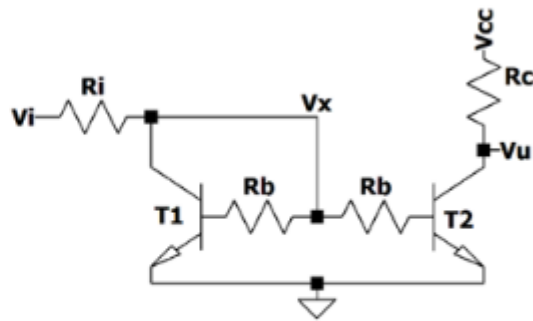


**Esercizio 1**

Nel circuito in figura, i transistori bipolari sono descritti da un modello a soglia, con  $V_T = 0.75$  V e  $V_{CE,sat} = 0.2$  V.



$$V_{CC} = 5V, \beta_F = 100, R_b = 12\text{ k}\Omega, R_i = 1\text{ k}\Omega.$$

Per rispondere alle domande successive, è utile tracciare la caratteristica statica  $V_u(V_i)$ . A questo scopo, si determinino le affermazioni preliminari esatte, fra le seguenti:

- ☐ T1 ON implica T2 ON, ma non viceversa
- ☐ T2 ON implica T1 ON, ma non viceversa
- ☒ T1 ON implica T2 ON e viceversa
- ☒ T1 non può saturare
- ☐ T2 non può saturare

Calcolo caratteristica statica:

T1, T2 OFF:

$$\left. \begin{aligned} V_x &= V_i - R_i I_{R_i} \\ I_{E1} + I_{B1} + I_{B2} &= 0 \end{aligned} \right\} \rightarrow V_x = V_i$$

$$\left. \begin{aligned} V_{BE1} &= V_x - R_b I_{B1} \\ V_{BE2} &= V_x - R_b I_{B2} \end{aligned} \right\} \rightarrow V_{BE1} = V_{BE2} = \boxed{V_i < V_T}$$

$$V_u = V_{CC} - R_c I_{C2} \rightarrow \boxed{V_u = V_{CC}}$$

T1, T2 ON, AD

$$V_i - R_i I_{Ri} = V_x$$

$$I_{C1} + I_{B1} + I_{B2}$$

$$\beta I_{B1}$$

$$(\beta+1)I_{B1}$$

$$I_{B1} = \frac{V_x - V_0}{R_B}$$

$$I_{B2} = \frac{V_x - V_0}{R_B}$$

$$\rightarrow I_{B1} = I_{B2}$$

$$\rightarrow V_x = V_i - (\beta+2)I_B = V_0 + R_B I_B \rightarrow$$

$$\rightarrow V_x = 0.105 V_i + 0.671$$

$$I_B = \frac{V_x - V_0}{R_B} \rightarrow I_{C2} = \frac{\beta(V_x - V_0)}{R_B}$$

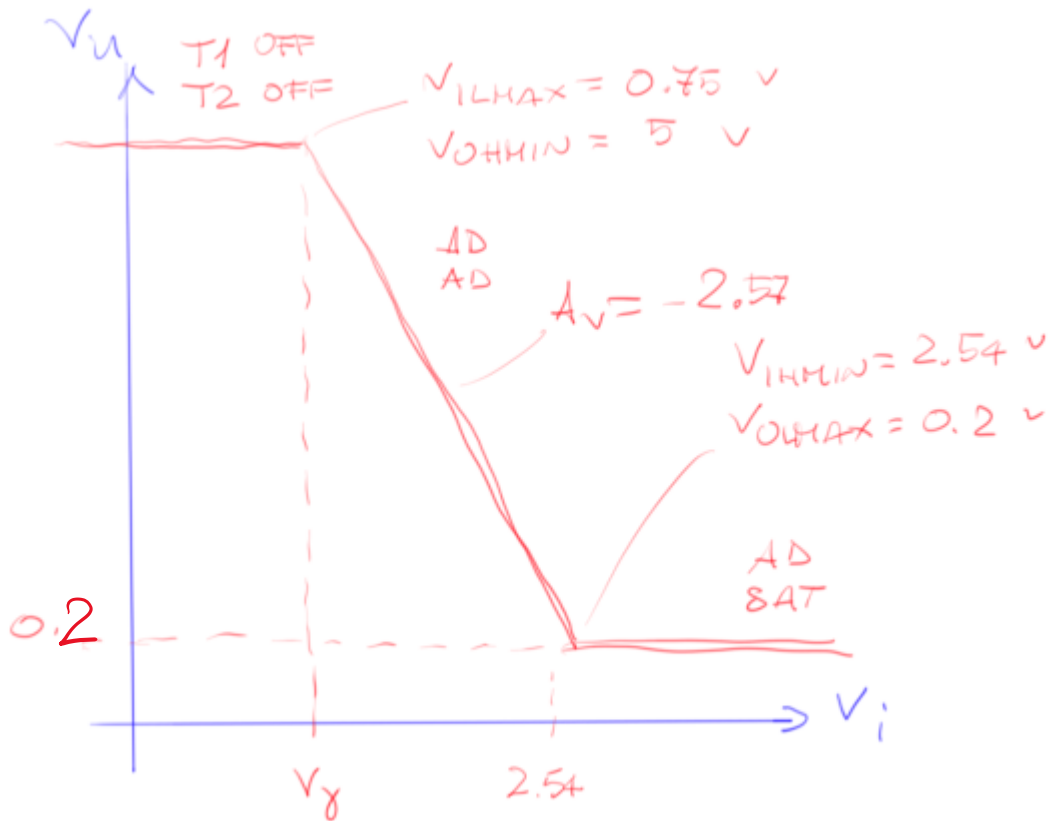
$$\rightarrow V_u = V_{CC} - \frac{\beta R_C}{R_B} (V_x - V_0) = -2.63 V_i + 6.97$$

Vale fino a T2: AD  $\rightarrow$  SAT  $\rightarrow V_u = V_{CESAT}$

$$V_i = 2.57 \text{ V}$$

T1 AD, T2 SAT:

$$V_u = V_{CE2} = V_{CESAT}$$



Assumendo  $R_c = 3k\Omega$ , si determini il valore basso dell'uscita  $V_L$ .

Si indichi il valore in Volt, con 2 cifre decimali.

Risposta: 8.20

Assumendo  $R_c = 3k\Omega$ , si determini il valore alto dell'uscita  $V_H$ .

Si indichi il valore in Volt, con 2 cifre decimali.

Risposta: 5.00

Assumendo  $R_c = 3k\Omega$ , si determini il massimo valore del guadagno di tensione  $|A_v| = \left| \frac{dV_u}{dV_i} \right|$  nell'intervallo  $V_i \in [0 \div V_{dd}]$ .

Si indichi il valore con 2 cifre decimali.

Risposta: 2.57

Assumendo  $R_c = 3k\Omega$ , si determini il valore di  $V_{iLmax}$ .

Si indichi il valore in V, con 2 cifre decimali.

Risposta:

0.75

Assumendo  $R_c = 3k\Omega$ , si determini il valore di  $V_{iHmin}$ .

Si indichi il valore in V, con 2 cifre decimali.

Risposta:

2.54

Assumendo  $R_c = 3k\Omega$ , si determini il valore di  $V_{oLmax}$ .

Si indichi il valore in V, con 2 cifre decimali.

Risposta:

0,20

Assumendo  $R_c = 3k\Omega$ , si determini il valore di  $V_{oHmin}$ .

Si indichi il valore in V, con 2 cifre decimali.

Risposta:

5.00

In generale, nel tratto di guadagno massimo:

$$V_u = V_{cc} - \frac{\beta_F R_c}{R_B} I_B = 5 + \frac{R_c}{1000} (0.66 - 0.88 v_i)$$

$$\rightarrow A_v = - \frac{0.88}{1000} R_c = -4 \rightarrow R_c = 4.56 \text{ k}\Omega$$

Si determini il valore da assegnarsi alla resistenza  $R_c$  in modo tale che il massimo valore del guadagno di tensione  $|A_v| = \left| \frac{dV_o}{dV_i} \right|$  nell'intervallo

$V_i \in [0 \div V_{dd}]$  sia pari a 4.

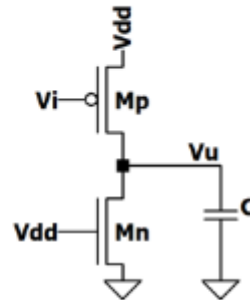
Si indichi il valore in  $k\Omega$ , con 2 cifre decimali.

Risposta:

4.56

## Esercizio 2

Nel circuito in figura, i transistori sono caratterizzati dai coefficienti  $\beta_n$  e  $\beta_p$  e dalle tensioni di soglia  $V_{Tn} = |V_{Tp}| = V_T$ .



$$V_{dd} = 2.9 \text{ V}, \beta_n = 0.5 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2}, \beta_p = 4.5 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2}, V_T = 0.3 \text{ V}, C = 7 \text{ pF}.$$

Il circuito è un invertitore "pseudo p-mos", con  $M_p$  a pull-up e  $M_n$  a pull-down.

$$V_{GSn} = V_{DD} \rightarrow M_n \text{ sempre ON}$$

$$V_{DSn} = V_u \rightarrow \text{in SAT se } V_{DD} < V_u + V_T \rightarrow V_u > V_{DD} - V_T = 2.6 \text{ V}$$

$$V_{SGp} = V_{DD} - V_i \rightarrow p \text{ OFF se } V_{DD} - V_i < V_T \rightarrow V_i > V_{DD} - V_T$$

$$V_{SDp} = V_{DD} - V_u \rightarrow p \text{ SAT se } V_{DD} - V_i < V_{DD} - V_u + V_T \rightarrow V_u < V_i + V_T$$

Se  $V_H > 2.6$  <sup>HP</sup>  $\rightarrow p \text{ OFF} \rightarrow I_p = 0$   $\rightarrow V_i = V_H > 2.6 \rightarrow I_{Dn} = 0$  <sup>HP</sup>  $\rightarrow m \text{ L/V}$   $\leftarrow OK$

KCL  $\rightarrow I_{Dp} = I_{Dn} + I_C$

$I_C = C \frac{dV_u}{dt}$

$0 \text{ (STATICO)}$

$V_{DS} = V_u = 0 = V_L$

$V_{GSn} > V_{DSn} + V_T$

$V_{DD} > 0 + V_T$

$$V_i = V_L = 0 < 2.6 \rightarrow p \text{ ON}, \boxed{\text{HP LIN}}^{***}$$

$$I_p = \beta_p \left\{ (V_{DD} - V_i - V_T)(V_{DD} - V_u) - \frac{(V_{DD} - V_u)^2}{2} \right\} \xrightarrow{I_n = I_p} V_u = \begin{cases} -2.15 \text{ (no; } V_{DS} < 0) \\ \boxed{2.75} \end{cases}$$

$$I_m = \beta_m \frac{(V_{DD} - V_T)^2}{2} = 1.69 \text{ mA} \quad (\text{SAT ok})$$

$$V_u = 2.75 \text{ V} = V_H \text{ soddisfa tutte le ipotesi}$$

$$V_H > 2.6 \rightarrow * \text{ OK}$$

$$\begin{aligned} V_{SGP} &= V_{DD} - V_L = V_{DD} \\ V_{SDP} &= V_{DD} - V_H = 2.9 - 2.75 = 0.15 \\ V_{GSM} &= V_{DD} < V_{DSM} + V_T \rightarrow 2.9 < 3.05 \rightarrow *** \text{ OK} \end{aligned} \quad \left. \begin{aligned} &\rightarrow V_{SGP} > V_{SDP} + V_T \rightarrow *** \text{ OK} \end{aligned} \right\}$$

Potenza statica:

$$V_i = V_H, V_u = V_L \rightarrow p \text{ OFF} \rightarrow I_D = 0 \rightarrow \tilde{P} = 0$$

$$V_i = V_L, V_u = V_H \rightarrow p \text{ LIN, n SAT} \rightarrow I_D = 1.69 \text{ mA} \rightarrow$$

$$\rightarrow \tilde{P} = \frac{1}{T} \left\{ \int_0^{T/2} 0 \cdot V_{DD} dt + \int_{T/2}^T 1.69 \cdot 10^{-3} \cdot 2.9 dt \right\} = \boxed{2.45 \text{ mW}}$$

Si determini il valore basso  $V_L$  caratteristico della rete.

Si indichi il valore in V, con 2 cifre decimali.

Risposta:

0

Con riferimento al punto precedente, si determinino le regioni di funzionamento dei transistori per  $V_i = V_H, V_u = V_L$ .

- ☐ n OFF
- ☐ n SAT
- ☒ n LIN
- ☒ p OFF
- ☐ p SAT
- ☐ p LIN

Si determini il valore alto  $V_H$  caratteristico della rete.

Si indichi il valore in V, con 2 cifre decimali.

Risposta:

2.75

Con riferimento al punto precedente, si determinino le regioni di funzionamento dei transistori per  $V_i = V_L$ ,  $V_u = V_H$ .

- ☐ n OFF
- ☒ n SAT
- ☐ n LIN
- ☐ p OFF
- ☐ p SAT
- ☒ p LIN

Assumendo che il segnale di ingresso alterni periodicamente i valori  $V_H$  e  $V_L$ , con *duty-cycle*=50%, si determini il consumo medio di potenza statica.

Si indichi il valore in mW, con 2 cifre decimali.

Risposta:

2.45

$$\left. \begin{array}{l} V_H = 2.75 \\ V_L = 0 \end{array} \right\} \rightarrow V_{u,50\%} = \frac{V_H + V_L}{2} = 1.375V$$

$t_{pHL}$ :  $V_i: V_H \rightarrow V_L$  istantaneamente  $\rightarrow$  p OFF

$$V_u: V_L \rightarrow V_H$$

Scarica del condensatore tramite  $I_m$ :  $I_m = -C \frac{dV_u}{dt}$

$$V_u: V_H \xrightarrow{(a) \text{ n SAT}} V_{DD} - V_T \xrightarrow{(b) \text{ n LIN}} V_{u,50\%}$$

$$(a) I_n = \frac{\beta_n}{2} (V_{DD} - V_T)^2 = -C \frac{dV_u}{dt} \rightarrow \int_0^{t_1} dt = \int_{\frac{\beta_n}{2}(V_{DD}-V_T)^2}^{\frac{\beta_n}{2}(V_{DD}-V_T)^2} dV_u \rightarrow t_1 = 0.63ms$$

$$(b) I_m = \beta_n \left\{ (V_{DD} - V_T) V_u - \frac{V_u^2}{2} \right\} \rightarrow \int_{t_1}^{t_{pHL}} dt = \int_{V_{DD}-V_T}^{V_{u,50\%}} \frac{-C}{\beta_n \left\{ (V_{DD} - V_T) V_u - \frac{V_u^2}{2} \right\}} dV_u$$

$$\rightarrow t_{pHL} = 6.13 \text{ ns}$$

Assumendo che il segnale di ingresso commuti istantaneamente da  $V_L$  a  $V_H$ , si determini il tempo di propagazione  $t_{pHL}$ .

Si indichi il valore in ns, con 2 cifre decimali.

Risposta:

6.13

Con riferimento al tempo  $t_{pHL}$  calcolato al punto precedente, si determinino le regioni di funzionamento dei transistori nel primo tratto del transitorio.

- ☐ n OFF
- ☒ n SAT
- ☐ n LIN
- ☒ p OFF
- ☐ p SAT
- ☐ p LIN

Con riferimento al tempo  $t_{pHL}$  calcolato al punto precedente, si determinino le regioni di funzionamento dei transistori nel secondo tratto del transitorio.

- ☐ n OFF
- ☐ n SAT
- ☒ n LIN
- ☒ p OFF
- ☐ p SAT
- ☐ p LIN
- ☐ non esiste un secondo tratto del transitorio



$t_{pLH}$ :  $V_i: V_H \rightarrow V_L \rightarrow p$  ON istantaneamente: SAT se  $V_u < V_T$   
 n ON SAT se  $V_u > V_{DD} - V_T$

$V_u$ :  $V_L \xrightarrow[p \text{ LIN}]{p \text{ SAT} \text{ n LIN}} V_T \xrightarrow[p \text{ LIN}]{p \text{ LIN} \text{ n LIN}} V_{u, 50\%}$

(a) (b)

(a):  $I_p = I_c + I_m \rightarrow C \frac{dV_u}{dt} = I_p - I_m = \frac{\beta_p}{2} (V_{DD} - V_L - V_T)^2 - \beta_n \left( (V_{DD} - V_T) V_u - \frac{V_u^2}{2} \right)$

$\rightarrow \int_0^{t_1} dt = \int_{V_L}^{V_T} \frac{C}{I_p - I_m} dV_u \rightarrow t_1 = 0.14 \text{ ns}$

(b)  $\rightarrow C \frac{dV_u}{dt} = I_{pLIN} - I_{nLIN} = \beta_p \left\{ (V_{DD} - V_L - V_T)(V_{DD} - V_u) - \frac{(V_{DD} - V_u)^2}{2} \right\} - \beta_n \left\{ (V_{DD} - V_T) V_u - \frac{V_u^2}{2} \right\}$

$\rightarrow \int_{t_1}^{t_{pLH}} dt = \int_{V_T}^{V_{u, 50\%}} \frac{C}{I_{pLIN} - I_{nLIN}} dV_u \rightarrow t_{pLH} = 0.7 \text{ ns}$

Assumendo che il segnale di ingresso commuti istantaneamente da  $V_H$  a  $V_L$ , si determini il tempo di propagazione  $t_{p,LH}$ .

Si indichi il valore in ns, con 2 cifre decimali.

Risposta:

0.7

Con riferimento al tempo  $t_{p,LH}$  calcolato al punto precedente, si determinino le regioni di funzionamento dei transistori nel primo tratto del transitorio.

- ☐ n OFF
- ☐ n SAT
- ☒ n LIN
- ☐ p OFF
- ☒ p SAT
- ☐ p LIN

Con riferimento al tempo  $t_{p,LH}$  calcolato al punto precedente, si determinino le regioni di funzionamento dei transistori nel secondo tratto del transitorio.

- ☐ n OFF
- ☐ n SAT
- ☒ n LIN
- ☐ p OFF
- ☐ p SAT
- ☒ p LIN
- ☐ non esiste un secondo tratto del transitorio