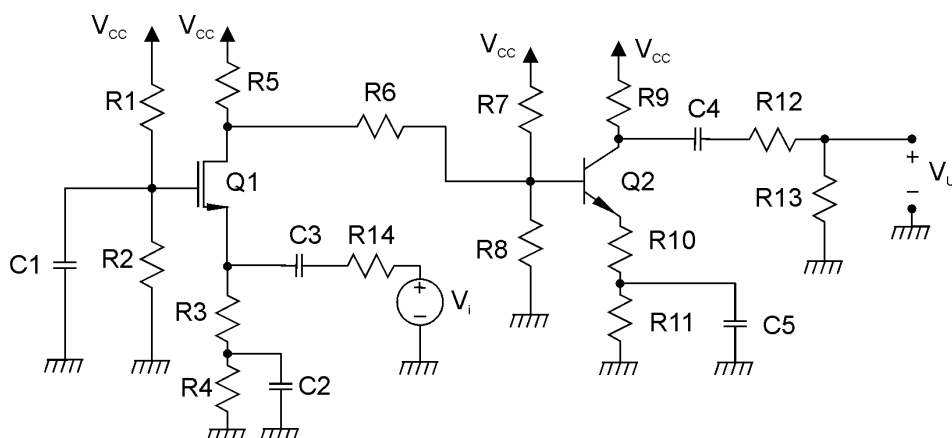


ELETTRONICA DIGITALE

Corso di Laurea in Ingegneria Informatica

Prova scritta del 19 febbraio 2024

Esercizio A



$R1 = 40 \text{ k}\Omega$	$R2 = 20 \text{ k}\Omega$	$R3 = 500 \Omega$	$R5 = 10 \text{ k}\Omega$	$R6 = 290 \Omega$	$R7 = 9300 \Omega$	$R8 = 870 \text{ k}\Omega$
$R9 = 2.5 \text{ k}\Omega$	$R10 = 350 \Omega$	$R11 = 3.65 \text{ k}\Omega$	$R12 = 100 \Omega$	$R13 = 7.9 \text{ k}\Omega$	$R14 = 50 \Omega$	$V_{CC} = 18 \text{ V}$

Q1 è un transistor MOS a canale n resistivo con $V_T = 1 \text{ V}$ e la corrente di drain in saturazione data da $I_D = k(V_{GS} - V_T)^2$ con $k = 0.5 \text{ mA/V}^2$. Q2 è un transistor BJT BC109B resistivo con $h_{re} = h_{oe} = 0$.

Con riferimento al circuito in figura:

- 1) Calcolare il valore della resistenza R4 in modo che, in condizioni di riposo, la tensione sul collettore di Q2 sia 13 V. Determinare, inoltre, il punto di riposo dei due transistori e verificare la saturazione di Q1.
- 2) Determinare l'espressione e il valore di V_U/V_i alle frequenze per le quali i condensatori possono essere considerati dei corto circuiti.

Esercizio B

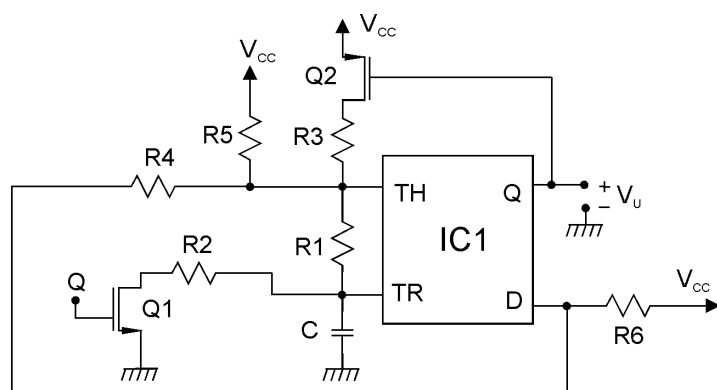
Progettare una porta logica in tecnologia CMOS, utilizzando la tecnica della pull-up network e della pull-down network, che implementi la funzione logica:

$$Y = \bar{A} \cdot (\bar{B} + \bar{C}) + C \cdot (D + \bar{E})$$

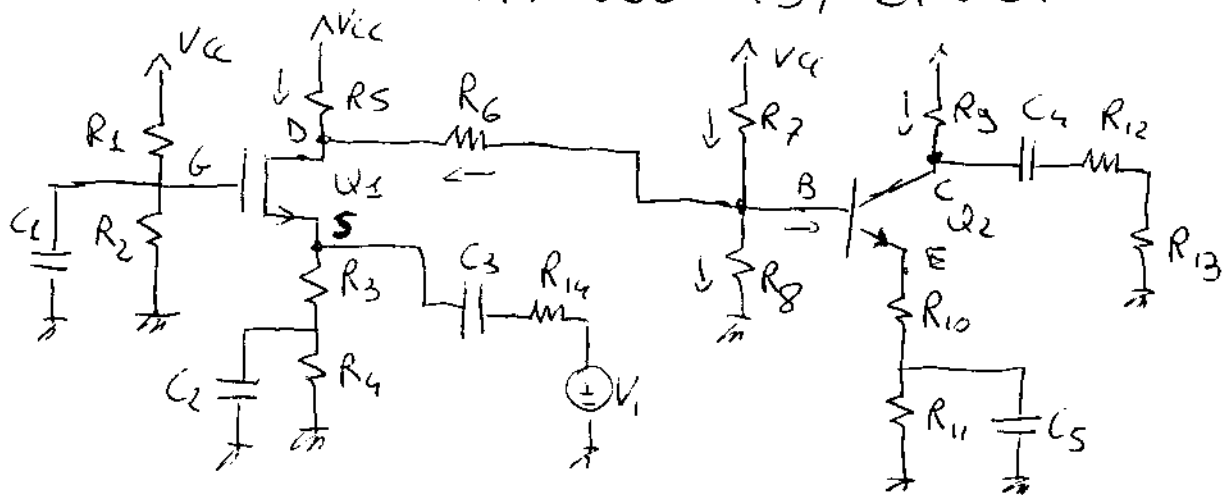
Determinare il numero dei transistori necessari e disegnarne lo schema completo. Dimensionare inoltre il rapporto (W/L) di tutti i transistori, assumendo, per l'inverter di base, W/L pari a 2 per il MOS a canale n e pari a 5 per quello a canale p. Si specifichino i dettagli della procedura di dimensionamento dei transistori.

Esercizio C

$R1 = 200 \Omega$	$R5 = 2 \text{ k}\Omega$
$R2 = 4.8 \text{ k}\Omega$	$R6 = 1.8 \text{ k}\Omega$
$R3 = 2 \text{ k}\Omega$	$C = 0.22 \mu\text{F}$
$R4 = 200 \Omega$	$V_{CC} = 6$



Il circuito IC1 è un NE555 alimentato a $V_{CC} = 6 \text{ V}$; Q1 ha $R_{on} = 0$ e $V_{Tn} = 1 \text{ V}$; Q2 ha $R_{on} = 0$ e $V_{Tp} = -1 \text{ V}$. Verificare che il circuito si comporta come un multivibratore astabile e determinare la frequenza del segnale di uscita.



$$\begin{aligned} R_1 &= 40 \text{ k}\Omega \\ R_2 &= 20 \text{ k}\Omega \\ R_3 &= 500 \Omega \\ R_5 &= 10 \text{ k}\Omega \\ R_6 &= 290 \Omega \\ R_7 &= 9300 \Omega \\ R_8 &= 870 \text{ k}\Omega \\ R_9 &= 2.5 \text{ k}\Omega \\ R_{10} &= 350 \Omega \\ R_{11} &= 3650 \Omega \\ R_{12} &= 100 \Omega \\ R_{13} &= 7.3 \text{ k}\Omega \\ R_{14} &= 50 \Omega \end{aligned}$$

1) Det. R_4 PER $V_C = 13 \text{ V}$

$$I_g = I_c = \frac{V_{CC} - V_C}{R_g} = 2 \text{ mA}$$

$$h_p: I_B \ll I_C \Rightarrow I_E \approx I_C$$

$$V_E = (R_{10} + R_{11}) I_C = 8 \text{ V}$$

$$V_{CE} = V_C - V_E = 5 \text{ V}$$

Q_2 SI TROVA NEL PUNTO DI LAVORO $I_C = 2 \text{ mA}$ E $V_{CE} = 5 \text{ V}$ PER IL

QUALE IL COSTRUTTORE FORNISCE I SEGUENTI PARAMETRI:

$$h_{FE} = 290, h_{ie} = 4.8 \text{ k}\Omega; h_{fe} = 300$$

$$I_B = \frac{I_C}{h_{FE}} = 6.89655 \mu\text{A} \Rightarrow I_B \ll I_C \text{ h.p. CONFERMATO}$$

$$V_B = V_E + V_{BE} = 8.7 \text{ V}$$

$$I_8 = \frac{V_B}{R_8} = 10 \mu\text{A}$$

$$I_7 = \frac{V_{CC} - V_B}{R_7} = 1 \text{ mA}$$

$$I_6 = I_7 - I_8 - I_B = 9.831 \times 10^{-4} \text{ A}$$

$$V_D = V_B - R_6 I_6 = 8.415 \text{ V}$$

$$I_5 = \frac{V_{CC} - V_D}{R_5} = 958.5 \mu\text{A}$$

$$I_D = I_S + I_6 = 1.9416 \text{ mA}$$

(2)

hp: Q_1 SATURO $\Rightarrow I_D = K (V_{GS} - V_T)^2$

$$V_{GS} = V_T \pm \sqrt{\frac{I_D}{K}} \quad \text{SCELGO SOLUZIONE CON IL SEGNO "+" PERCHÉ}$$

Q_1 È UN NPNOS E QUINDI CONDUCE PER $V_{GS} \geq V_T$

$$V_{GS} = V_T + \sqrt{\frac{I_D}{K}} = 2.97 \text{ V}$$

$$I_6 = 0 \Rightarrow I_D = I_S = 1.9416 \text{ mA}$$

$$V_S = I_S (R_3 + R_4) =$$

$$V_G = V_{CC} \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 6 \text{ V}$$

$$V_S = V_G - V_{GS} = 6 - 2.97 = 3.03 \text{ V}$$

$$R_4 = \frac{V_S}{I_S} - R_3 = \underline{\underline{1060.57 \Omega}}$$

$$V_{DS} = V_D - V_S = 5.385 \text{ V}$$

VERIFICA SATURAZIONE: $V_{DS} \stackrel{?}{\geq} V_{GS} - V_T$

$$5.385 \text{ V} > 1.97 \text{ V} \text{ hp VERIFICATA}$$

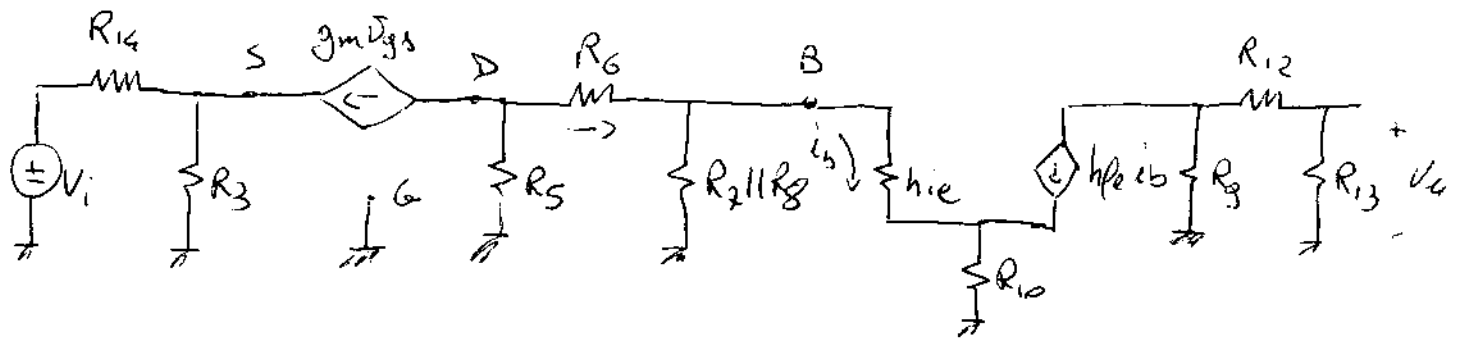
$$g_m = 2K(V_{GS} - V_T) = 1.97 \times 10^{-3} \text{ A/V}$$

$$Q_1: \begin{cases} I_D = 1.94 \text{ mA} \\ V_{DS} = 5.385 \text{ V} \\ V_{GS} = 2.97 \text{ V} \\ g_m = 1.97 \text{ mA/V} \end{cases}$$

$$Q_2: \begin{cases} I_C = 2 \text{ mA} \\ V_{CE} = 5 \text{ V} \\ I_B = 6.8355 \mu\text{A} \\ h_{ie} = 4.8 \text{ k}\Omega \\ h_{fe} = 300 \end{cases}$$

2) DET. V_u/V_i PER C_1, C_2, C_3, C_4, C_5 CORTOCIRCUITATI

(3)



$$V_u = (-h_{fe} i_b) \frac{R_9}{R_9 + R_{12} + R_{13}} \cdot R_{13}$$

$$i_b = i_6 \frac{R_7 \parallel R_8}{(R_7 \parallel R_8) + h_{ie} + R_{10}(h_{fe} + 1)} = i_6 \frac{R_7 \parallel R_8}{(R_7 \parallel R_8) + R_v}$$

$$R_v = h_{ie} + R_{10}(h_{fe} + 1) = 110150 \Omega$$

$$i_6 = (-g_m \bar{V}_{gs}) \frac{R_5}{R_5 + R_6 + R_7 \parallel R_8 \parallel R_v} \Rightarrow i_6 = g_m \bar{V}_{gs} \frac{R_5}{R_5 + R_6 + R_7 \parallel R_8 \parallel R_v}$$

$$\bar{V}_{gs} = \phi \Rightarrow \bar{V}_{gs} = -\bar{V}_s$$

$$\bar{V}_s = \frac{V_i}{R_{14} + R_3 \parallel \frac{1}{g_m}} \left(R_3 \parallel \frac{1}{g_m} \right) \left\{ \bar{V}_s = V_i \frac{\frac{R_3}{1 + g_m R_3}}{R_{14} + \frac{R_3}{1 + g_m R_3}} = V_i \frac{R_3}{R_{14}(1 + g_m R_3) + R_3} \right.$$

$$R_3 \parallel \frac{1}{g_m} = \frac{R_3}{1 + g_m R_3}$$

$$\frac{V_u}{V_i} = (-h_{fe}) \frac{R_9 R_{13}}{R_9 + R_{12} + R_{13}} \frac{R_7 \parallel R_8}{R_7 \parallel R_8 + R_v} g_m \frac{R_5}{R_5 + R_6 + R_7 \parallel R_8 \parallel R_v} \frac{R_3 \parallel \frac{1}{g_m}}{R_{14} + R_3 \parallel \frac{1}{g_m}}$$

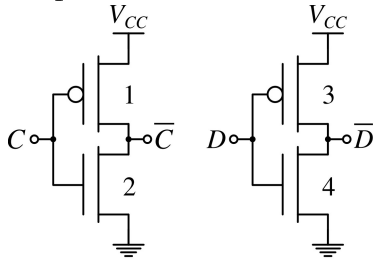
$$= -38.073$$

Esercizio B – svolgimento

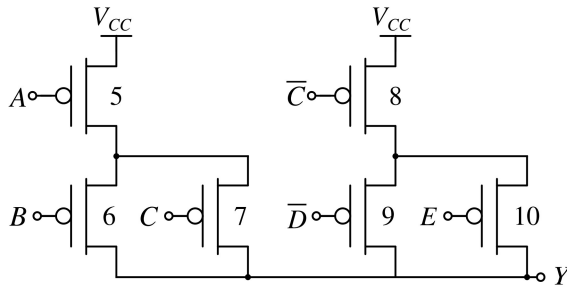
$$Y = \bar{A} \cdot (\bar{B} + \bar{C}) + C \cdot (D + \bar{E})$$

Numero di MOS: $6 \times 2 + 2 \times 2 = 16$

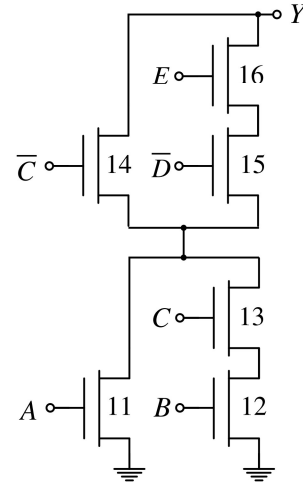
Schema completo:



PUN:



PDN:



Dimensionamento della PUN, assumendo $(W/L)_p = p = 5$:

- $(W/L)_{1,3} = p = 5$
- Percorsi con 2 MOS in serie: (Q5-Q6), (Q5-Q7), (Q8-Q9), (Q8-Q10), tutti possibili.

$$(W/L)_{5,6,7,8,9,10} = w; \quad 2 \times \frac{1}{w} = \frac{1}{p} \implies w = 2p = 10.$$

Dimensionamento della PDN, assumendo $(W/L)_n = n = 2$:

- $(W/L)_{2,4} = n = 2$
- Percorsi con 4 MOS in serie: (Q12-Q13-Q15-Q16) possibile.

$$(W/L)_{12,13,15,16} = x; \quad 4 \times \frac{1}{x} = \frac{1}{n} \implies x = 4n = 8.$$

- Percorsi con 3 MOS in serie: (Q11-Q15-Q16) possibile, mentre (Q12-Q13-Q14) impossibile dovuto a C e C-bar.

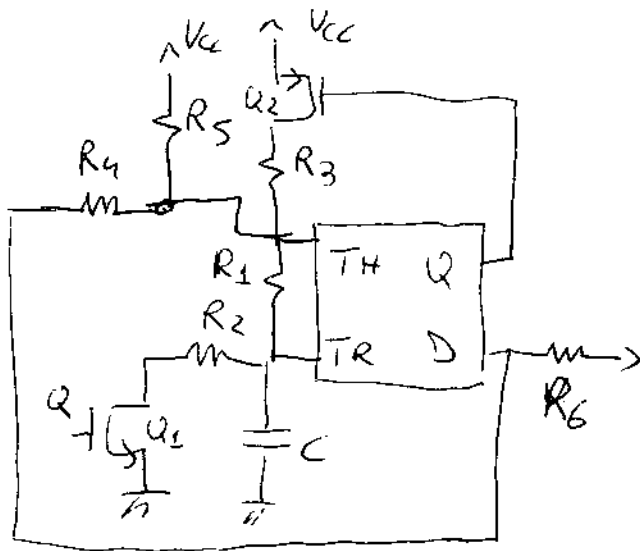
$$(W/L)_{11} = y; \quad \frac{1}{y} + 2 \times \frac{1}{x} = \frac{1}{n} \implies y = \frac{nx}{x - 2n} = 2n = 4.$$

- Percorsi con 2 MOS in serie: (Q11-Q14) possibile.

$$(W/L)_{14} = z; \quad \frac{1}{z} + \frac{1}{y} = \frac{1}{p} \implies z = \frac{ny}{y - n} = 2n = 4.$$

ESERCIZIO C

(5)



$$R_3 = 200 \Omega$$

$$R_2 = 4.8 K\Omega$$

$$R_3 = 2 K\Omega$$

$$R_4 = 200 \Omega$$

$$R_5 = 2 K\Omega$$

$$R_6 = 1.8 K\Omega$$

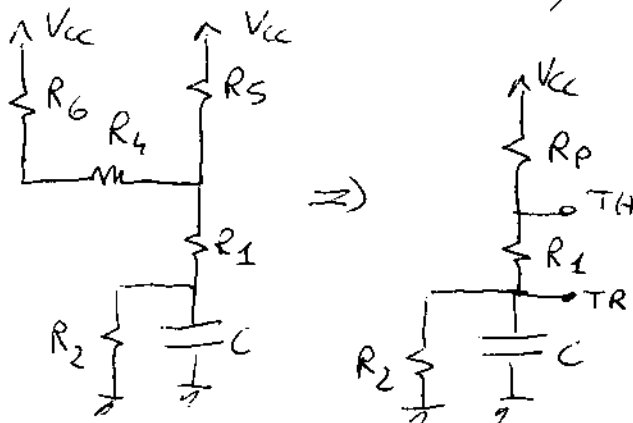
$$C = 0.22 \mu F$$

$$V_{CC} = 6V$$

1) FASE DI SET

$$Q = 1 \Rightarrow V_{G1} = V_{CC}; V_{S1} = 0V; V_{GS1} = 6V > V_{TH1} \Rightarrow Q_1 \text{ ON}$$

$$D = HI \quad V_{G2} = V_{CC}; V_{S2} = 6V; V_{GS2} = 0V < V_{TP} = -1V \Rightarrow Q_2 \text{ OFF}$$



$$R_p = (R_4 + R_6) || R_5 = 1 K\Omega$$

$$V_{th} = \frac{1}{3} V_{CC} = 2V$$

$$V_{f1} = V_{CC} \frac{R_2}{R_2 + R_1 + R_p} = 4.8V$$

$$\text{PER } V_{TH} = 4V \quad I_p = I_1 = \frac{V_{CC} - V_{TH}}{R_p} = 2mA$$

$$V_{cor1} = V_{TH} - R_1 I_1 = 3.6V$$

$$\text{VERIFICA CORRUZIONE: } V_{th} < V_{cor1} < V_{f1};$$

$$2V < 3.6V < 4.8V \quad \text{VERIFICA OK}$$

$$R_{v1} = R_2 || (R_1 + R_p) = 960 \Omega$$

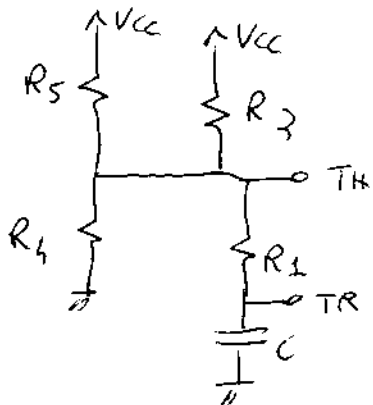
$$\tau_1 = C R_{v1} = 211.2 \mu s$$

$$T_1 = \tau_1 \ln \left(\frac{V_{th} - V_{f1}}{V_{cor1} - V_{f1}} \right) = 1.789 \times 10^{-4} s$$

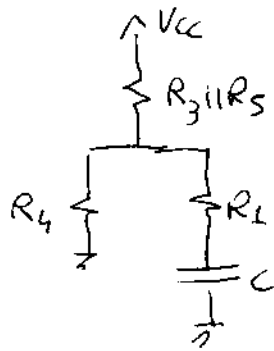
2) FASE DI RESET

$$Q = \phi \quad V_{GS} = \phi V, \quad V_{SE} = \phi V, \quad V_{GS1} = \phi V < V_{TN} = 1V \Rightarrow Q_1 \text{ OFF}$$

$$D = \phi \quad V_{G2} = \phi V, \quad V_{S2} = 6V, \quad V_{GS2} = -6V < V_{TP} = -1V \Rightarrow Q_2 \text{ ON}$$



\Rightarrow



$$V_{12} = V_{\text{cons}} = 3.6V$$

$$V_{\text{con}2} = V_{i1} = 2V$$

$$V_{f2} = V_{CC} \frac{R_4}{R_4 + R_3 \parallel R_5} = 1V$$

VERIFICA COMPUTAZIONE: $V_{12} > V_{\text{con}2} > V_{f2}$

$$3.6V > 2V > 1V \Rightarrow \text{VERIFICA OK}$$

$$R_{V2} = R_1 + R_3 \parallel R_5 \parallel R_4 = 366.6 \, \Omega$$

$$\tau_2 = C R_{V2} = 8.06 \times 10^{-5} s$$

$$\overline{T}_2 = \tau_2 \ln \left(\frac{V_{12} - V_{f2}}{V_{\text{con}2} - V_{f2}} \right) = 7.7078 \times 10^{-5} s$$

$$\overline{T} = \overline{T}_1 + \overline{T}_2 = 2.56 \times 10^{-4} s$$

$$\underline{f} = \frac{1}{\overline{T}} = \underline{\underline{3905.8 \, Hz}}$$