



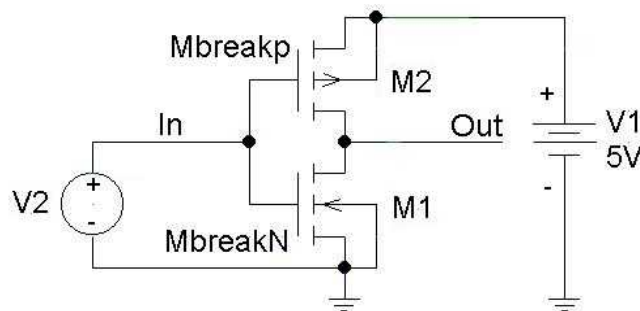
PROVA FINALE SIMULAZIONI SPICE DI CIRCUITI ELETTRONICI

C. Guazzoni

Anno Accademico 2024/2025 – Terzo Laboratorio

Simulazione SPICE di un invertitore CMOS

Si consideri il seguente invertitore CMOS:



realizzato impiegando due MOSFET complementari e alimentato tra 0 e 5V.

Si realizzi lo schema elettrico attingendo alle librerie disponibili e realizzando opportunamente le interconnessioni. Nel definire le caratteristiche dei MOS si ricorra alle seguenti informazioni:

- Processo VLSI in tecnologia CMOS $1\mu m$ (tecnologia un po' vecchiotta... ☺)
- $L_n = L_p = 1\mu m$
- $W_n = W_p = 10\mu m$
- Tensione di soglia $V_{TO} = \pm 0.7V$
- Fattore di transconduttanza NMOS $K_p = 8.1 \cdot 10^{-5} A/V^2$ (indichiamo qui il fattore di transconduttanza con K_p sia per il transistor NMOS che per il PMOS dal momento che questo è il simbolo usato in Spice per entrambi i transistori)
- Fattore di transconduttanza PMOS $K_p = 2.7 \cdot 10^{-5} A/V^2$

Nell'inserire i dispositivi si operi nel modo seguente: dalla libreria *breakout.slb* prelevare i dispositivi *MbreakN* (MOSFET *n-channel* ad arricchimento) e *MbreakP* (MOSFET *p-channel* ad arricchimento).

Nell'inserire i parametri di modello si operi nel modo seguente: dopo aver selezionato col mouse il componente, dal menu *Edit* selezionare *Model* e, successivamente, *Edit Instance Model (Text)*. Nella finestra disponibile aggiornare con le definizioni di modello seguenti:

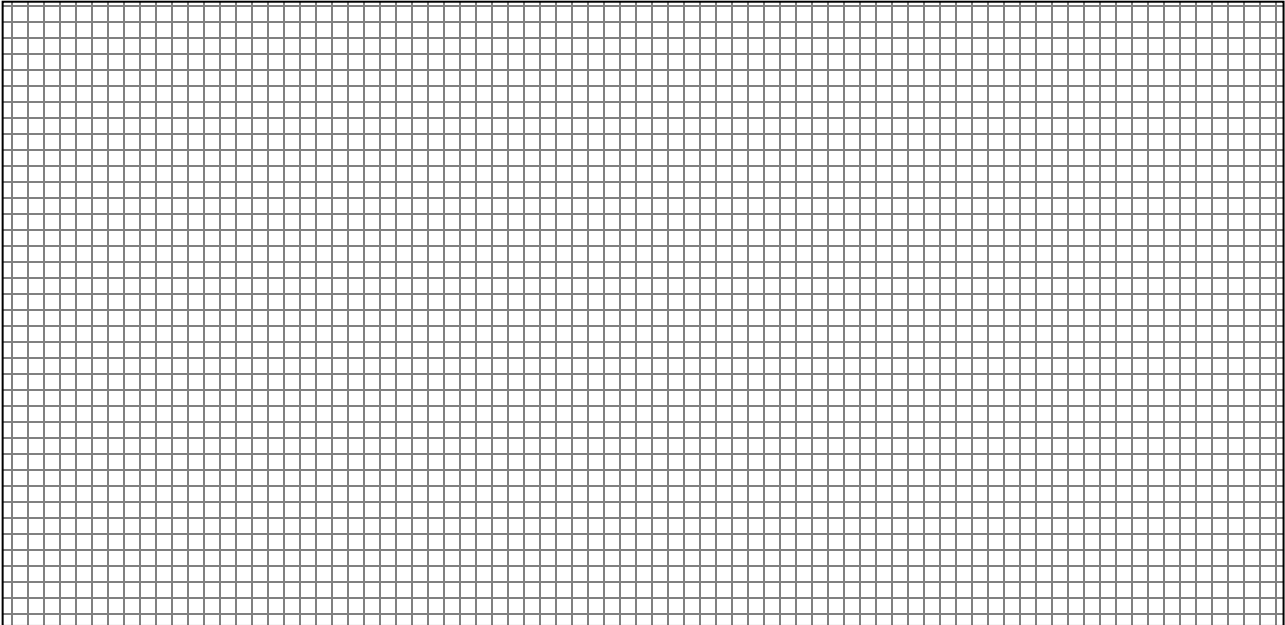
```
.model Mbreakp PMOS(  
VTO=-.7  
KP=2.7e-5)
```

```
.model Mbreakn NMOS(  
VTO=.7  
KP=8.1e-5)
```

Nell'inserire i parametri geometrici si operi dapprima evidenziando il componente; poi selezionando nel menu *Edit* la voce *Attributes* e aggiornando gli opportuni campi (L e W).

a. Analisi della caratteristica di trasferimento statica

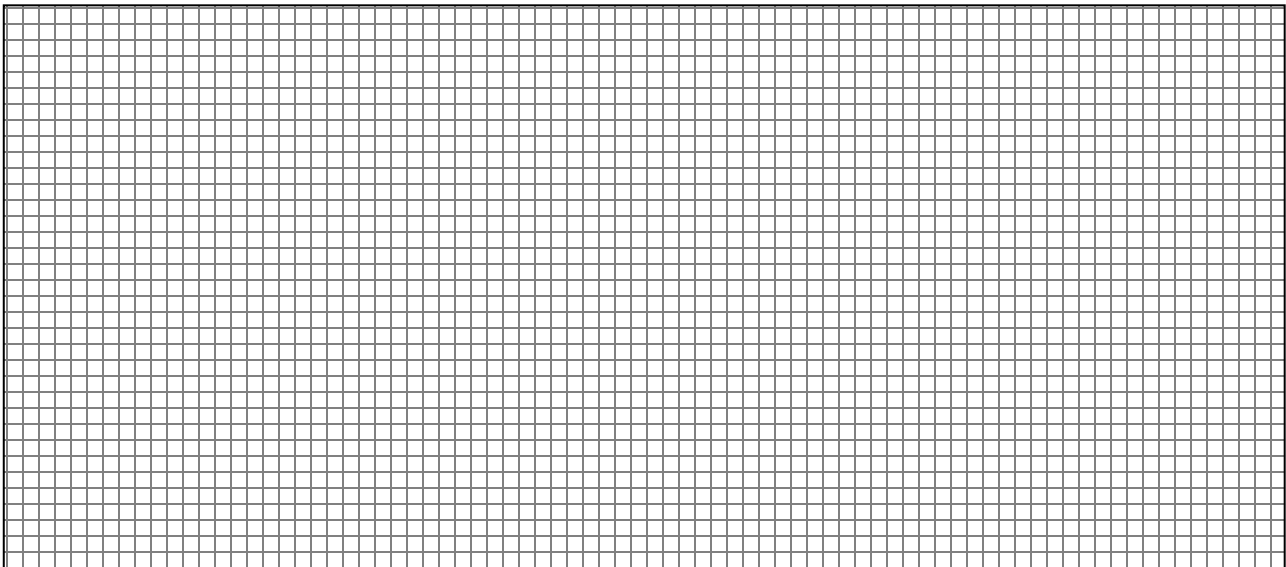
1. Determinare, mediante simulazione *SPICE*, la caratteristica di trasferimento V_{out} / V_{in} dell'invertitore; a tale scopo si utilizzino opportunamente il *Setup* dal menu *Analysis* e i *Markers* (Suggerimento: si ricorra ad una analisi di tipo DC sweep del generatore V_2). Si riporti dettagliatamente il risultato nello spazio sottostante e si identifichino le regioni di funzionamento dei due transistori nei vari tratti della caratteristica.



2. Con l'ausilio del postprocessore grafico *Probe* si determinino i margini di rumore dell'invertitore (Suggerimento: si può pervenire alla funzione derivata della caratteristica di trasferimento mediante la funzione *Add Trace* di *Probe*, utilizzando l'operatore di derivazione $D(V_{out})$, e da questa risalire ai punti cercati mediante la funzione *Cursor* nel menu *Tools*).

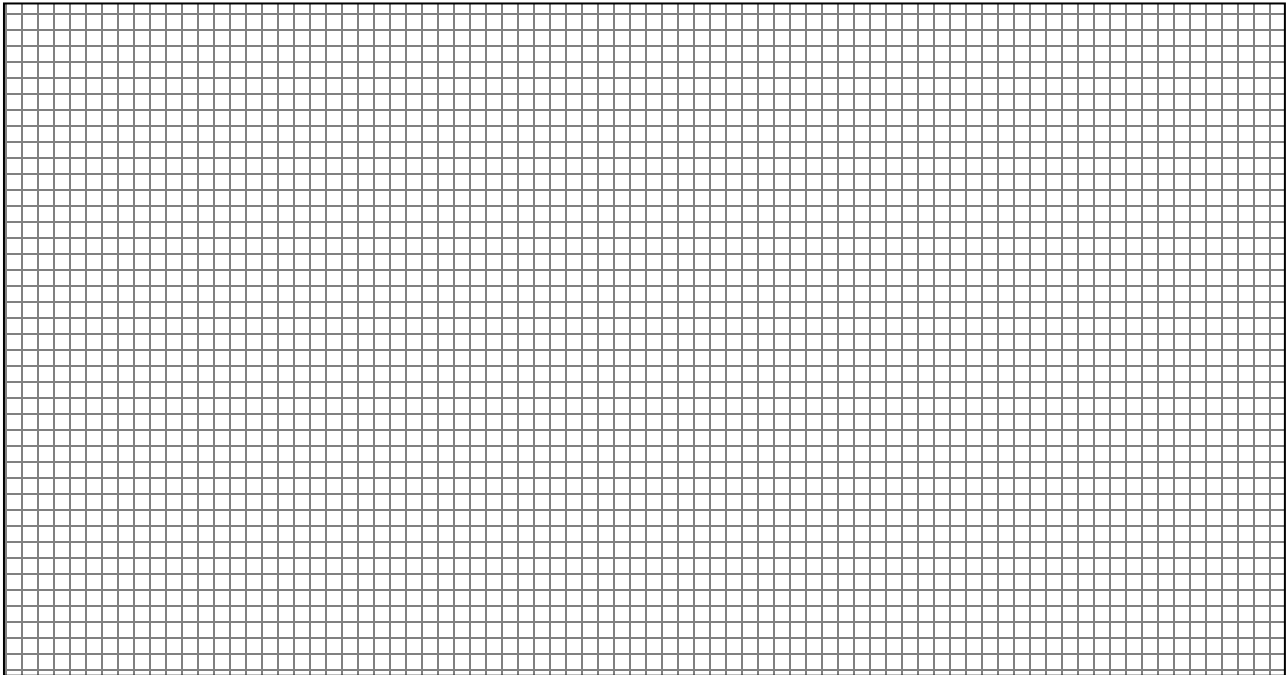
$V_{OH\ min} =$	$V_{OL\ max} =$	$NM_H =$
$V_{IL\ max} =$	$V_{IH\ min} =$	$NM_L =$

3. Si determini il valore di massimo assorbimento di corrente riportando con cura la caratteristica di assorbimento rilevata (Suggerimento: si aggiornino i *Markers* nel circuito o si ricorra ad *Add Trace*).

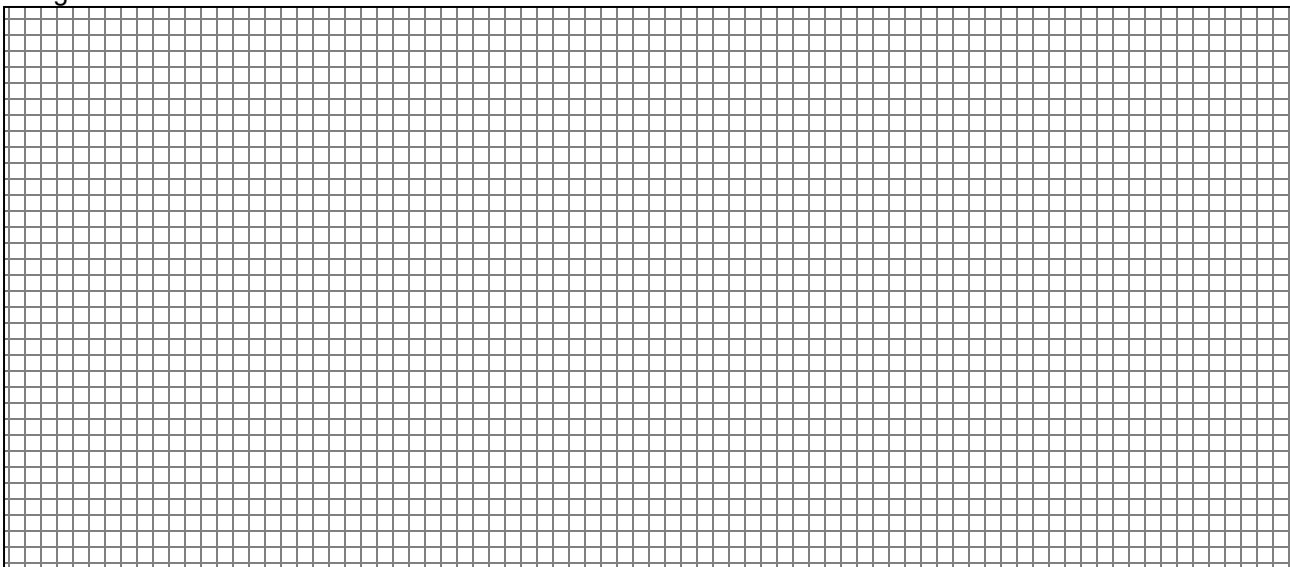


$$I_{MAX} =$$

4. Realizzare una simulazione parametrica della caratteristica di trasferimento al variare della tensione di alimentazione da 2V a 5V con passo unitario. Si predispongano opportunamente le voci al menu *Parametric Sweep* raggiungibile selezionando *Setup* nel menu *Analysis*. Si ponga, in particolare: *Swept Var. Type = Voltage Source; Name = V1; Sweep Type = Linear; Start Value = 2; End Value = 5; Increment = 1*. Si riportino nello spazio seguente le caratteristiche rilevate con la simulazione.

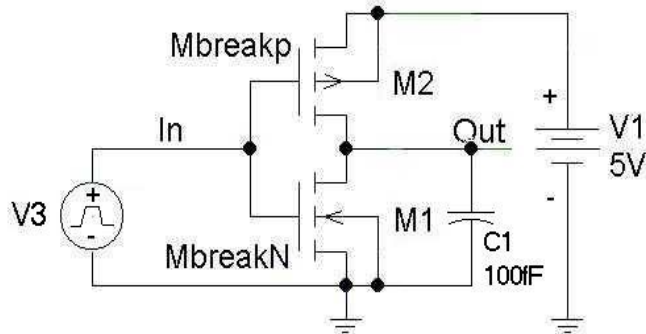


5. Si effettui un'analisi parametrica della caratteristica di trasferimento dell'invertitore rispetto alla tensione di soglia V_{TO} del n-MOSFET. Si scelga, in particolare $V_{TO}=0.5, 1, 1.5, 2V$. A tale scopo ripristinare il generatore V_1 tornando, dal menu *Analysis Setup*, alla sezione *Parametric* e selezionare *Model Parameter*. Di seguito inserire: *Sweep type: Value list; Model type: NMOS; Model Name: MbreakN; Parameter Name: VTO; Values: 0.5, 1, 1.5, 2*. Riprodurre quanto ottenuto nello spazio che segue giustificando brevemente i risultati.



b. Analisi del transitorio di commutazione

Si disattivi nel menu *Setup* la funzione *Parametric Sweep* abilitata in precedenza. Aggiornando il circuito con l'aggiunta di una capacità da 100fF tra l'uscita e la massa si perviene al circuito riportato nella figura seguente:



Il generatore di tensione V3 è di tipo *Vpulse* così parametrizzato: $V_1 = 0$; $V_2 = 5$; $TD=100\text{p}$; $TR=1\text{p}$; $TF=1\text{p}$; $PW=1\text{n}$; $PER=2\text{n}$. (per la descrizione dei parametri del generatore si ricorra, ad esempio, alla [traccia della prima esercitazione di laboratorio](#))

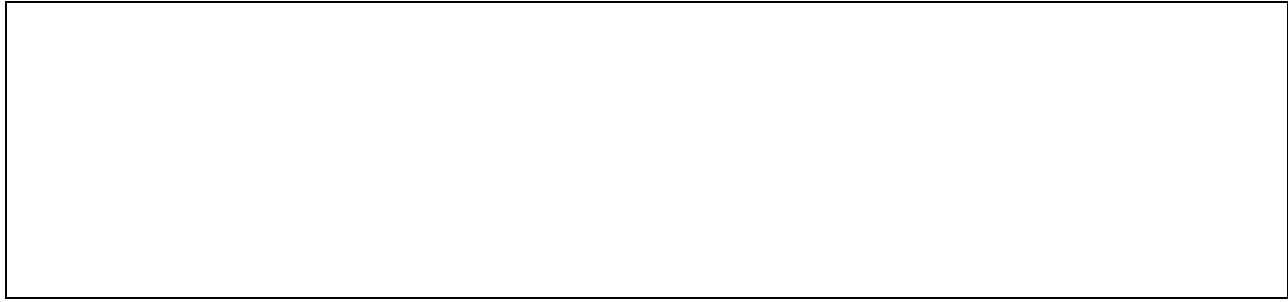
1. Si simulino i transistori di commutazione LH e HL scegliendo nel menu *Analysis Setup* la funzione *Transient*: qui si definiscano opportunamente i parametri *Print Step*, *Final Time* e *No Print Delay*. Riportare i valori dei due tempi di propagazione e spiegare perché τ_{pLH} è maggiore di τ_{pHL} .

$$\tau_{pLH} =$$

$$\tau_{pHL} =$$

2. Si modifichi il circuito al fine di ottenere tempi di propagazione identici nelle due commutazioni. Indicare la modifica effettuata e verificarne, mediante simulazione, l'efficacia.

3. Analisi parametrica mediante parametri globali. Effettuare l'analisi parametrica dei tempi di commutazione al variare della capacità di carico (100fF , 200fF , 500fF) dichiarandola come parametro globale. *Suggerimento*: in *Attributes* della capacità inserire come *Value* la dicitura $\{Cvar\}$. Nel menu *Draw* selezionare *Place Part* e inserire il nome *PARAM*. Nelle proprietà di *PARAM* attribuire a *NAME1* il nome *Cvar* e a *VALUE1* il valore 100fF . Nel menu *Analysis Setup* scegliere *Parametric* e indicare: *Swept Var. Type: Global Parameter; Name: Cvar; Sweep Type: Value List; Values: 100f, 200f, 500f*. Riportare i tempi di propagazione nei tre casi.



4. Si ripristini il circuito con capacità di carico a 100fF e si agisca sul periodo del segnale in ingresso ponendo negli *Attributes* di V_3 : $PER=1ns, 0.5ns, 0.25ns, 0.1ns$ e corrispondentemente $PW=0.5ns, 0.25ns, 0,125ns, 0.05ns$. Spiegare ciò che accade al crescere della frequenza e determinare la frequenza massima alla quale può operare questo invertitore.

