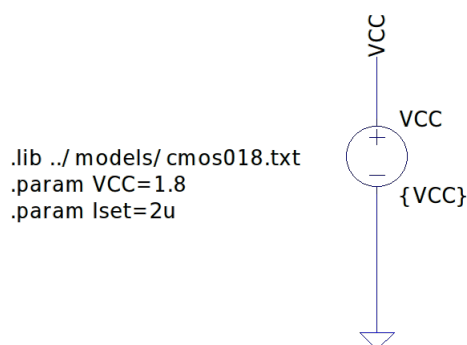


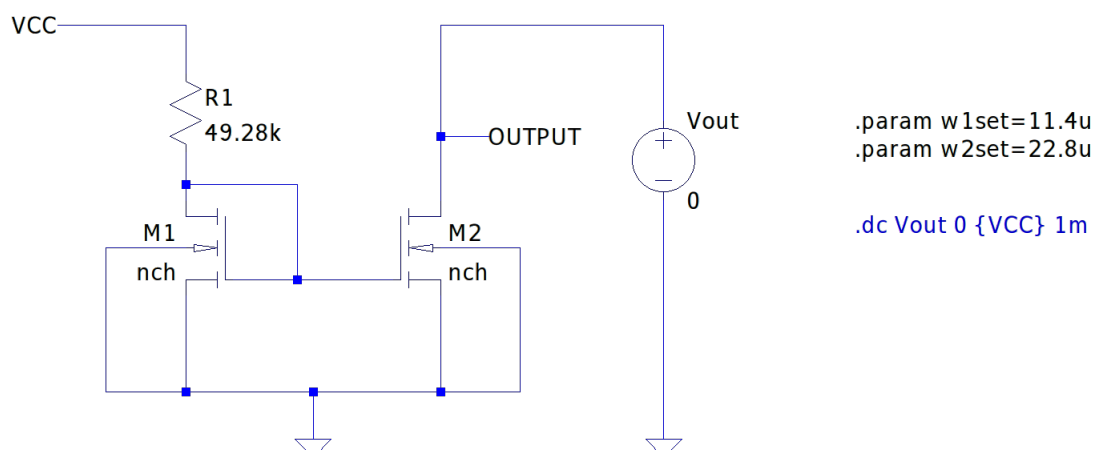
<b>Návrh analogových integrovaných obvodů</b> <b>Ústav mikroelektroniky</b> <b>FEKT VUT v Brně</b>			<b>Jméno</b> <b>Jakub Charvot</b>	<b>ID</b> <b>240844</b>
			<b>Ročník</b> <b>3.</b>	<b>Obor</b> <b>MET</b>
<b>Spolupracoval</b> –	<b>Měřeno dne</b> 4.3. 2024	<b>Odevzdáno dne</b> 17.3. 2024	<b>Hodnocení</b>	
<b>Název zadání</b> <b>Proudová zrcadla</b>				<b>Č. úlohy</b> <b>2</b>

# 1 Vypracování



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

## 1.1 Jednoduché proudové zrcadlo



Obr. 2: Zapojení a SPICE kód.

### 1.1.1 Ruční návrh

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

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

$$\frac{W_1}{L_1} = \frac{2 \cdot 25 \cdot 10^{-6}}{220 \cdot 10^{-6} \cdot (0,2)^2}$$

$$\frac{W_1}{L_1} \doteq 5,68$$

Pro oba tranzistory zvolíme stejnou délku kanálu  $L_1 = L_2 = 2 \mu\text{m}$ , tedy  $W_1 = 11,36 \mu\text{m}$ . Druhý tranzistor má dosáhnout dvakrát vyššího proudu, takže zvolíme  $W_2 = 22,72 \mu\text{m}$ .

$$R_1 = \frac{U_R}{I_{M1}} = \frac{U_{CC} - U_{GS1}}{I_{M1}} = \frac{U_{CC} - (U_{TH0,1} + U_{OV,1})}{I_{M1}}$$

$$R_1 = \frac{1,8 - (368,024 \cdot 10^{-3} + 0,2)}{25 \cdot 10^{-6}}$$

$$R_1 \doteq 49,28 \text{ k}\Omega$$

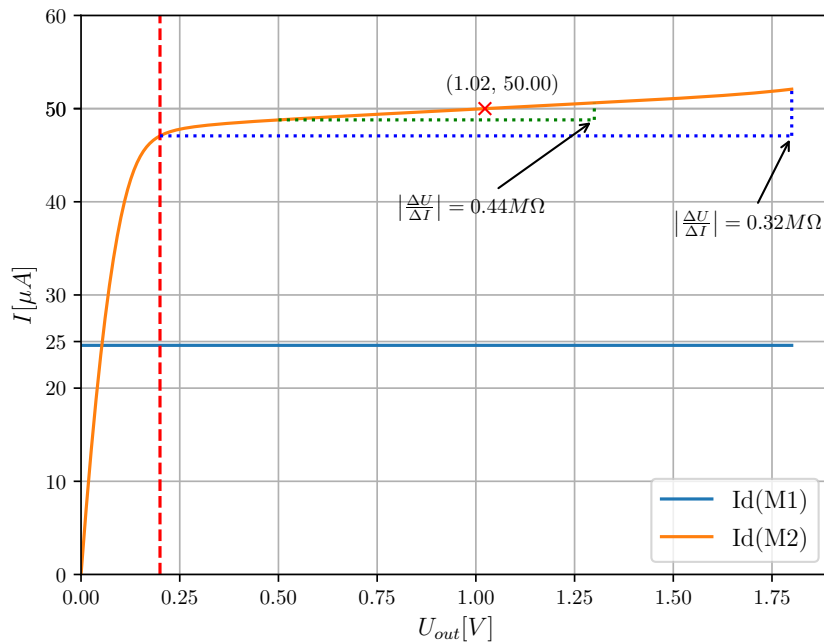
Výstupní odpor tohoto zapojení je roven výstupnímu odporu tranzistoru  $M_2$ :

$$r_{OUT} = \frac{1}{\lambda \cdot I_{M2}}$$

$$r_{OUT} = \frac{1}{0,044 \cdot 50 \cdot 10^{-6}}$$

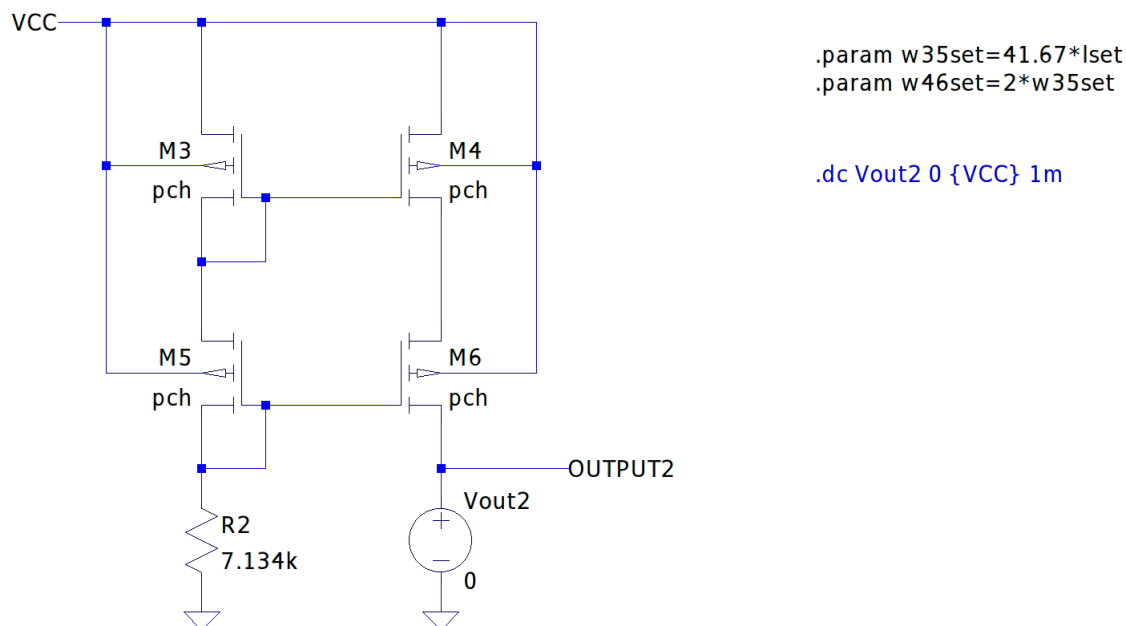
$$r_{OUT} = 454,545 \text{ k}\Omega$$

### 1.1.2 Výstupní charakteristika



Obr. 3: DC analýza pro jednoduché proudové zrcadlo.

## 1.2 Kaskodové proudové zrcadlo



Obr. 4: Zapojení a SPICE kód.

### 1.2.1 Ruční návrh

Pro vstupní větev je stanoven proud  $50 \mu\text{A}$ , výpočet rozměrů je proveden obdobným způsobem jako v minulém příkladu:

$$\frac{W_{3,5}}{L_{3,5}} = \frac{2 \cdot I_{D3}}{K P_P \cdot (U_{GS} - U_{TH})^2}$$

$$\frac{W_{3,5}}{L_{3,5}} = \frac{2 \cdot 50 \cdot 10^{-6}}{60 \cdot 10^{-6} \cdot (0,2)^2}$$

$$\frac{W_{3,5}}{L_{3,5}} = 41,67$$

Opět použijeme délku kanálu  $L_{3,5} = L_{4,6} = 2 \mu\text{m}$ , tedy  $W_{3,5} = 83,34 \mu\text{m}$ . Druhý tranzistor má dosáhnout dvakrát vyššího proudu, takže zvolíme  $W_{4,6} = 166,68 \mu\text{m}$

Pro nastavení proudu slouží rezistor R2. Jeho hodnota je stanovena na základě úbytku napětí na rezistoru.

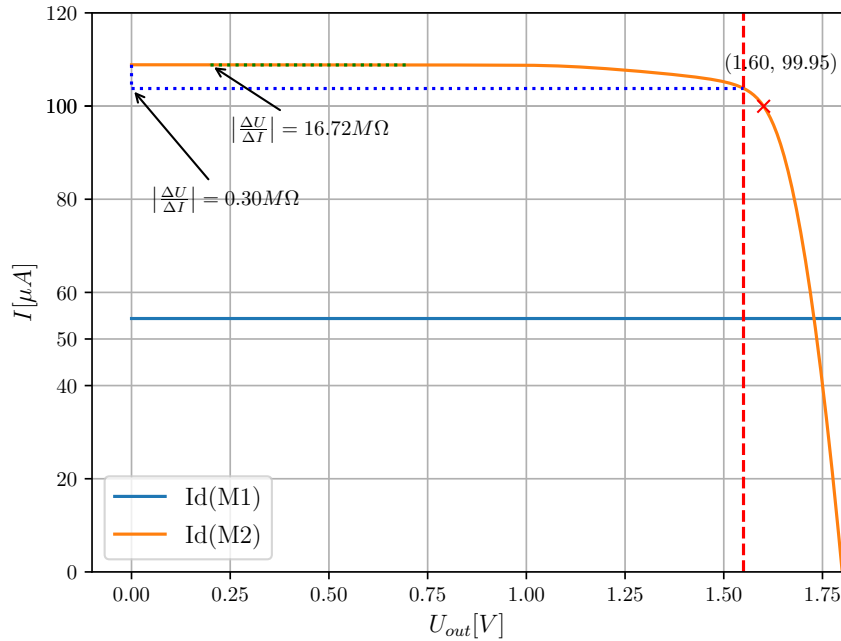
$$\begin{aligned} U_{R2} &= U_{CC} - U_{GS3} - U_{GS5} \\ &= U_{CC} - U_{TH0,3} - U_{OV3} - U_{TH,5} - U_{OV5} \\ &= U_{CC} - U_{TH0,3} - U_{TH,5} - 2 \cdot U_{OV3,5} \\ &= 1,8 - 0,4433 - 0,6 - 2 \cdot 0,2 \\ &= 0,3567 \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
R_2 &= \frac{U_{R1}}{I_{M1}} \\
&= \frac{0,3567}{50 \cdot 10^{-6}} \\
&= 7,134 \text{ k}\Omega
\end{aligned}$$

Pro výpočet výstupního odporu použijeme zjednodušený vztah, jelikož rozměry tranzistorů  $M4$  a  $M6$  jsou stejné:

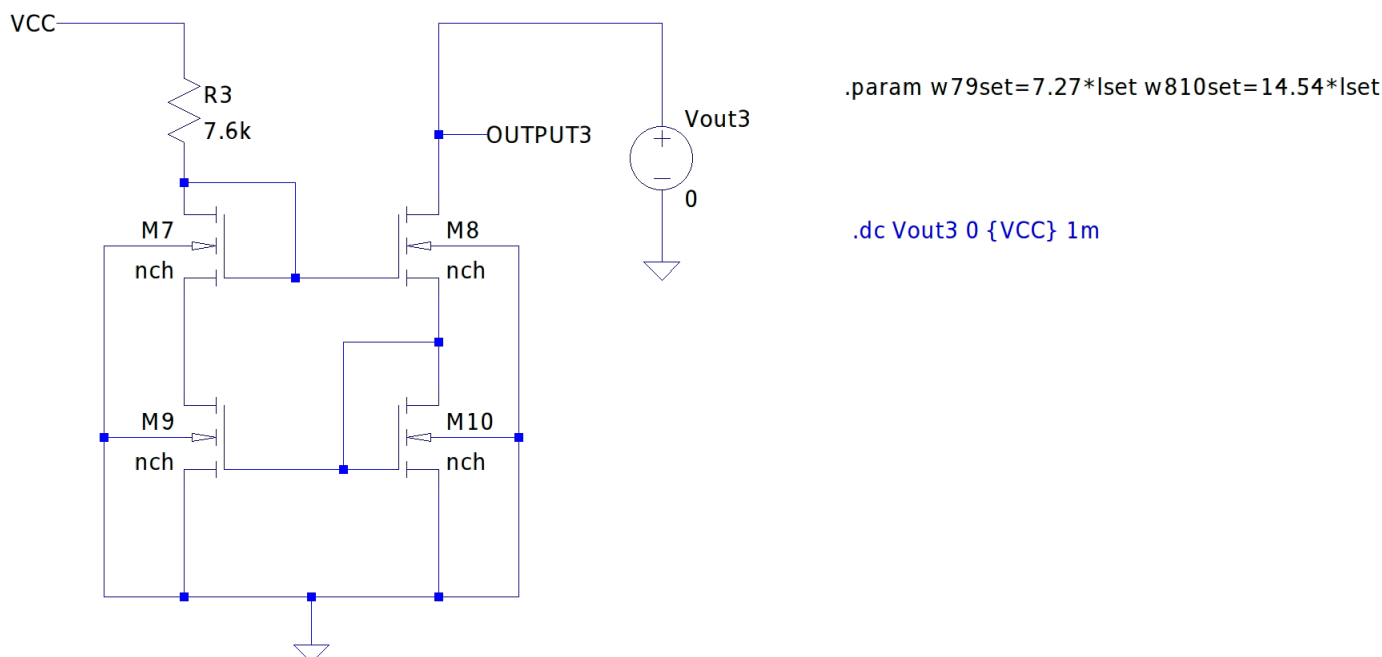
$$\begin{aligned}
r_{OUT} &= r_{o4,6}^2 \cdot g_{m6} \\
&= \left( \frac{1}{\lambda_{PMOS} \cdot I_{M6}} \right)^2 \cdot \frac{2 \cdot I_{M6}}{U_{OV6}} \\
&= \frac{2}{\lambda_{PMOS}^2 \cdot I_{M6} \cdot U_{OV6}} \\
&= \frac{2}{0,079^2 \cdot 100 \cdot 10^{-6} \cdot 0,2} \\
&= 16,02 \text{ M}\Omega
\end{aligned}$$

### 1.2.2 Výstupní charakteristika



Obr. 5: DC analýza pro kaskodové proudové zrcadlo.

### 1.3 Modifikované Wilsonovo proudové zrcadlo



Obr. 6: Zapojení a SPICE kód.

#### 1.3.1 Ruční návrh

Výpočet rozměrů tranzistorů vychází ze stejných rovnic jako v předešlých příkladech, délku kanálu zvolíme opět stejnou, tedy  $L_{7,9} = L_{8,10} = 2 \mu\text{m}$ .

Pro vstupní větev je stanoven proud  $50 \mu\text{A}$ , pro výstupní větev  $100 \mu\text{A}$  a  $U_{OV} = 0,25 \text{ V}$ :

$$\begin{aligned} \frac{W_{7,9}}{L_{7,9}} &= \frac{2 \cdot I_{D7}}{K P_N \cdot (U_{GS} - U_{TH})^2} \\ &= \frac{2 \cdot 50 \cdot 10^{-6}}{220 \cdot 10^{-6} \cdot (0,25)^2} \\ &= 7,27 \end{aligned}$$

Pak  $W_{7,9} = 14,55 \cdot 10^{-6} \mu\text{m}$ . Pro výstupní větev je proud dvojnásobný, tedy i šířka kanálu musí být  $W_{8,10} = 2 \cdot W_{7,9} = 29,1 \mu\text{m}$ .

Pro nastavení proudu slouží rezistor  $R3$ . Jeho hodnota je stanovena na základě úbytku napětí na rezistoru.

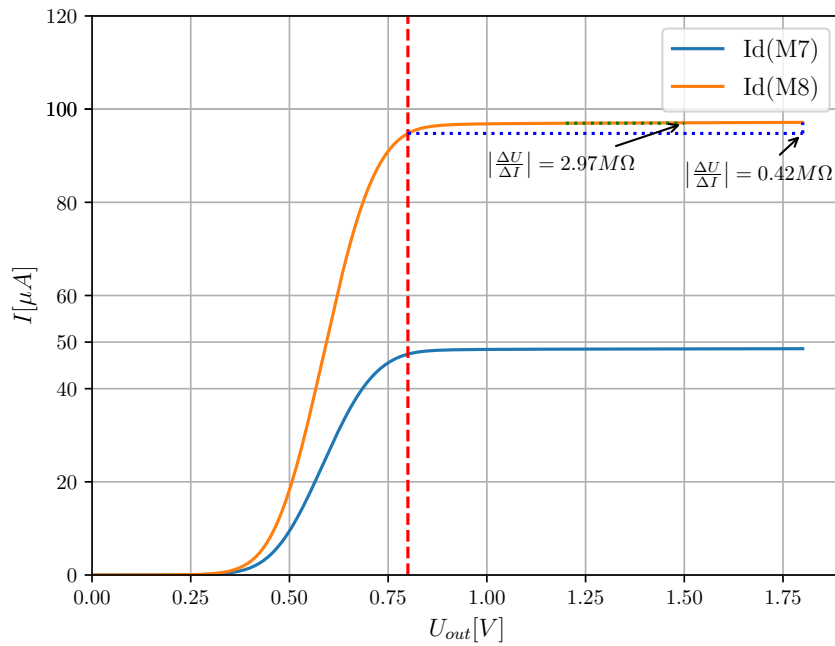
$$\begin{aligned} U_{R3} &= U_{CC} - U_{GS7} - U_{GS9} \\ &= U_{CC} - U_{TH7} - U_{OV7} - U_{TH0,9} - U_{OV9} \\ &= U_{CC} - U_{TH7} - U_{TH0,9} - 2 \cdot U_{OV7,9} \\ &= 1,8 - 0,55 - 0,37 - 2 \cdot 0,25 \\ &= 0,38 \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
R_2 &= \frac{U_{R3}}{I_{M7}} \\
&= \frac{0,38}{50 \cdot 10^{-6}} \\
&= 7,6 \text{ k}\Omega
\end{aligned}$$

Pro výpočet výstupního odporu použijeme zjednodušený vztah, jelikož rozměry tranzistorů  $M4$  a  $M6$  jsou stejné:

$$\begin{aligned}
r_{OUT} &= r_{o8} \cdot g_{m9} \cdot r_T \\
&= \frac{1}{\lambda_N \cdot I_{M8}} \cdot \frac{2 \cdot I_{M7}}{U_{OV9}} \cdot \left( r_{o9} \parallel \left( R_3 + \frac{1}{g_{m7}} \right) \right) \\
&= \frac{1}{\lambda_N \cdot I_{M8}} \cdot \frac{2 \cdot I_{M7}}{U_{OV9}} \cdot \left( \frac{1}{\lambda_N \cdot I_{M9}} \parallel \left( R_3 + \frac{U_{OV7}}{2 \cdot I_{M7}} \right) \right) \\
&= \frac{1}{0,044 \cdot 100 \cdot 10^{-6}} \cdot \frac{2 \cdot 50 \cdot 10^{-6}}{0,25} \cdot \left( \frac{1}{0,04 \cdot 50 \cdot 10^{-6}} \parallel \left( 7,6 \cdot 10^3 + \frac{0,25}{2 \cdot 50 \cdot 10^{-6}} \right) \right) \\
&= 900 \text{ k}\Omega
\end{aligned}$$

### 1.3.2 Výstupní charakteristika



Obr. 7: DC analýza pro modifikované Wilsonovo proudové zrcadlo.

## 2 Závěr

V této úloze jsme porovnávali tři základní typy proudových zrcadel.

Vždy byl proveden ruční výpočet parametrů součástek a výsledek byl následně prověřen simulací. Pro jednoduché proudové zrcadlo odpovídá výsledek simulace očekáváním – zapojení je jednoduché a výpočet mohl být proveden poměrně přesně. Jak je vidět z grafu 3, dynamický rozsah je přibližně 1,6 V, napříč tímto rozsahem hodnota výstupního proudu přibližně lineárně roste z důvodu efektu modulace délky kanálu.

Pro kaskodové zrcadlo se simulace poměrně odchyluje od požadavků na vstupní a výstupní proud, ruční výpočet byl tedy méně přesný. Hodnoty použité v ručním výpočtu pocházejí z tabulek z první úlohy, kdy jsme simulovali změny prahového napětí. Tyto tabulky neobsahují hodnoty pro požadovaný poměr  $W/L$  ani pro napětí na bulku horního tranzistoru. Byly tedy použity hodnoty nejbližší, nikoliv zcela přesné, tím mohlo dojít k chybě. Z výsledků simulace plyne, že největší chyba je u výpočtu hodnoty rezistoru. Pokud bychom použili přesnější hodnoty a nebo iterovali v rámci simulace, dojdeme k podstatně lepšímu výsledku. Dynamický rozsah tohoto zapojení je o něco málo menší, přibližně 1,55 V. Výstupní odpor je ale oproti jednoduchému zrcadlu podstatně vyšší, výstupní proud tedy není tolik závislý na změně výstupního napětí.

Pro Wilsonovo zrcadlo opět došlo k odchylce simulovaných proudů od hodnoty, se kterou pracuje výpočet. Důvod je stejný jako v předchozím případě. Jako výchozí bod návrhu jsou ale i tyto výpočty dostatečně přesné. U Wilsonova zrcadla vychází výstupní odpor výrazně nižší než u zrcadla kaskodového (vypočtená hodnota je pak ještě nižší než simulovaná), dynamický rozsah je také menší a to přibližně 1 V.

	Jednoduché		Kaskodové		Wilsonovo	
	V	S	V	S	V	S
Vstupní proud [ $\mu\text{A}$ ]	25	25	50	54	50	49
Výstupní proud [ $\mu\text{A}$ ]	50	50	100	109	100	97
$r_{OUT}$ [ $\text{M}\Omega$ ]	0,455	0,4	16	16	0,9	3

Tabulka 1: Porovnání hodnot simulace (S) a ručních výpočtů (V).