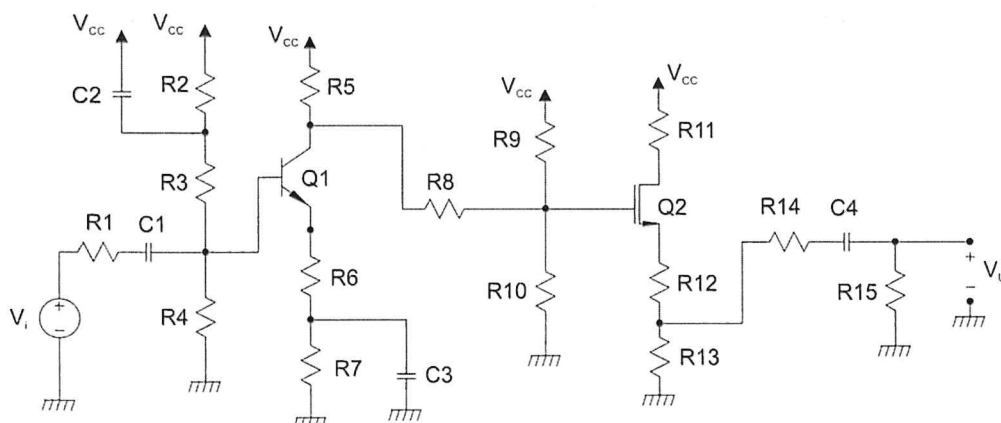


ELETTRONICA DIGITALE
Corso di Laurea in Ingegneria Informatica

Prova scritta del 12 settembre 2024

Esercizio A



R1 = 200 Ω	R3 = 370 k Ω	R4 = 370 k Ω	R5 = 25 k Ω	R6 = 100 Ω	R7 = 1.4 k Ω	R8 = 625 Ω	R9 = 4.5 k Ω
R10 = 22.5 k Ω	R11 = 1 k Ω	R12 = 100 Ω	R13 = 400 Ω	R14 = 500 Ω	R15 = 10 k Ω	Vcc = 18 V	

Q1 è un transistor BJT BC109B resistivo con $h_{re} = h_{oe} = 0$; Q2 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 $k = 0.5 \text{ mA/V}^2$.

Con riferimento al circuito in figura:

- 1) Calcolare il valore della resistenza R_2 in modo che, in condizioni di riposo, la tensione sul drain di Q_2 sia 10 V. Determinare, inoltre, il punto di riposo dei due transistori e verificare la saturazione di Q_2 .
- 2) Determinare l'espressione e il valore di V_u/V_i alle frequenze per le quali i condensatori riportati nel circuito in figura possono essere considerati dei corto circuiti.

Esercizio B

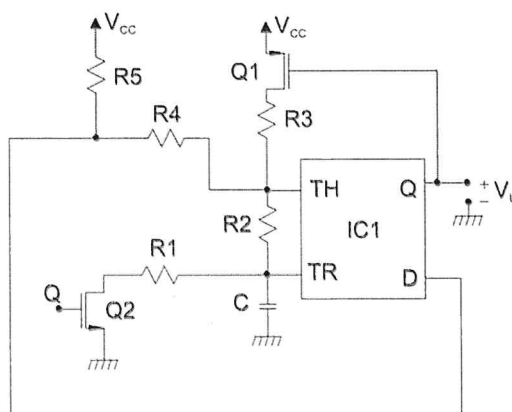
Progettare una porta logica in tecnologia CMOS, utilizzando la tecnica della pull-up network e della pull-down network, che implementi la funzione logica:

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

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.

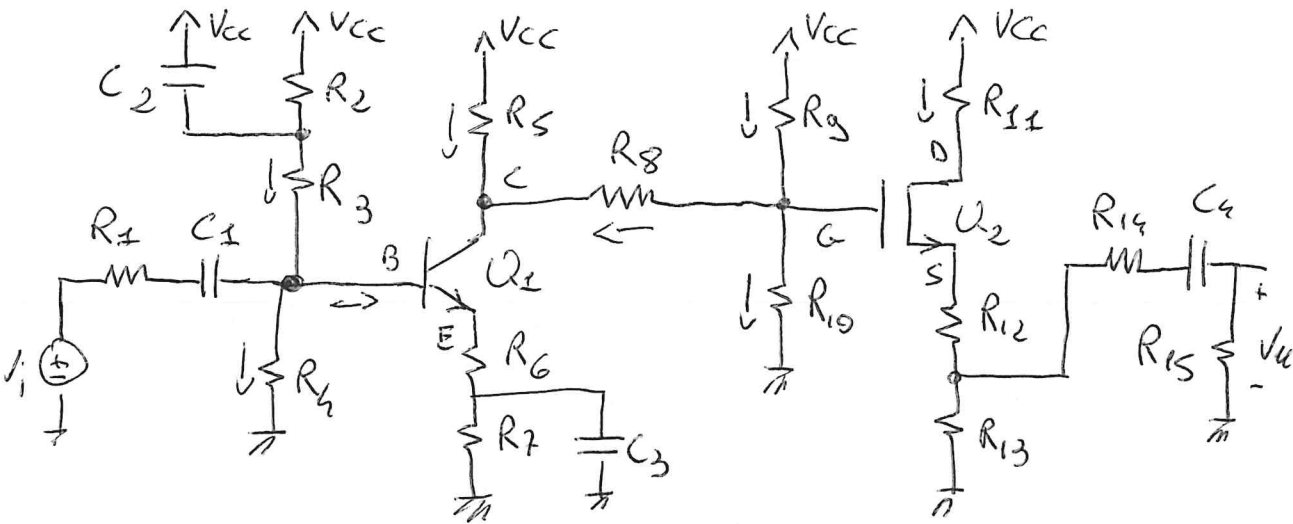
Esercizio C

$R1 = 15\text{ k}\Omega$	$R5 = 500\text{ }\Omega$
$R2 = 500\text{ }\Omega$	$C = 22\text{ nF}$
$R3 = 6\text{ k}\Omega$	$V_{CC} = 6\text{ V}$
$R4 = 2\text{ k}\Omega$	



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

ESERCIZIO A



$$R_1 = 200 \Omega$$

$$R_3 = 370 \text{ k}\Omega$$

$$R_4 = 370 \text{ k}\Omega$$

$$R_5 = 25 \text{ k}\Omega$$

$$R_6 = 100 \Omega$$

$$R_7 = 1.4 \text{ k}\Omega$$

$$R_8 = 625 \Omega$$

$$R_9 = 4.5 \text{ k}\Omega$$

$$R_{10} = 22.5 \text{ k}\Omega$$

$$R_{11} = 1 \text{ k}\Omega$$

$$R_{12} = 100 \Omega$$

$$R_{13} = 400 \Omega$$

$$R_{14} = 500 \Omega$$

$$R_{15} = 10 \text{ k}\Omega$$

$$V_{CC} = 18 \text{ V}$$

1) CALCOLARE R_2 PER $V_D = 10 \text{ V}$

$$I_{R2} = \frac{V_{CC} - V_D}{R_{11}} = 8 \text{ mA}$$

$$I_G = 0 \Rightarrow I_D = I_S$$

$$V_S = (R_{12} + R_{13}) I_S = 4 \text{ V}$$

$$V_{DS} = V_D - V_S = 6 \text{ V}$$

$$\text{hp: } Q_2 \text{ SATURO} \Rightarrow I_D = K (V_{GS} - V_T)^2$$

$$V_{GS} = V_T \pm \sqrt{\frac{I_D}{K}}$$

POICHÉ NROS CONDUCCE PER $V_{GS} \geq V_T$ SCELGO LA SOLUZIONE CON VALORE POSITIVO

$$V_{GS} = V_T + \sqrt{\frac{I_D}{K}} = 5 \text{ V}$$

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

$$6 \text{ V} > (5 - 1) = 4 \text{ V} \Rightarrow \text{VERIFICA OK}$$

$$g_m = 2K (V_{GS} - V_T) = 4 \times 10^{-3} \text{ A/V}$$

$$V_G = V_{GS} + V_S = 5 + 4 = 9 \text{ V}$$

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

$$I_{10} = \frac{V_G}{R_{10}} = 0.4 \text{ mA}$$

$$I_8 = I_9 - I_{10} = 1.6 \text{ mA} \quad (I_6 = \phi)$$

$$V_C = V_G - R_8 I_8 = 8 \text{ V}$$

$$I_5 = \frac{V_{CC} - V_E}{R_5} = 0.4 \text{ mA}$$

$$I_C = I_5 + I_8 = 2 \text{ mA}$$

$$h_p: Q_1 \text{ in 2.A.D.} \Rightarrow I_B \ll I_C \Rightarrow I_C \approx I_E$$

$$V_E \approx I_E (R_6 + R_7) = 3 \text{ V}$$

$$V_{CE} = V_C - V_E = 8 - 3 = 5 \text{ V}$$

SIAMO NEL PUNTO DI RIPOSO $I_C = 2 \text{ mA}$ E $V_{CE} = 5 \text{ V}$ PER IL QUALE IL COSTRUTTORE FORNISCE I SEGUENTI PARAMETRI:

$$h_{FE} = 290 ; h_{fe} = 300 ; h_{ie} = 4800 \Omega$$

$$\text{VERIFICA IPOTESI : } V_{CE} \stackrel{?}{\geq} V_{CE\text{SAT}} \\ 5 \text{ V} > 0.2 \text{ V} \Rightarrow \text{VERIFICA OK}$$

$$I_B = \frac{I_C}{290} = 6.89655 \mu\text{A}$$

$$V_B = V_E + V_{BE} = 3.7 \text{ V}$$

$$I_4 = \frac{V_B}{R_4} = 10 \mu\text{A}$$

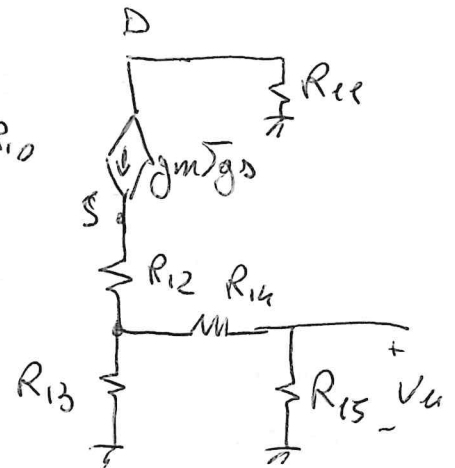
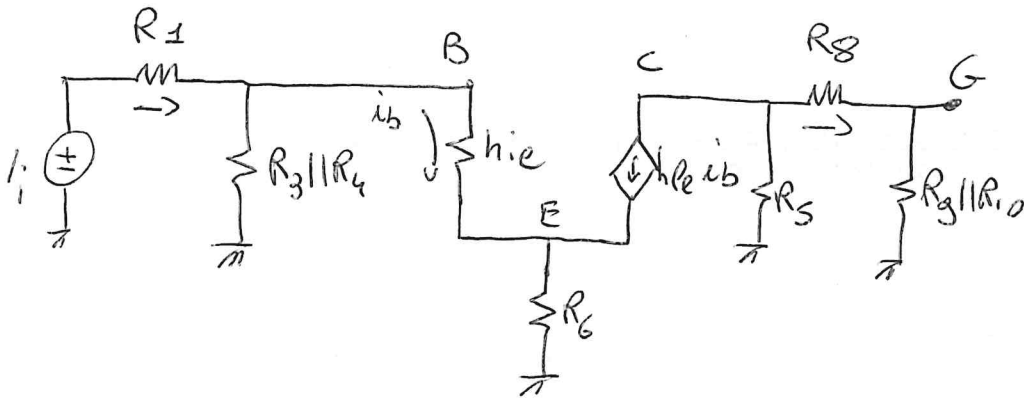
$$I_3 = I_4 + I_B = 16.89655 \mu\text{A}$$

$$R_2 = \frac{V_{CC} - V_B}{I_3} - R_3 = \underline{\underline{476326.6 \Omega}}$$

$$Q_1: \begin{cases} I_C = 2 \text{ mA} \\ V_{CE} = 5 \text{ V} \\ h_{FE} = 290 \\ h_{ie} = 4800 \Omega \\ h_{fe} = 300 \end{cases}$$

$$Q_2: \begin{cases} I_D = 8 \text{ mA} \\ V_{DS} = 6 \text{ V} \\ V_{GS} = 5 \text{ V} \\ g_m = 4 \times 10^{-3} \text{ A/V} \end{cases}$$

(3)

2) Det. $\frac{V_u}{V_i}$ PER C_i CORTO CIRCUITATI

$$V_u = R_{15} i_{15}$$

$$i_{15} = (g_m V_{gs}) \frac{R_{e3}}{R_{13} + R_{14} + R_{15}}$$

$$V_D = (g_m V_{gs}) \left\{ R_{12} + [R_{13} \parallel (R_{14} + R_{15})] \right\} = g_m V_{gs} R_{V5}$$

$$V_{gs} = V_g - V_D = V_g - (g_m V_{gs}) R_{V5}$$

$$\Rightarrow V_{gs} = \frac{V_g}{1 + g_m R_{V5}} \quad \text{DOVE } R_{V5} = R_{12} + [R_{13} \parallel (R_{14} + R_{15})] = 485.32 \Omega$$

$$V_g = (R_9 \parallel R_{10}) i_8$$

$$i_8 = (-h_{fe} i_5) \frac{R_5}{R_5 + R_8 + R_9 \parallel R_{10}}$$

$$i_b = i_1 \frac{(R_3 \parallel R_4)}{(R_3 \parallel R_4) + h_{ie} + R_6 (h_{fe} + 1)}$$

$$i_1 = \frac{V_i}{R_1 + R_3 \parallel R_4 \parallel [h_{ie} + R_6 (h_{fe} + 1)]}$$

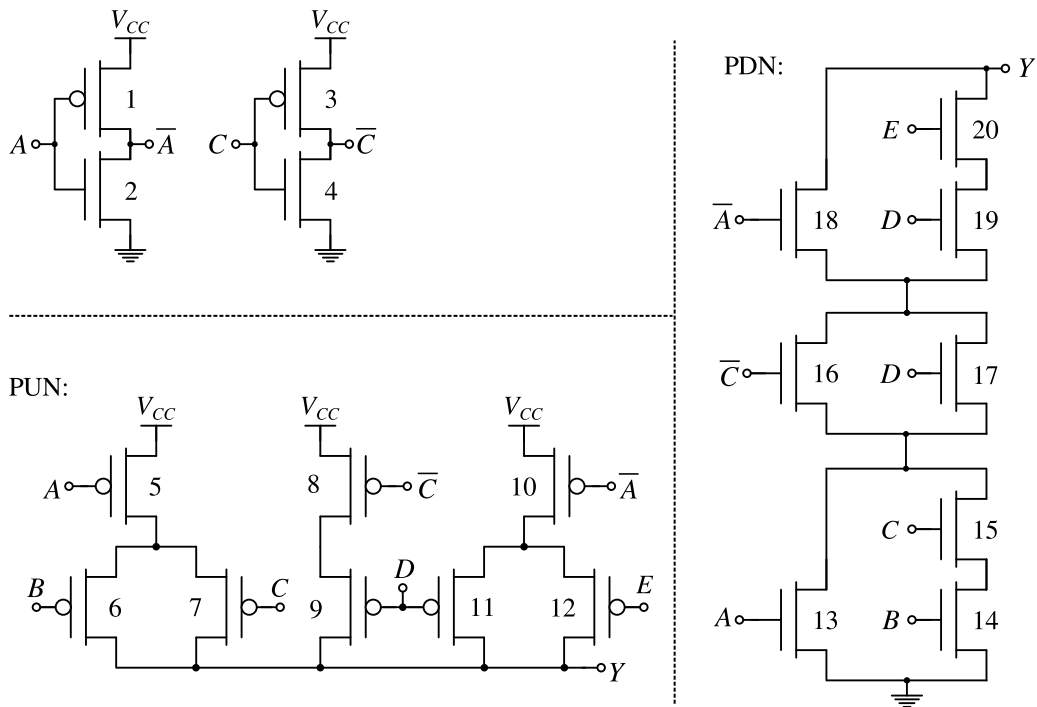
$$\frac{V_u}{V_i} = \frac{R_{15} g_m \frac{R_{13}}{R_{13} + R_{14} + R_{15}} \frac{1}{1 + g_m \{ R_{12} + [R_{13} \parallel (R_{14} + R_{15})] \}}}{\frac{R_3 \parallel R_4}{(R_3 \parallel R_4) + h_{ie} + R_6 (h_{fe} + 1)} \frac{R_1 + R_3 \parallel R_4 \parallel [h_{ie} + R_6 (h_{fe} + 1)]}{1}} \cdot \frac{3191.489}{320} \frac{(-h_{fe}) (R_9 \parallel R_{10}) R_5}{R_5 + R_8 + (R_9 \parallel R_{10})}$$

Calcoli intermediari:
 $\frac{R_3 \parallel R_4}{(R_3 \parallel R_4) + h_{ie} + R_6 (h_{fe} + 1)} = \frac{4 \times 10^{-3} \cdot 3.6637 \times 10^{-2}}{1} = 0.8413$
 $\frac{R_1 + R_3 \parallel R_4 \parallel [h_{ie} + R_6 (h_{fe} + 1)]}{1} = 0.339587$
 $\frac{R_{13}}{R_{13} + R_{14} + R_{15}} = \frac{1}{3.3828 \times 10^{-5}}$
 $\frac{1}{1 + g_m \{ R_{12} + [R_{13} \parallel (R_{14} + R_{15})] \}} = \frac{1}{1 + 320 \cdot 485.32} = \frac{1}{157302.4}$

$$= -13.6$$

Esercizio B – svolgimento

$$Y = \bar{A} \cdot (\bar{B} + \bar{C}) + C \cdot \bar{D} + A \cdot (\bar{D} + \bar{E}); \quad \text{Numero di MOS: } (8 + 2) \times 2 = 20$$



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, Q10-Q11, Q10-Q12: tutti possibili.

$$(W/L)_{5,6,7,8,9,10,11,12} = x; \quad 2 \times \frac{1}{x} = \frac{1}{p} \implies x = 2p = 10.$$

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

- $(W/L)_{2,4} = n = 2$
- Percorsi con 5 MOS in serie:
 - Q14-Q15-Q16-Q19-Q20 impossibile: C e \bar{C}
 - Q14-Q15-Q17-Q19-Q20 possibile

$$(W/L)_{14,15,17,19,20} = y; \quad 5 \times \frac{1}{y} = \frac{1}{n} \implies y = 5n = 10.$$

- Percorsi con 4 MOS in serie:
 - Q13-Q16-Q19-Q20 possibile, con Q19 e Q20 già dimensionati
 - Q13-Q17-Q19-Q20 possibile, con Q17, Q19 e Q20 già dimensionati
 - Q14-Q15-Q16-Q18 impossibile: C e \bar{C}
 - Q14-Q15-Q17-Q18 possibile, con Q14, Q15, Q17 già dimensionati

Partendo da quest'ultimo percorso, per quanto riguarda Q18:

$$(W/L)_{18} = w; \quad \frac{1}{w} + \frac{3}{y} = \frac{1}{n} \implies w = \frac{5}{2} n = 5.$$

Per quanto riguarda, invece, Q13 e Q16, abbiamo due opzioni:

Opzione A: dimensiono Q13 e Q16, verificando il percorso Q13-Q17-Q19-Q20 a posteriori.

$$(W/L)_{13,16} = t; \quad \frac{2}{t} + \frac{2}{y} = \frac{1}{n} \implies t = \frac{10}{3} n = \frac{20}{3}.$$

Verifica del percorso Q13-Q17-Q19-Q20: $\frac{1}{t} + \frac{3}{y} = \frac{3}{5n} < \frac{1}{n}$, quindi il dimensionamento è valido.

Opzione B: dimensiono Q13 nel osservando il percorso Q13-Q17-Q19-Q20, e successivamente dimensiono Q16 osservando il percorso Q13-Q16-Q19-Q20.

$$(W/L)_{13} = u; \quad \frac{1}{u} + \frac{3}{y} = \frac{1}{n} \implies u = \frac{yn}{y-3n} = \frac{5}{2} n = 5.$$

$$(W/L)_{16} = v; \quad \frac{1}{u} + \frac{1}{v} + \frac{2}{y} = \frac{1}{n} \implies v = \frac{nyu}{yu-2nu-ny} = 5n = 10.$$

Ottimizzazione d'area:

	Opzione A	Opzione B
Q13	$(10/3)n$	$(5/2)n$
Q16	$(10/3)n$	$5n$
Totale	$(20/3)n = 40/3$	$(15/2)n = 15$

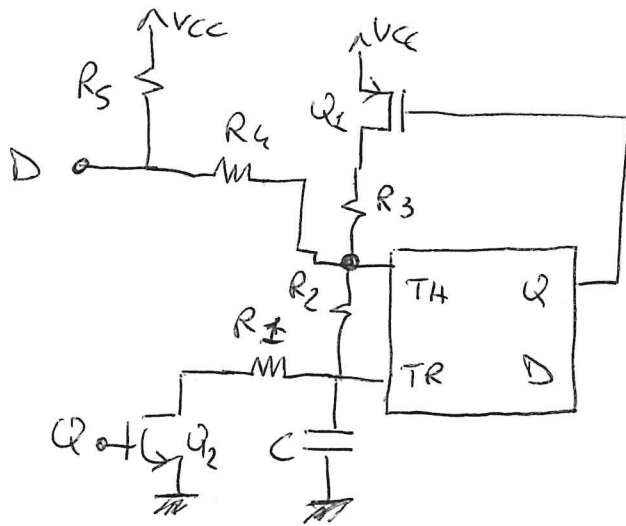
L'opzione A è da preferire in quanto ottimizza l'area totale.

Rimangono da verificare i percorsi con 3 MOS in serie:

- Q13-Q16-Q18 impossibile: A e \overline{A}
- Q13-Q17-Q18 impossibile: A e \overline{A}

ESERCIZIO C

(6)



$$R_1 = 15 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 500 \Omega$$

$$R_3 = 6 \text{ k}\Omega$$

$$R_4 = 2 \text{ k}\Omega$$

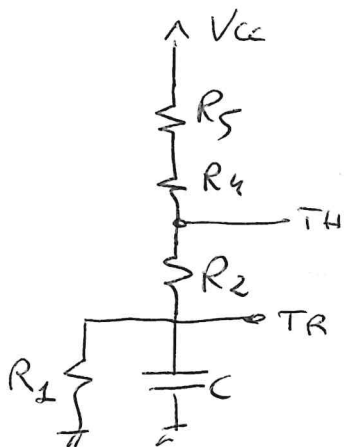
$$R_5 = 500 \Omega$$

$$C = 22 \text{ nF}$$

$$V_{CC} = 6 \text{ V}$$

1) FASE DI SET

$$\begin{cases} Q_1 = 1 \\ D = \text{HI} \end{cases} \Rightarrow \begin{aligned} V_{G1} &= 6 \text{ V} \quad V_{S1} = 6 \text{ V} \Rightarrow V_{GS1} = 0 \text{ V} > V_{TP} = -1 \text{ V} \Rightarrow Q_1 \text{ OFF} \\ V_{G2} &= 6 \text{ V} \quad V_{S2} = 0 \text{ V} \Rightarrow V_{GS2} = 6 \text{ V} > V_{TN} = +1 \text{ V} \Rightarrow Q_2 \text{ ON} \end{aligned}$$



$$V_{I1} = \frac{1}{3} V_{CC} = 2 \text{ V}$$

$$V_{F1} = V_{CC} \frac{R_1}{R_1 + R_5 + R_4 + R_2} = 5 \text{ V}$$

$$\text{Se } V_{TH} = 4 \text{ V} \Rightarrow I_2 = \frac{V_{CC} - V_{TH}}{R_4 + R_5} = 0.8 \text{ mA}$$

$$V_{COR1} = V_{TH} - R_2 I_2 = 3.6 \text{ V}$$

VERIFICA CARICATA ZIONE: $V_{I1} < V_{COR1} < V_{F1}$
 $2 \text{ V} < 3.6 \text{ V} < 5 \text{ V} \quad \underline{\text{OK}}$

$$R_{V1} = R_1 \parallel [R_2 + R_4 + R_5] = 2500 \Omega$$

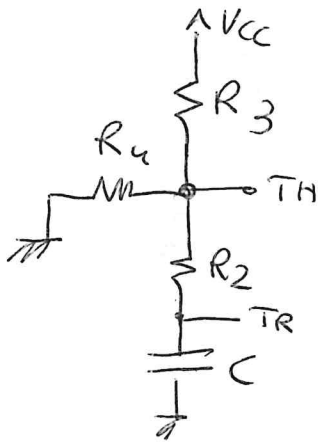
$$\tau_1 = C R_{V1} = 55 \mu\text{s}$$

$$T_1 = \tau_1 \ln \left(\frac{V_{I1} - V_{F1}}{V_{COR1} - V_{F1}} \right) = 41.9 \mu\text{s}$$

2) FASE DI RESET

(7)

$$\begin{cases} Q = \phi \\ D = \phi \end{cases} \Rightarrow \begin{aligned} &V_{G1} = \phi V \quad V_{S1} = 6V \Rightarrow V_{GS1} = -6V < V_{TP} = -1V \Rightarrow U_1 \text{ ON} \\ &V_{G2} = \phi V \quad V_{S2} = \phi V \Rightarrow V_{GS2} = \phi V < V_{TN} = +4V \Rightarrow U_2 \text{ OFF} \end{aligned}$$



$$V_{i2} = V_{cor1} = 3.6V$$

$$V_{cor2} = V_{i1} = 2V$$

$$V_{f2} = V_{CC} \frac{R_4}{R_3 + R_4} = 1.5V$$

VERIFICA CENNUTAZIONE: $V_{i2} > V_{cor2} > V_{f2}$
 $3.6V > 2V > 1.5V$
OK

$$R_{V2} = R_2 + (R_3 \parallel R_4) = 2k\Omega$$

$$\tau_2 = C R_{V2} = 44 \mu s$$

$$T_2 = \tau_2 \ln \left(\frac{V_{i2} - V_{f2}}{V_{cor2} - V_{f2}} \right) = 63.14 \mu s$$

$$T = T_1 + T_2 = 105.04 \mu s$$

$$f = \frac{1}{T} = 9520 \text{ Hz}$$