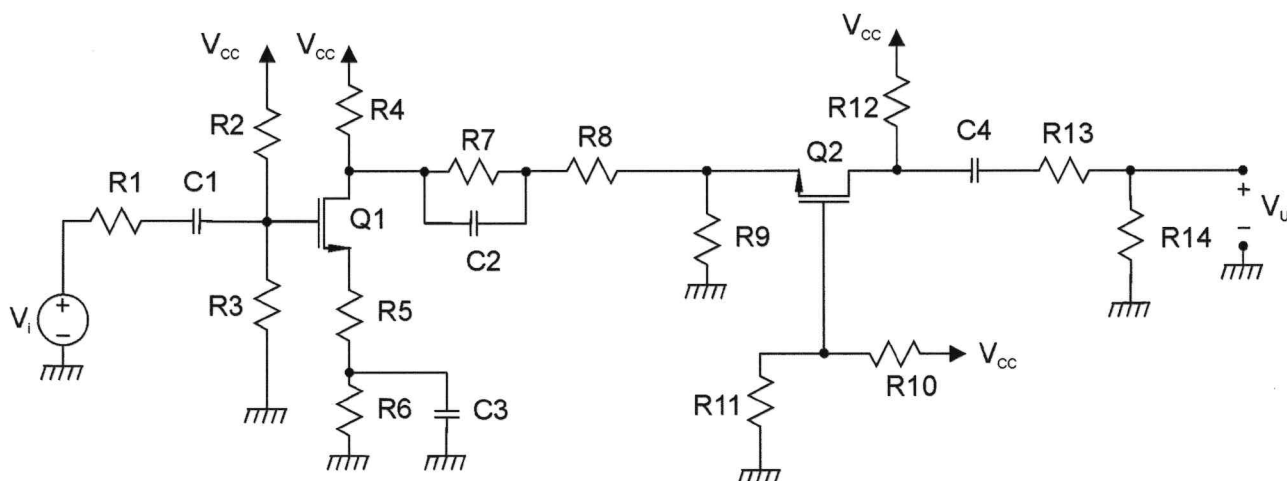


ELETTRONICA DIGITALE

Corso di Laurea in Ingegneria Informatica

Prova scritta del 24 luglio 2023

Esercizio A



$R1 = 500 \, \Omega$	$R2 = 50 \, \text{k}\Omega$	$R3 = 40 \, \text{k}\Omega$	$R4 = 5625 \, \Omega$	$R5 = 200 \, \Omega$	$R6 = 2300 \, \Omega$	$R8 = 500 \, \Omega$
$R9 = 100 \, \text{k}\Omega$	$R10 = 10 \, \text{k}\Omega$	$R11 = 20 \, \text{k}\Omega$	$R12 = 12 \, \text{k}\Omega$	$R13 = 100 \, \Omega$	$R14 = 20 \, \text{k}\Omega$	$V_{CC} = 18 \, \text{V}$

Q1 e Q2 sono dei transistori 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 $k = 0.5 \, \text{mA/V}^2$.

Con riferimento al circuito in figura:

- 1) Calcolare il valore della resistenza R7 in modo che, in condizioni di riposo, la tensione sul drain di Q2 sia 12 V. Determinare, inoltre, il punto di riposo dei due transistori e verificarne la saturazione.
- 2) Determinare l'espressione e il valore di V_U/V_i alle frequenze per le quali C1, C2, C3 e C4 possono essere considerati dei corto circuiti.

Esercizio B

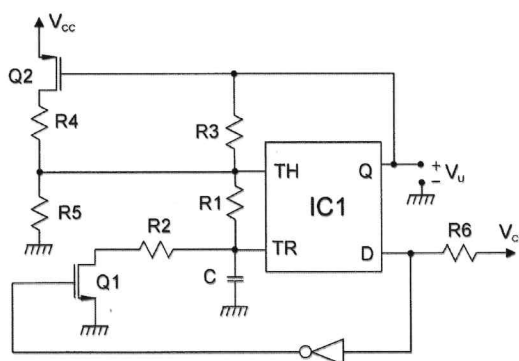
Progettare una porta logica in tecnologia CMOS, utilizzando la tecnica della pull-up network e della pull-down network, che implementi la funzione logica:

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

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.

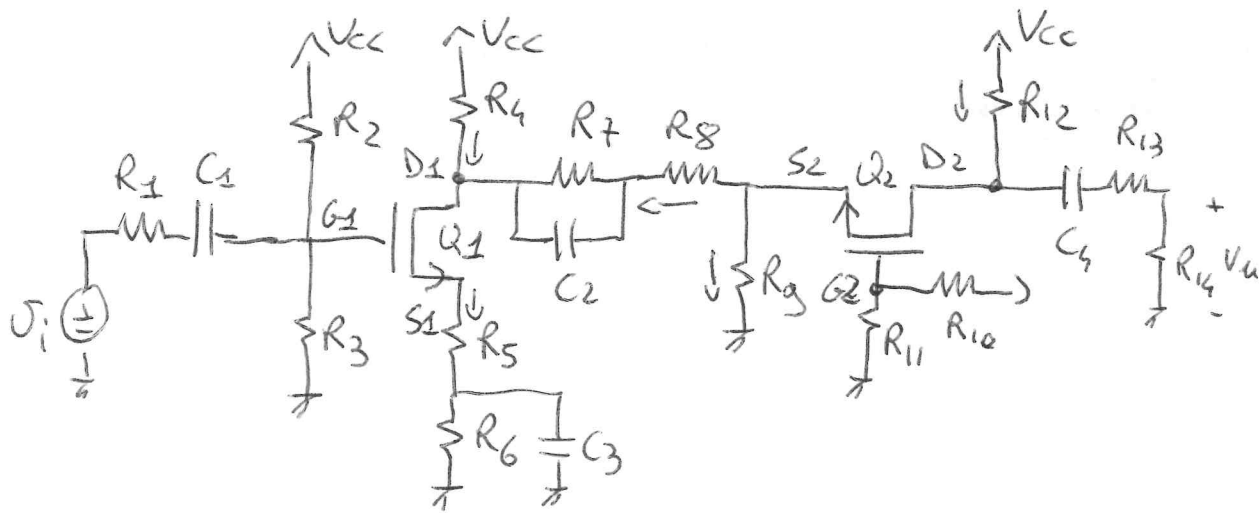
Esercizio C

$R1 = 500 \, \Omega$	$R5 = 2 \, \text{k}\Omega$
$R2 = 60 \, \Omega$	$R6 = 1 \, \text{k}\Omega$
$R3 = 500 \, \Omega$	$C = 560 \, \text{nF}$
$R4 = 600 \, \Omega$	$V_{CC} = 6 \, \text{V}$



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 ha $R_{on} = 0$ e $V_{Tp} = -1 \, \text{V}$; gli inverter sono ideali. Verificare che il circuito si comporta come un multivibratore astabile e determinare la frequenza del segnale di uscita.

ESERCIZIO A



$$R_1 = 500 \Omega$$

$$R_2 = 50 \text{ k}\Omega$$

$$R_3 = 40 \text{ k}\Omega$$

$$R_4 = 50 \text{ k}\Omega$$

$$R_5 = 200 \Omega$$

$$R_6 = 2300 \Omega$$

$$R_8 = 500 \Omega$$

$$R_9 = 100 \text{ k}\Omega$$

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

$$R_{11} = 20 \text{ k}\Omega$$

$$R_{12} = 12 \text{ k}\Omega$$

$$R_{13} = 100 \Omega$$

$$R_{14} = 20 \text{ k}\Omega$$

1) DETERMINARE R_7 PER $V_{D2} = 12 \text{ V}$

$$I_{I2} = I_{D2} = \frac{V_{CC} - V_{D2}}{R_{12}} = 0.5 \text{ mA}$$

$$I_{G2} = 0 \Rightarrow V_{G2} = V_{CC} \frac{R_{11}}{R_{11} + R_{10}} = 12 \text{ V}$$

hp: Q_2 SATURO $\Rightarrow I_{D2} = K(V_{GS2} - V_T)^2$

$$V_{GS2} = V_T \pm \sqrt{\frac{I_{D2}}{K}}$$

SCELGO LA SOLUZIONE CON IL SEGNO POSITIVO PERCHÉ UN MOS CONDUCE

SELO SE $V_{GS} \geq V_T$

$$V_{GS2} = V_T + \sqrt{\frac{I_{D2}}{K}} = 2 \text{ V}$$

$$V_{S2} = V_{G2} - V_{GS2} = 12 - 2 = 10 \text{ V}$$

$$V_{DS2} = V_{D2} - V_{S2} = 12 - 10 = 2 \text{ V}$$

VERIFICA hp SATURAZIONE DI Q_2 : $V_{DS2} \stackrel{?}{\geq} V_{GS2} - V_T$

$$2 \text{ V} > (2 - 1) = 1 \text{ V} \Rightarrow \text{hp VERIFICATA}$$

$$g_{m2} = 2K(V_{GS2} - V_T) = 1 \text{ mA/V}$$

$$I_g = \frac{V_{S2}}{R_9} = 0.1 \text{ mA}$$

$$I_8 = I_{D2} - I_g = 0.4 \text{ mA}$$

(2)

$$I_{G1} = 0 \Rightarrow V_{G1} = V_{CC} \frac{R_3}{R_2 + R_3} = 8V$$

$$\text{hp 1 } Q_1 \text{ SATURO} \Rightarrow I_{D1} = K(V_{GS1} - V_T)^2$$

$$I_{D1} = K(V_{G1} - V_{S1} - V_T)^2 = K[V_{G1} - (R_5 + R_6)I_{D1} - V_T]^2$$

$$I_{D1} = 0.5 \times 10^{-3} [8 - 2500 I_{D1} - 1]^2 = 0.5 \times 10^{-3} [7 - 2500 I_{D1}]^2$$

$$= 0.5 \times 10^{-3} [49 + 6.25 \times 10^6 I_{D1}^2 - 35000 I_{D1}]$$

$$= 3125 I_{D1}^2 - 17.5 I_{D1} + 0.0245$$

$$\Rightarrow 3125 I_{D1}^2 - 18.5 I_{D1} + 0.0245 = 0$$

$$I_{D1} = \frac{18.5 \pm \sqrt{342.25 - 306.25}}{6250} = \frac{18.5 \pm 6}{6250} \quad \begin{cases} I_{D1A} = 3.92 \text{ mA} \\ I_{D1B} = 2 \text{ mA} \end{cases}$$

$$\text{Se } I_{D1A} \Rightarrow V_{S1} = (R_5 + R_6)I_{D1A} = 9.8V \Rightarrow V_{GS1} = -1.8 < V_T = 1V \Rightarrow \text{SOLUZIONE NON ACCETTABILE}$$

$$I_{D1} = 2 \text{ mA}$$

$$V_{S1} = (R_5 + R_6)I_{D1} = 5V$$

$$\underline{V_{GS1}} = V_{G1} - V_{S1} = 8 - 5 = \underline{3V} > V_T = 1V \Rightarrow \text{SOLUZIONE ACCETTABILE}$$

$$I_4 = I_{S1} - I_8 = 2 \text{ mA} - 0.4 \text{ mA} = 1.6 \text{ mA}$$

$$V_{D1} = V_{CC} - R_4 I_4 = 9V$$

$$V_{D1} = V_{S2} - (R_7 + R_8)I_8$$

$$\underline{R_7} = \frac{V_{S2} - V_{D1}}{I_8} - R_8 = \frac{10 - 9}{0.4 \times 10^{-3}} - 5000 = \underline{2000 \Omega}$$

$$\underline{g_{m1}} = 2K(V_{GS1} - V_T) = \underline{2 \times 10^{-3} \text{ A/V}}$$

$$\underline{V_{DS1}} = V_{D1} - V_{S1} = 9 - 5 = \underline{4V}$$

$$\text{VERIFICA SATURAZIONE: } V_{DS1} \stackrel{?}{\geq} V_{GS1} - V_T$$

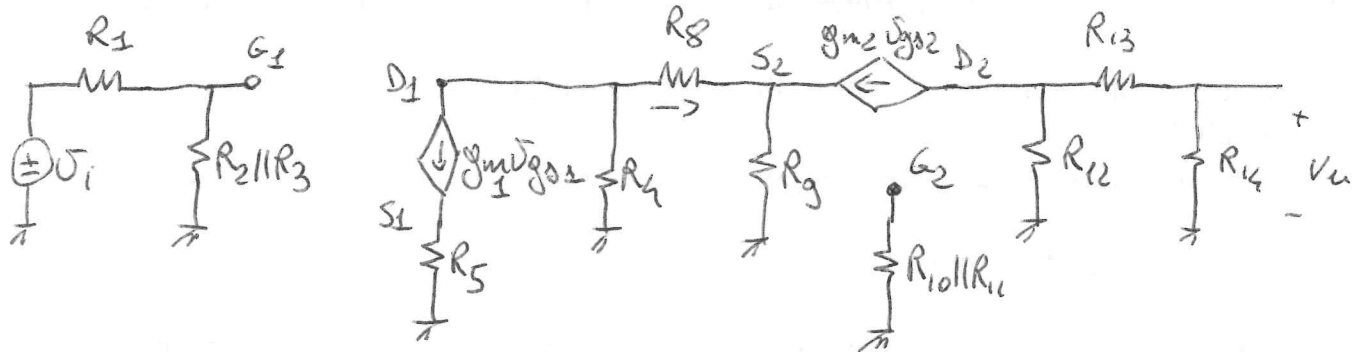
$$4V > (3V - 1V) = 2V \quad \text{HP. VERIFICATA}$$

$$Q_1: \begin{cases} I_{D1} = 2 \text{ mA} \\ V_{DS1} = 4 \text{ V} \\ V_{GS1} = 3 \text{ V} \\ g_{m1} = 2 \times 10^{-3} \text{ A/V} \end{cases}$$

$$Q_2: \begin{cases} I_{D2} = 0.5 \text{ mA} \\ V_{DS2} = 2 \text{ V} \\ V_{GS2} = 2 \text{ V} \\ g_{m2} = 1 \times 10^{-3} \text{ A/V} \end{cases}$$

(3)

2) DETERMINARE ESPRESSIONE E VALORE DI V_u/V_i A CENTRO BANDA



$$V_u = (-g_{m2} v_{gs2}) \frac{R_{12} R_{14}}{R_{12} + R_{13} + R_{14}}$$

$$v_{gs2} = \phi$$

$$v_{gs2} = i_g \left(R_9 \parallel \frac{1}{g_{m2}} \right)$$

$$i_g = (-g_{m1} v_{gs1}) \frac{R_4}{R_4 + R_8 + \left(R_9 \parallel \frac{1}{g_{m2}} \right)}$$

$$\begin{cases} v_{ds1} = (g_{m1} v_{gs1}) R_5 \\ v_{gs1} = v_{gs1} - g_{m1} v_{ds1} R_5 \end{cases} \Rightarrow v_{gs1} = \frac{1}{1 + g_{m1} R_5}$$

$$v_{gs1} = v_i \frac{R_2 \parallel R_3}{R_1 + (R_2 \parallel R_3)}$$

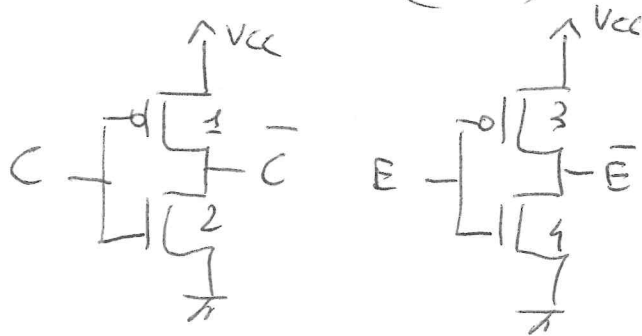
$$\frac{V_u}{V_i} = (-g_{m2}) \frac{R_{12} R_{14}}{R_{12} + R_{13} + R_{14}} \left(-R_9 \parallel \frac{1}{g_{m2}} \right) (-g_{m1}) \frac{R_4}{R_4 + R_8 + \left(R_9 \parallel \frac{1}{g_{m2}} \right)} \frac{1}{1 + g_{m1} R_5}$$

$$0.978$$

$$\frac{R_2 \parallel R_3}{R_1 + (R_2 \parallel R_3)} = -8.176$$

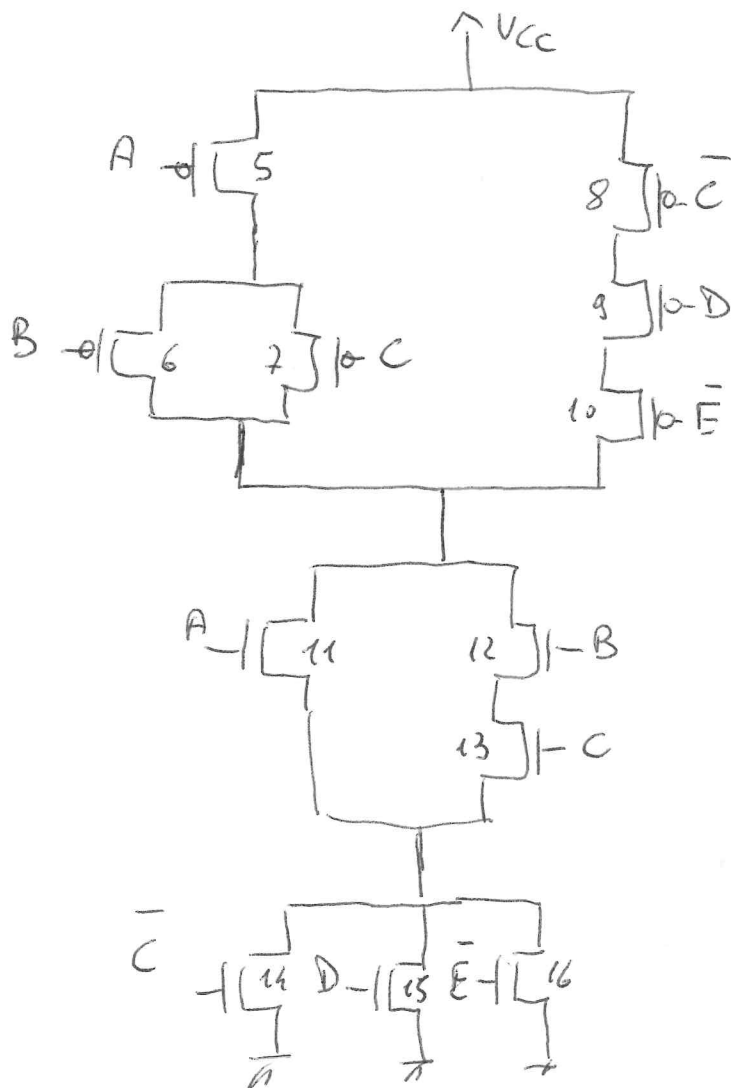
$$Y = \bar{A}(\bar{B} + \bar{C}) + C\bar{D}E$$

$$\# \text{ MOS} = (6 \times 2) + (2 \times 2) = 16$$



$$\left(\frac{W}{L}\right)_{1,3} = p = 5$$

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



DIREZIONAMENTO PUN

PERCORSI 3 MOS

$$Q_8 - Q_9 - Q_{10}$$

$$\left(\frac{W}{L}\right)_{8,9,10} = x = 15$$

$$\frac{1}{x} + \frac{1}{x} + \frac{1}{x} = \frac{1}{p} \Rightarrow x = 3p = 15$$

PERCORSI 2 MOS

$$Q_5 - Q_6$$

$$Q_5 - Q_7$$

$$\left(\frac{W}{L}\right)_{5,6,7} = y = 10$$

$$\frac{1}{y} + \frac{1}{y} = \frac{1}{p} \Rightarrow y = 2p = 10$$

DIREZIONAMENTO PDN

PERCORSI 3 MOS

$$Q_{12} - Q_{13} - Q_{14} \text{ IMPOSSIBILE } C \text{ e } \bar{C}$$

$$Q_{12} - Q_{13} - Q_{15} \text{ POSSIBILE}$$

$$Q_{12} - Q_{13} - Q_{16} \text{ POSSIBILE}$$

(5)

$$\left(\frac{W}{L}\right)_{12,13,15,16} = 2 = 6$$

$$\frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} = \frac{1}{n} \Rightarrow 2 = 3n = 6$$

1) PERCORSI DA 2 ROS

$$Q_{11} \sim Q_{14}$$

$$Q_{11} - Q_{15} \text{ CON } Q_{15} \text{ GIÀ DIMENSIONATO}$$

$$Q_{11} - Q_{16} \text{ CON } Q_{16} \text{ GIÀ DIMENSIONATO}$$

OPZIONE A: DIMENSIONO $Q_{11} - Q_{14}$ E RI VERIFICO ALTRI PERCORSI.

$$\left(\frac{W}{L}\right)_{11,14} = a = 4$$

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{a} = \frac{1}{n} \Rightarrow a = 2n = 4$$

$$\text{VERIFICA: } \frac{1}{2n} + \frac{1}{3n} = \frac{3+2}{6n} = \frac{5}{6n} < \frac{1}{n} \Rightarrow \text{OPZIONE VALIDA}$$

OPZIONE B: DIMENSIONO PRIMA $Q_{11} - Q_{15}$ (OPPURE $Q_{11} - Q_{16}$) E POI $Q_{11} - Q_{14}$

$$\left(\frac{W}{L}\right)_{11} = b$$

$$\frac{1}{b} + \frac{1}{3n} = \frac{1}{n} \Rightarrow \frac{1}{b} = \frac{2}{3n} \Rightarrow b = \frac{3}{2}n = 3$$

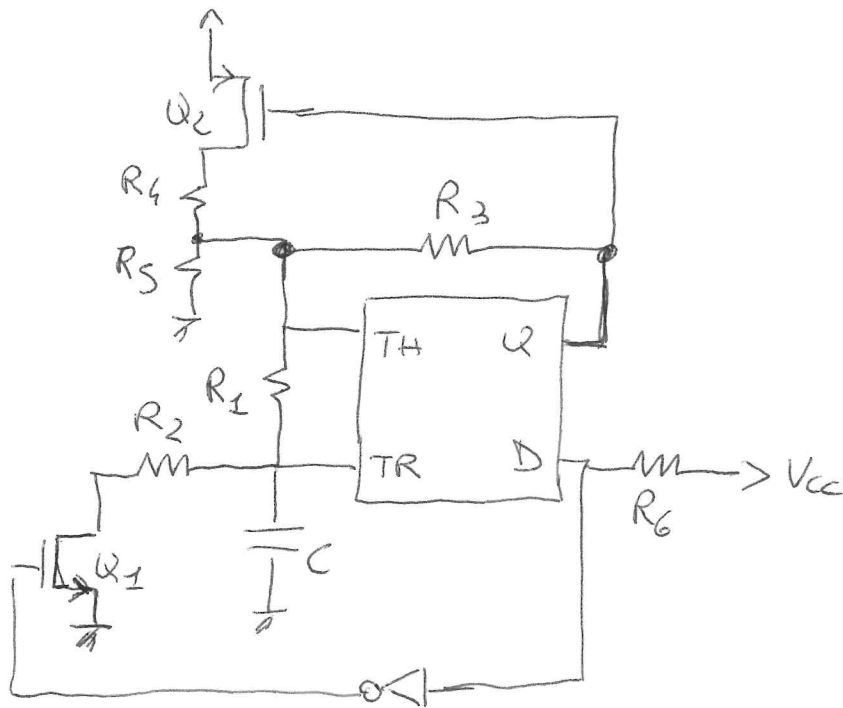
$$\left(\frac{W}{L}\right)_{14} = c$$

$$\frac{1}{c} + \frac{2}{3n} = \frac{1}{n} \Rightarrow \frac{1}{c} = \frac{1}{3n} \Rightarrow c = 3n = 6$$

CONFRONTO LE DUE OPZIONI:

	$\left(\frac{W}{L}\right)_{11}$	$\left(\frac{W}{L}\right)_{14}$	TOTALE
OP.A	4	4	8
OP.B	3	6	9

SCELGO L'OPZIONE A IN QUANTO MI CONSENTE DI OTTENERE UN CIRCUITO DI AREA MINORE



$$R_1 = 500 \Omega$$

$$R_2 = 60 \Omega$$

$$R_3 = 500 \Omega$$

$$R_4 = 600 \Omega$$

$$R_5 = 2 \text{ k}\Omega$$

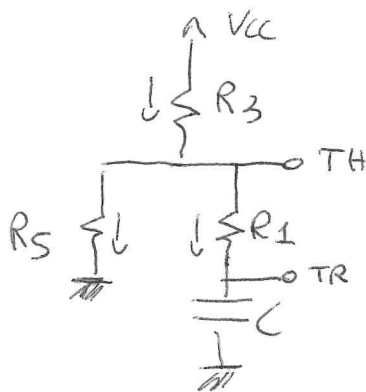
$$R_6 = 1 \text{ k}\Omega$$

$$C = 560 \text{ nF}$$

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

1) FASE SET

$$\left. \begin{array}{l} Q = 1 \\ D = \text{HI} \end{array} \right\} \Rightarrow \begin{array}{l} V_{G1} = 0 \text{ V} \quad V_{S1} = 0 \text{ V} \quad V_{GS1} = 0 \text{ V} < V_{T1} = 1 \text{ V} \Rightarrow Q1 \text{ OFF} \\ V_{G2} = 6 \text{ V} \quad V_{S2} = 6 \text{ V} \quad V_{GS2} = 0 \text{ V} > V_{T2} = -1 \text{ V} \Rightarrow Q2 \text{ OFF} \end{array}$$



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

$$V_{f1} = V_{CC} \frac{R_5}{R_3 + R_5} = 4.8 \text{ V}$$

$$V_{TH} = 4 \text{ V} \Rightarrow I_3 = \frac{V_{CC} - V_{TH}}{R_3} = 4 \text{ mA}$$

$$I_5 = \frac{V_{TH}}{R_5} = 2 \text{ mA}$$

$$I_1 = I_3 - I_5 = 2 \text{ mA}$$

$$V_{COR1} = V_{TH} - R_1 I_1 = 3 \text{ V}$$

VERIFICA CERRUTAZIONE: $V_{i1} < V_{COR1} < V_{f1}$

$$2 \text{ V} < 3 \text{ V} < 4.8 \text{ V} \quad \text{VERIFICA OK}$$

$$R_{V1} = R_1 + (R_3 \parallel R_5) = 300 \Omega$$

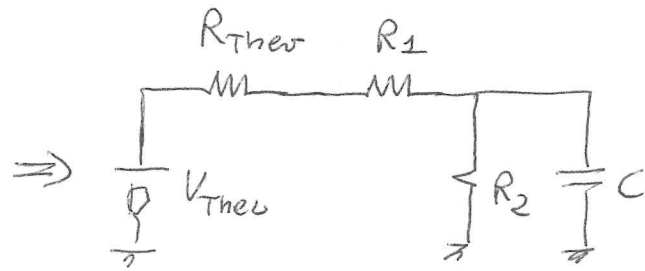
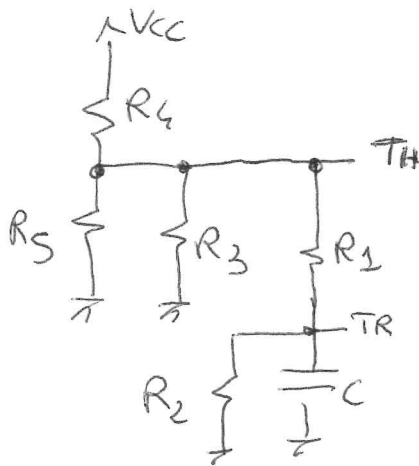
$$\tau_1 = C R_{V1} = 504 \mu\text{s}$$

$$T_1 = \tau_1 \ln \left(\frac{V_{i1} - V_{f1}}{V_{COR1} - V_{f1}} \right) = 2.2268 \times 10^{-4} \text{ s}$$

2) FASE RESET

(7)

$$\begin{aligned} Q=\phi \quad \left. \begin{array}{l} V_{G1}=6V \\ V_{S1}=\phi V \end{array} \right\} & V_{GS1}=6V > V_{T1}=1V \Rightarrow Q_1 \text{ ON} \\ D=\phi \quad \left. \begin{array}{l} V_{G2}=\phi V \\ V_{S2}=6V \end{array} \right\} & V_{GS2}=-6V < V_{T2}=-1V \Rightarrow Q_2 \text{ ON} \end{aligned}$$



$$V_{Thev} = V_{CC} \frac{R_3 \parallel R_5}{(R_3 \parallel R_5) + R_4} = 2.4V$$

$$R_{Thev} = R_3 \parallel R_4 \parallel R_5 = 240 \Omega$$

$$V_{i2} = V_{con1} = 3V$$

$$V_{con2} = V_{i1} = 2V$$

$$V_{f2} = V_{Thev} \frac{R_2}{R_{Thev} + R_1 + R_2} = 0.18V$$

$$\text{VERIFICA: } V_{i2} > V_{con2} > V_{f2}$$

$$3V > 2V > 0.18V \Rightarrow \text{VERIFICA OK}$$

$$R_{v2} = R_2 \parallel (R_1 + R_{Thev}) = 55.5 \Omega$$

$$\tau_2 = C R_{v2} = 31.08 \mu s$$

$$T_2 = \tau_2 \ln \left(\frac{V_{i2} - V_{f2}}{V_{con2} - V_{f2}} \right) = 1.361 \times 10^{-5} s$$

$$T = T_1 + T_2 = 2.3629 \times 10^{-4} s$$

$$f = \frac{1}{T} = \underline{\underline{4232 \text{ Hz}}}$$