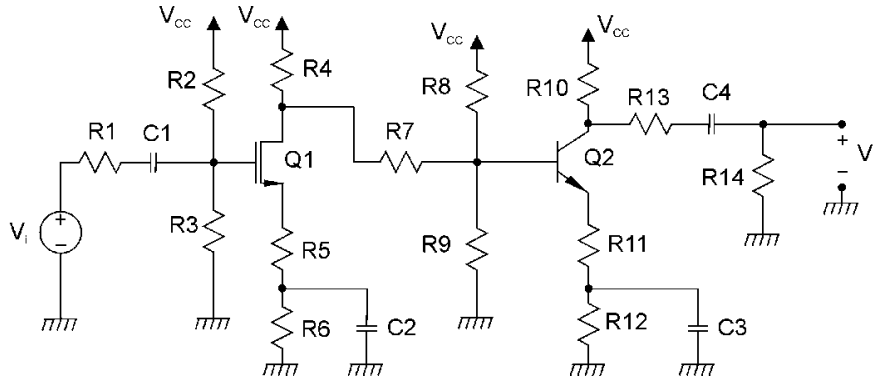


# ELETTRONICA DIGITALE

## Corso di Laurea in Ingegneria Informatica

Prova scritta del 19 settembre 2022

### Esercizio A



$R_1 = 50 \, \Omega$	$R_2 = 20 \, \text{k}\Omega$	$R_4 = 5 \, \text{k}\Omega$	$R_5 = 100 \, \Omega$	$R_6 = 1900 \, \Omega$	$R_7 = 290 \, \Omega$	$R_8 = 22.6 \, \text{k}\Omega$
$R_9 = 6.7 \, \text{k}\Omega$	$R_{10} = 3.5 \, \text{k}\Omega$	$R_{11} = 200 \, \Omega$	$R_{12} = 2.8 \, \text{k}\Omega$	$R_{13} = 1 \, \text{k}\Omega$	$R_{14} = 10 \, \text{k}\Omega$	$V_{CC} = 18 \, \text{V}$

Q1 è un transistor MOS a canale n resistivo con  $V_T = 1 \, \text{V}$  e la corrente di drain in saturazione è 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 R3 in modo che, in condizioni di riposo, la tensione sul collettore di Q2 sia 11 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 C1, C2, C3, C4 possono essere considerati dei corto circuiti.

### Esercizio B

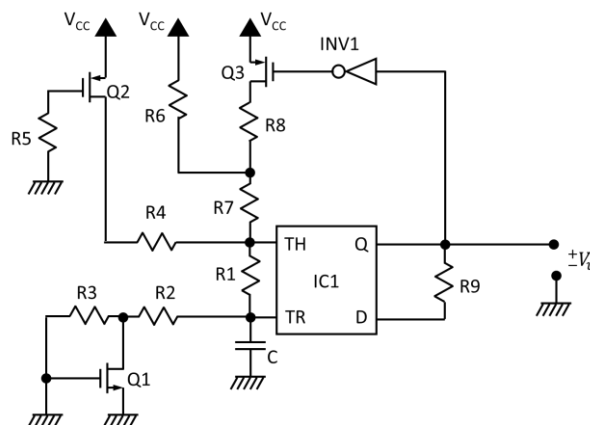
Progettare una porta logica in tecnologia CMOS, utilizzando la tecnica della pull-up network e della pull-down network, che implementi la funzione logica:

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

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.

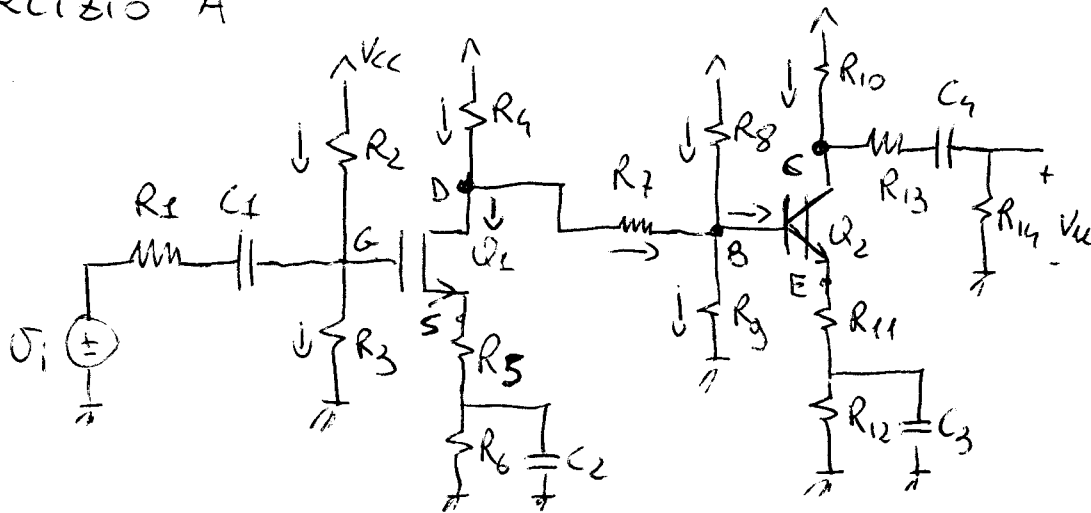
### Esercizio C

$R_1 = 100 \, \Omega$	$R_6 = 5.9 \, \text{k}\Omega$
$R_2 = 750 \, \Omega$	$R_7 = 100 \, \Omega$
$R_3 = 250 \, \Omega$	$R_8 = 104.05 \, \Omega$
$R_4 = 18 \, \text{k}\Omega$	$C = 100 \, \text{nF}$
$R_5 = 1 \, \text{k}\Omega$	$V_{CC} = 6 \, \text{V}$



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 e Q3 hanno  $R_{on} = 0$  e  $V_{Tp} = -1 \, \text{V}$ ; l'inverter è ideale. Verificare che il circuito si comporta come un multivibratore astabile e determinare la frequenza del segnale di uscita.

## ESERCIZIO A



$$\begin{aligned}
 R_1 &= 50 \Omega \\
 R_2 &= 20 \text{ k}\Omega \\
 R_3 &= 5 \text{ k}\Omega \\
 R_4 &= 100 \Omega \\
 R_5 &= 1900 \Omega \\
 R_6 &= 1300 \Omega \\
 R_7 &= 290 \Omega \\
 R_8 &= 22.6 \text{ k}\Omega \\
 R_9 &= 6.7 \text{ k}\Omega \\
 R_{10} &= 3.5 \text{ k}\Omega \\
 R_{11} &= 200 \Omega \\
 R_{12} &= 2.8 \text{ k}\Omega \\
 R_{13} &= 1 \text{ k}\Omega \\
 R_{14} &= 10 \text{ k}\Omega
 \end{aligned}$$

1) DET.  $R_3$  PER  $V_C = 3.1 \text{ V}$ ; PUNTO RIPOSO; SATURAZ. Q1

$$I_{10} = I_C = \frac{V_{CC} - V_C}{R_{10}} = 2 \text{ mA}$$

$$\text{hp1: } I_B \ll I_C \Rightarrow I_E \approx I_C$$

$$V_E = (R_{11} + R_{12}) I_E = 6 \text{ V}$$

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

PER  $I_C = 2 \text{ mA}$  e  $V_{CE} = 5 \text{ V}$  IL COSTRUTTORE FORNISCE I SEGUENTI PARAMETRI:

$$h_{FE} = 230 \quad h_{FE} = 300 \quad h_{ie} = 4800 \Omega$$

$$I_B = \frac{I_C}{h_{FE}} = 6.8965 \mu\text{A} \Rightarrow I_B \ll I_C \text{ E' VERIFICATA}$$

$$V_B = V_E + V_{BE} = 6.7 \text{ V}$$

$$I_8 = \frac{V_{CC} - V_B}{R_8} = 0.5 \text{ mA}$$

$$I_9 = \frac{V_B}{R_9} = 1 \text{ mA}$$

$$I_7 = I_9 + I_B - I_8 = 5.068965 \times 10^{-4} \text{ A}$$

$$V_D = V_B + R_7 I_7 = 6.847 \text{ V}$$

$$I_4 = \frac{V_{CC} - V_D}{R_4} = 2.2306 \text{ mA}$$

$$I_D = I_4 - I_7 = 1.7237 \text{ mA}$$

$$I_G = 0 \text{ PERCHÉ } Q_1 \text{ È UN MOSFET} \Rightarrow I_D = I_S$$

$$V_S = (R_S + R_E) I_D = 3.4474 \text{ V}$$

$$\text{hp 2: } Q_1 \text{ È IN SATURAZIONE} \Rightarrow I_D = K(V_{GS} - V_T)^2$$

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

SI SCEGLIE LA SOLUZIONE CON IL SEGNO "+" PERCHÉ  $Q_1$  È UN MOS E PERTANTO PER ESSERE IN CONDIZIONE DEVE ESSERE  $V_{GS} \geq V_T$

$$V_{GS} = V_T + \sqrt{\frac{I_D}{K}} = 2.8567 \text{ V}$$

$$V_{DS} = V_D - V_S = 3.3996 \text{ V}$$

$$\text{VERIFICA hp 2: } V_{DS} \stackrel{?}{\geq} V_{GS} - V_T$$

$$3.3996 \text{ V} > 1.8567 \text{ V} \Rightarrow \text{hp VERIFICATA}$$

$$g_m = 2K(V_{GS} - V_T) = 1.8567 \times 10^{-3} \text{ A/V}$$

$$V_G = V_{GS} + V_S = 6.3045 \text{ V}$$

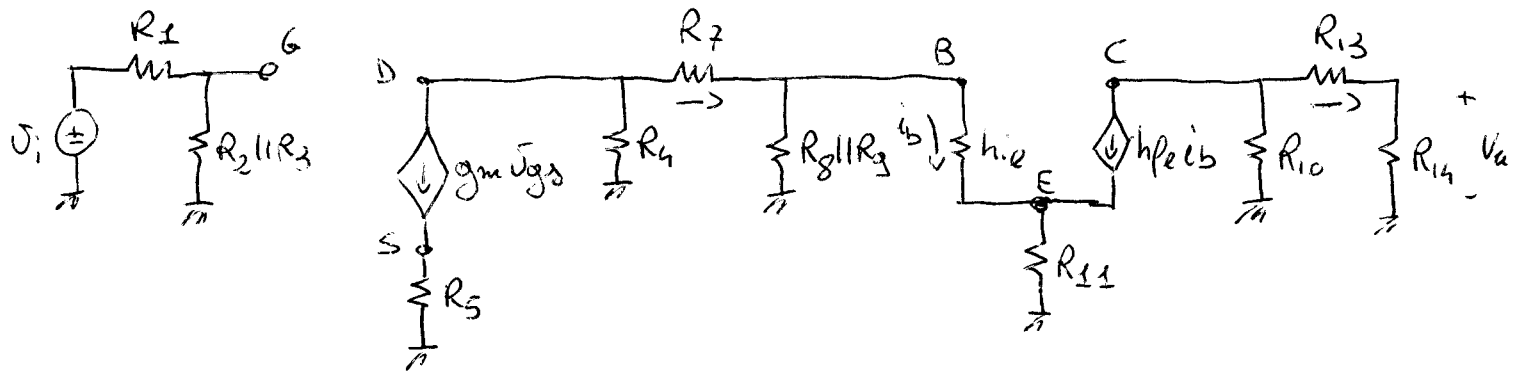
$$I_2 = \frac{V_{CC} - V_G}{R_2} = 584.735 \mu\text{A} = I_3$$

$$\underline{\underline{R_3}} = \frac{V_G}{I_2} = \underline{\underline{10780 \Omega}}$$

$$Q_1: \begin{cases} I_D = 1.72 \text{ mA} \\ V_{DS} = 3.4 \text{ V} \\ V_{GS} = 2.86 \text{ V} \\ g_m = 1.86 \times 10^{-3} \text{ A/V} \end{cases}$$

$$Q_2: \begin{cases} I_C = 2 \text{ mA} \\ V_{CE} = 5 \text{ V} \\ h_{FE} = 290 \\ h_{ie} = 4800 \Omega \\ h_{fe} = 300 \end{cases}$$

2) ESPRESSIONE E VALORE DI  $V_u/V_i$  PER C: CORTO CIRCUITATI (3)



$$V_u = R_{14} i_{13}$$

$$i_{13} = (-h_{fe} i_b) \frac{R_{10}}{R_{10} + R_{13} + R_{14}}$$

$$i_b = i_7 \frac{R_8 || R_9}{(R_8 || R_9) + h_{ie} + R_{11}(h_{fe} + 1)}$$

$$R_v = h_{ie} + R_{11}(h_{fe} + 1) = 6500 \Omega$$

$$i_7 = (-g_m \bar{v}_{gs}) \frac{R_4}{R_4 + R_7 + R_8 || R_9 || [h_{ie} + R_{11}(h_{fe} + 1)]}$$

$$\bar{v}_s = R_5 g_m \bar{v}_{gs}$$

$$\bar{v}_{gs} = \bar{v}_g - \bar{v}_s = \bar{v}_g - R_5 g_m \bar{v}_{gs} \Rightarrow \bar{v}_{gs} = \frac{\bar{v}_g}{1 + g_m R_5}$$

$$\bar{v}_g = V_i \frac{R_2 || R_3}{R_1 + R_2 || R_3}$$

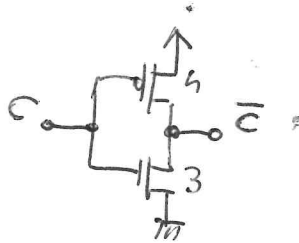
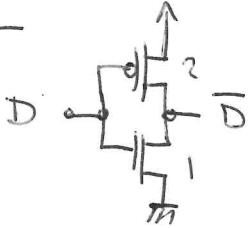
$$\frac{V_u}{V_i} = (-h_{fe}) \frac{R_{10} R_{14}}{R_{10} + R_{13} + R_{14}} \frac{R_8 || R_9}{(R_8 || R_9) + h_{ie} + R_{11}(h_{fe} + 1)} (-g_m) \frac{R_4}{R_4 + R_7 + R_8 || R_9 || [h_{ie} + R_{11}(h_{fe} + 1)]}$$

$$\frac{0.843}{1 + g_m R_5} \frac{0.3329}{R_1 + R_2 || R_3} = + 41.21$$

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

$$N = 2 \times (7 + 2) = 18$$

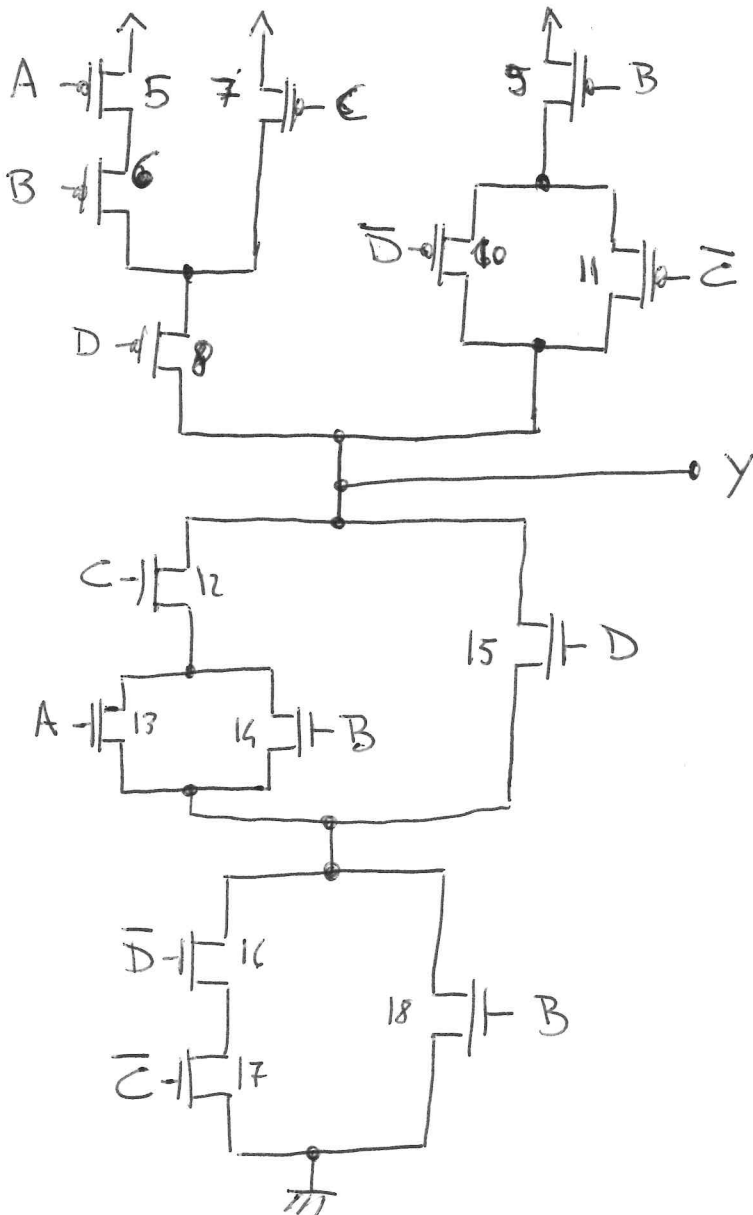
INVERTER



$$\left(\frac{W}{L}\right)_{1,3} = m = 2$$

$$\left(\frac{W}{L}\right)_{2,4} = p = 5$$

ROTATIONAL LOGIC :



Dim PDN:

- PERCORSO DA 3: 5-6-8 POSSIBILE

$$\left(\frac{w}{L}\right)_{5,6,8} = x \quad \frac{1}{x} + \frac{1}{x} + \frac{1}{x} = \frac{3}{x} = \frac{1}{P} \rightarrow x = \left(\frac{w}{L}\right)_{5,6,8} = 3P = 15$$

- PERCORSO DA 2:  $\left\{ \begin{array}{l} 7-8, \text{ POSSIBILE CON 8 GIÀ DIMENSIONATO} \\ 9-10, \text{ POSSIBILE} \\ 9-11, \text{ POSSIBILE} \end{array} \right.$

$$\left(\frac{w}{L}\right)_7 = t \quad \frac{1}{t} + \frac{1}{3P} = \frac{1}{P} = \frac{3}{3P} \rightarrow \frac{1}{t} = \frac{2}{3P} \rightarrow t = \left(\frac{w}{L}\right)_7 = \frac{3P}{2} = 7.5$$

$$\left(\frac{w}{L}\right)_{9,10,11} = z \rightarrow \frac{1}{z} + \frac{1}{z} = \frac{2}{z} = \frac{1}{P} \rightarrow z = \left(\frac{w}{L}\right)_{9,10,11} = 2P = 10$$

Dim PDN:

PERCORSO DA 4:

12-14-~~16~~-17 IMPOSSIBILE (~~c~~ e ~~c~~)  
12-13-~~16~~-17 IMPOSSIBILE (c e ~~c~~)

- PERCORSO DA 3:  $\left\{ \begin{array}{l} 12-13-18 \text{ POSSIBILE} \\ 12-14-18 \text{ POSSIBILE} \\ 15-16-17 \text{ IMPOSSIBILE (D e } \overline{D}) \end{array} \right.$

$$\left(\frac{w}{L}\right)_{12,13,14,18} = f \rightarrow \frac{1}{f} + \frac{1}{f} + \frac{1}{f} = \frac{3}{f} = \frac{1}{M} \rightarrow f = \left(\frac{w}{L}\right)_{12,13,14,18} = 3M = 6$$

- PERCORSO DA 2: 15-18 POSSIBILE, CON 18 GIÀ DIMENSIONATO

$$\left(\frac{w}{L}\right)_{15} = j \quad \frac{1}{j} + \frac{1}{3M} = \frac{1}{M} = \frac{3}{3M} \rightarrow \frac{1}{j} = \frac{2}{3M} \rightarrow j = \left(\frac{w}{L}\right)_{15} = \frac{3M}{2} = 3$$

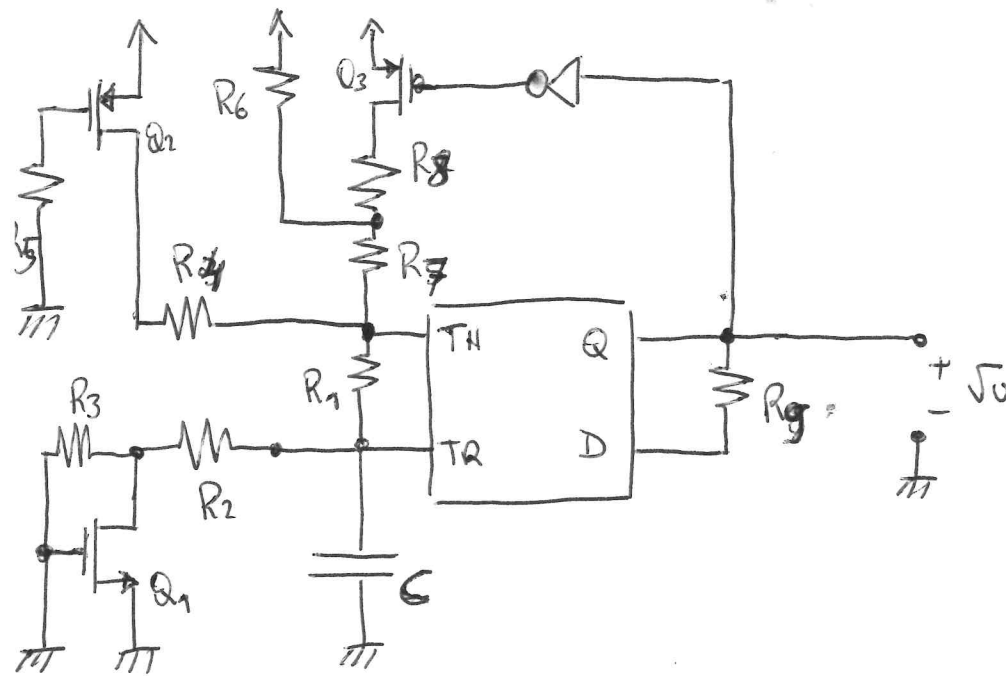
$$V_{CC} = 6V \quad C = 100 \text{ mF}$$

$$R_1 = 100 \Omega \quad R_5 = 1 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 750 \Omega \quad R_6 = 5.3 \text{ k}\Omega$$

$$R_3 = 250 \Omega \quad R_7 = 100 \Omega$$

$$R_4 = 18 \text{ k}\Omega \quad R_8 = 104.05 \Omega$$



$$Q_1: V_{GS_{Q1}} = 0 \rightarrow Q_1 \text{ SEMPRE OFF} \quad (V_{GS} = 0 < V_{Th})$$

$$Q_2: I_{R5} = I_{G_{Q2}} = 0 \rightarrow V_{G_{Q2}} = 0 \rightarrow V_{GS_{Q2}} = -V_{CC} < -|V_{Tp}|$$

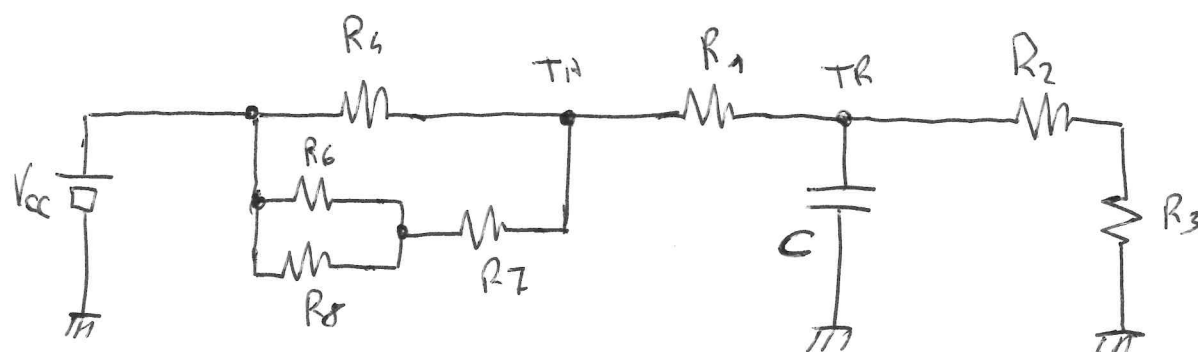
$$\rightarrow Q_2 \text{ SEMPRE ON}$$

$$\text{STATO DI } Q_3: \text{ DIPENDE DALLO STATO DI IC 1 (SET/RESET)}$$

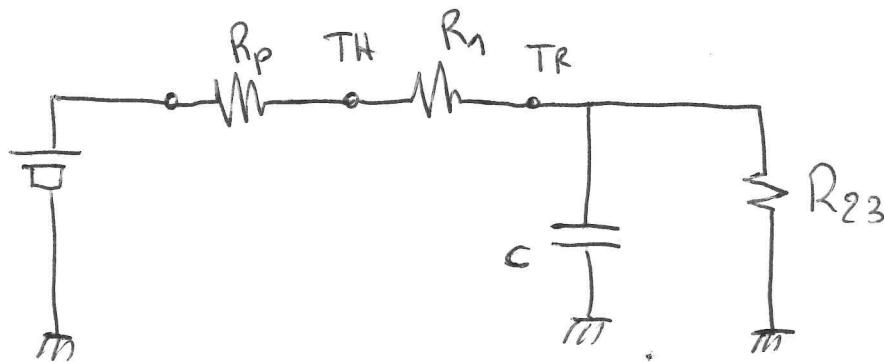
$$\underline{\text{SET}}: V_{in} = \frac{1}{3} V_{CC} = 2V$$

$$Q = '1' \rightarrow V_Q = V_{CC} \rightarrow V_{G_{Q3}} = 0 \rightarrow V_{GS_{Q3}} = -V_{CC} < -|V_{Tp}|$$

$$\rightarrow Q_3 \text{ ON IN SET}$$



IN SET HO :



$$\begin{cases} R_p = R_4 \parallel (R_7 + R_6 \parallel R_8) \\ R_{23} = R_2 \parallel R_3 \end{cases}$$

↓

$$\begin{cases} R_p = 200 \, \Omega \\ R_{23} = 1 \, \text{k}\Omega \end{cases}$$

$$V_{f1} = \frac{R_{23}}{R_{23} + R_1 + R_p} \cdot V_{cc} = 4,615 \, \text{V}$$

COM 12 :  $I_1 = \frac{V_{cc} - \frac{2}{3}V_{cc}}{R_p} = 10 \, \text{mA}$

$$V_{com12} = \frac{2}{3}V_{cc} - R_1 \cdot I_1 = 3 \, \text{V}$$

VERIFICAZIONE CAS :  $V_{i1} < V_{com12} < V_{f1}$   
 $2 \, \text{V} < 3 \, \text{V} < 4,615 \, \text{V}$

OK VERIFICAZIONE

$$R_{v1} = R_{23} \parallel (R_1 + R_p) = 230,763 \, \Omega$$

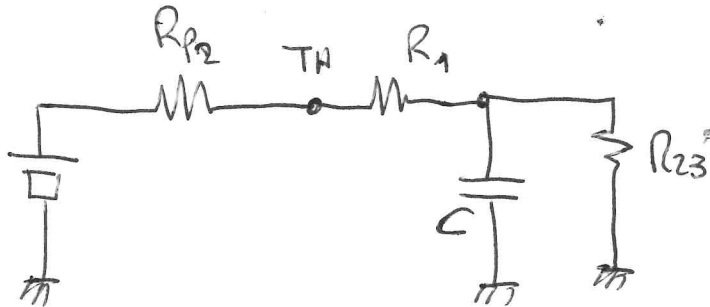
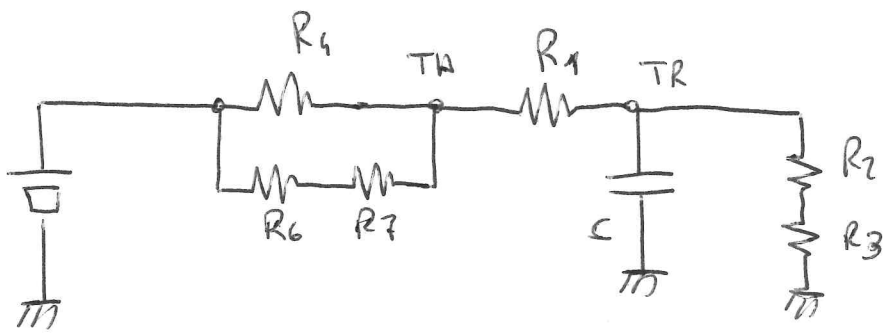
$$\tau_1 = R_{v1} \cdot C = 23,077 \, \mu\text{s}$$

$$T_1 = \tau_1 \cdot \ln \left\{ \frac{V_{f1} - V_{i1}}{V_{f1} - V_{com1}} \right\} = 11,12 \, \mu\text{s}$$

RESET  $V_{i2} = V_{com12} = 3 \, \text{V}$   
 $V_{com11} = V_{i1} = 2 \, \text{V}$

STATO DI Q3 :  $Q = '0' \rightarrow V_Q = 0 \, \text{V} \rightarrow V_{GS_{Q3}} = 0 \, \text{V} > -|V_{TP}| : Q3 \text{ OFF}$





$$R_{p2} = R_4 \parallel (R_6 + R_7) = 4,5 \text{ k}\Omega$$

$$V_{F2} = V_{CC} \frac{R_{23}}{R_{p2} + R_1 + R_{23}} = 1,071 \text{ V}$$

VERIFICO CMB:  $V_{F2} < V_{COM21} < V_{i2}$   
 $1,071 \text{ V} < 2 \text{ V} < 3 \text{ V}$  OK VERIFICATO

$$R_{V2} = (R_{p2} + R_1) \parallel R_{23} = 821,43 \text{ }\Omega$$

$$\tau_2 = R_{V2} \cdot C = 82,143 \text{ }\mu\text{s}$$

$$T_2 = \tau_2 \cdot \ln \left\{ \frac{V_{F2} - V_{i2}}{V_{F2} - V_{COM2}} \right\} = 60,037 \text{ }\mu\text{s}$$

$$T = T_1 + T_2 = 71,156 \text{ }\mu\text{s}$$

$$f_{osc} = 14,054 \text{ kHz}$$