

Cvičení 8: MOSFET v logických IO

C8.1: Invertor NMOS

Princip činnosti, převodní charakteristika, hradla NAND a NOR

Simulace převodní charakteristiky (vliv parametrů tranzistoru a zátěže)

M8.1 Měření převodní charakteristiky

S8.1 Simulace převodní charakteristiky invertoru NMOS

Nevýhody Invertoru NMOS

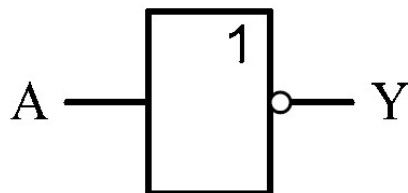
C8.2: Invertor CMOS

Princip činnosti, převodní a odběrová charakteristika, dynamické chování, Příklad CP8.1

S8.2 Simulace invertoru CMOS v LTSpice (sestavení schématu, DC a tranzientní analýza)

C8.1: Invertor NMOS

Realizace logické funkce inverze elektronickými obvody



A	Y
0	1
1	0

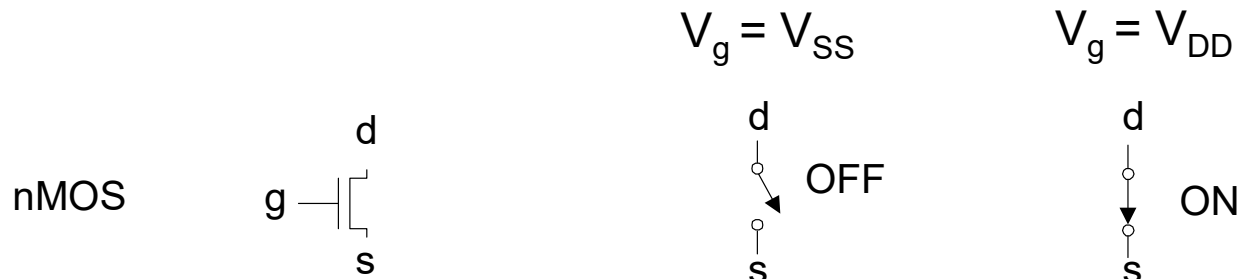
1. Přiřazení elektrického signálu logickým hodnotám, typicky:

log.1 = V_{DD} = Power = PWR = High = 5 V, 3.3 V, 1.5 V apod.

log.0 = V_{SS} = Ground = GND = Low = 0 V

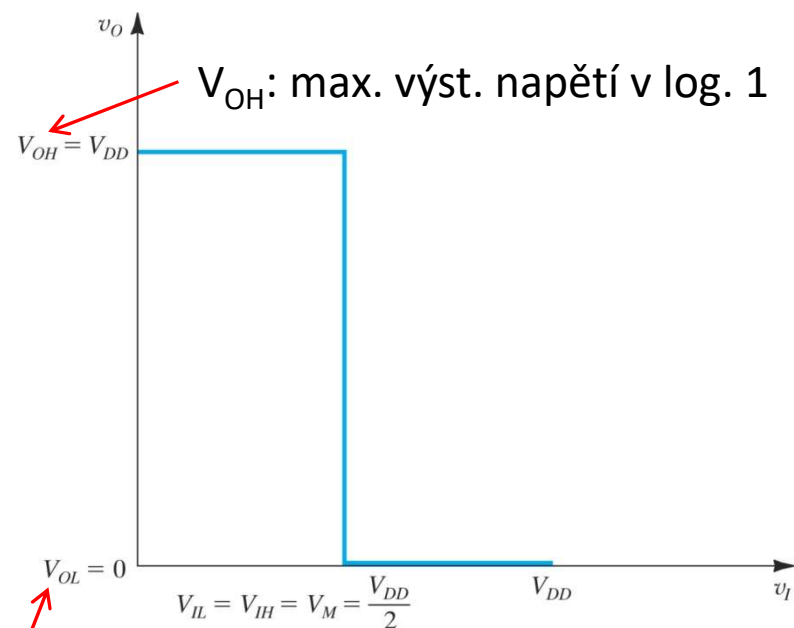
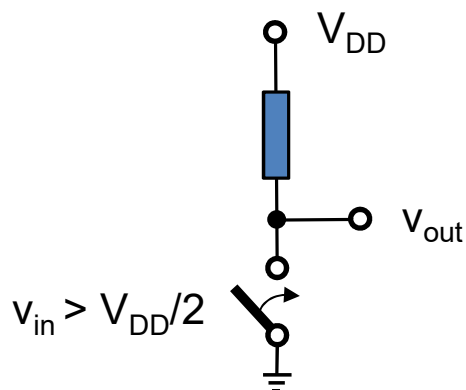
A	Y
V_{SS}	V_{DD}
V_{DD}	V_{SS}

2. Využití spínače (či spínačů) řízeného vstupem A, který přepne požadovanou hodnotu na výstup Y.



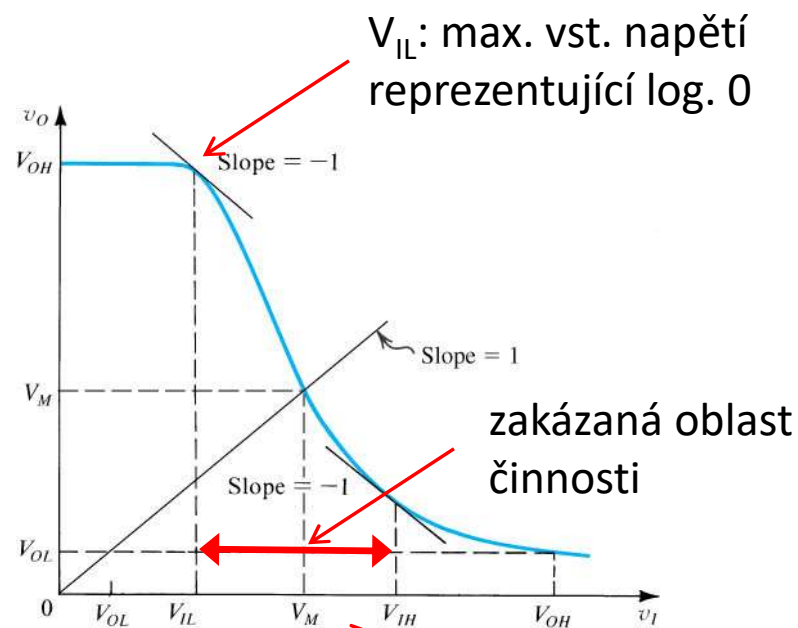
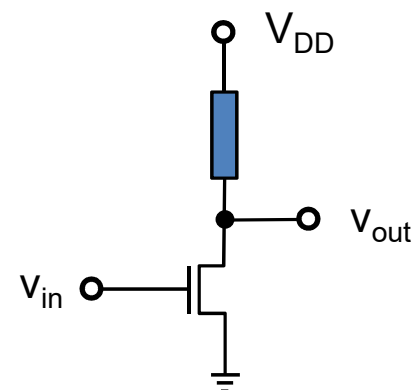
C8.1: Invertor NMOS

Ideální invertor



V_{OL} : min. výst. napětí v log. 0

Reálný invertor

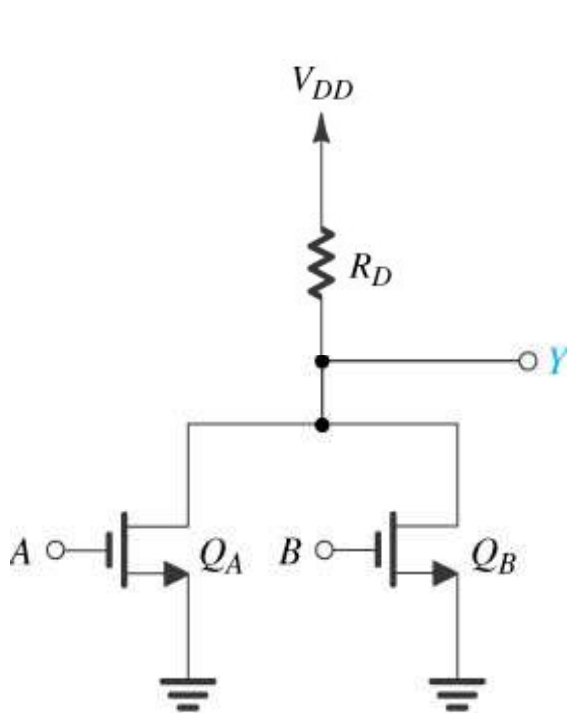


V_{IH} : min. vst. napětí reprezentující log. 1

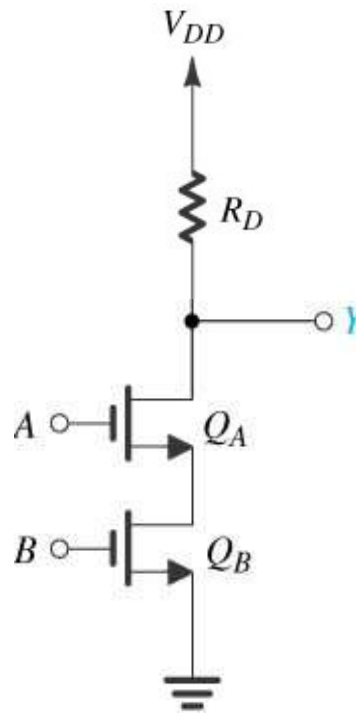
C8.1: Invertor NMOS

Realizace hradel AND a OR v NMOS logice:

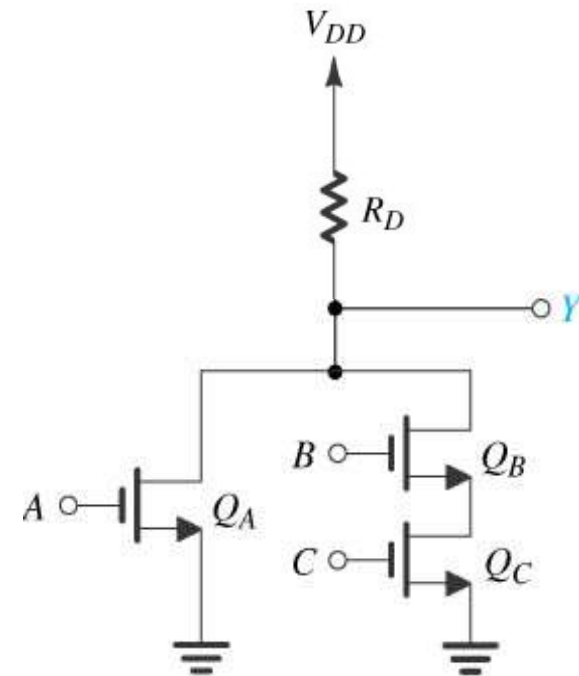
Odpor R_D lze nahradit tranzistorem NMOS (hradlo připojeno k V_{DD} , D, či S).



$$Y = \overline{A + B}$$



$$Y = \overline{A \cdot B}$$

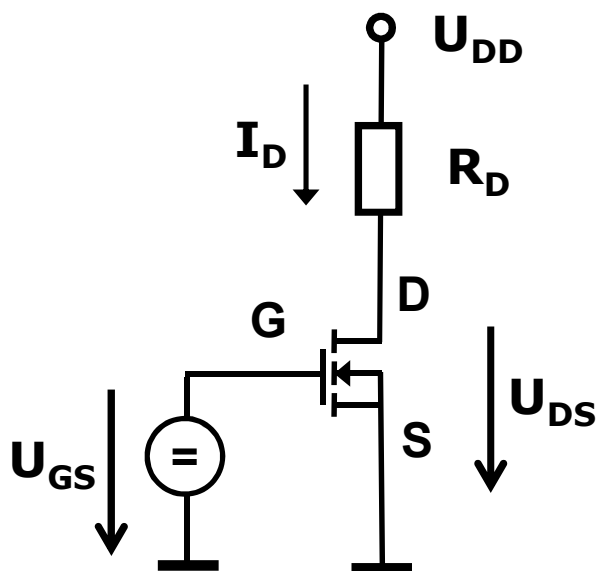


$$Y = \overline{A + B \cdot C}$$

C8.1: Invertor NMOS

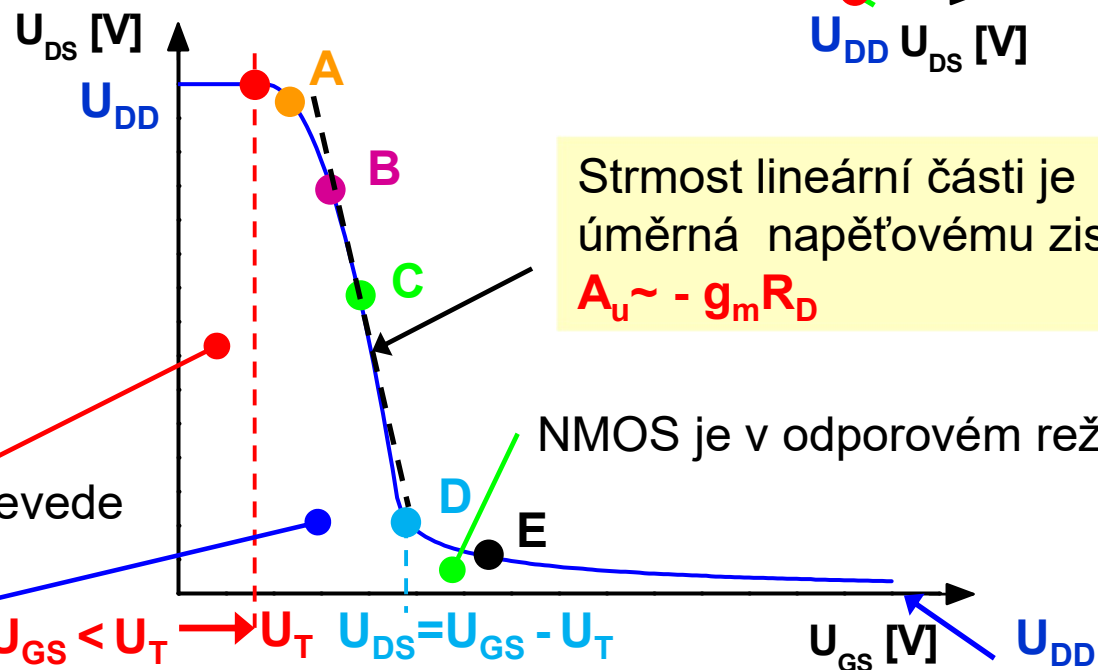
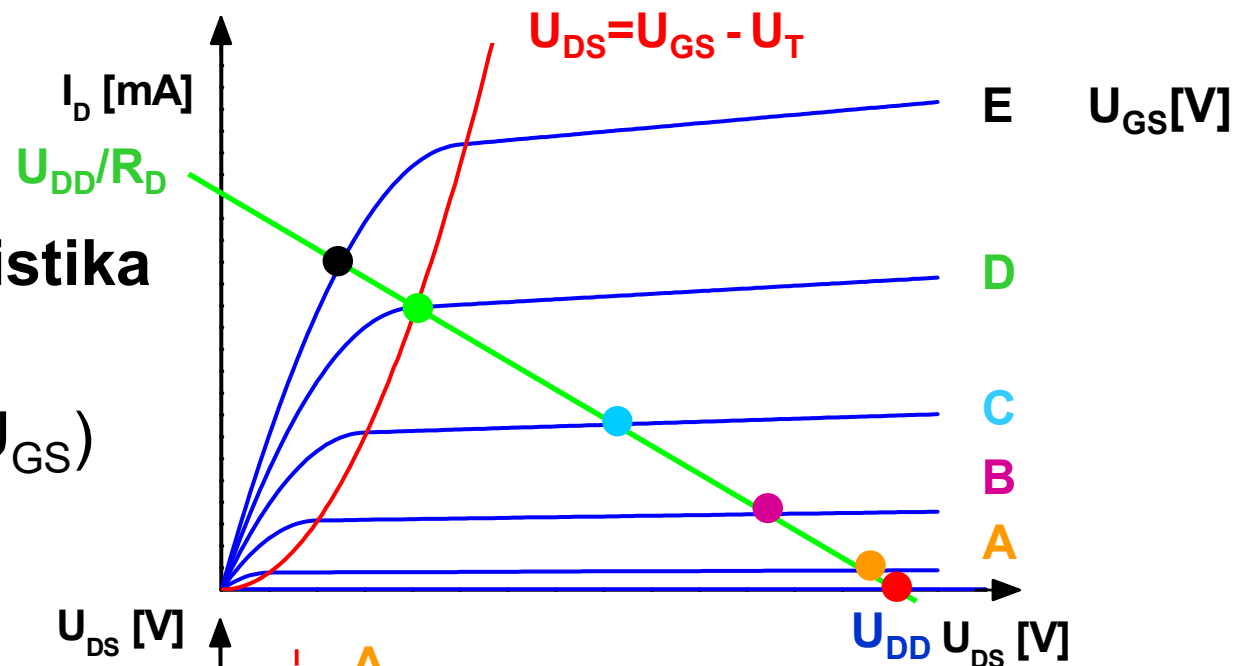
Převodní charakteristika Invertoru NMOS

je závislost $U_{DS} = f(U_{GS})$



NMOS nevede

NMOS je v saturaci



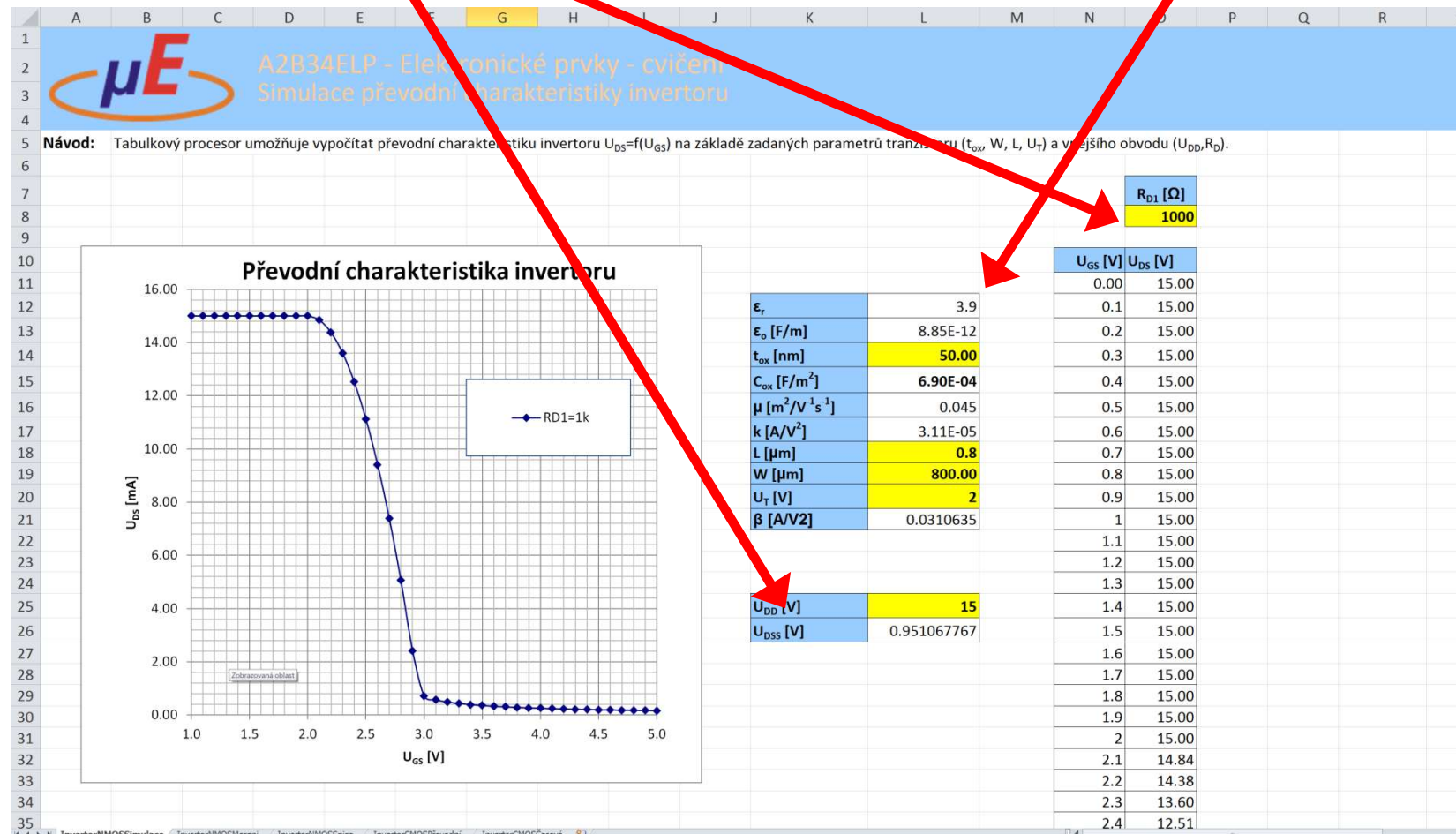
Strmost lineární části je
úměrná napěťovému zisku
 $A_u \sim -g_m R_D$

NMOS je v odporovém režimu

C8.1: Invertor NMOS

Excel – list **InvertorSimulace**

Tabulkový procesor umožňuje vypočítat převodní charakteristiku invertoru $U_{DS}=f(U_{GS})$ na základě zadaných parametrů tranzistoru (t_{ox} , W , L , U_T) a vnějšího obvodu (U_{DD} , R_D).



C8.1: Invertor NMOS

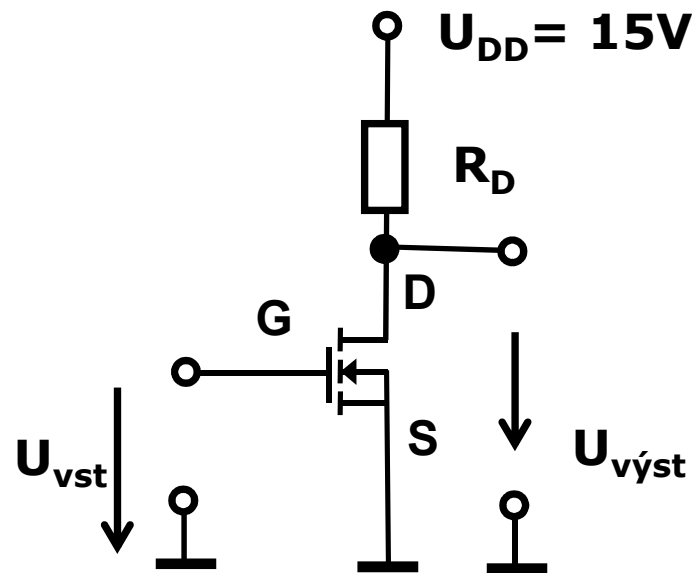
M8.1: Měření převodní charakteristiky invertoru NMOS

Změřte převodní charakteristiky invertoru s tranzistorem MOSFET BS170F pro různé hodnoty zatěžovacího odporu R_D .

Doporučené hodnoty: $U_{DD}=15V$, $R_D= 1k, 3.3k$ a $10k$

Vykreslete grafy charakteristik v Excelu (list InvertorMěření) a porovnejte je se simulací (list InvertorSimulace)

Určete parametry U_T , R_{on} , A_u .



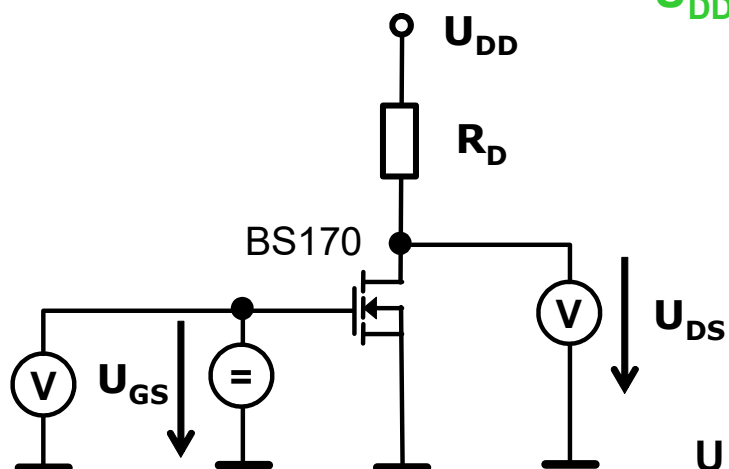
C8.1: Invertor NMOS

Katalogový list tranzistoru BS170F

PARAMETRY@podmínky				
U_{DS}		Drain-Source Voltage	60	V
I_D	$T_{amb} = 25^{\circ}C$	Continuous Drain Current	0.15	A
I_{DM}		Pulsed Drain Current	3	A
U_{GS}		Gate Source Voltage	± 20	V
P_{tot}	$T_{amb} = 25^{\circ}C$	Power Dissipation	330	mW
BU_{DSS}	$I_D = 100\mu A, U_{GS} = 0V$	Drain-Source Breakdown Voltage	60 - 90	V
$U_{GS(th)}$	$I_D = 1mA, U_{DS} = U_{GS}$	Gate-Source Threshold Voltage	0.8 - 3	V
I_{GSS}	$U_{GS} = 15V, U_{DS} = 0V$	Gate-Body Leakage	10	nA
$R_{DS(on)}$	$U_{GS} = 10V, I_D = 200mA$	Static Drain-Source On-State Resistance	5	Ω
g_{fs}	$U_{DS} = 10V, I_D = 200mA$	Forward Transconductance	200	mS
C	$U_{DS} = 10V, U_{GS} = 0V, f = 1MHz$	Input Capacitance	60	pF
$t_{d(on)}$	$U_{DD} = 15V, I_D = 600mA$	Turn-On Delay Time	10	ns
$t_{d(off)}$	$U_{DD} = 15V, I_D = 600mA$	Turn-Off Delay Time	10	ns

C8.1: Invertor NMOS

Princip měření

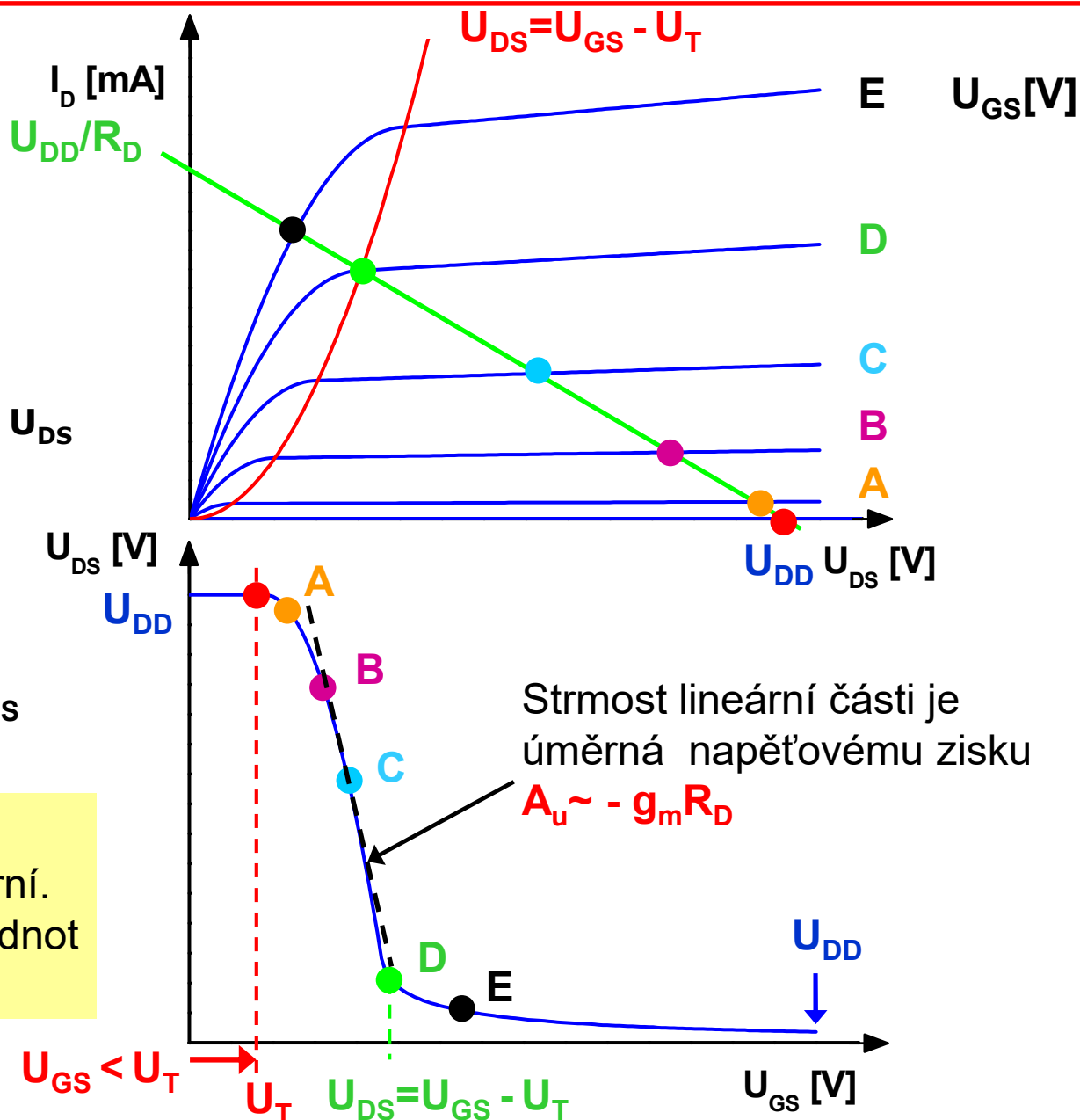


$$U_{vst} = U_{GS}$$

$$U_{vyst} = U_{DS}$$

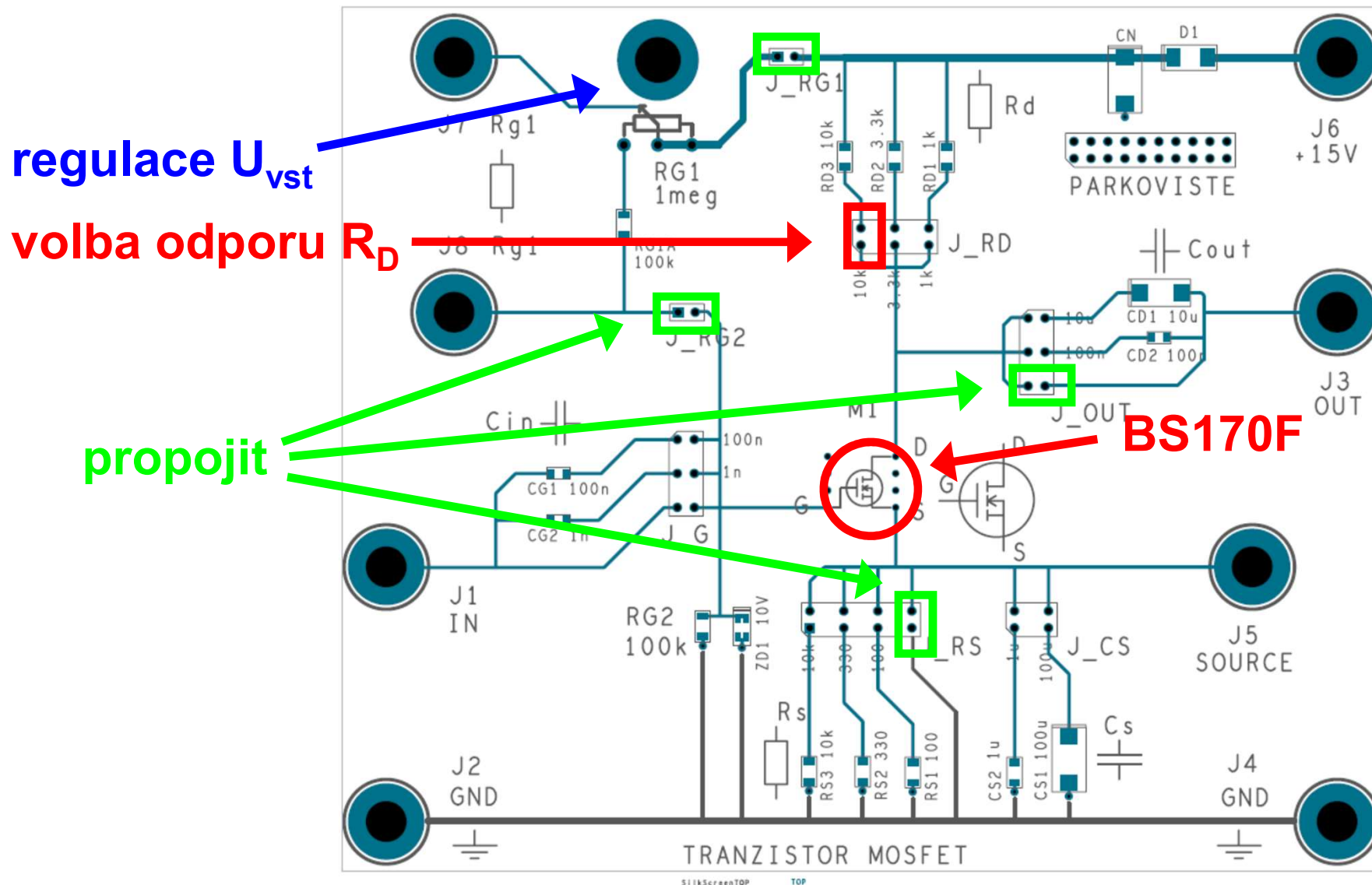
POZOR!!

Charakteristika je nelineární.
Je třeba změřit dostatek hodnot
mezi body A-E.



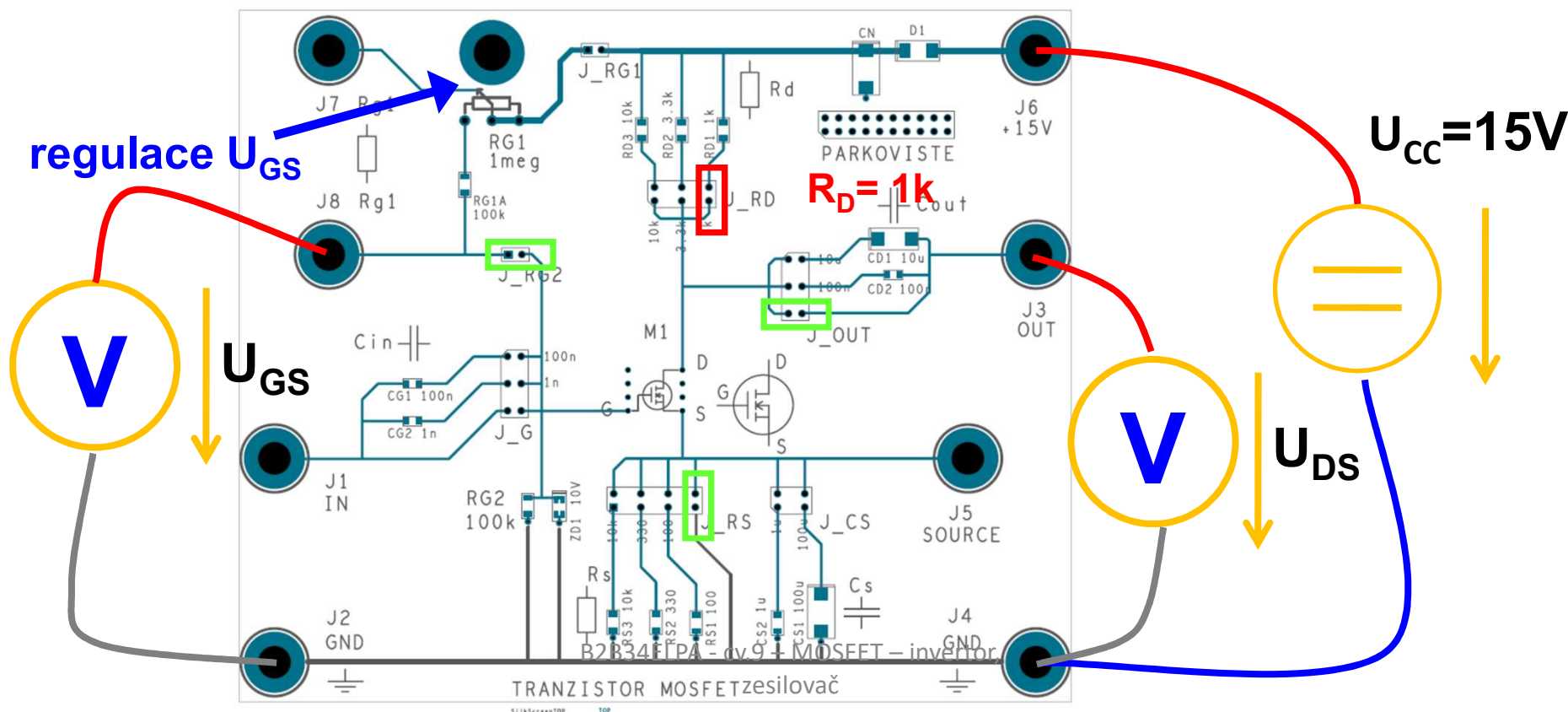
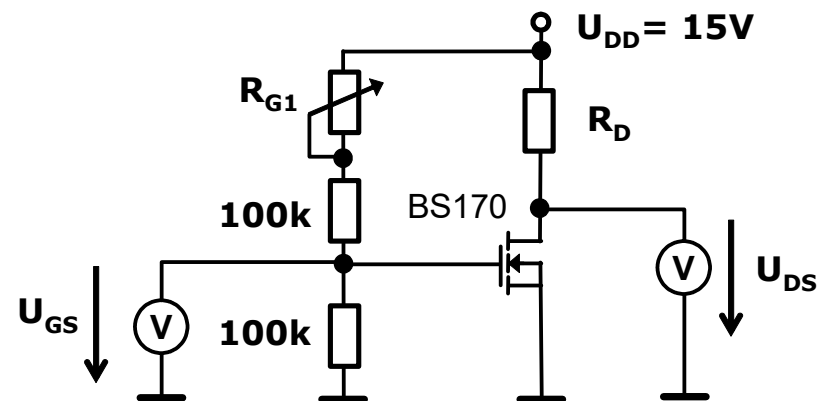
C8.1: Invertor NMOS

Přípravek pro měření převodní charakteristiky invertoru NMOS



C8.1: Invertor NMOS

Zapojení pro měření převodní charakteristiky

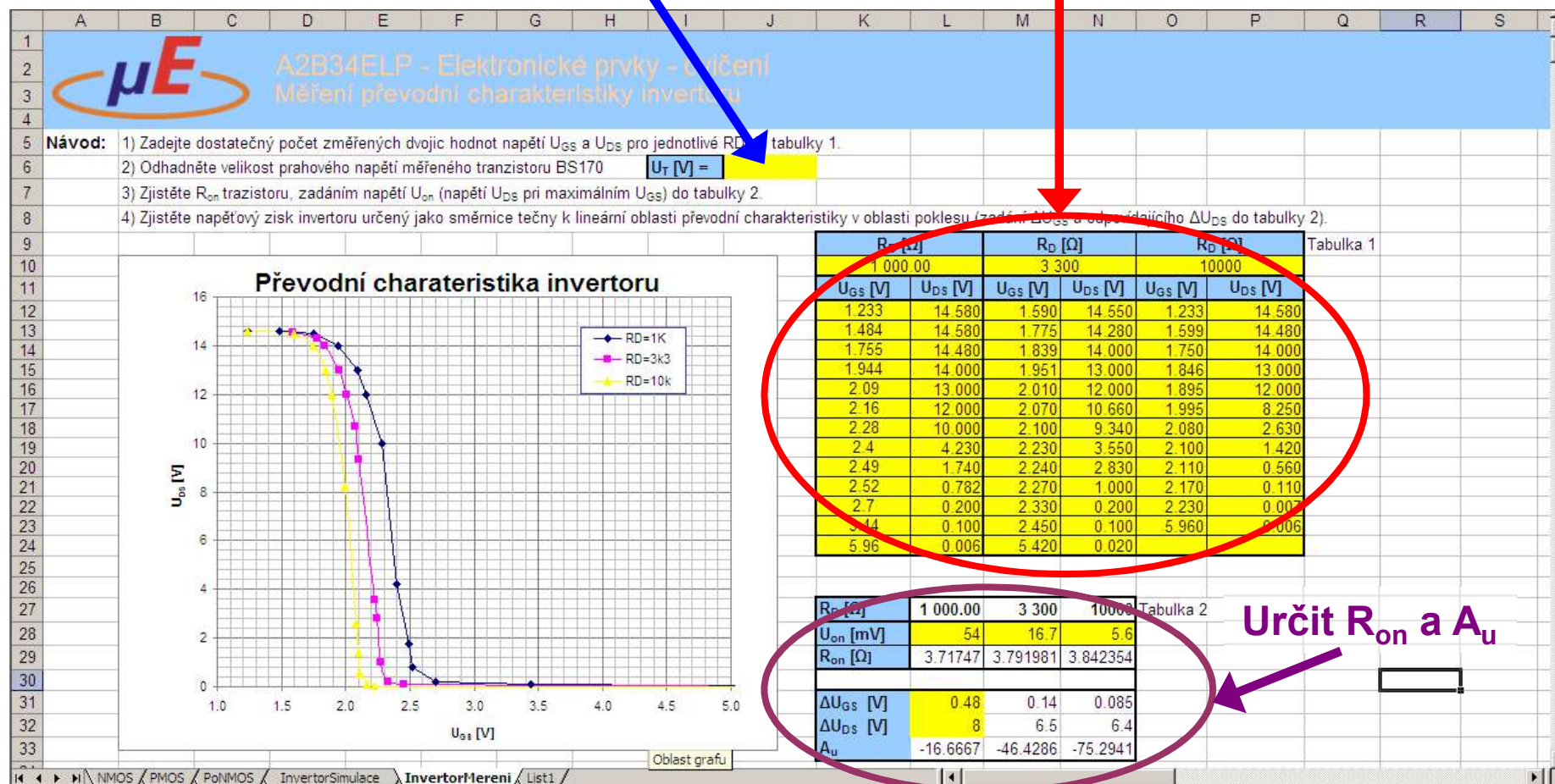


C8.1: Invertor NMOS

Zpracování výsledků – list **InvertorMěření**

Odhadnout prahové napětí tranzistoru BS170 z počátečního zlomu charakteristiky

Pro vybrané R_D doplnit naměřené souřadnice U_{GS} a U_{DS} převodní charakteristiky

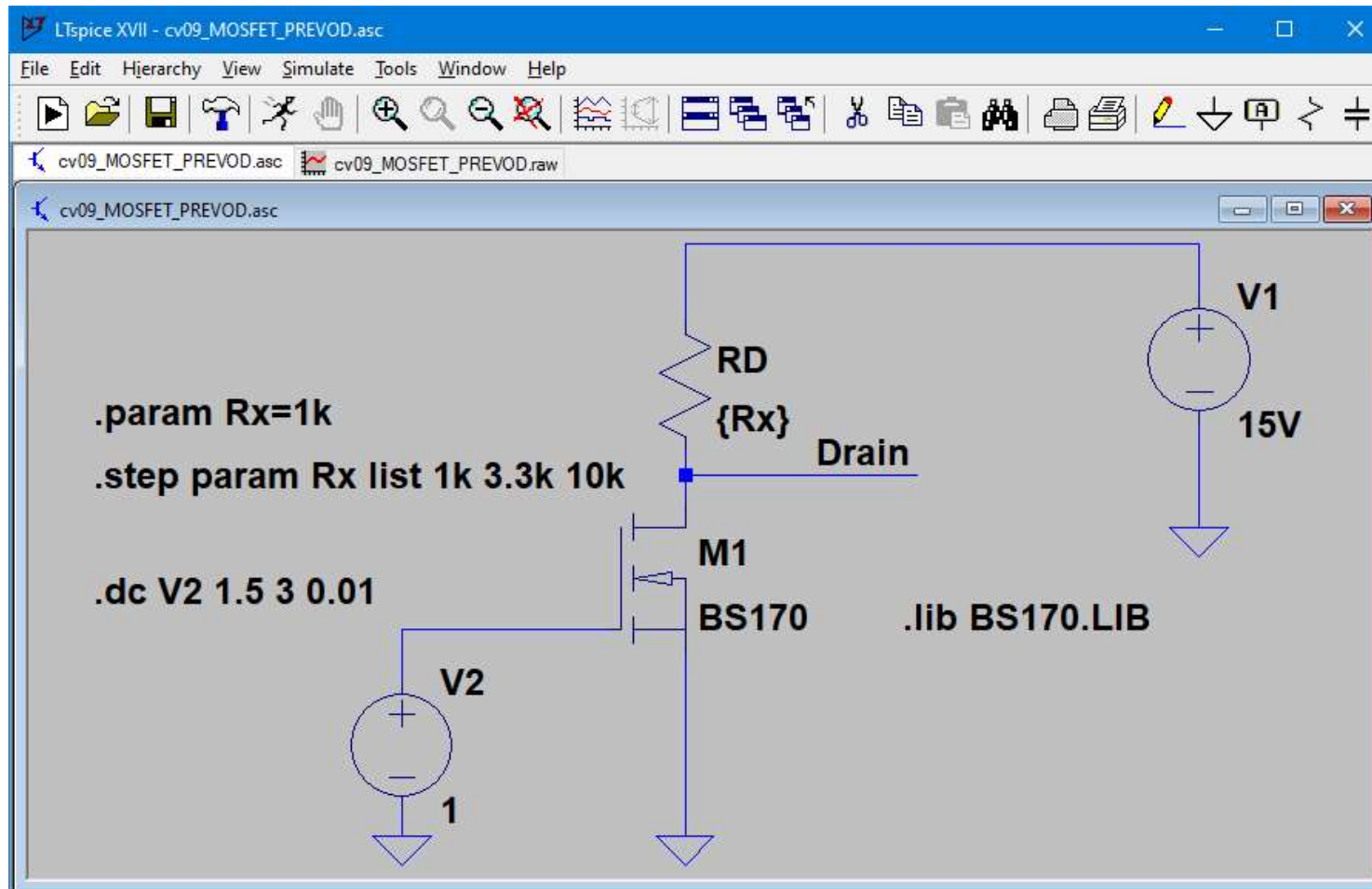


C8.1: Invertor NMOS

S8.1: Simulace převodní charakteristiky invertoru NMOS

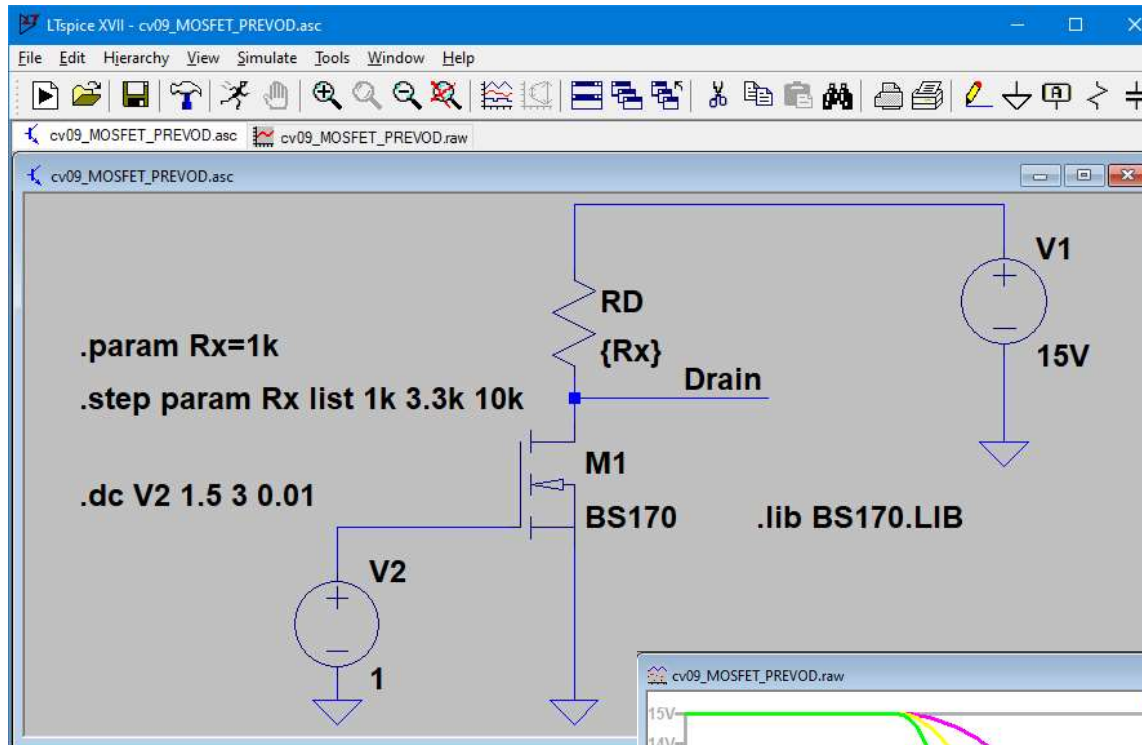
$$U_{DS}=f(U_{GS})$$

NMOS_prevod.asc

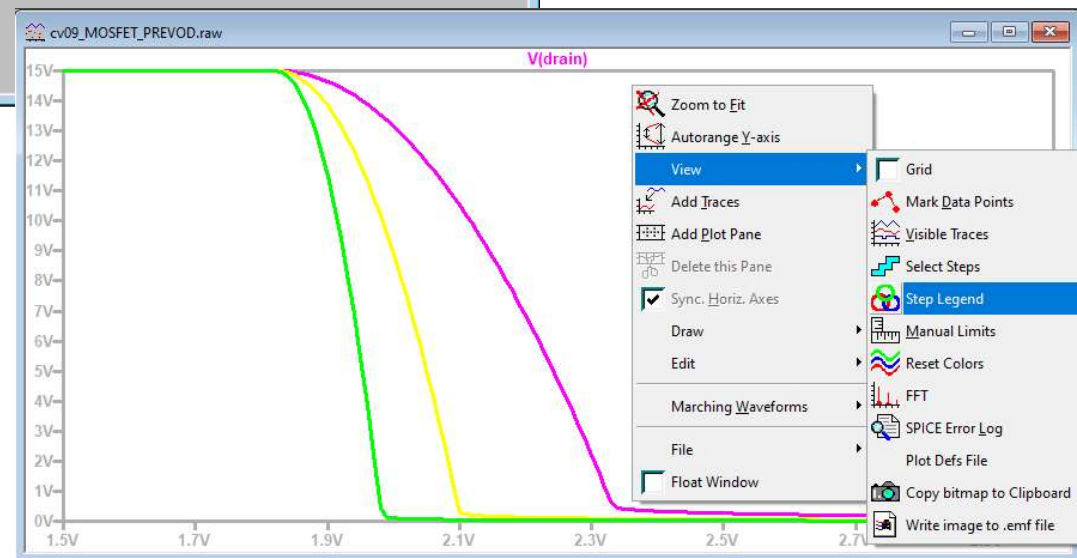


C8.1: Invertor NMOS

$$U_{DS}=f(U_{GS})$$



Přiřazení parametru ke křivce:

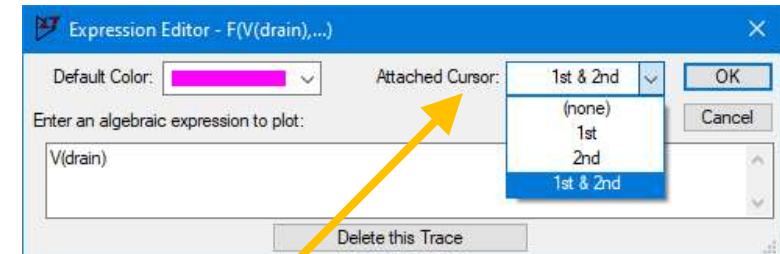


C8.1: Invertor NMOS

Odečet napět'ového zisku pomocí kurzorů

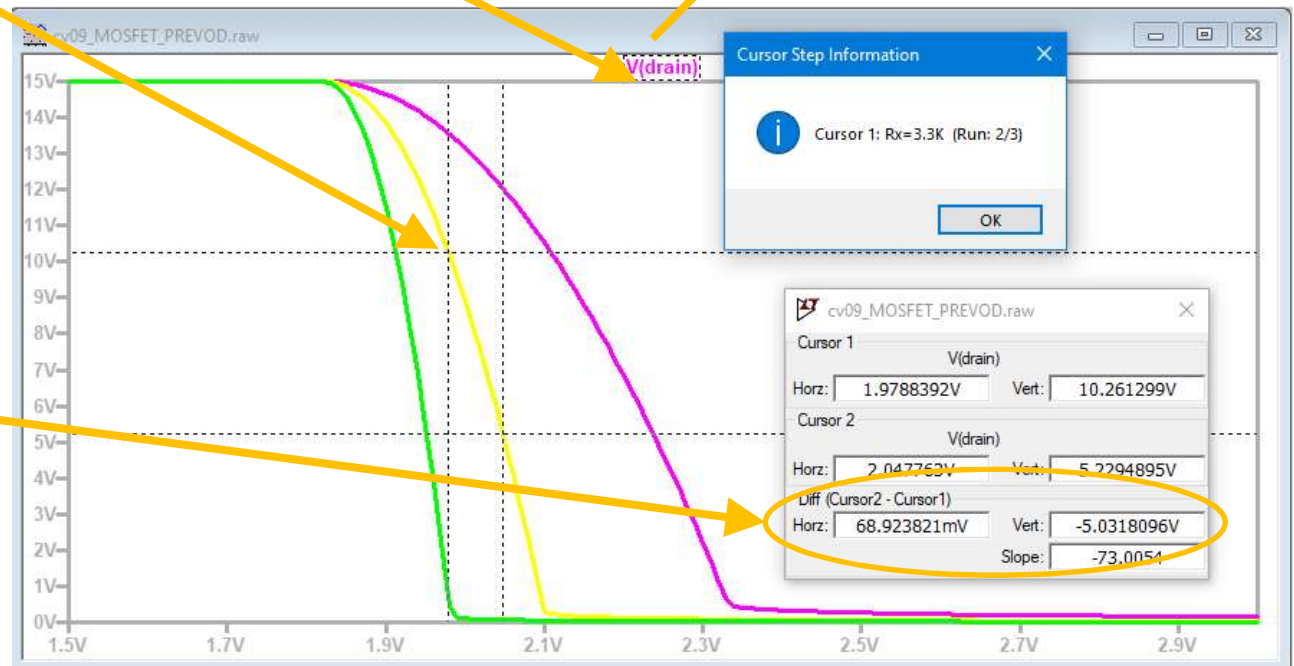
$$U_{DS}=f(U_{GS})$$

1) Zapnutí kurzorů – RMB na V(drain)



2) Přesouvání kurzorů po křivce (LMB)

*Přeskakování kurzoru
na jiný průběh pomocí
šipek ↑↓ na klávesnici*



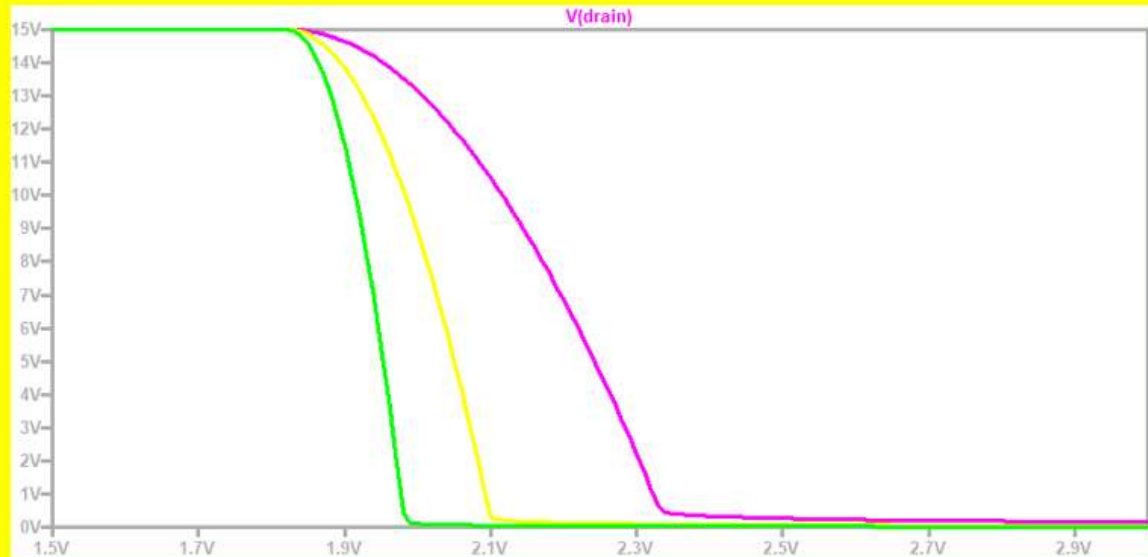
3) Odečet hodnot

C8.1: Invertor NMOS

Odhadnout prahové napětí
tranzistoru BS170

Vložit nasimulovaný průběh

- Návod:**
- 1) Na odsimulovaných průbězích pomocí kurzorů odečtete ΔU_{GS} a ΔU_{DS} , zadejte do tabulky
 - 2) Odhadněte velikost prahového napětí měřeného tranzistoru BS170 U_T [V] =
 - 3) Zjistěte R_{on} tranzistoru, zadáním napětí U_{on} (napětí U_{DS} při maximálním U_{GS}) do tabulky
 - 4) Zjistěte napěťový zisk invertoru určený jako směrnice tečny k lineární oblasti převodní charakteristiky v oblasti poklesu (zadání ΔU_{GS} a odpovídajícího ΔU_{DS} do tabulky).
 - 5) Do žlutého pole vložte odsimulované průběhy



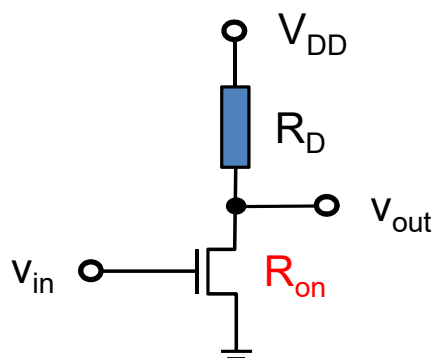
R_D [Ω]	1 000	3 300	10 000
U_{on} [mV]	54	16,7	5,6
R_{on} [Ω]	0	0	0
ΔU_{GS} [V]	0,125	0,068	0,036
ΔU_{DS} [V]	5,1	5,03	5,36
A_u	-40,8	-73,9706	-148,8889

Určit R_{on} a A_u

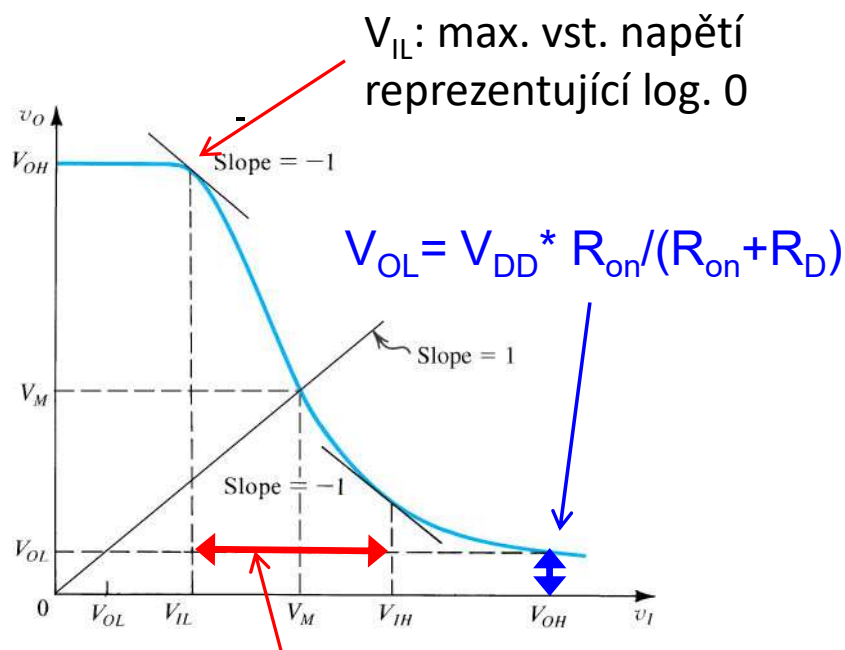
C8.1: Invertor NMOS

Nevýhody

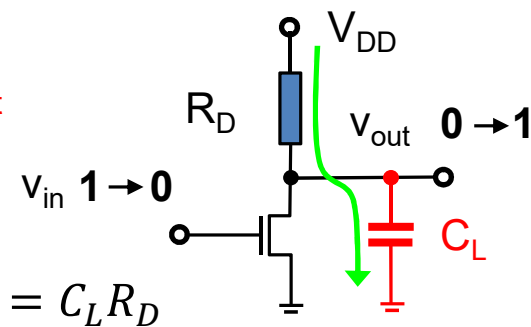
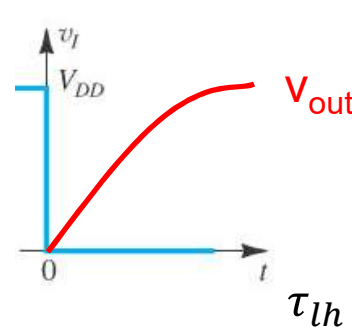
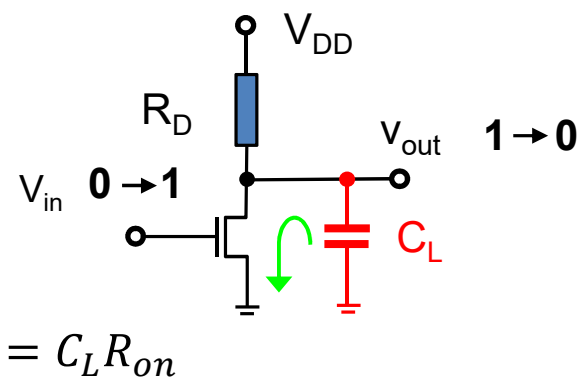
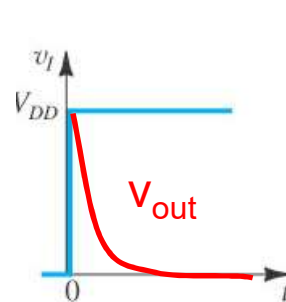
- nesymetrická charakteristika
- široká zakázaná oblast
- nenulová hodnota V_{OL}
- nenulová spotřeba v log.0 na výstupu
- velký výstupní odpor v log.1 na výstupu
- špatné dynamické vlastnosti



$$R_D \gg R_{on}$$



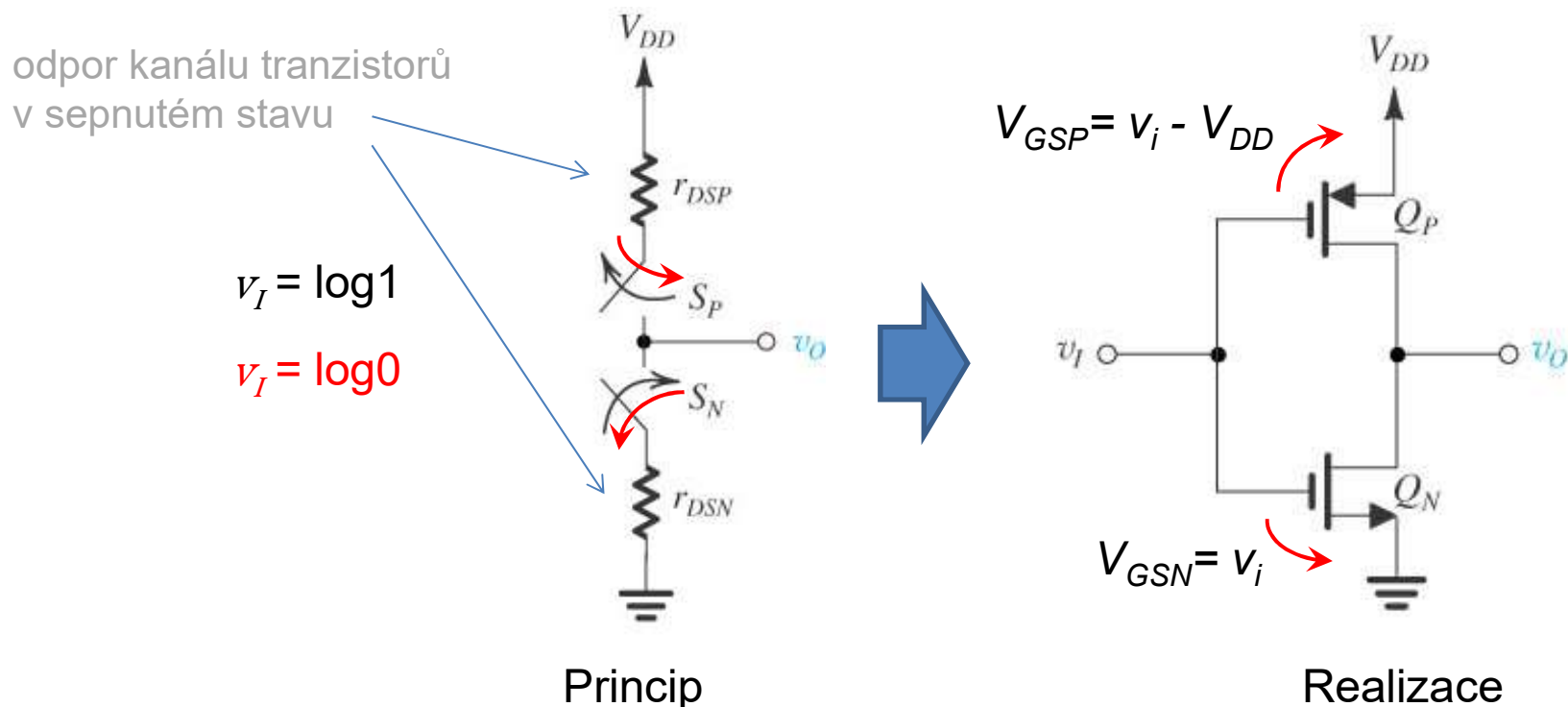
zakázaná oblast činnosti



C_L .. vstupní kapacita následujících hradel (tranzistorů)

C8.2: Invertor CMOS

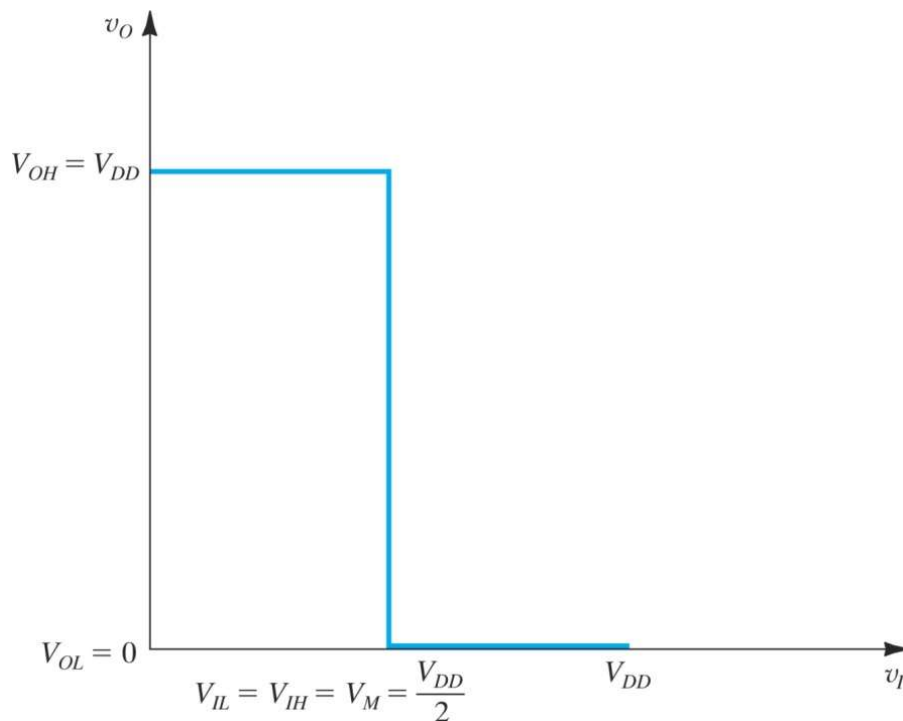
- ❑ **Princip** využívá dvojici v protifázi pracujících spínačů, které přepínají buď log0 (GND), anebo log1 (V_{DD}) na výstup. Proud napříč spínači je v klidu nulový.
- ❑ **Realizace** využívá dvojici antisériově zapojených komplementárních MOSFETů (mají shodné absolutní hodnoty prahového napětí, shodné β -faktory) .
- ❑ V log0 na vstupu je NMOS(Q_N) nevodivý a PMOS(Q_P) sepnut ($V_{GSP} = -V_{DD}$), log1 na vstupu je tomu naopak.



C8.2: Invertor CMOS

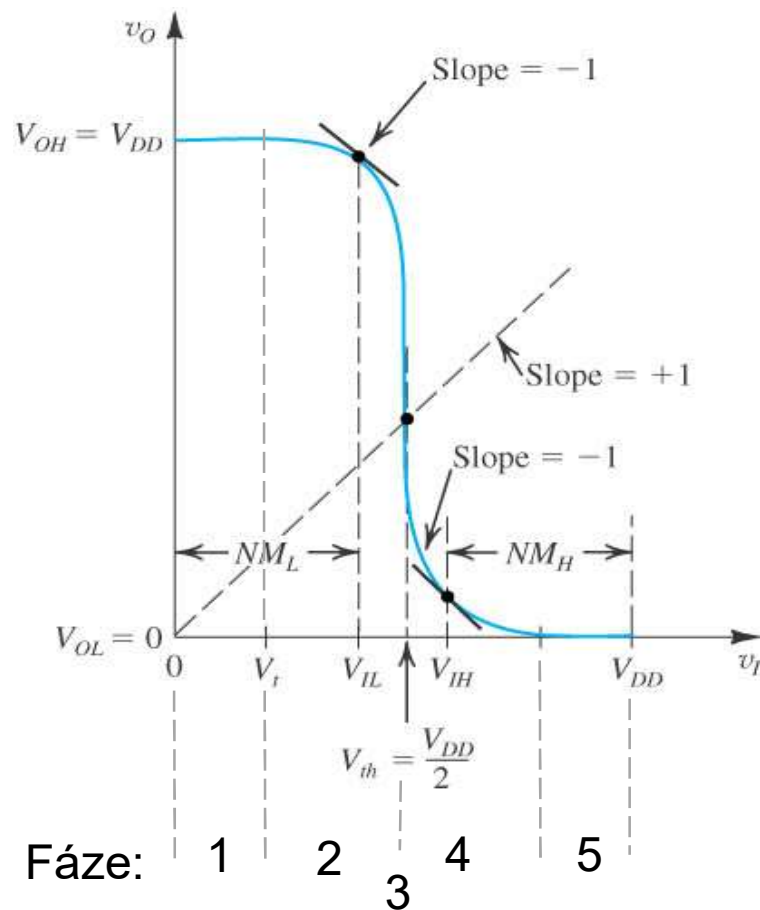
Převodní charakteristika

Ideální invertor



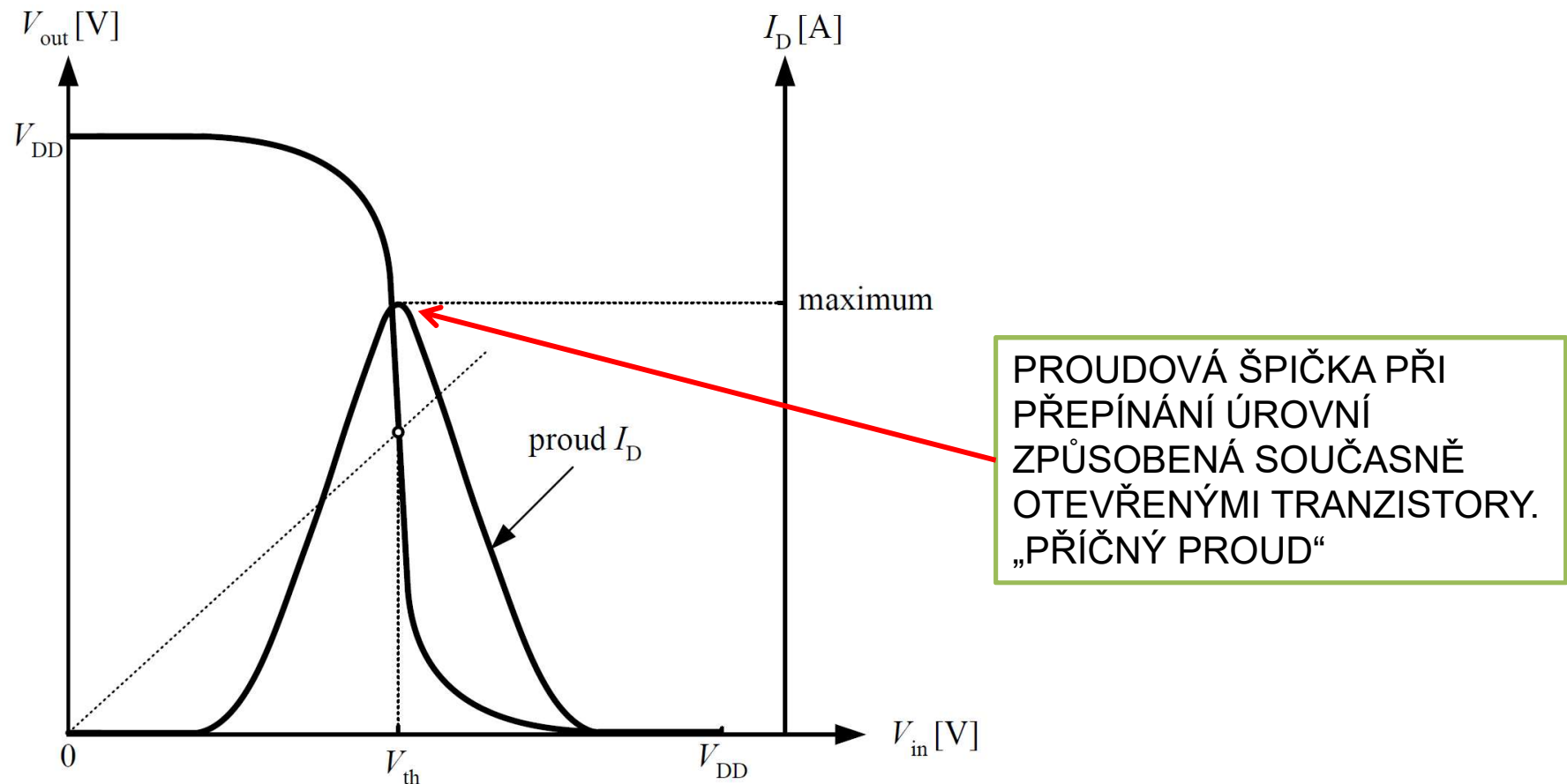
- 1 Q_N rozepnut Q_P v odporové oblasti
- 2 Q_N v saturaci Q_P v odporové oblasti
- 3 Q_N v saturaci Q_P v saturaci
- 4 Q_N v odporové oblasti Q_P v saturaci
- 5 Q_N v odporové oblasti Q_P rozepnut

Invertor CMOS (komplemnární tranzistory)



C8.2: Invertor CMOS

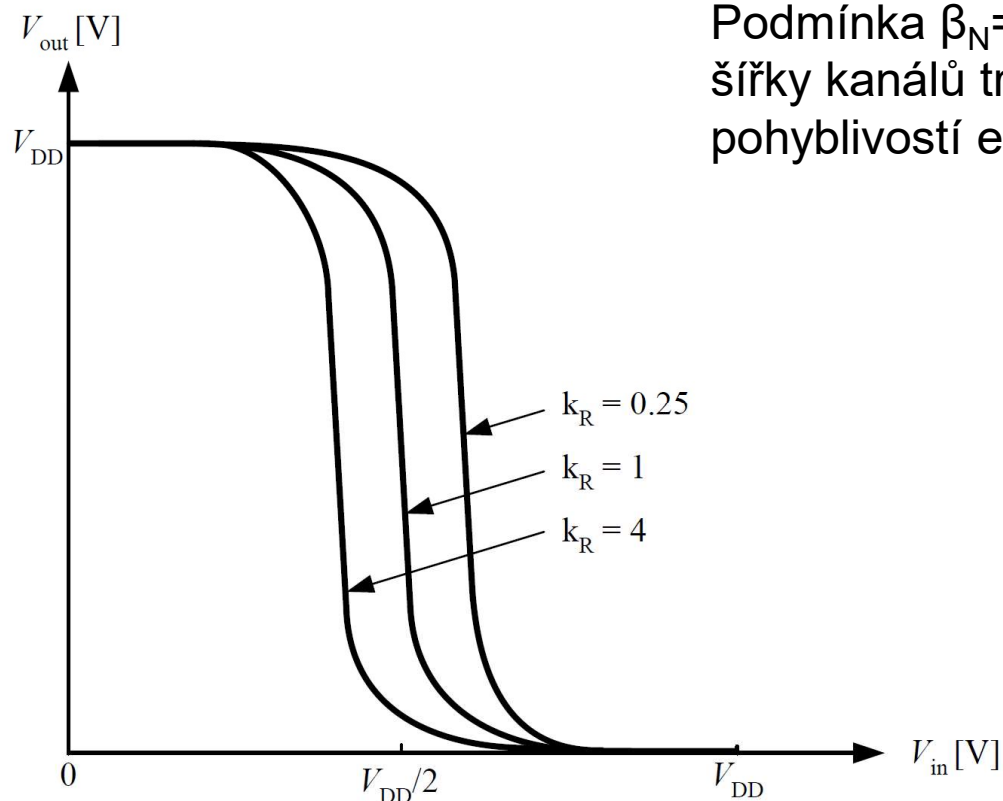
Statická spotřeba závisí na vstupním napětí, pro povolené hodnoty log0 a log1 je nulová (alespoň jeden tranzistor nevede). V zakázané oblasti (hodnota na výstupu se mění) může být značná (oba tranzistory jsou vodivé).



C8.2: Invertor CMOS

Vliv parametrů tranzistorů na převodní charakteristiku

Ideální charakteristika (zlom nastává při $V_{in}=V_{DD}/2$) vyžaduje plně komplementární tranzistory: $|V_{thN}| = |V_{thP}|$, $\beta_N = \beta_P$, tj. $k_R = \beta_N/\beta_P = 1$.



Podmínka $\beta_N = \beta_P$ ($k_R = 1$) vyžaduje přizpůsobit šířky kanálů tranzistoru nesymetrii hodnot pohyblivostí elektronů a děr

$$\beta_N = \beta_P$$

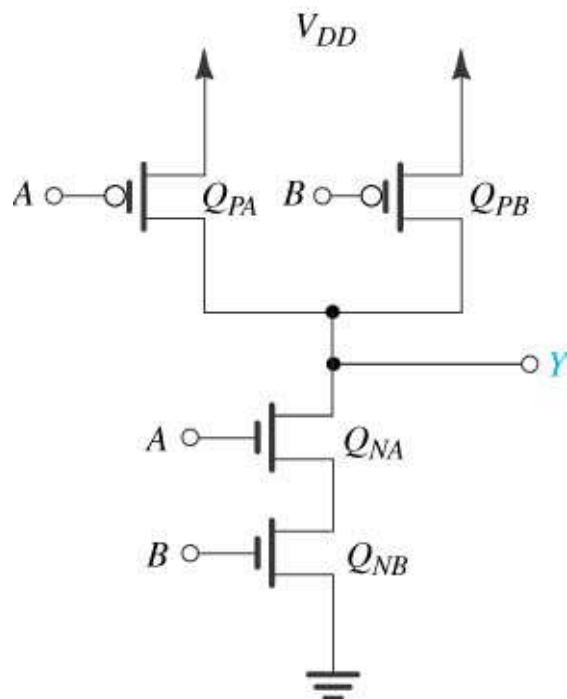
$$\mu_N C_{ox} \frac{W_N}{L_N} = \mu_P C_{ox} \frac{W_P}{L_P}$$

pro $L_N = L_P$ získáme

$$\boxed{\frac{W_P}{W_N} = \frac{\mu_N}{\mu_P}}$$

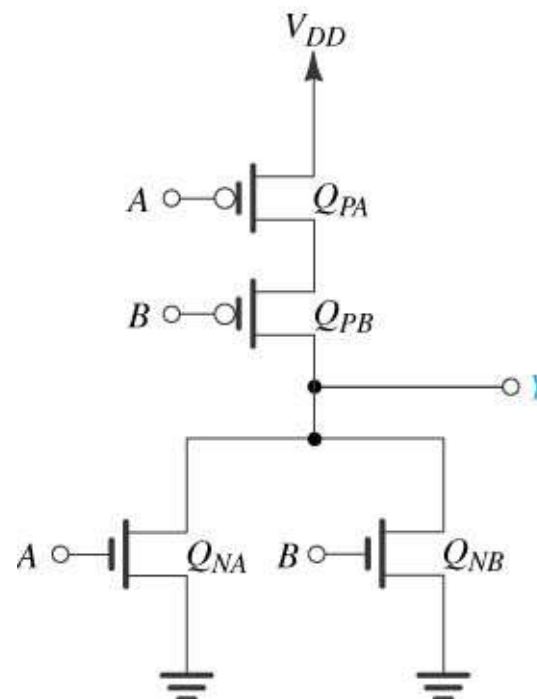
C8.2: Invertor CMOS

Realizace hradel AND a OR v komplementární CMOS logice:



$$Y = \overline{A \cdot B}$$

spodní část (pod uzlem výstup)



$$Y = \overline{A + B}$$

horní část (nad uzlem výstup)

NAND : tranzistory NMOS sériově

NOR : tranzistory NMOS paralelně



tranzistory PMOS paralelně

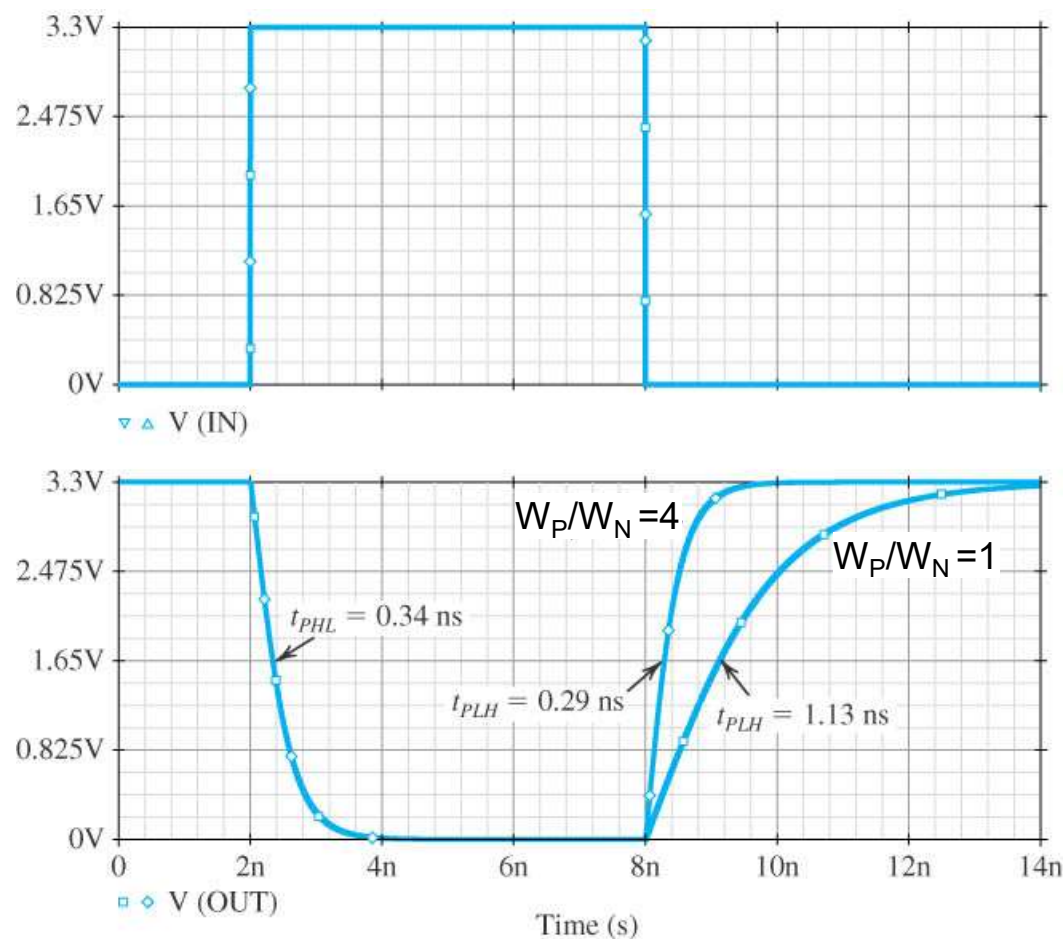
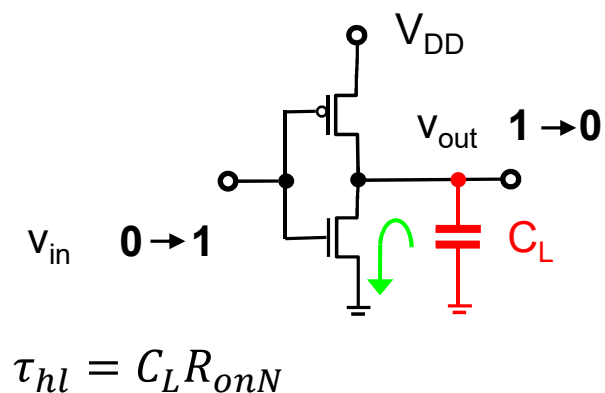
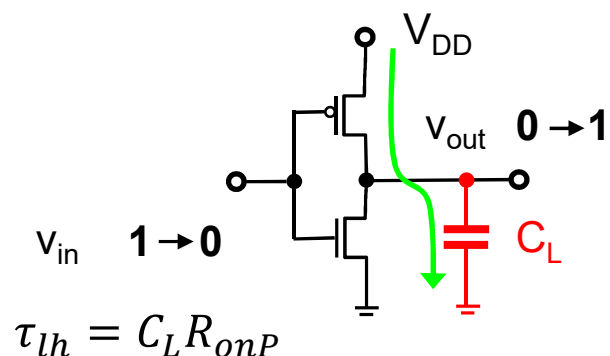


tranzistory PMOS sériově

C8.2: Invertor CMOS

Dynamické parametry a dynamická spotřeba

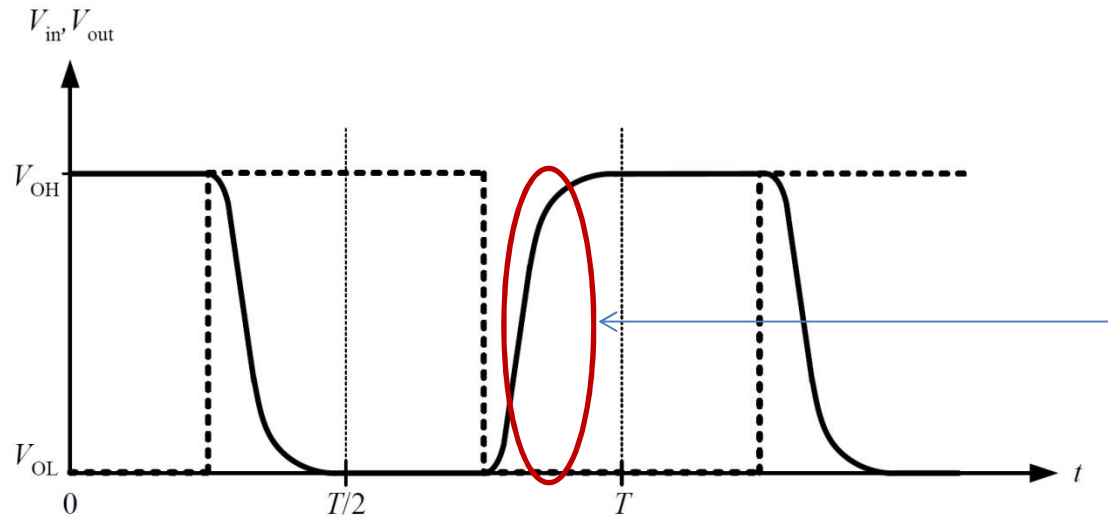
Dynamická změna výstupního napětí je dána nabíjením/vybíjením kapacitní zátěže přes spínaný PMOS/NMOS.



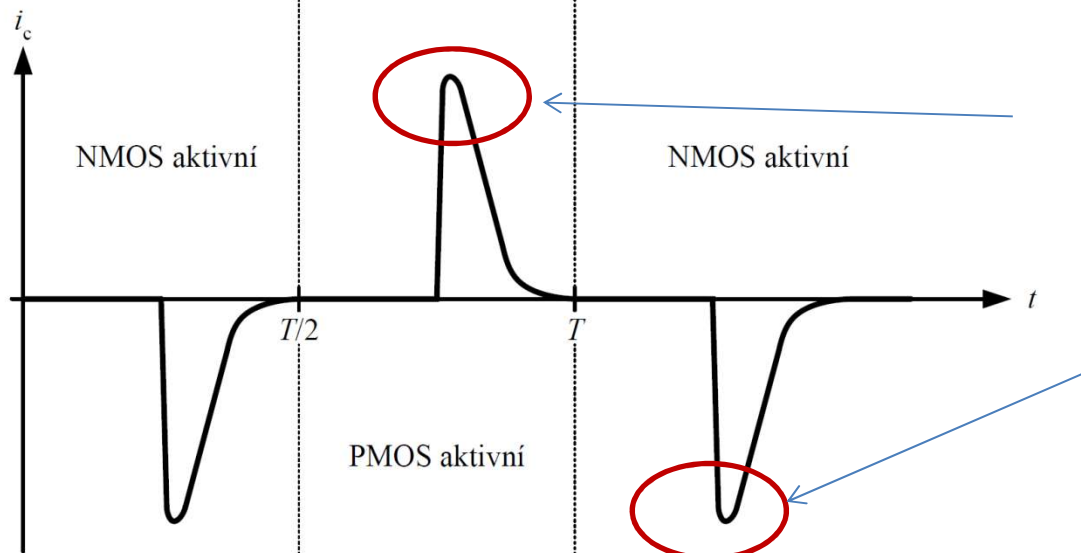
Průběh vstupního (nahore) a výstupního (dole) napětí.

C8.2: Invertor CMOS

Dynamické parametry a dynamická spotřeba



ZPOMALENÍ PRŮBĚHU
ZPŮSOBENÉ
KONEČNÝM
NABÍJENÍM A VYBÍJENÍM
VÝSTUPNÍ KAPACITY



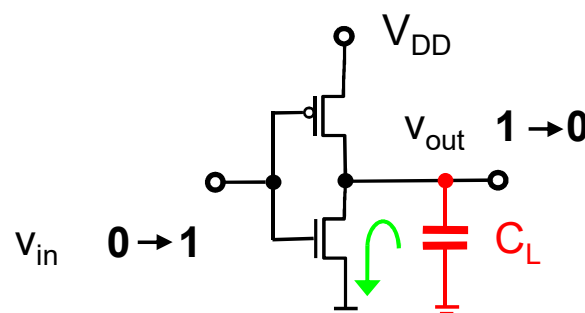
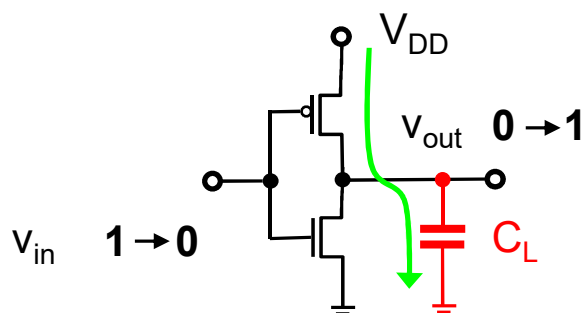
PROUDOVÉ ŠPIČKY
NA NAPÁJECÍ Lince
ZPŮSOBENÉ
NABÍJENÍM A VYBÍJENÍM
VÝSTUPNÍ KAPACITY

C8.2: Invertor CMOS

Dynamická spotřeba invertoru CMOS

- způsobena periodickým nabíjením a vybíjením zatěžovací kapacity C_L .
- při každé změně stavu je spotřebována energie $W = \frac{1}{2} C_L V_{DD}^2$
- počítáme dvě změny stavu (např. 0-1-0) s frekvencí f je dynamický ztrátový výkon invertoru

$$P = C_L V_{DD}^2 f$$



Příklad CP8.1

Odhadněte maximální dynamickou spotřebu CMOS čipu (0.25 μm technologie), který obsahuje 10^6 (N) ekvivalentních hradel NAND s vstupní kapacitou $C = 3.9 \text{ aF}$. Předpokládejte pracovní frekvenci $f = 500 \text{ MHz}$ a napájecí napětí $V_{DD} = 2.5\text{V}$.

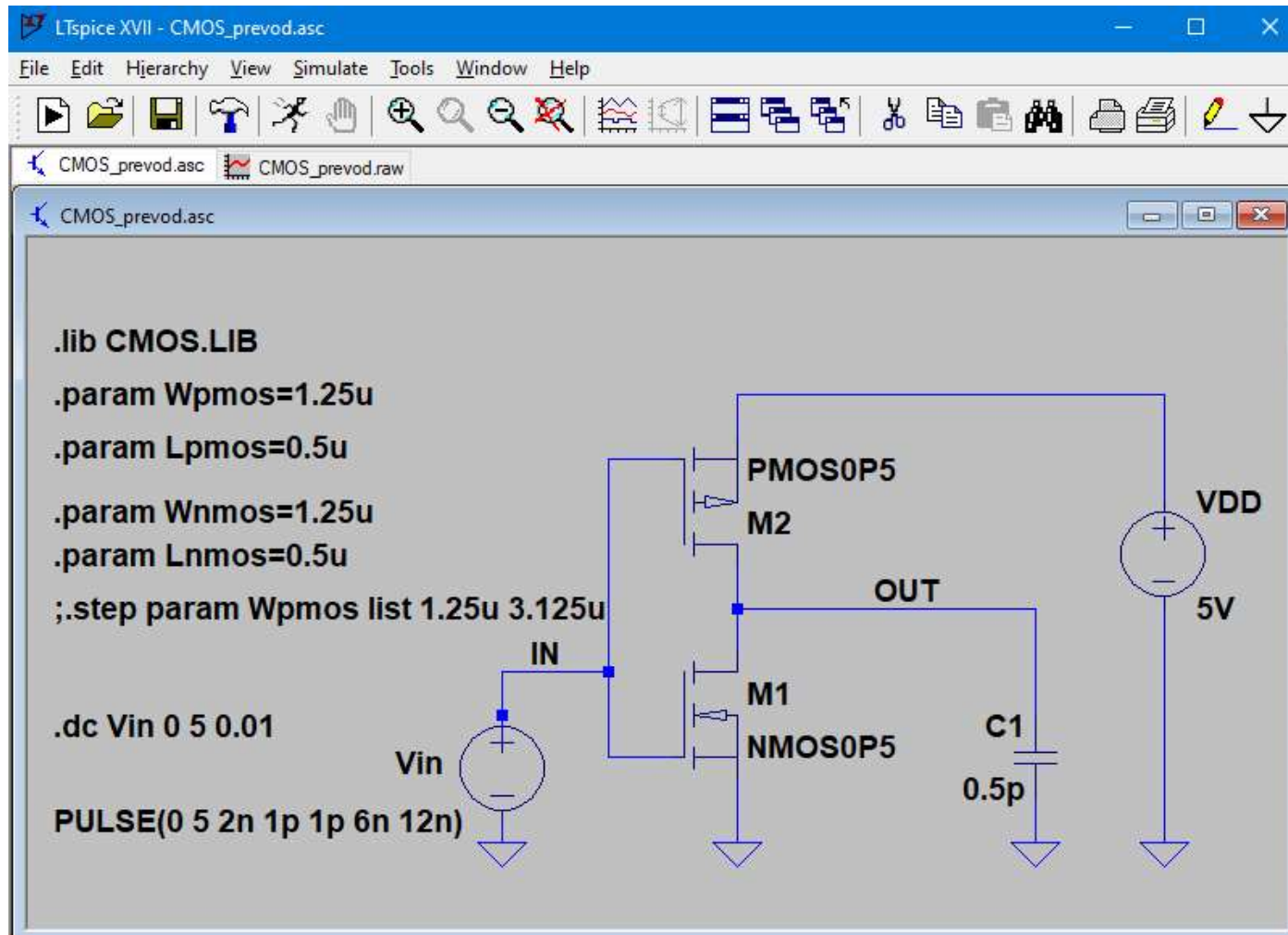
Řešení $P = N C V_{DD}^2 f = 10^6 \cdot 3.9 \times 10^{-15} \cdot 2.5^2 \cdot 5 \times 10^8 = 12.2 \text{ [W] !!!}$

C8.2: Invertor CMOS

S8.2: Simulace převodní charakteristiky invertoru CMOS

$$U_{OUT}=f(U_{IN})$$

CMOS_prevod.asc



C8.2: Invertor CMOS

CMOS_prevod.asc

```
.model PMOS0P5 PMOS(Level=1
```

```
+ L={Lpmos}
```

```
+ W={Wpmos}
```

```
+ VTO=-0.8
```

```
+ GAMMA=0.45
```

```
+ PHI=0.8
```

```
+ LD=0.09E-06
```

```
+ WD=0
```

```
...
```

```
.model NMOS0P5 NMOS
```

```
+ L={Lnmos}
```

```
+ W={Wnmos}
```

```
+ VTO=0.7
```

```
+ GAMMA=0.5
```

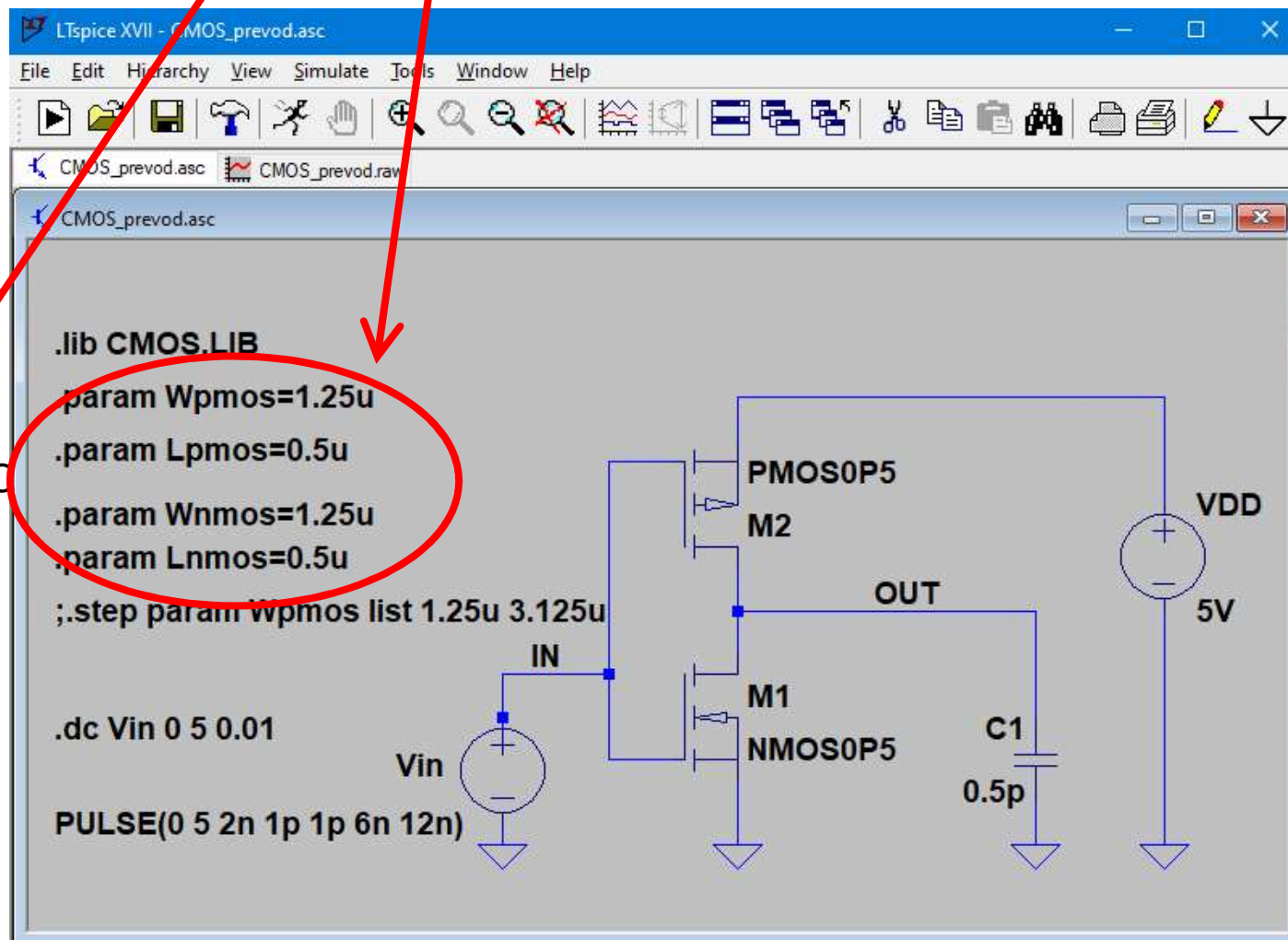
```
+ PHI=0.8
```

```
+ LD=0.08E-06
```

```
+ WD=0
```

```
...
```

Délka a šířka kanálu jako nastavitelný parametr

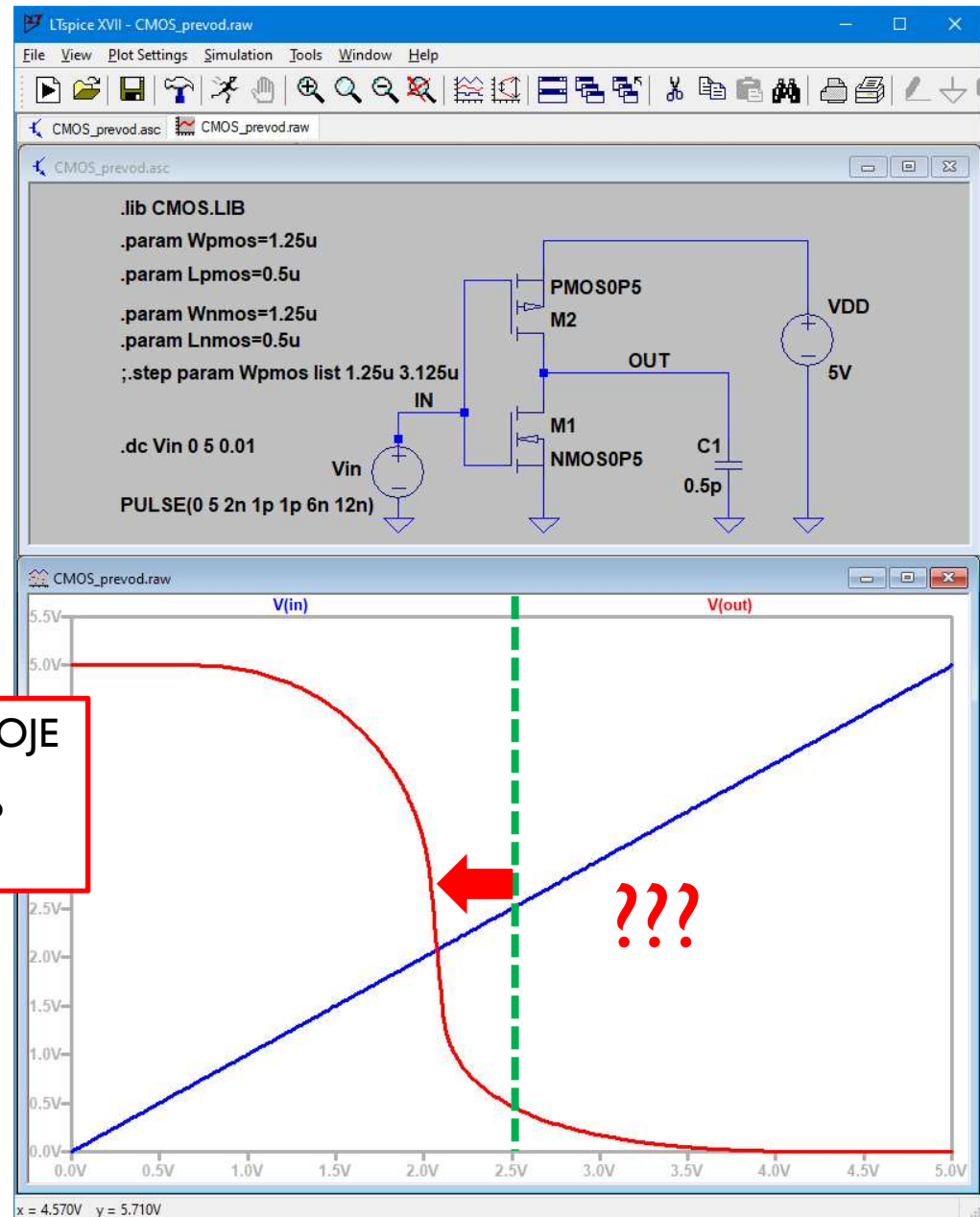


C8.2: Invertor CMOS

CMOS_prevod.asc

POSUN
CHARAKTERISTIKY
= PRŮBĚH NENÍ
SYMETRICKÝ

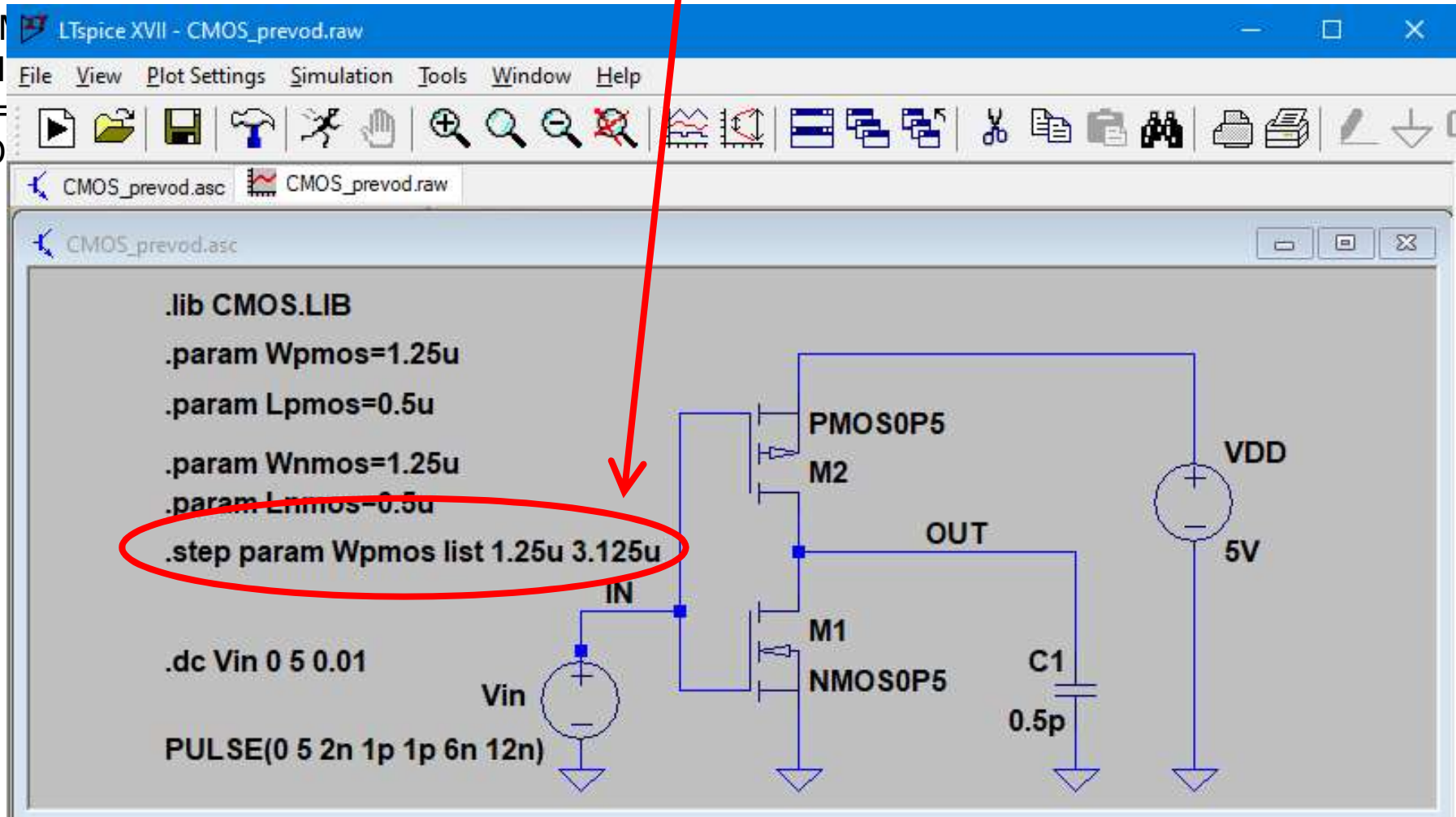
ROZDÍLNÁ POHYBLIVOST NOSIČŮ NÁBOJE
 $\mu_N \neq \mu_P$ $\mu_N \approx 2,5\mu_P$



C8.2: Invertor CMOS

```
.model PMOS0P5 PMOS(Level=1  
+ L={Lpmos}  
+ W={Wpmos}  
+ VTO=-0.8  
+ GAMMA=0  
+ PHI=0  
+ LD=0  
+ WDM=0  
...
```

Úprava šířky kanálu PMOS tranzistoru,
aby β -faktory obou tranzistorů byly shodné.

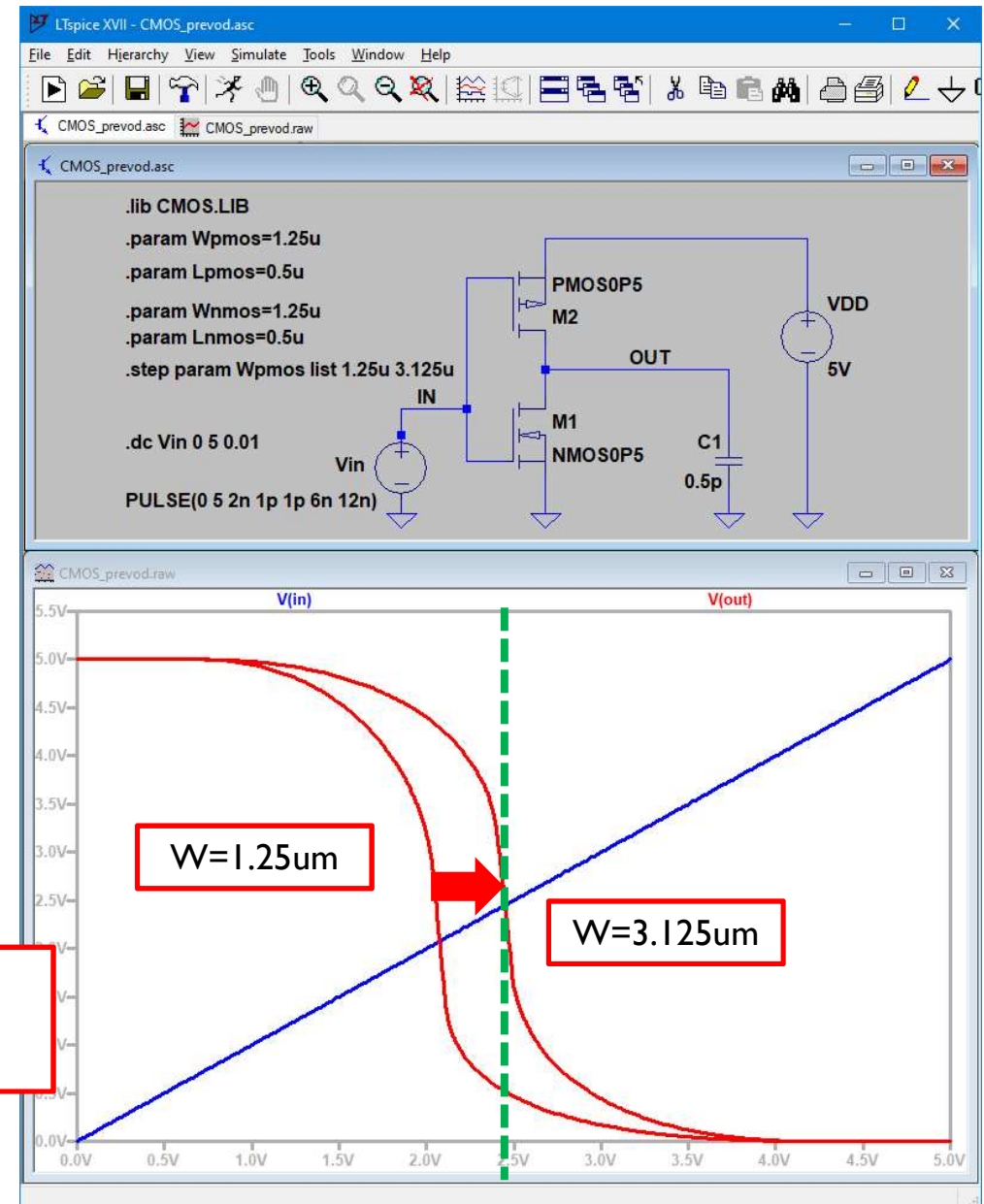


C8.2: Invertor CMOS

CMOS_prevod.asc

OK = PRŮBĚH JE
SYMETRICKÝ

ROZDÍLNÁ POHYBLIVOST NOSIČŮ NÁBOJE
 $\mu_N \neq \mu_P$ $\mu_N \approx 2,5\mu_P$



C8.2: Invertor CMOS

Odečíst špičkovou hodnotu
proudového odběru

Určit A_u

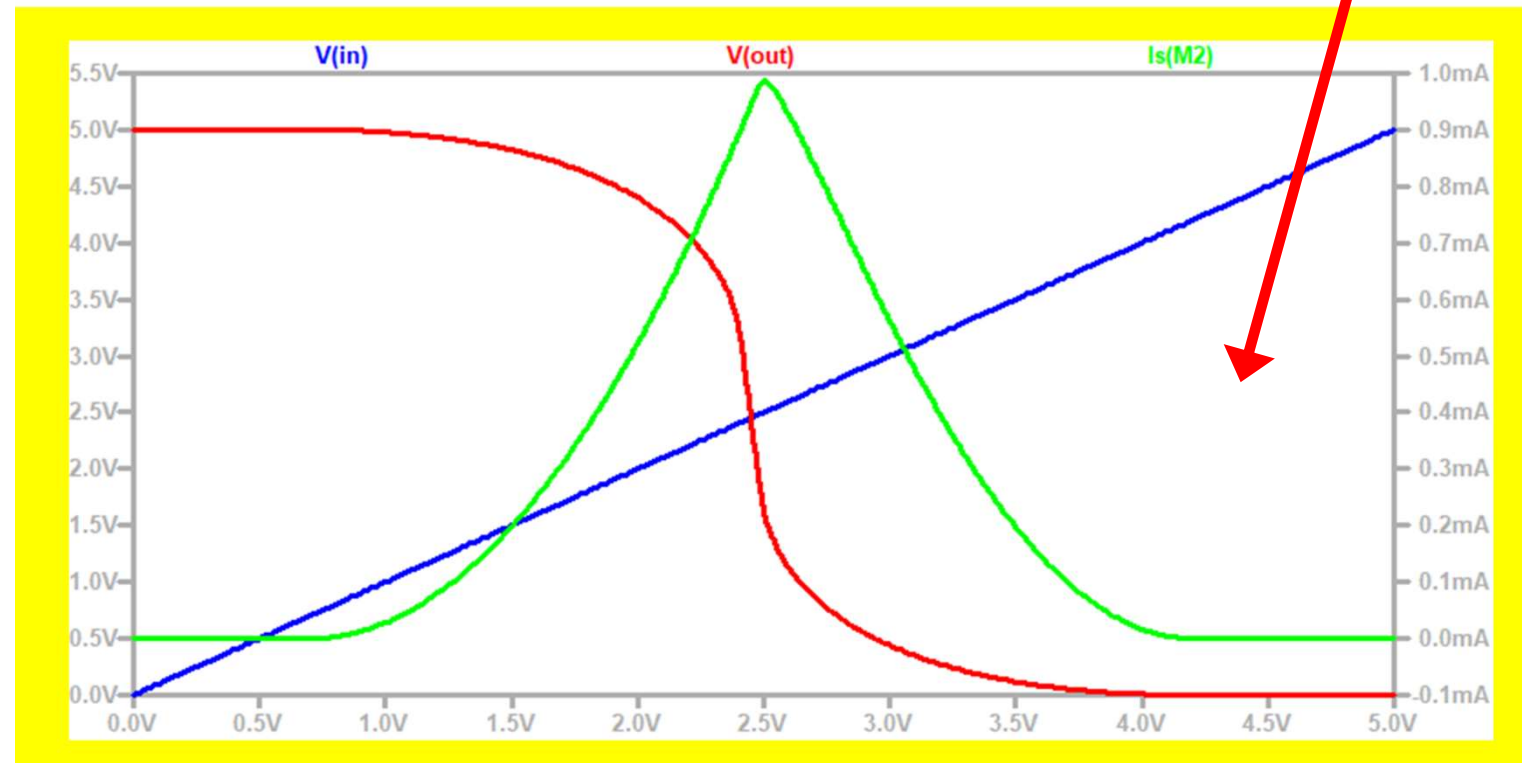
Vložit nasimulovaný průběh



A2B34ELP - Elektronické prvky - cvičení
CMOS invertor - převodní charakteristika

- Návod:
- 1) Do žlutě vyznačeného pole vložte graf nasimulovaných charakteristik.
 - 2) Odečtěte špičkovou hodnotu proudu. $I_{MAX} = 1.07 \text{ mA}$
 - 3) Z grafu v LTSPICE odečtěte údaje pro výpočet strmosti převodní charakteristiky.

Změřená data:		
$\Delta U_{V2}[\text{V}]$	$\Delta U_{U2}[\text{V}]$	strmost
0.3	2.8	9.33



C8.2: Invertor CMOS

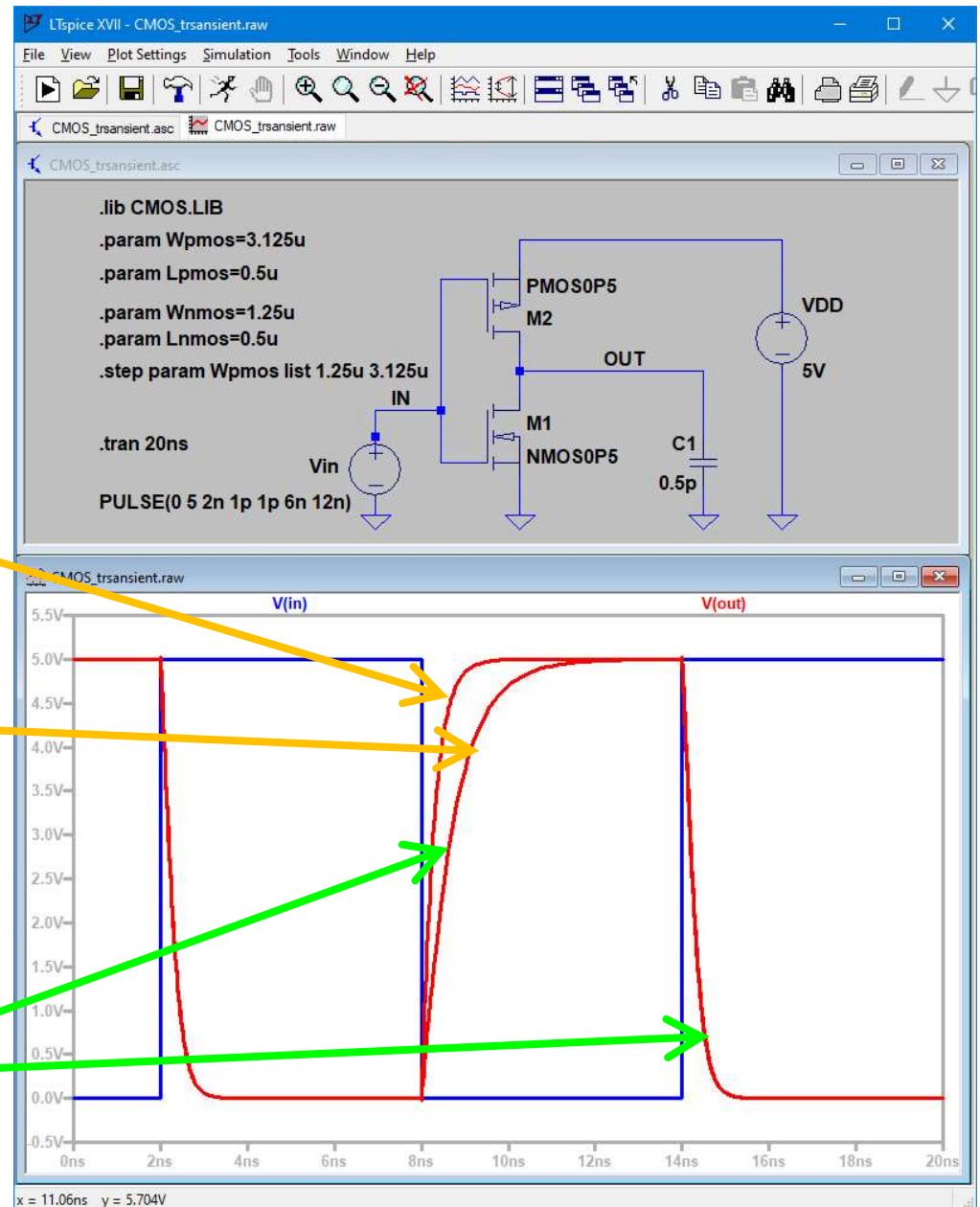
CMOS_transient.asc

$W=3.125\mu\text{m}$

$W=1.25\mu\text{m}$

OTÁZKA:

PROČ JE PRO $W_{\text{pmos}}=1.25\mu\text{m}$
PRŮBĚH SESTUPNÉ A VZESTUPNÉ
HRANY ROZDÍLNÝ?



C8.2: Invertor CMOS

Vložit nasimulovaný průběh

Určit zpoždění při přechodu 0-1 a 1-0

