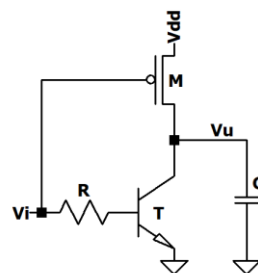


PROVA SCRITTA DI ELETTRONICA
19 GIUGNO 2023

1) Nel circuito in figura il transistor T è descritto da un modello a soglia, con $V_T = 0.75 \text{ V}$ e $V_{CE,sat} = 0.2 \text{ V}$, mentre M è caratterizzato dal coefficiente β_p e dalla tensione di soglia V_{Tp} .



$$V_{dd} = 3.5 \text{ V}, \beta_F = 100, R = 10 \text{ k}\Omega, \beta_p = 5 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2}, V_{Tp} = -0.4 \text{ V}.$$

Il valore della capacità C è assegnato in maniera casuale durante lo svolgimento della prova. Nella traccia che segue, si assume $C = 3 \text{ pF}$

Il circuito rappresenta un invertitore, la cui rete di pull-down è analoga a quella di un invertitore RTL, mentre la rete di pull-up è analoga a quella di un invertitore CMOS.

Determinare il valore V_H caratteristico della rete.

Per $V_i = V_L$, HP: $V_L < V_T$ (*)
 $T \text{ OFF} \rightarrow I_C = 0 \rightarrow I_D = 0 \xrightarrow{\text{HP: M L/N (**)}} V_{SD} = V_{DD} - V_u = 0 \rightarrow \boxed{V_u = V_H = V_{DD}}$

Determinare il valore V_L caratteristico della rete.

$V_i = V_H = V_{DD}$
 $T \text{ ON} \xrightarrow{\text{HP: SAT (***)}} \boxed{V_u = V_{CE,sat} = V_L}$
 Verifica IPOTESI:
 $V_L = V_{CE,sat} < V_T \rightarrow (*) \text{ OK}$
 $V_i = V_L \rightarrow \begin{cases} V_{SG} = V_{DD} - V_{CE,sat} \\ V_{SD} = V_{DD} - V_{DD} = 0 \end{cases} \rightarrow V_{SG} > V_{SD} + V_T \rightarrow (***) \text{ OK}$
 $V_i = V_H \rightarrow \begin{cases} I_B = \frac{V_{DD} - V_T}{R} \\ V_{SG} = V_{DD} - V_{DD} = 0 \rightarrow M \text{ OFF} \rightarrow I_D > I_C = 0 \end{cases} \rightarrow I_C < \beta_F I_B \rightarrow (**) \text{ OK}$

Determinare il tempo di propagazione $t_{p,LH}$ caratteristico della rete.

Il tempo richiesto è il tempo associato al transitorio di carica del condensatore di uscita tramite la corrente di pull-up erogata dal pMOS. Il calcolo è analogo a quello già condotto per l'invertitore CMOS ad eccezione del valore di ingresso $V_i = V_L = V_{CE,sat} \rightarrow V_{SG} = V_{dd} - V_{CE,sat}$ e, corrispondentemente, della diversa escursione.

$V_u: V_L \xrightarrow{\text{M SAT (A)}} V_T \xrightarrow{\text{M L/N (B)}} \frac{V_H + V_L}{2} = 1.85 \text{ V} = V_{u,ss}$
 $V_u(t) = V_T$
 transitorio (A):
 $I_D = \frac{\beta_p}{2} (V_{DD} - V_{CE,sat} - V_T)^2 = C \frac{dV_u}{dt} \rightarrow \int_0^{t_1} dt = \int_{V_L}^{V_T} \frac{2C}{\beta_p (V_{DD} - V_{CE,sat} - V_T)^2} dV_u$
 $\rightarrow t_1 = 28.53 \text{ ps}$
 transitorio (B):
 $I_D = \beta_p \left[(V_{DD} - V_{CE,sat} - V_T)(V_{DD} - V_u) - \frac{(V_{DD} - V_u)^2}{2} \right] = C \frac{dV_u}{dt} \rightarrow \int_{t_1}^{t_2} dt = \int_{V_T}^{V_{u,ss}} \frac{C}{\beta_p \{ \dots \}} dV_u$
 $\rightarrow t_2 = 219.41 \text{ ps} \rightarrow \boxed{t_{p,LH} = t_1 + t_2 = 247.95 \text{ ps}}$

Determinare il tempo di propagazione $t_{p,HL}$ caratteristico della rete.

Il tempo richiesto è il tempo associato al transitorio di scarica del condensatore di uscita tramite la corrente di pull-down erogata dal BJT. Nell'intervallo di interesse, T è sempre in AD:

$$t_{pHL} : V_i = V_H \rightarrow TON, MOFF$$

transitorio di scarica di C attraverso I_C : $I_C = -C \frac{dV_C}{dt}$

$$V_u: V_H \xrightarrow{T \text{ AD, M OFF}} V_{u, 50\%}$$

$$I_C = \beta_F \bar{I}_B = \beta_F \frac{(V_{DD} - V_{CE})}{R_B} = -C \frac{dV_{CE}}{dt} \rightarrow$$

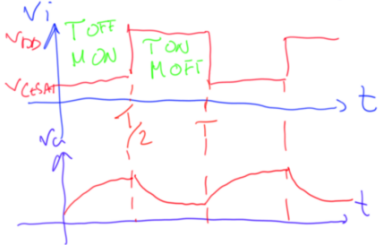
$$\rightarrow \int_0^{t_{PHL}} dt = \int_{V_{DD}}^{V_{CE, 50\%}} \left(\frac{-C R_B}{\beta_F (V_{DD} - V_{CE})} \right) dV_{CE} \rightarrow t_{PHL} = 180 \text{ ps}$$

Si assuma che il segnale di ingresso alterni periodicamente i valori V_H e V_L , con periodo $T=2\text{ ns}$ e duty cycle pari al 50%. **Determinare la potenza dinamica media richiesta al generatore V_{dd} .**

Si trascurino la potenza "di corto circuito" e la potenza associata alla corrente di ingresso.

Potenze statiche: (analogo a teoria eros)

$$\hat{P}_{old} = \hat{P}_{PHOS} + \hat{P}_{BJT} + \cancel{\hat{P}_c}$$



$$\Phi_{\text{PMWS}} = \frac{1}{T} \int_0^T I_D \cdot V_{SD} dt =$$

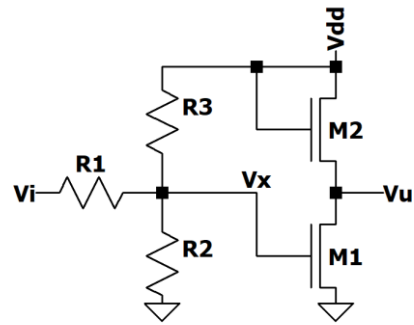
$$= \frac{1}{T} \int_{V_{u(0)} = V_{CESAT}}^{V_u(T/2) = V_{DD}} C (V_{DD} - V_u) dV_u = \frac{2C}{T} (V_{DD} - V_{CESAT})^2 = 32.67 \text{ mW}$$

$$P_{BJT} = \frac{1}{T} \int_0^T I_C V_{CE} dt = \frac{1}{T} \left\{ \int_0^{T_2} I_C V_{CE} dt + \int_{\frac{1}{2}T}^T I_C V_{CE} dt + \int_{\frac{1}{2}T}^{\frac{1}{2}T} \frac{C dv_u}{dt} v_u dt \right\} = -\frac{C}{T} \int_{V_{DD}}^{V_{CESAT}} v_u dv_u = -\frac{2C}{T} (V_{CESAT}^2 - V_{DD}^2) = 36.67 \text{ mW}$$

$\rightarrow \tilde{P}_{dd} = 69.3 \text{ mm}$

2) Nel circuito in figura i transistori sono caratterizzati dai coefficienti β_1 e β_2 e dalle tensioni di soglia $V_{T1} = V_{T2} = V_T$.

Si determini la caratteristica statica $V_u(V_i)$, descritta dai punti richiesti nel seguito.



$$V_{dd} = 5 \text{ V}, \beta_1 = 2 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2}, \beta_2 = 0.2 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2}, V_T = 0.5 \text{ V}, R_1 = 1 \text{ k}\Omega, R_2 = 10 \text{ k}\Omega, R_3 = 10 \text{ k}\Omega.$$

Il circuito è un invertitore CMOS a carico saturato, con ingresso V_x .

$I_1 + I_3 = I_2$
 $\frac{V_i - V_x}{R_1} + \frac{V_{DD} - V_x}{R_3} = \frac{V_x}{R_2} \rightarrow V_x = 0.417 + 0.833 V_i$

$V_i = 0 \text{ V} \rightarrow V_x = 0.417 \text{ V} < V_T \rightarrow M1 \text{ OFF} \rightarrow I_{D1} = I_{D2} = 0 \rightarrow M1 \text{ SAT/OFF} \rightarrow V_u = V_{DD} - V_T = 4.5 \text{ V}$

$V_i = 0.4 \text{ V} \rightarrow V_x = 0.75 \text{ V} > V_T \rightarrow M1 \text{ ON, SAT} (*) \rightarrow I_{D1} = \frac{\beta_1}{2} (V_x - V_T)^2 = I_{D2} = \frac{\beta_2}{2} (V_{DD} - V_u - V_T)^2 \rightarrow V_u = 3.71 \text{ V} (* \text{ OK})$

$V_i = 1 \text{ V} \rightarrow V_x = 1.25 \text{ V} \rightarrow M1 \text{ ON, SAT} (*) \rightarrow \dots \rightarrow V_u = 2.13 \text{ V} \quad M1 \text{ SAT, } M2 \text{ SAT}$

$V_i = 2 \text{ V} \rightarrow V_x = 2.083 \text{ V} \rightarrow M1 \text{ ON, LIN} \rightarrow \dots \rightarrow V_u = 0.593 \text{ V} \quad M1 \text{ LIN, } M2 \text{ SAT}$

$V_i = 3.5 \text{ V} \rightarrow V_x = 3.33 \text{ V} \rightarrow M1 \text{ ON, LIN} \rightarrow \dots \rightarrow V_u = 0.362 \text{ V} \quad M1 \text{ LIN, } M2 \text{ SAT}$

$V_i = 5 \text{ V} \rightarrow V_x = 4.583 \text{ V} \rightarrow M1 \text{ ON, LIN} \rightarrow \dots \rightarrow V_u = 0.23 \text{ V} \quad M1 \text{ LIN, } M2 \text{ SAT}$