

# 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>Seznam zkratk</b>	<b>7</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:

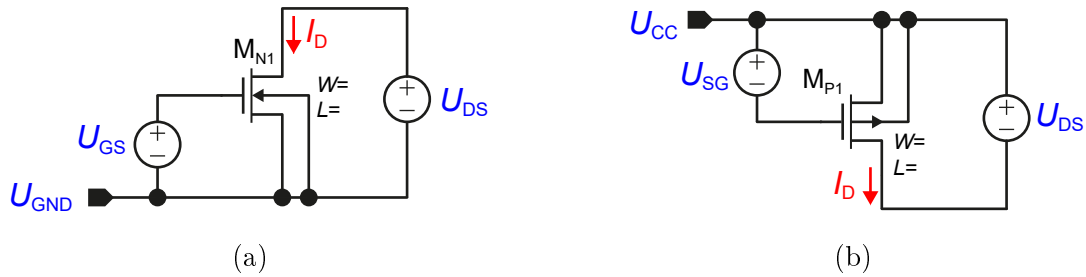
- 1.1 Prahové napětí  $U_{TH0}$
- 1.2 Závislost prahového napětí  $U_{TH}$  na napětí bulku
- 1.3 Závislost modulace délky kanálu ( $\lambda$ ) na délce kanálu ( $L$ )

## 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
```

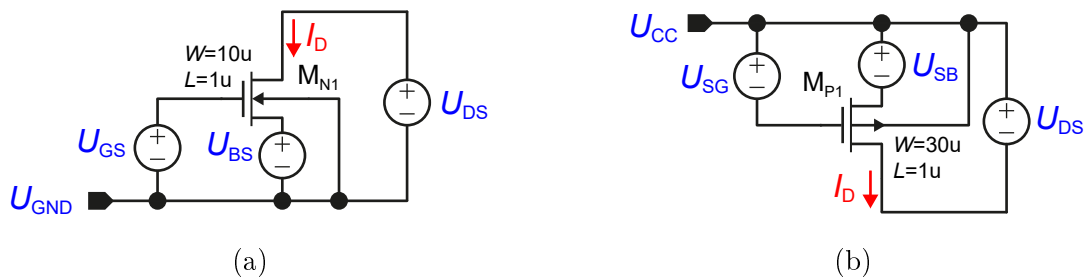
Obr. 1.2: Nastavení automatického rozmítání a měření

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.

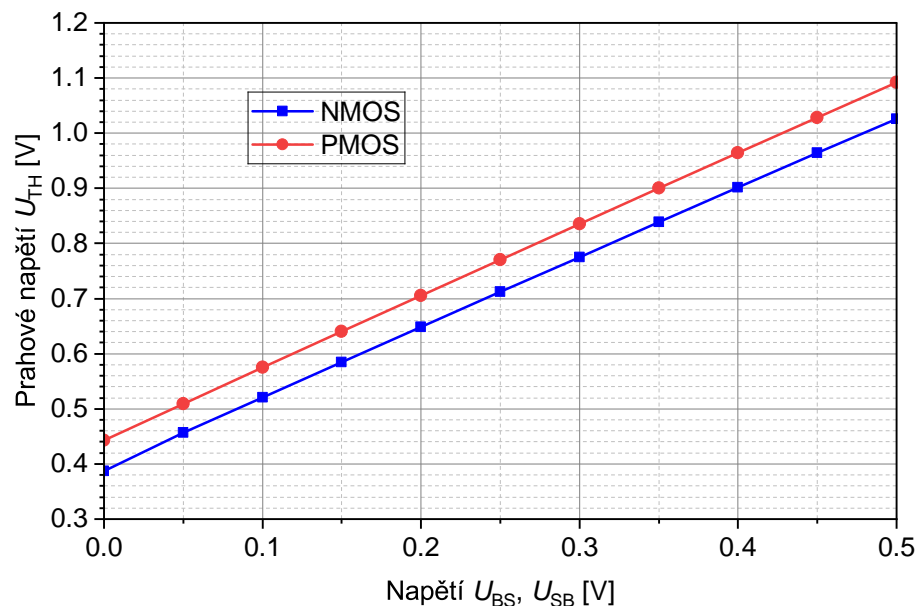
**Doporučený postup:**

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, tj. 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.

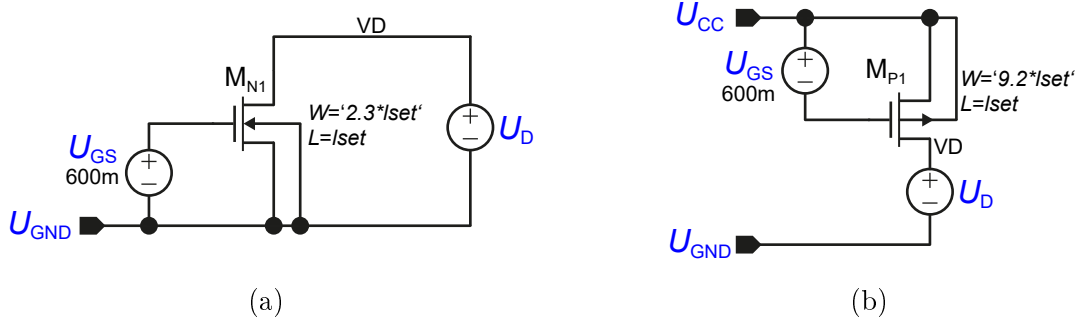


Obr. 1.4: Vliv rozdílného napětí mezi bulk a source na prahové napětí tranzistoru

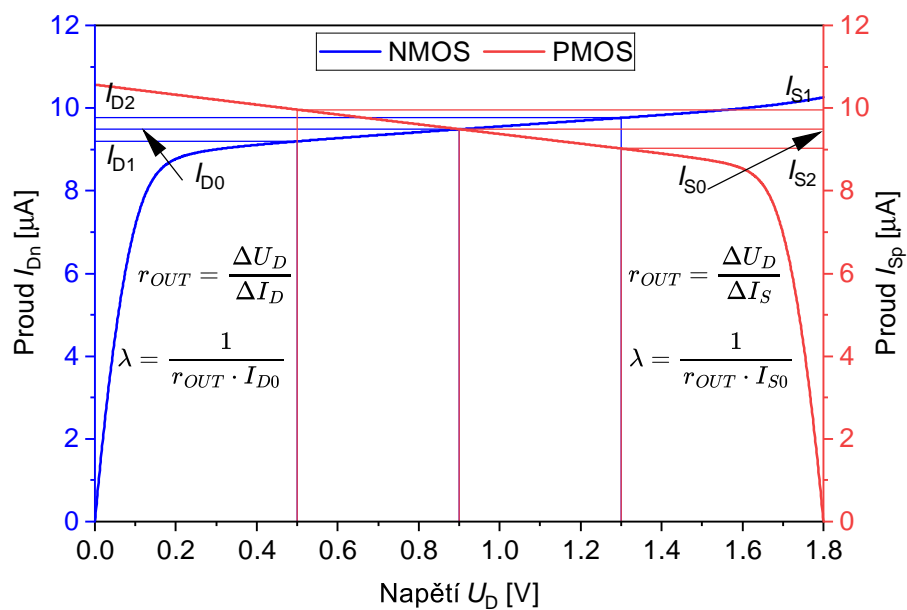
**1.3 Závislost modulace délky kanálu ( $\lambda$ ) na délce kanálu ( $L$ )**

**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  $\lambda$ .



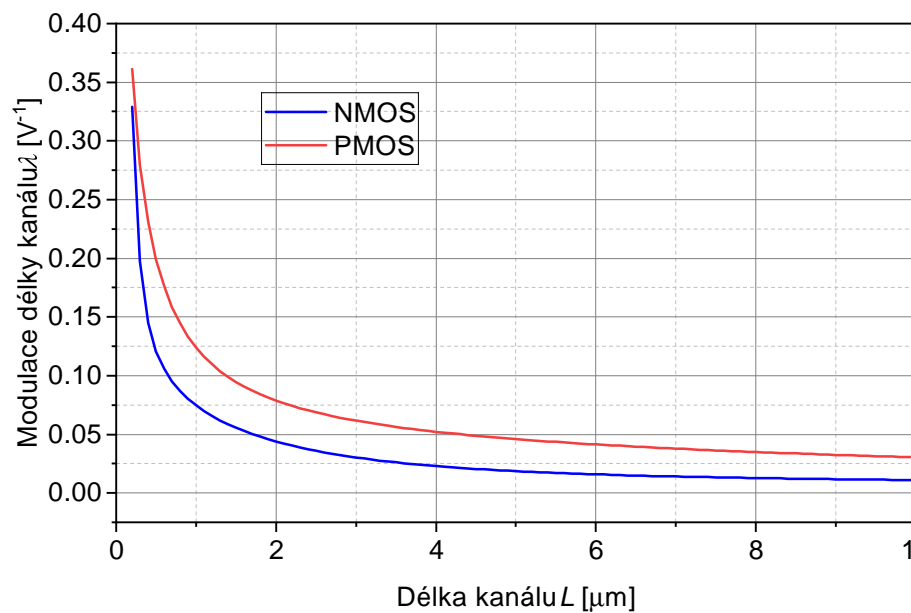
Vzhledem k velkému počtu bodů by manuální odečítání s následným znovunastavením simulace bylo značně zdlouhavé, lze využít měřicí funkce pro odečet hodnot i následné vyhodnocení. Následně pomocí funkce „STEP“ s krokováním rozměrů tranzistoru (viz. úloha 1.1) lze nastavit automatické změření celého rozsahu. 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 ( $L$ )

## Seznam zkratek

RMC            kliknutí pravým tlačítkem myši