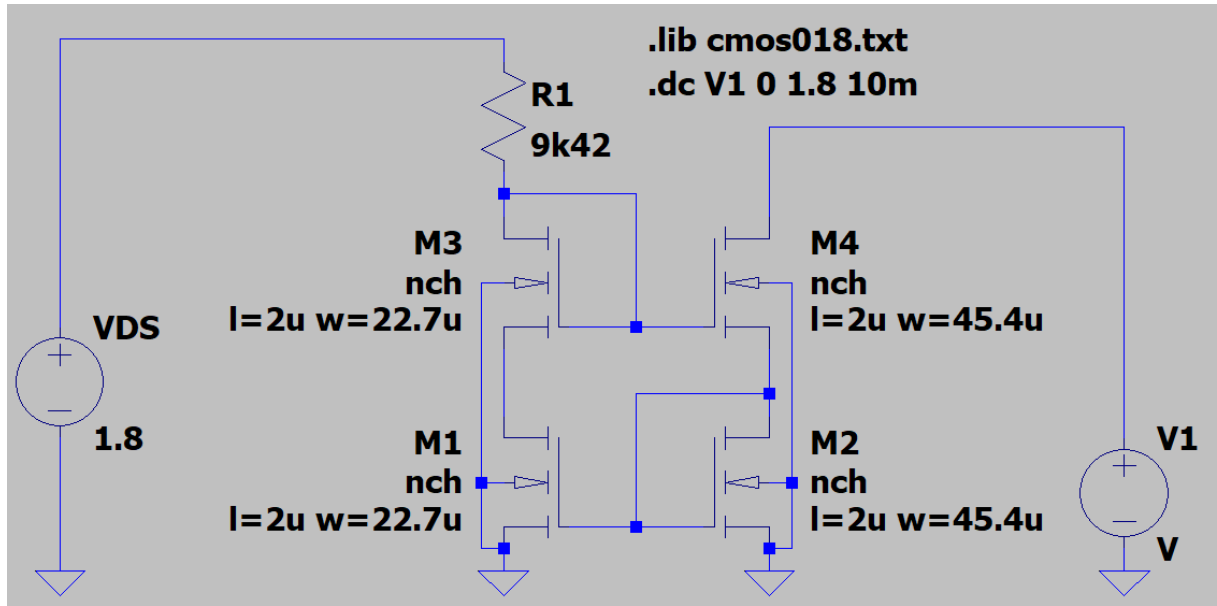


Obr. 5: Závislost proudu tranzistorem I_{M2} a I_{M1} na napětí na zrcadle U_{OUT}

Výstupní odpor pak můžeme určit jako:

$$r_{OUT} = \frac{dU_{OUT}}{dI_{M2}} = \frac{U_{M2-1.8} - U_{M2-1}}{I_{M2-1.8} - I_{M2-1}} = \frac{1.8 - 1}{(99.98384 - 99.78091) \cdot 10^{-6}} [\Omega] = 3463353 [\Omega] = 3.5[M\Omega] \quad (20)$$

3 Wilsonovo proudové zrcadlo



Obr. 6: Schéma zapojení s výslednými hodnotami

Rozměry L a W můžeme určit stejně jako v předchozím příkladu $L = 2[\mu m]$ a W podle vztahu 21.

$$W_{M1-3} = \frac{2 \cdot I_D \cdot L}{K P_{PM1} U_{OV}^2} = \frac{2 \cdot 50 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^{-6}}{220 \cdot 10^{-6} \cdot 0.2^2} [m] = 22.7 [\mu m] \quad (21)$$

Protože poměr proudu výstupního proudu k vstupnímu proudu je 2, můžeme určit W_{M2-4} jako $W_{M2-4} = 2 \cdot W_{M1} = 45.4 [\mu m]$.

	$L[\mu m]$	$W[\mu m]$
M_1	2	22.7
M_2	2	45.4
M_3	2	22.7
M_4	2	45.4

Tabulka 3: Rozměry tranzistorů pro Wilsonovo proudové zrcadlo

Stejně jako v předchozím příkladu můžeme určit výstupní odpor r_{OUT} jako:

$$R_1 = \frac{V_{CC} - (U_{GSM1} + U_{GSM3})}{I_{M1,3}} \quad (22)$$

Kde:

$$U_{GSM1} = U_{TH0} + U_{OV} = (0.368024 + 0.25) [V] = 0.518024[V] \quad (23)$$

U M_3 musíme započítat bulk efekt a tedy hodnotu U_{TH} odečteme z grafu z předchozího protokolu, tedy $U_{TH,M3} = 1.0481[V]$.

V této části extrakce parametrů jsem pravděpodobně udělal nějakou chybu, bohužel ji nemohu najít. Pokud by totiž U_{TH} PMOS tranzistoru, zatíženého buklefektrem $U_{SB} = 0.52[V]$ bylo $U_{TH} = 1.0481[V]$ znamenalo by to:

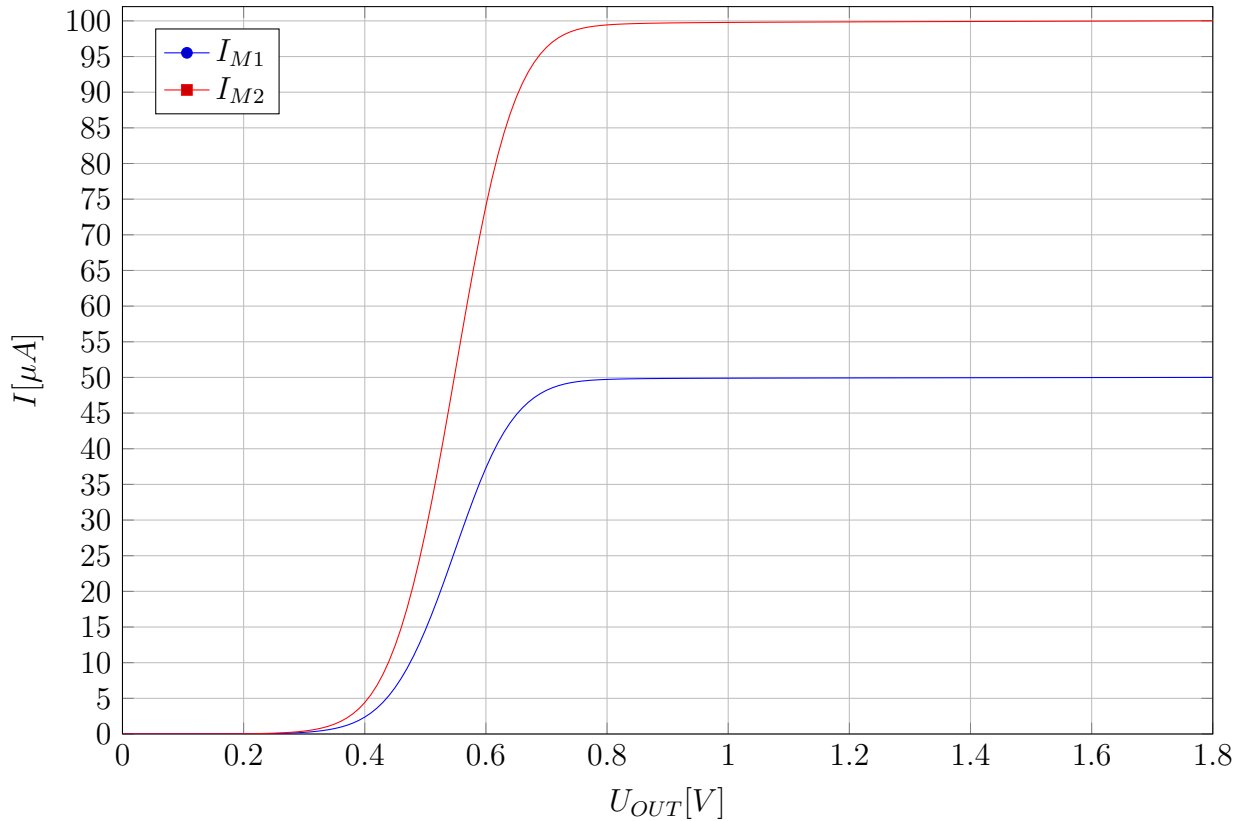
$$U_{GSM3} = U_{TH} + U_{OV} = (1.0481 + 0.25) [V] = 1.2981[V] \quad (24)$$

a tedy:

$$U_{CC} = 1.8[V] < U_{GSM1} + U_{GSM3} = (0.518024 + 1.2981) [V] = 1.816124[V] \quad (25)$$

Což by znamenalo, že napájecí napětí U_{CC} je menší než napětový úbytek na tranzistorech a tedy nedostačuje k provozu tohoto zrcadla.

Každopádně když přesto provedeme simulaci s iteračně určenou hodnotou $R_1 = 9.42[k\Omega]$, dostaneme graf 9.



Obr. 7: Závislost proudu tranzistorem I_{M2} a I_{M1} na napětí na zrcadle U_{OUT}

$$g_m = KP_N \cdot \frac{W}{L} \cdot (U_{GS} - U_{TH}) = \left(220 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{45.4 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 10^{-6}} \cdot 0.25 \right) [S] = 0.0049939[S] = 5[mS]$$

$$\begin{aligned} r_T = r_{o1} \parallel \left(R_1 + \frac{1}{g_{m3}} \right) &= \frac{1}{\lambda \cdot I_M} \parallel \left(R_1 + \frac{1}{g_{m3}} \right) = \\ \left(\frac{1}{0.0438342 \cdot 100 \cdot 10^{-6}} \parallel \left(9.42 \cdot 10^3 \frac{1}{0.0049939} \right) \right) [\Omega] &= \\ = (228132 \parallel 1886301) [\Omega] &= 203518[\Omega] = 204[k\Omega] \end{aligned}$$

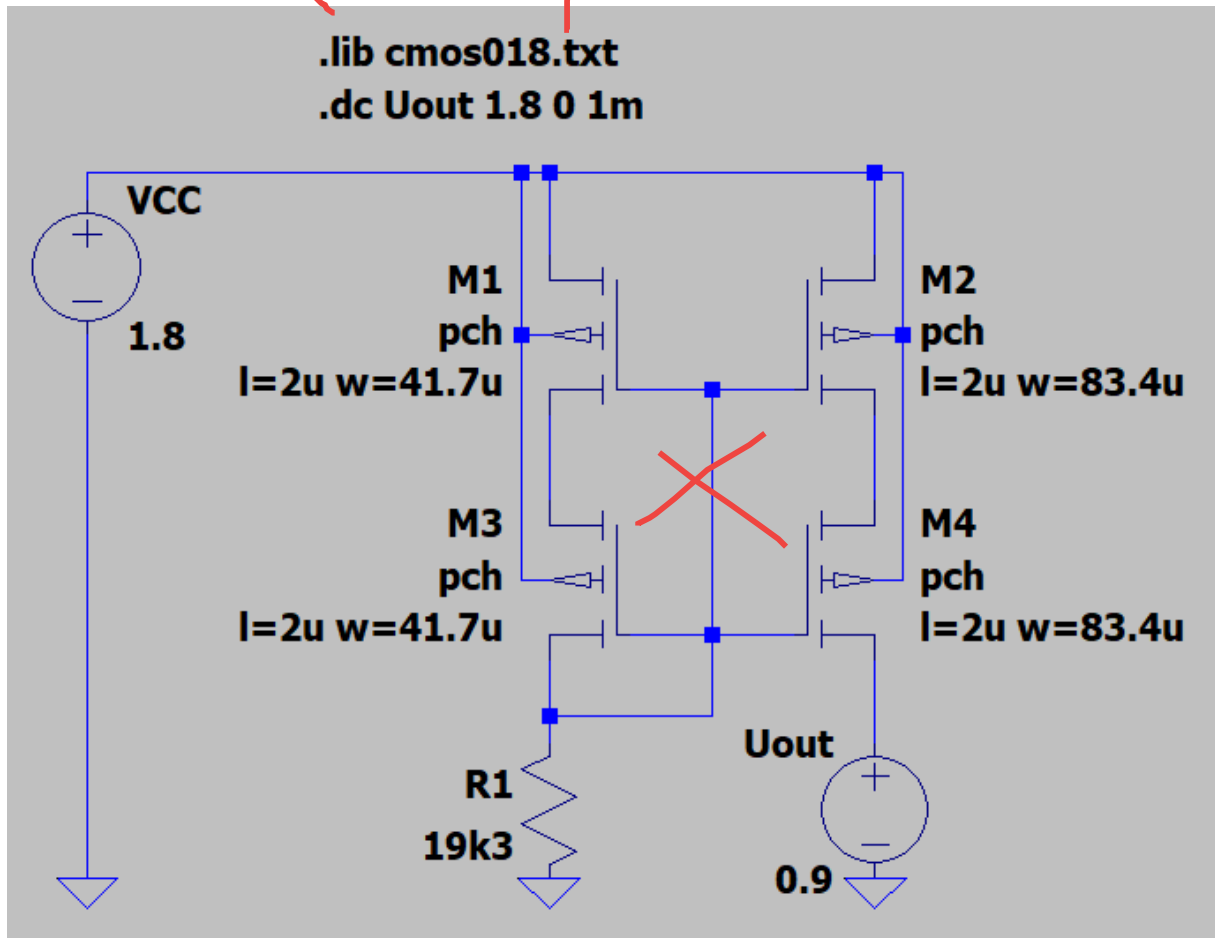
$$\begin{aligned} r_{out} &= \frac{1}{\lambda \cdot I_M} \cdot KP_N \cdot \frac{W}{L} \cdot U_{OV} \cdot r_T = \\ \left(\frac{1}{0.0438342 \cdot 100 \cdot 10^{-6}} \cdot 220 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{45.4 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 10^{-6}} \cdot 0.25 \cdot 204 \cdot 10^3 \right) [\omega] &= 58103946[\Omega] = 58[M\Omega] \end{aligned}$$

Výstupní odpor pak můžeme určit jako:

$$r_{OUT} = \frac{dU_{OUT}}{dI_{M2}} = \frac{U_{M2-1.8} - U_{M2-0.8}}{I_{M2-1.8} - I_{M2-0.8}} = \frac{1.8 - 0.8}{(100.0119 - 99.78091) \cdot 10^{-6}} = 4.3[M\Omega] \quad (26)$$

3.0.1 Bonus

~~X~~ + 0,1



Obr. 8: Schéma zapojení, s výslednými hodnotami

Rozměry L a W jsem přebíral z návrhu obyčejného kaskádového proudového zrcadla, tedy:

	$L[\mu m]$	$W[\mu m]$
M_1	2	41.7
M_2	2	83.4
M_3	2	41.7
M_4	2	83.4

Tabulka 4: Rozměry tranzistorů pro Modifikované Kaskádové proudové zrcadlo

Úbytek napětí na tranzistorech M_1 a M_3 bude trochu složitější, než v předchozích případech. Úbytek na M_3 bude stejný jako v předchozím případě, tedy $U_{GSM3} = U_{TH} + U_{OV}$. Pro jeho určení ale kvůli bulkefektu potřebujeme znát úbytek na M_1 , který je $U_{M1} = 0.1[V]$. Z toho tedy $U_{TH3} = 0.574707[V]$ a $U_{GSM3} = 0.774707[V]$.

Odpor R_1 pak můžeme určit jako:

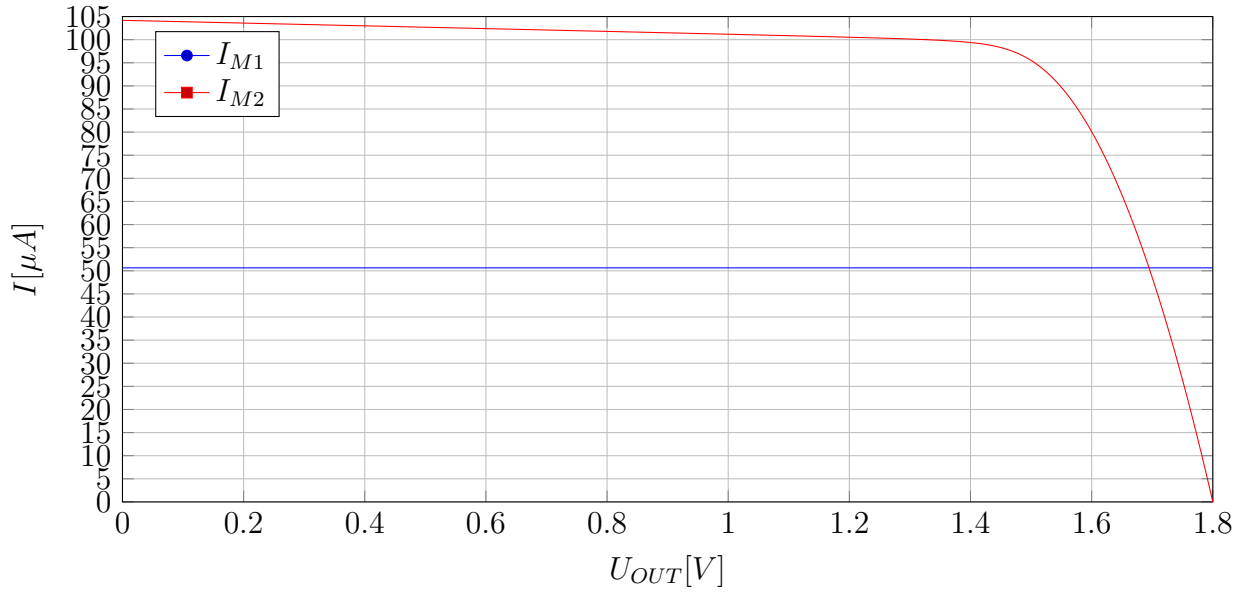
$$R_1 = \frac{V_{CC} - (U_{M1} + U_{GSM3})}{I_{M1,3}} \quad (27)$$

Tedy:

$$R_1 = \frac{1.8 - (0.1 + 0.774707)}{50 \cdot 10^{-6}} [\Omega] = 18506 [\Omega] = 19 [k\Omega] \quad (28)$$

Výstupní odpor pak můžeme určit jako:

$$r_{OUT} = \frac{1}{\lambda I_{out}} = \frac{1}{\lambda I_{M2}} = \frac{1}{0.0787029 \cdot 100 \cdot 10^{-6}} [\Omega] = 127060 [\Omega] = 127 [k\Omega] \quad (29)$$



Obr. 9: Závislost proudu tranzistorem I_{M2} a I_{M1} na napětí na zrcadle U_{OUT}

Výstupní odpor pak můžeme určit jako:

$$r_{OUT} = \frac{dU_{OUT}}{dI_{M2}} = \frac{U_{M2-1.8} - U_{M2-0.5}}{I_{M2-1.8} - I_{M2-0.5}} = \frac{1.8 - 0.5}{(104.1794 - 100.1333) \cdot 10^{-6}} [\Omega] = 321297 [\Omega] = 321 [k\Omega] \quad (30)$$

4 Závěr

Podle zadání jsem provedl ruční návrh tří proudových zrcadel (Jednoduché, Kaskodové a Wilsonovo). Všechny tři zrcadla jsem následně odsimuloval a uvedl výsledky simulací. Následující tabulka 1 porovnává výstupní odpor jednotlivých zrcadel.

Typ zrcadla	výpočet $R_{out}[M\Omega]$	simulace $R_{out}[M\Omega]$
Jednoduché	0.456	0.456
Kaskodové	0.127	3.5
Wilsonovo	58	4.3
Modifikované Kaskodové	0.127	0.321

Tabulka 1: Porovnání vypočítaného a odsimulovaného výstupního odporu