

# Návrh analogových integrovaných obvodů

návody do CP

**Garant předmětu:**

doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.

**Autor textu:**

doc. Ing. Vilém Kledrowetz, Ph.D.



# Obsah

<b>1</b>	<b>Extrakce parametrů tranzistorů MOSFET ze SPICE modelu</b>	<b>1</b>
1.1	Prahové napětí $U_{TH0}$ . . . . .	1
1.2	Závislost prahového napětí $U_{TH}$ na napětí bulku . . . . .	3
1.3	Závislost modulace délky kanálu ( $\lambda$ ) na délce kanálu ( $L$ ) . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Proudová zrcadla</b>	<b>7</b>
2.1	Jednoduché proudové zrcadlo . . . . .	7
2.2	Kaskodové proudové zrcadlo . . . . .	10
2.3	Modifikované Wilsonovo proudové zrcadlo . . . . .	12
	<b>Seznam zkratek</b>	<b>15</b>

# 1 Extrakce parametrů tranzistorů MOSFET ze SPICE modelu

V této úloze si provedete charakterizaci používaných modelů tranzistorů. Získáte parametry tranzistorů, které budete ve zbytku semestru používat pro ruční výpočty.

Pozn. Každý výrobce dodává ke své technologii modely a dokumentaci, kde jsou parametry všech dostupných součástek napsány. Tyto dokumenty a technologie jsou chráněny NDA a přístup k nim vyžaduje podstoupení schvalovacího procesu. Z toho důvodu používáme volně dostupné modely, které nejsou svázány s žádnou technologií a nemají žádnou dokumentaci.

Vstupní parametry technologie jsou:

- Nesymetrické napájecí napětí  $U_{CC} = 1,8 \text{ V}$ ,  $U_{SS} = U_{GND} = 0 \text{ V}$ ,
- $KP_N = 220 \mu\text{A}/\text{V}^2$ ,
- $KP_P = 60 \mu\text{A}/\text{V}^2$ .

## Seznam úloh:

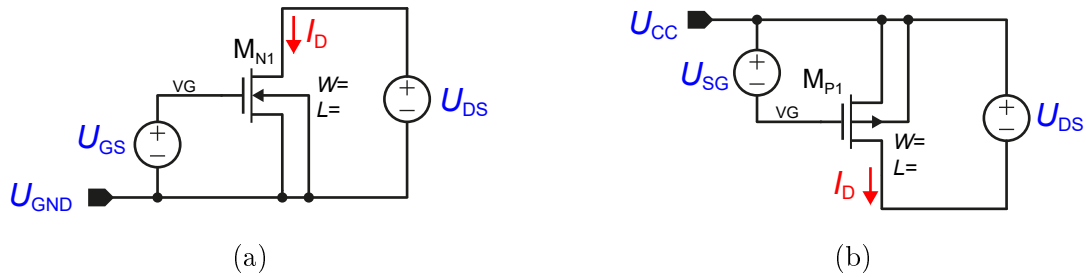
- 1.1 Prahové napětí  $U_{TH0}$
- 1.2 Závislost prahového napětí  $U_{TH}$  na napětí bulků
- 1.3 Závislost modulace délky kanálu ( $\lambda$ ) na délce kanálu ( $L$ )

## 1.1 Prahové napětí $U_{TH0}$

**Zadání:** Simulací získejte hodnoty prahového napětí  $U_{TH0}$  pro dvě různé řady rozměrů tranzistorů (níže jsou použity desetinné tečky):

- 1) konstantní poměr  $W/L = 5$ , kdy  $L = 0.18; 0.3; 0.5; 0.8; 1; 2; 3; 5; 10$ ,
- 2) různé rozměry:  $W/L = 0.22/0.18; 1/0.5; 2/0.5; 2/1; 5/1; 5/2; 10/5; 10/10; 40/10$ ,
- 3) výše uvedené dva body budou provedeny pro tranzistor NMOS i PMOS.

Prahové napětí odečítejte v bodě, kde  $I_D = 100 \text{ nA}$  při  $U_{DS} = U_{CC}/2$ . Schéma pro simulaci je ukázáno na obr. 1.1



Obr. 1.1: Schéma pro zjištění  $U_{TH0}$  pro tranzistor (a) NMOS a (b) PMOS

### Výstupy:

- schéma obvodu z LTspice včetně všech součástek/SPICE direktivy. Pokud se obvody pro body 1) a 2) liší, budou ve výstupech oba obvody,
- printscreen ze *SPICE Output Log* s odsimulovanými hodnotami pro bod 1) a 2). V závěru budou hodnoty uvedeny v tabulce.
- výše uvedené dva body budou ve výstupech pro tranzistor NMOS a PMOS.

### Doporučený postup:

- ad 1) Vytvořte schéma podle obr. 1.1a. Postupně nastavuje rozměry tranzistorů dle zadání a odečítejte prahové napětí, resp. napětí, při němž teče tranzistorem proud

$$I_D = 100n \cdot W/L = 100n \cdot 5 = 500 \text{ nA} \quad (1.1)$$

Rozměry tranzistorů lze nastavovat ručně a následně pomocí kurzorů odečíst napětí při daném proudu. Efektivnějším způsobem je nastavit „STEP“ analýzu a použít měřicí funkci „MEAS“.

Pro nastavení funkce „STEP“ je nutné nastavit hodnotu  $L$  jako parametr, např. „*lset*“. Protože poměr  $W/L$  je pro všechny délky stejný, roven 5, nastaví se šířka  $W$  jako '*lset* \* 5'. Po té se definuje jako parametr proměnná „*lset*“ a následně samotné krokování „STEP param *lset* list 0.18u, 0.3u, 0.5u, 0.8u, 1u, 2u, 3u, 5u, 10u“. Samotná analýza použitá v simulaci bude stejnosměrné rozmítání napětí  $U_{GS}$  ve vhodném rozsahu, např. od 0 V do 1 V s krokem 1 mV.

Měřicí funkce se nastaví jako „MEAS DC UTH FIND V(VG) WHEN Id(M1)=500n“, kde „VG“ je název uzlu připojený na gate tranzistoru.

Po spuštění analýzy si otevřete okno *View - SPICE Output Log* (zkratka Ctrl+L), kde jsou výsledné hodnoty  $U_{TH}$ , resp. napětí v uzlu „VG“ při daném proudu.

ad 2) Zde již nejde použít automatické rozmítání podle předchozího vzoru, protože poměr  $W/L$  není konstantní. Pro tento účel lze využít funkci „TABLE“. Ve funkci „.MEAS“ je nutné změnit hodnotu proudu  $I_D$ , při kterém se hledá napětí  $U_{GS}$ . Tato hodnota, jak již bylo napsáno, není konstantní, a proto je zadána pomocí vzorce. Zápis výše uvedených funkcí je ukázán na obr. 1.2

```
.param wset=table(n, 1,0.22u, 2,1u, 3,2u, 4,2u, 5,5u, 6,5u, 7,10u, 8,10u, 9,40u)
.param lset=table(n, 1,0.18u, 2,0.5u, 3,0.5u, 4,1u, 5,1u, 6,2u, 7,5u, 8,10u, 9,10u)
.step param n 1 9 1
.meas DC UTH FIND V(VG) WHEN Id(M1)=100n*wset/lset
```

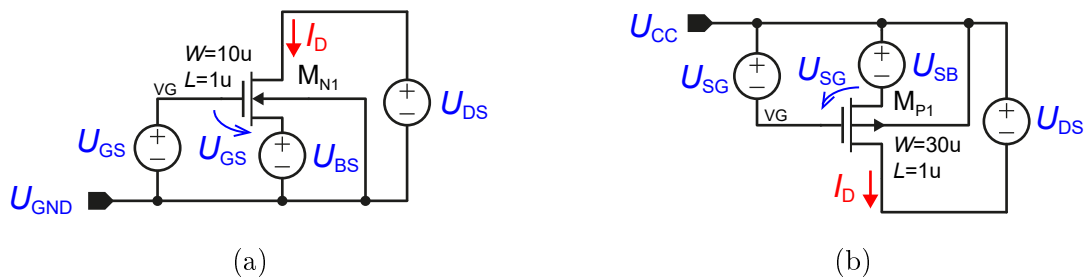
Obr. 1.2: Nastavení automatického rozmítání a měření

ad 3) Opakujte body a) a b) pro tranzistor PMOS (schéma na obr. 1.1b). Pozor, zde napětí v uzlu „VG“ neodpovídá napětí  $U_{SG}$ , protože  $U_{SG} = U_{CC} - U_G$ . Toto je potřeba zohlednit ve vytváření měřicí funkce!

## 1.2 Závislost prahového napětí $U_{TH}$ na napětí bulku

**Zadání:** Simulací získejte hodnoty prahového napětí  $U_{TH}$  pro napětí  $U_{BS}$  (NMOS) resp.  $U_{SB}$  (PMOS) v rozsahu 0 V až 500 mV s krokem 50 mV.

Prahové napětí odečítejte stejně jako v předchozím případě, tj. v bodě, kde  $I_D = 100$  nA při  $U_{DS} = U_{CC}/2$ . Schéma pro simulaci je ukázáno na obr. 1.3



Obr. 1.3: Schéma pro simulaci závislosti  $U_{TH}$  na napětí bulku pro tranzistor (a) NMOS a (b) PMOS

### Výstupy:

- schéma obvodu z LTspice včetně všech součástek/SPICE direktivy,
- graficky vyjádřená závislost  $U_{TH}$  na  $U_{BS}$  ( $U_{SB}$ ). V závěru budou uvedeny hodnoty v tabulce pro  $U_{BS}$ ,  $U_{SB} = 0,2$  V;  $0,25$  V;  $0,3$  V;  $0,4$  V a  $0,5$  V.
- výše uvedené dva body budou ve výstupech pro tranzistor NMOS a PMOS.

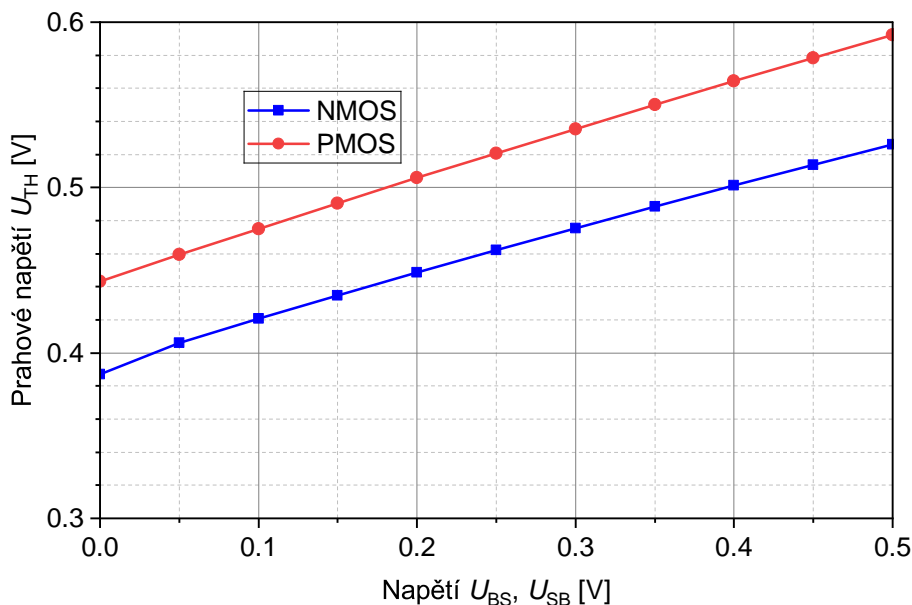
**Doporučený postup:**

Tato úloha je obdobná jako úloha 1.1 s tím rozdílem, že v rámci funkce „STEP“ nebudou rozmítány rozměry tranzistoru (zde jsou konstantní), ale bude rozmítáno napětí  $U_{BS}$  dle zadání („STEP VBS 0 0.5 50m“). Nakreslete schéma pro tranzistor NMOS (obr. 1.3a) a nastavte analýzu. Po spuštění analýzy otevřete *View - SPICE Output Log* (zkratka Ctrl+L), kde jsou vypsané výsledky měřicí funkce (pozor, od naměřeného napětí je potřeba odečíst napětí  $U_{SB}$  - např. „meas UTH param VGATE-VBS“), tj. i hodnoty prahového napětí. Hodnoty si uložte (budou potřeba v závěru) a zároveň si je lze vykreslit pomocí RMC na výsledky a následným vybráním *Plot .step'ed .meas data*.

Opakujte postup pro tranzistor PMOS (obr. 1.3b). Opět pozor na „VG“ v měřicí funkci!

**Výsledky**

Očekávané průběhy jsou znázorněny na obr. 1.4.

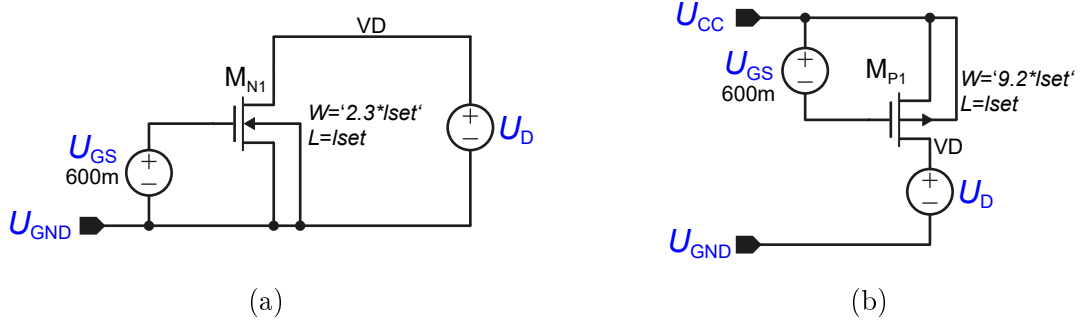


Obr. 1.4: Vliv rozdílného napětí mezi bulk a source na prahové napětí tranzistoru

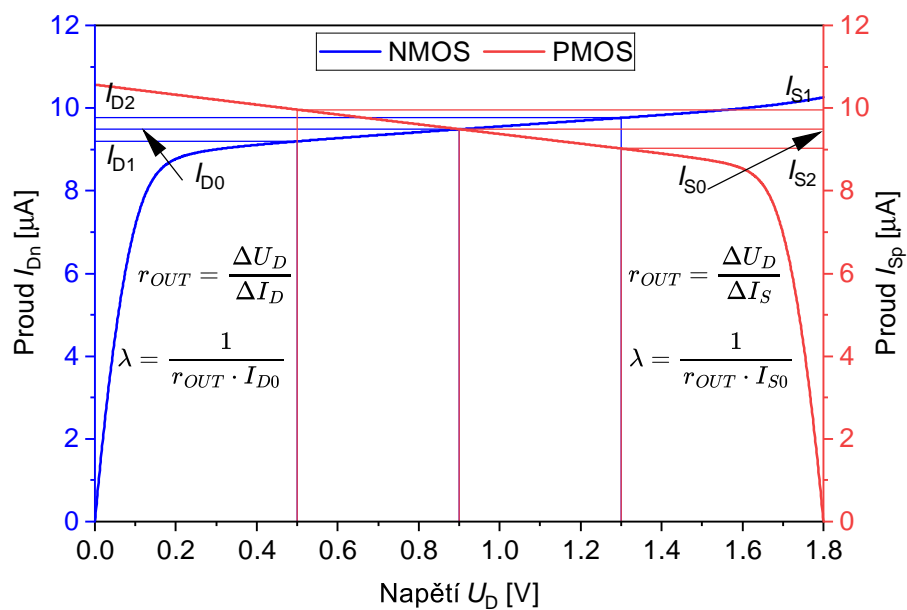
### 1.3 Závislost modulace délky kanálu ( $\lambda$ ) na délce kanálu ( $L$ )

**Zadání:** Simulací získejte hodnoty parametru  $\lambda$  tranzistoru NMOS a PMOS pro  $L$  v rozmezí  $0,2 \mu\text{m}$  až  $10 \mu\text{m}$  s krokem  $0,1 \mu\text{m}$  při konstantním poměru  $W/L$ .

Pro odečítání výstupního odporu uvažujte oblast mezi  $U_D = 0.5 \text{ V}$  a  $1.3 \text{ V}$ . Schéma obvodu pro simulaci je na obr. 1.5 a na obr. 1.6 je znázorněn princip odečtu a následného výpočtu parametru  $\lambda$ .



Obr. 1.5: Schéma pro simulaci závislosti  $\lambda$  na délce kanálu  $L$  pro tranzistor (a) NMOS a (b) PMOS



Obr. 1.6: Cesta k získání parametru  $\lambda$

### Výstupy:

- schéma obvodu z LTspice včetně všech součástek/SPICE direktivy,
- graficky vyjádřená závislost  $\lambda$  vs  $L$ . V závěru budou uvedeny hodnoty v tabulce pro  $L = (0,5; 0,8; 1; 1,2; 2; 5) \mu m$ .
- výše uvedené dva body budou ve výstupech pro tranzistor NMOS a PMOS.

### Doporučený postup:

Pro simulaci vykreslete výstupní charakteristiku tranzistoru a následně odečtěte hodnoty proudu  $I_D$  při napětích  $U_{DS} = 0.5$  V a 1.3 V. V těchto bodech také stačí rozmítat napětí  $U_{DS}$ , nicméně pro případnou kontrolu použijte celý rozsah, tj. 0 až 1,8 V. Po odečtení hodnot proudu lze společně s příslušnými napětími spočítat výstupní odpor, resp. parametr  $\lambda$ .



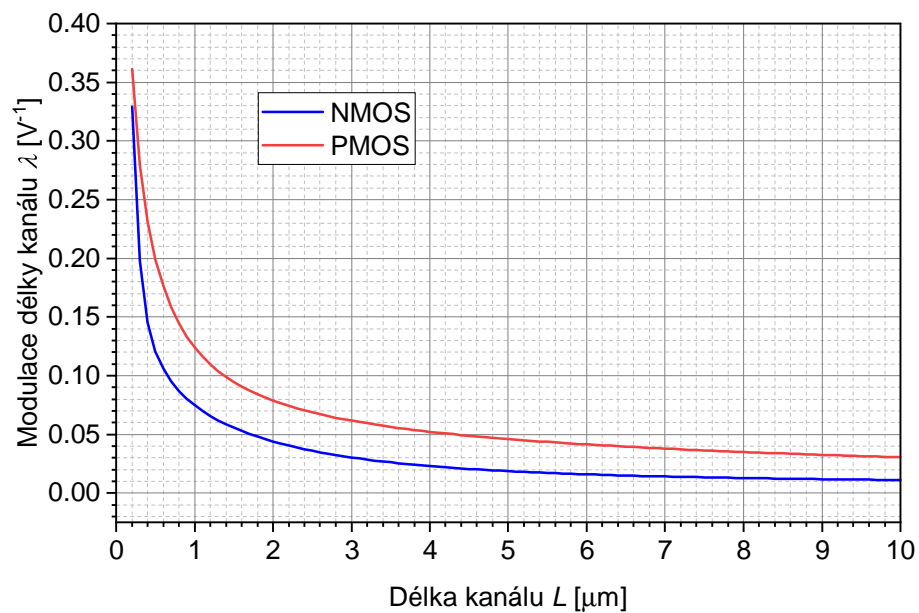
Vzhledem k velkému počtu bodů by manuální odečítání s následným znovunastavením simulace bylo značně zdlouhavé, lze využít měřicí funkce pro odečet hodnot i následné vyhodnocení. Následně pomocí funkce „STEP“ s krokováním rozměrů tranzistoru (viz. úloha 1.1) lze nastavit automatické změření celého rozsahu. Zápis výše uvedených funkcí pro tranzistor NMOS je na obr. 1.7.

```
.param lset=1u
.step param lset 0.2u 10u 0.1u
.meas DC ID1 FIND Id(M1) WHEN V(VD)=0.5
.meas DC ID2 FIND Id(M1) WHEN V(VD)=1.3
.meas DC ID0 FIND Id(M1) WHEN V(VD)=0.9
.meas rout param (1.3-0.5)/(ID2-ID1)
.meas lambda param 1/(ID0*rout)
```

Obr. 1.7: Nastavení odečítání a výpočtu hodnot v LTspice pro tranzistor NMOS

### Výsledky

Očekávané průběhy jsou znázorněny na obr. 1.8.



Obr. 1.8: Závislost modulace délky kanálu ( $\lambda$ ) na délce kanálu ( $L$ )

## 2 Proudová zrcadla

Proudová zrcadla jsou součástí prakticky každého obvodu (operační zesilovače, komparátory, zdroje referenčních signálů atd.). V nejjednodušším případě se v podstatě jedná o tranzistor pracující v oblasti saturace, jehož pracovní bod je nastaven pomocí dalšího tranzistoru v diodovém zapojení (tzv. vstupní tranzistor). Struktury proudových zrcadel většinou umožňují připojit vícero proudových výstupů a jednoduše tak nastavit proudy ve více větvích složitějších obvodů. Ve všech úlohách tohoto cvičení budou mít proudové zrcadla pouze jeden výstup. Cílem je se seznámit s jejich návrhem a vyzkoušet si varianty s tranzistory NMOS i PMOS.

K návrhu používejte stejné modely jako u cvičení 1, přičemž využijte získané parametry tranzistorů pro ruční návrh.

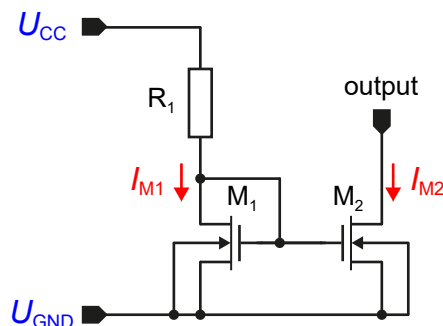
### Seznam úloh:

- 2.1 Jednoduché proudové zrcadlo
- 2.2 Kaskodové proudové zrcadlo
- 2.3 Modifikované Wilsonovo proudové zrcadlo

### 2.1 Jednoduché proudové zrcadlo

**Zadání:** Navrhněte jednoduché proudové zrcadlo s tranzistory NMOS (proudová nora), kdy proud vstupní větve je  $25\ \mu\text{A}$  a výstupní proud  $50\ \mu\text{A}$ . Požadovaný výstupní dynamický rozsah je  $1,6\ \text{V}$  (od  $0,2\ \text{V}$  až k napájecímu napětí). Postupně

- 1) vypočítejte rozměry  $W$  a  $L$  obou tranzistorů a odpor pro nastavení vstupního proudu. Vypočítejte výstupní dynamický odpor  $r_{OUT}$ ,
- 2) následně simulacemi ověřte zadané i vypočítané parametry.



Obr. 2.1: Jednoduché proudové zrcadlo

**Výstupy:** Výstupní soubor s výsledky bude obsahovat:

- a) schéma obvodu z LTspice včetně všech součástek/SPICE direktivy,
- b) podrobný a komentovaný ruční návrh obvodu,
- c) grafický výstup ze simulace, kde bude vyznačen vstupní a výstupní proud ( $I_{M1}$  a  $I_{M2}$ ); výstupní dynamický rozsah, resp. minimální napětí na výstupu, kdy jsou všechny tranzistory v saturaci; výstupní odpor  $r_{OUT}$ ,
- d) v závěru uveďte tabulku, kde budou srovnány vypočítané a odsimulované hodnoty.

### **Doporučený postup:**

Oba tranzistory pracují v oblasti saturace, a proto pro jejich návrh bude použita rovnice popisující proud tranzistorem v tomto režimu. Tedy

$$I_D = \frac{1}{2} \cdot KP_N \cdot \frac{W}{L} \cdot (U_{GS} - U_{TH})^2, \quad (2.1)$$

kde pro zjednodušení je zde zanedbána část  $(1 + \lambda \cdot U_{DS})$ .

Z této rovnice je nutné vyjádřit  $W/L$  a následně tento poměr vypočítat. V rovnici se vyskytuje „neznámá“ hodnota  $U_{GS}$ . Zde je potřeba si uvědomit, že u tranzistoru hodnota  $U_{GS} - U_{TH} = U_{OV}$  určuje bod, kde tranzistor přechází z režimu lineárního do režimu saturace. Dle zadání by výstupní pracovní rozsah měl být od 0,2 V, což jednoznačně říká, že při 0,2 V musí být tranzistor v saturaci. Tedy  $U_{OV} \leq 0,2$  V. Zároveň aby tranzistor pracoval v silné inverzi, je potřeba mít  $U_{OV} \geq 0,2$  V. Pro tento návrh tedy platí  $U_{GS} - U_{TH} = 0,2$  V.

Výpočet  $W/L$  lze provést pro každý tranzistor zvlášť, např.  $M_1$  a následně stejným způsobem spočítat  $M_2$  dle stejné rovnice s jiným  $I_D$ . Druhou možností je spočítat jeden a druhý následně vynásobit dle poměru procházejících proudů. Např. proběhne výpočet  $W_1/L_1$  a následně

$$\frac{W_2}{L_2} = \frac{W_1}{L_1} \cdot \frac{I_{M2}}{I_{M1}}. \quad (2.2)$$

V dalším kroku, po vypočítání poměru  $W/L$ , nastává volba délky  $L$ . Pro dosažení vyššího výstupního odporu bez přílišné zvětšení plochy tranzistoru se jeví jako kompromis volba  $L$  mezi 1  $\mu\text{m}$  - 3  $\mu\text{m}$ , viz. obr. 1.8. Pozn. tato volba má vliv i na další parametry, kterými se zde však nezabýváme (např. souběh), stejně jako nemáme konkrétní aplikaci proudového zrcadla s konkrétnějšími požadavky.

Odpor  $R_1$  se vypočítá jednoduše podle Ohmova zákona. Proud odporem odpovídá  $I_{M1}$  a napětí na odporu je dáno jako rozdíl mezi napětími na pínách odporu, tedy

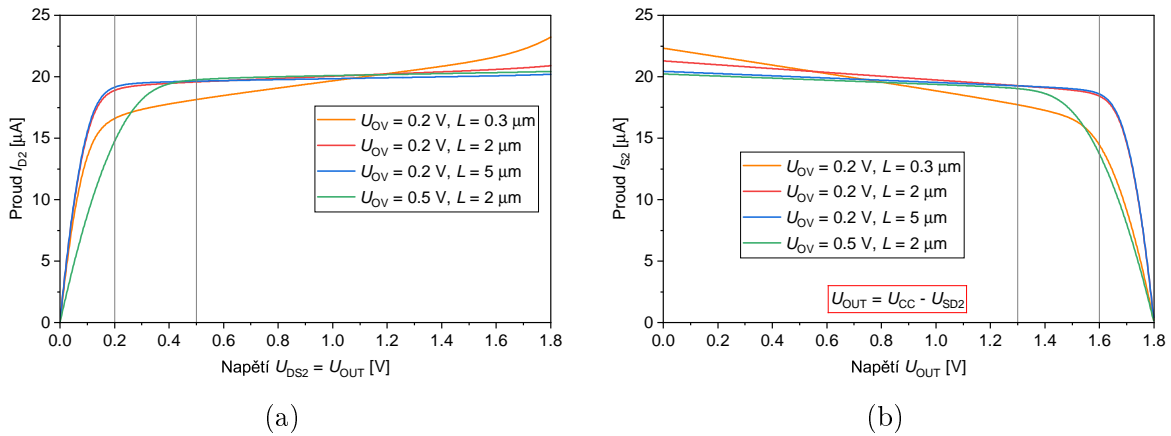
$$R_1 = \frac{U_R}{I_{M1}} = \frac{U_{CC} - U_{GS1}}{I_{M1}} = \frac{U_{CC} - (U_{TH0,1} + U_{OV,1})}{I_{M1}}. \quad (2.3)$$

Posledním počítaným parametrem je výstupní odpor. Ten je v případě jednoduchého proudového zrcadla dán přímo výstupním odporem tranzistoru MOS, tedy

$$r_{OUT} = \frac{1}{\lambda \cdot I_{M2}}. \quad (2.4)$$

Parametr  $\lambda$  odečtete z výsledků úlohy 1.3 podle zvoleného  $L$ .

Nyní v simulátoru nakreslete obvod. K výstupu připojte zdroj, který se pomocí analýzy .DC bude rozmítat v celém rozsahu napájení, tedy od 0 V do 1,8 V. Výstupní charakteristika bude vypadat obdobně jako ta na obr. 2.2a. Pozor, jedná se o výstupní charakteristiku proudového zrcadla s jiným výstupním proudem!



Obr. 2.2: Závislost výstupního proudu jednoduchého proudového zrcadla s tranzistorem (a) NMOS a (b) PMOS (pouze pro ilustraci) na výstupním napětí pro několik různých parametrů tranzistorů

Z výstupu odečtete pomocí kurzorů bod, kdy přechází tranzistor z lineárního režimu do saturace. Tento přechod není ostrý a tak jej nelze přesně. Jedná se spíše o ověření, že průběh odpovídá zvoleným hodnotám. Např. na obr. 2.2 je vidět rozdíl, mezi tranzistorem navrženým s  $U_{OV} = 0,2$  V a  $U_{OV} = 0,5$  V. V místě kurzoru umístíte popisek (RMC na kurzor a následně *Notes & Annotations - Cursor Position*, popř. stisknout klávesu „L“, kdy na pozici kurzoru bude umístěn popisek.

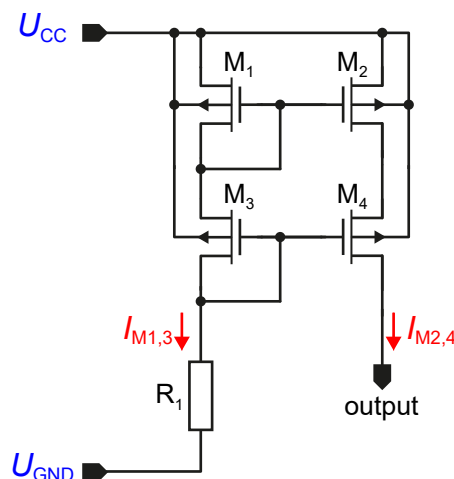
Pro odečet výstupního odporu odečtete pro  $\Delta U_{OUT}$  změnu  $\Delta I_{M2}$ . Zde je otázka, kde umístit kurzory, resp. jaké uvažovat napětí. Pokud bychom brali celý rozsah, tj. od 0,2 V do 1,8 V, výstupní odpor by byl výrazně degradován průběhem proudu kolem 0,2 V. Protože zde není uvedena oblast, kde tento odečet provést nebo jak se bude pohybovat

napětí na výstupu, bylo by výhodné provést dva odečty - pro plný a částečný rozsah. Např. pro  $\Delta U_{OUT,1} = 1,8 - 0,2$  a  $\Delta U_{OUT,2} = 1,3 - 0,5$ . V místech odečtu umístěte popisky - viz. výše.

## 2.2 Kaskodové proudové zrcadlo

**Zadání:** Navrhněte kaskodové proudové zrcadlo s tranzistory PMOS (proudový zdroj), kdy proud vstupní větve je  $50 \mu\text{A}$  a výstupní proud  $100 \mu\text{A}$ . Zvolte  $U_{OV} = 0,2 \text{ V}$ . Postupně

- 1) 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),
- 2) následně simulacemi ověřte zadané i vypočítané parametry.



Obr. 2.3: Kaskodové proudové zrcadlo s tranzistory PMOS

**Výstupy:** Výstupní soubor s výsledky bude obsahovat:

- a) schéma obvodu z LTspice včetně všech součástek/SPICE direktivy,
- b) podrobný a komentovaný ruční návrh obvodu,
- c) grafický výstup ze simulace, kde bude vyznačen vstupní a výstupní proud ( $I_{M1,3}$  a  $I_{M2,4}$ ); výstupní dynamický rozsah, resp. maximální napětí na výstupu, kdy jsou všechny tranzistory v saturaci; výstupní odpor  $r_{OUT}$ ,
- d) v závěru uveďte tabulku, kde budou srovnány vypočítané a odsimulované hodnoty.

**Doporučený postup:**

V první fázi lze vypočítat rozměry tranzistorů obdobným způsobem jako u předchozí úlohy. Hodnota  $U_{OV}$  je dána přímo v zadání. Jak bude ukázáno později, vyšší hodnoty by zde přinesly problém, že by výsledný úbytek na tranzistorech mohl být větší než napájecí rozsah. Jinými slovy by se úbytky „nevešly“ do napájecího okna.

Do výpočtu odporu  $R_1$  pomocí Ohmova zákona se projeví i úbytek napětí na kaskodě, tedy napětí  $U_{GS3}$ . U tranzistoru  $M_3$  také dochází k body efektu, protože neplatí, že  $U_{BS} = 0$  V. Prahové napětí  $M_3$  je vyšší, než výchozí  $U_{TH0}$ . Hodnotu  $U_{TH,3}$  odečtete z výsledků úlohy [1.2 Závislost prahového napětí  \$U\_{TH}\$  na napětí bulku](#). Pro hodnotu napětí na odporu platí

$$U_{R1} = U_{CC} - U_{GS1} - U_{GS3} = U_{CC} - U_{TH0,1} - U_{OV1} - U_{TH,3} - U_{OV3} = \\ U_{CC} - U_{TH0,1} - U_{TH,3} - 2 \cdot U_{OV1,3}, \quad (2.5)$$

kdy je uvažováno, že  $U_{OV1} = U_{OV3}$ .

Výpočet výstupního odporu je v tomto případě složitější, protože se již nejedná pouze o jeden tranzistor, ale o kaskodu dvou tranzistorů, kdy  $M_4$  se snaží držet konstantní napětí na své elektrodě source. Pokud napětí v uzlu source klesne,  $M_4$  se přivře (přivře se cesta k  $U_{GND}$ ), klesne proud jím protékající a napětí v uzlu stoupne. Obdobně je to při nárůstu napětí v daném uzlu. Z tohoto popisu je zřejmé, že zde bude figurovat transkonduktance  $g_{m4}$ . Pro výstupní odpor platí

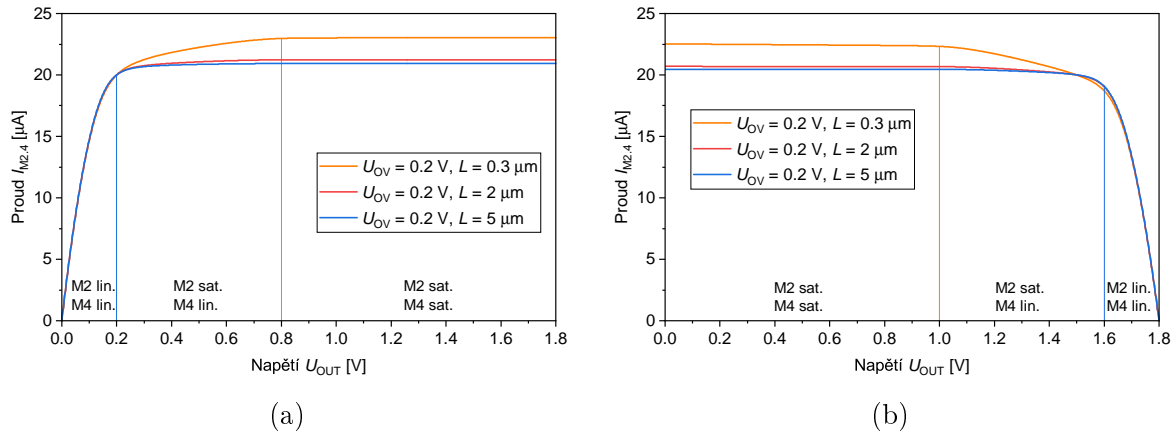
$$r_{OUT} = r_{o2} \cdot r_{o4} \cdot g_{m4}. \quad (2.6)$$

Pokud  $L_2 = L_4$ , lze rovnice více zjednodušit

$$r_{OUT} = r_{o2,4}^2 \cdot g_{m4}. \quad (2.7)$$

Rozsah výstupního napětí, kdy jsou všechny tranzistory v saturaci, je v případě kaskodového proudového zrcadla s tranzistory PMOS limitován ze shora. Teoreticky by na každém tranzistoru ve výstupní větvi stačilo napětí  $U_{OV}$  - v tomto případě 0,2 V, tedy celkově 0,4 V. Avšak toto zapojení udržuje na drainu  $M_2$  napětí  $U_{GS1}$ .

Jak postupně při snižování  $U_{OV}$  přechází  $M_2$  a  $M_4$  do saturace je ukázáno na obr. [2.4b](#). Pro ilustraci je zde uveden u případ pro kaskodové proudové zrcadlo s tranzistorem NMOS (obr. [2.4a](#)).



Obr. 2.4: Závislost výstupního proudu kaskodového proudového zrcadla s tranzistorem (a) NMOS (pouze pro ilustraci) a (b) PMOS na výstupním napětí pro několik různých parametrů tranzistorů

Na základě výše uvedeného lze pro výstupní rozsah psát

$$U_{OUTmax} = U_{CC} - U_{GS1} - U_{OV4} = U_{CC} - U_{TH0,1} - 2 \cdot U_{OV2,4}, \quad (2.8)$$

kde  $U_{OUTmin}$  je v tomto případě  $U_{GND}$ , dále se předpokládá  $U_{OV2} = U_{OV4}$ .

Simulace jsou stejné jako v případě úlohy 2.1 [Jednoduché proudové zrcadlo](#). Při odečtu výstupní odporu odečtete také dvě hodnoty - pro maximální rozsah a pro rozsah, kde odečtete horní hranici alespoň 0,1 V od bodu, kde oba tranzistory přecházejí do saturace (je potřeba použít zoom). Pokud je výstupní odpor simulovaný výrazně nižší než vypočítaný, je pravděpodobně chyba v nedostatečné přesnosti nastavení analýzy. Nezapomeňte opět v důležitých místech umístit kurzory.

## 2.3 Modifikované Wilsonovo proudové zrcadlo

**Zadání:** 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  $U_{GS} \sim U_{TH}(= U_{OV}) = 0,25 V$ . Postupně

- 1) 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).
- 2) následně simulacemi ověřte zadané i vypočítané parametry.



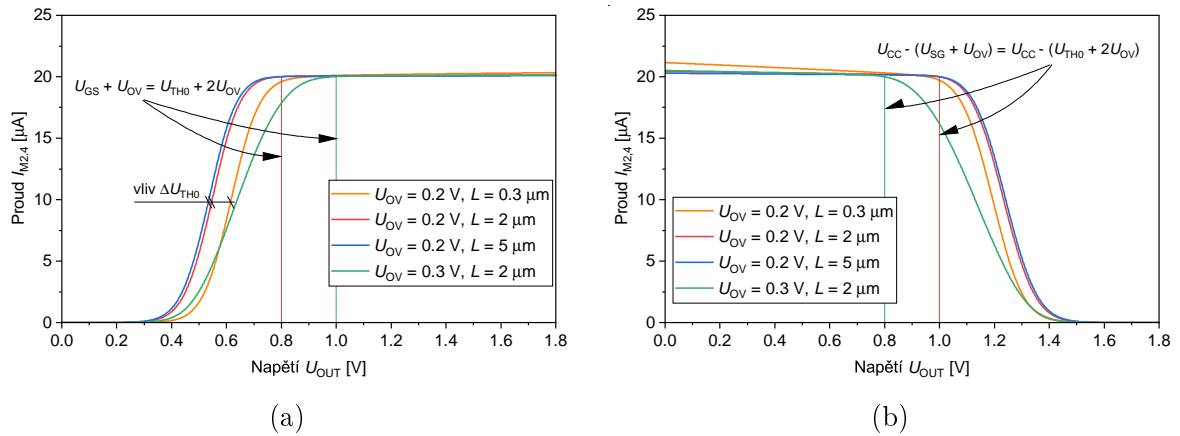


$$r_T = r_{o1} \parallel (R_1 + 1/g_{m3}). \quad (2.10)$$

Tranzistory  $M_2$  a  $M_4$  protéká stejný proud a pokud jsou navrženy se stejným  $U_{OV}$  mají i stejnou transkonduktaci  $g_m$ . Rovnici 2.9 lze více zjednodušit na

$$r_{OUT} \cong r_{o4} \cdot g_{m1} \cdot r_T. \quad (2.11)$$

Tato rovnice platí i pro obyčejné Wilsonovo proudové zrcadlo. Rozdíl je pouze ve výpočtu  $r_T$  (rovnice 2.10), kde se u obyčejné verze zrcadla nenachází člen „ $1/g_{m3}$ “ ( $r_T = r_{o1} \parallel R_1$ ).



Obr. 2.6: Závislost výstupního proudu modifikovaného Wilsonova proudového zrcadla s tranzistory (a) NMOS a (b) PMOS (pouze pro ilustraci) na výstupním napětí pro několik různých parametrů tranzistorů

Pro minimální výstupní napětí na výstupu za předpokladu  $U_{OV2} = U_{OV4}$  platí

$$U_{OUTmin} = U_{GS2} + U_{OV4} = U_{TH0,2} + U_{OV2} + U_{OV4} = U_{TH0,2} + U_{OV2,4}, \quad (2.12)$$

což dává stejnou hodnotu jako kaskodové proudové zrcadlo.

Výpočty pro klasické Wilsonovo proudové zrcadlo jsou přesně stejné s výjimkou, že se nepočítá tranzistor  $M_3$ . Nevýhodou tohoto zrcadla je, že nelze implementovat více proudových výstupů.

## Seznam zkratek

RMC            kliknutí pravým tlačítkem myši