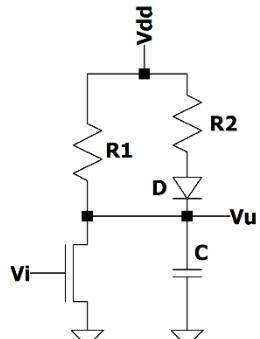


PROVA SCRITTA DI ELETTRONICA
4 LUGLIO 2023

- 1) Nel circuito in figura, il transistore è caratterizzato dal coefficiente β_n e dalla tensione di soglia V_T . Il diodo è descritto da un modello a soglia, con $V_g = 0.75$ V.



$$V_{dd} = 3.3 \text{ V}, \beta_n = 4 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2}, V_T = 0.3 \text{ V}, C = 4 \text{ pF}, R_1 = 5 \text{ k}\Omega, R_2 = 1 \text{ k}\Omega.$$

DOMANDE:

- 1) Si calcoli il valore di V_u per $V_i = 0V$. Con riferimento a tale punto, si determinino le regioni di funzionamento dei dispositivi.
 - 2) Si calcoli il valore di V_i per il quale si ottiene $V_u = 3V$. Con riferimento a tale punto, si determinino le regioni di funzionamento dei dispositivi.
 - 3) Si calcoli il valore di V_i per il quale si ottiene $V_u = 1.5V$. Con riferimento a tale punto, si determinino le regioni di funzionamento dei dispositivi.
 - 4) Si calcoli il valore di V_i per il quale si ottiene $V_u = 0.5V$. Con riferimento a tale punto, si determinino le regioni di funzionamento dei dispositivi.
 - 5) Si calcoli il valore di V_u per $V_i = 3.3V$. Con riferimento a tale punto, si determinino le regioni di funzionamento dei dispositivi.
 - 6) Si calcoli il valore della tensione di soglia logica V_{TL} . Con riferimento a tale punto, si determinino le regioni di funzionamento dei dispositivi.
 - 7) Si calcoli il tempo di propagazione $t_{p,LH}$. Si determinino le regioni di funzionamento dei dispositivi nel primo tratto del transitorio e, ove necessario, nel secondo tratto.

Osservazioni preliminari: il circuito è analogo a un invertitore on MOS a carico resistivo.

La rete di pull-up è costituita dal parallelo fra R_1 e la serie $R_2 - D$.

$$D \text{ OFF}: V_{DD} - V_u < V_g \rightarrow V_u > V_{DD} - V_g$$

$$M \text{ OFF}: V_{GS} = V_i < V_T$$

$$M \text{ SAT}: V_{GS} = V_i < V_{DS} + V_T \rightarrow V_u > V_i - V_T$$

Calcolo coranti, si trova V_u

$$M \text{ OFF} \rightarrow V_i < V_T \rightarrow I_D = 0 \quad \left. \begin{array}{l} I_{R1} + I_{R2} = 0 \\ I_D + I_C = I_{R1} + I_{R2} \end{array} \right\} \xrightarrow{\text{HP: } D \text{ OFF} \rightarrow I_{R2} = 0} I_{R1} = \frac{V_{DD} - V_u}{R_1} = 0 \rightarrow V_u = V_{DD}$$

\star

$$(V_{DD} > V_{DD} - V_T) \quad (\rightarrow \text{HP } \star \text{ OK})$$

$$\rightarrow V_i = 0 \text{ V} \rightarrow V_u = 3.3 \text{ V} \quad M \text{ OFF} \quad D \text{ OFF}$$

M1 ON, SAT, D OFF ($V_u = 3 \text{ V} > V_{DD} - V_g$)

$$V_u = V_{DD} - R_1 I_{R1} \quad \left. \begin{array}{l} I_D = \frac{\beta_m}{2} (V_i - V_T)^2 \\ " \end{array} \right\} \rightarrow V_u = V_{DD} - \frac{\beta_m R}{2} (V_i - V_T)^2 \xrightarrow{V_u = 3 \text{ V}} V_i = \begin{cases} 0.12 \text{ V} (< V_T) \\ 0.47 \text{ V} (\text{OK}) \end{cases}$$

$(V_{GS} < V_{DS} + V_T)$

$$\begin{array}{ll} V_i & V_u \\ " & " \\ 0.47 & 3 \end{array} \quad \begin{array}{ll} V_i & V_u \\ " & " \\ 0.12 & 0.3 \end{array} \quad \left. \begin{array}{l} \text{HP SAT OK} \\ \text{HP } \star \text{ OK} \end{array} \right\}$$

$$\rightarrow V_u = 3 \text{ V} \rightarrow V_i = 0.47 \text{ V} \quad M \text{ SAT}, D \text{ OFF}$$

M1 ON, SAT, D ON

$$\left. \begin{aligned} I_{R1} &= \frac{V_{DD} - V_u}{R_1} \\ I_{R2} &= \frac{V_{DD} - V_d - V_u}{R_2} \\ I_D &= \frac{\beta_m}{2} (V_i - V_T)^2 \\ I_D &= I_{R1} + I_{R2} \end{aligned} \right\} \rightarrow$$

$$\frac{V_{DD} - V_u}{R_1} + \frac{V_{DD} - V_d - V_u}{R_2} = \frac{\beta_m}{2} (V_i - V_T)^2 \xrightarrow{V_u = 1.5} V_i = \begin{cases} -0.54 (< V_T) \\ 1.14 (\text{ok}) \end{cases}$$

$$\begin{aligned} V_{GS} &< V_{DS} + V_T \\ 1.14 &< 1.5 + 0.3 \end{aligned} \quad \begin{matrix} \text{SAT} \\ \text{OK} \end{matrix}$$

M1 ON, LIN, D ON

$$\left. \begin{aligned} I_{R1} &= \dots \\ I_{R2} &= \dots \\ I_D &= \frac{\beta_m}{2} \left| (V_i - V_T) V_u - \frac{V_u^2}{2} \right| \\ I_D &= I_{R1} + I_{R2} \end{aligned} \right\} \rightarrow$$

$$\frac{V_{DD} - V_u}{R_1} + \frac{V_{DD} - V_u - V_T}{R_2} = \frac{\beta_m}{2} \left| (V_i - V_T) V_u - \frac{V_u^2}{2} \right| \xrightarrow{V_u = 0.5} V_i = 1.85 \text{ V}$$

$$\begin{aligned} V_{GS} &> V_{DS} + V_T & \text{LIN} \\ 1.85 &> 0.5 + 0.3 & \text{ON} \end{aligned}$$

$$V_i = 3.3 \quad \begin{aligned} V_u &= \begin{cases} 6.34 (\text{NO: } V_{GS} < V_{DS} + V_T) \\ 0.25 (\text{OK: } V_{GS} > V_{DS} + V_T) \end{cases} \\ &\quad \begin{matrix} " & " \\ 3.3 & 0.25 + 0.3 \end{matrix} \end{aligned}$$

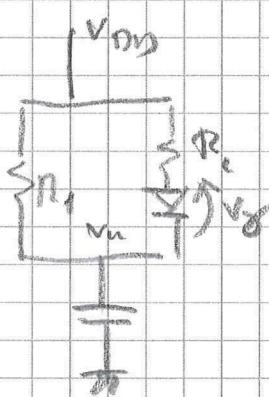
Calcolo V_{TL} : $V_i = V_u \rightarrow V_i < V_u + V_T \rightarrow$ H SAT, HP D ON

$$\frac{V_{DD} - V_u}{R_1} + \frac{V_{DD} - V_T - V_u}{R_2} = \frac{\beta_m}{2} (V_i - V_T) \xrightarrow{V_i = V_u = V_{TL}} V_{TL} = \begin{cases} -1.23 \text{ (NO)} \\ 1.23 \text{ (OK: } V_u < V_{DD} - V_T \rightarrow \text{D ON}) \end{cases}$$

tempo di propagazione t_{PLH} : $V_i : V_H \rightarrow V_L$ istantaneamente.

$$t < 0 : V_i = V_H = V_{DD} \rightarrow V_u = V_L = 0.25 \text{ V}$$

$$t > 0, t \rightarrow \infty \quad V_i = V_L < V_T \rightarrow \text{H OFF} \rightarrow V_u = V_H = V_{DD}$$



$$\frac{V_{DD} - V_u}{R_1} + \frac{V_{DD} - V_T - V_u}{R_2} = C \frac{dV_u}{dt}$$

$$\int_0^{t_{PLH}} dt = \int \frac{C}{\frac{V_{DD} - V_u}{R_1} + \frac{V_{DD} - V_T - V_u}{R_2}} dV_u$$

$V_u(0) = V_L$

$V_u : V_L \longrightarrow V_H$

$$V_{u,50\%} = \frac{V_L + V_H}{2} \approx 1.78 \text{ V} \quad (< V_{DD} - V_T)$$

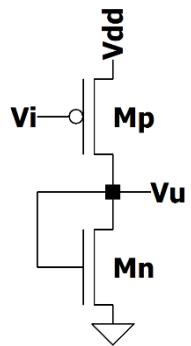
↓
DIODO ON
DURANTE
TUTTO IL TRANS.

$$\rightarrow t_{PLH} = 3.31 \text{ ms}$$

1° tratto H OFF D ON

2° " : non esiste

2) Nel circuito in figura, i transistori sono caratterizzati dai coefficienti β_n e β_p e dalle tensioni di soglia V_{Tn} e V_{Tp} .



$$V_{dd} = 3.5V, \beta_n = 0.2 \frac{mA}{V^2}, \beta_p = 5 \frac{mA}{V^2}, V_{Tn} = 0.3V, V_{Tp} = -0.5V.$$

DOMANDE:

- 1) Si determini il valore basso V_L caratteristico della rete.
 - 2) Si determini il valore alto V_H caratteristico della rete.
 - 3) Al variare di V_i nell'intervallo $[V_L \div V_H]$, si determini il massimo valore assoluto del guadagno di tensione: $|A_V| = \left| \frac{dV_u}{dV_i} \right|$. Si determinino le regioni di funzionamento dei dispositivi in questo caso.
 - 4) Si calcolino i margini di immunità ai disturbi della rete.
 - 5) Assumendo che il segnale di ingresso alterni periodicamente i valori $V_L \div V_H$, con *duty-cycle* pari al 50%, si calcoli la potenza media dissipata dal circuito. Si trascurino i contributi di potenza dinamica
-

Esercizio 2: il circuito rappresenta un invertitore pMOS, la cui rete di pull-down è costituita dal Transistor nMOS. Quest'ultimo, se ON, è necessariamente SAT ($V_{GS} = V_{DS} < V_{DS} + V_T$)

Le regioni di funzionamento del pMOS sono:

$$\text{OFF: } V_{GS} < |V_{TP}| \rightarrow V_i > V_{DD} - |V_{TP}|$$

$\begin{matrix} " \\ V_{DD} - V_i \\ " \\ V_{DD} - V_u \end{matrix}$

$$\text{SAT: } V_{GS} < V_{SD} + |V_{TP}| \rightarrow V_{DD} - V_i < V_{DD} - V_u + |V_{TP}| \rightarrow V_u < V_i + |V_{TP}|$$

$$\text{p OFF} \rightarrow I_{DP} = 0 \quad \left\{ \begin{array}{l} I_{DN} = 0 \xrightarrow{\text{SAT}} \frac{P_{DN}}{2} \left(\frac{V_{GS} - V_{TM}}{V_u} \right)^2 = 0 \rightarrow V_u = V_{TM} = 0.3 \\ I_{DN} = I_{PP} \end{array} \right.$$

per $V_i = 0.3$, supponendo p LIN:

$$I_{DPLH} = I_{DSAT} : \frac{P_D}{2} \left[(V_{DD} - V_i - |V_{TP}|)(V_{DD} - V_u) - \frac{(V_{DD} - V_u)^2}{2} \right] = \frac{P_{DSAT}}{2} (V_u - V_{TM}) \cdot \frac{V_i = 0.3}{V_u} \rightarrow V_u = \begin{cases} -1.86 \text{ (NO)} \\ 3.43 \text{ (ON)} \end{cases}$$

Quindi: $V_H = 3.43$, $V_L = 0.3$

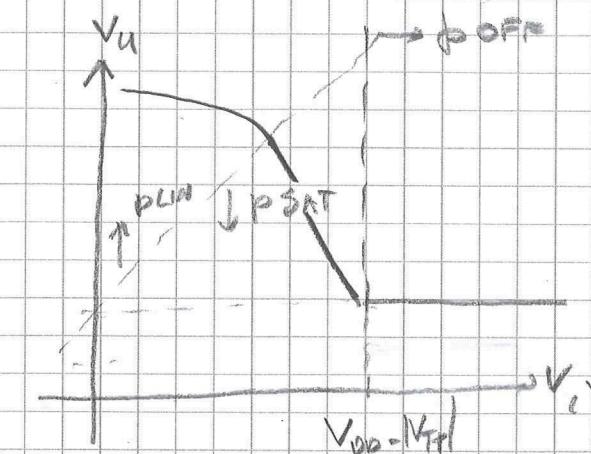
per $V_i = V_H$, $V_u = V_L \rightarrow$ p OFF $\rightarrow I_D = 0 \rightarrow P = 0$ (potenza dissipata)

$V_i = V_L$, $V_u = V_H \rightarrow$ p LIN $\rightarrow I_D = 0.98 \text{ mA} \rightarrow P = 3.42 \text{ mW}$

In SAT, p SAT:

$$\frac{P_{DSAT}}{2} (V_u - V_{TM})^2 = \frac{P_D}{2} \left(V_{DD} - V_i - |V_{TP}| \right)^2 \rightarrow V_u = V_{TM} + \sqrt{\frac{P_D}{P_{DSAT}}} (V_{DD} - V_i - |V_{TP}|) \rightarrow \left| \frac{dV_u}{dV_i} \right| = K_v = \sqrt{\frac{P_D}{P_{DSAT}}} = 5$$

La caratteristica completa è mostrata in figura.



$$\begin{aligned} V_{SG} &> V_{SD} + |V_{TP}| \\ " & \\ V_{DD} - V_i &> V_{DD} - V_u + |V_{TP}| \end{aligned}$$

Il guadagno MAX coincide con la condizione SAT-SAT $\rightarrow |A_{VHMAX}| = 5$

Essere un punto angoloso, di coordinate (V_{IHMIN}, V_{OHMAX})

Quindi:

$$V_{IHMIN} = V_{DD} \cdot |N_{Tp}| = 3 \quad \left. \right\} *$$

$$V_{OHMAX} = V_{TM} = 0.3$$

Il punto di coordinate (V_{IHMAX}, V_{OHMIN}) si trova necessariamente nelle regione PLIN, o SAT.

$$\frac{\beta_m}{2} (V_u - V_{Thm})^2 = \beta_p \left[(V_{DD} - V_i - N_{Tp}) (V_{DD} - V_u) - \frac{(V_{DD} - V_u)^2}{2} \right] \quad \left. \right\} \rightarrow$$

$\downarrow \frac{d}{dV_i}, \frac{dV_u}{dV_i} = -1$

$$2 \frac{\beta_m}{2} (V_u - V_{Thm}) \left(\frac{dV_u}{dV_i} \right) = \beta_p \left[(-1)(V_{DD} - V_u) + (V_{DD} - V_i - N_{Tp}) \left(-\frac{dV_u}{dV_i} \right) - 2 \frac{(V_{DD} - V_u)}{2} \left(-\frac{dV_u}{dV_i} \right) \right]$$

$\frac{dV_u}{dV_i} = -1$

* } $\rightarrow N_{HL} = 0.3 \quad \left. \right\} \rightarrow N_H = 0.3$

$$\left. \begin{array}{l} V_i = 2.38 = V_{IHMAX} \\ V_u = 3.13 = V_{OHMIN} \end{array} \right. \quad \left. \begin{array}{l} N_{HL} = 2.08 \\ N_H = 2.08 \end{array} \right. \quad \left. \begin{array}{l} N_{HL} = 0.3 \\ N_H = 0.3 \end{array} \right.$$

(Scartando l'altra radice)

In fine la potenza media deriva dai intervalli equivalenti
a potenze istantanee cost.

$$V_i = V_H \rightarrow P = 0$$

$$V_i = V_L \rightarrow P = 3.42 \text{ mW}$$

]

→

$$\tilde{P} = \frac{1}{T} \int_{T_1}^{T_2} dt = \frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} P(V_i = V_L) dt + \frac{1}{T} \int_{\frac{T}{2}}^T P(V_i = V_H) dt$$

$$= \frac{\pi/2}{\pi} \cdot 3.42 \text{ mW} = 1.71 \text{ mW}$$