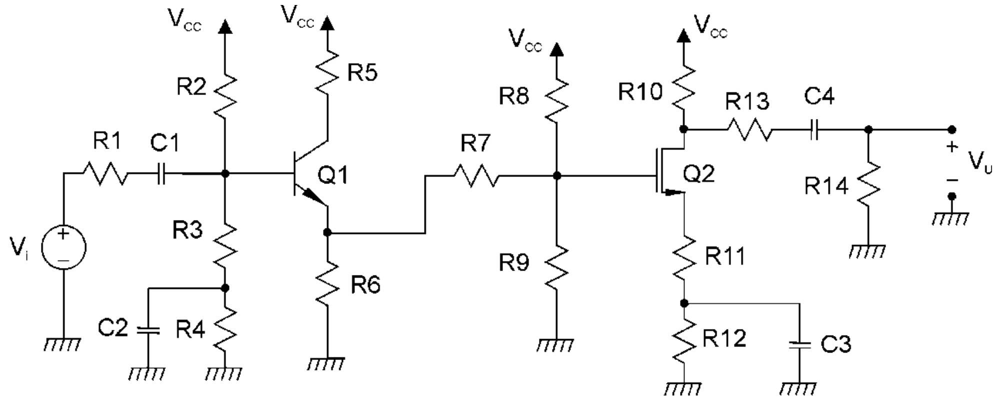
ELETTRONICA DIGITALE
Corso di Laurea in Ingegneria Informatica

Prova scritta del 16 gennaio 2023

Esercizio A



R1 = 50 Ω	R2 = 20.2 kΩ	R3 = 15 kΩ	R5 = 2.9 kΩ	R6 = 2.4 kΩ	R7 = 800 Ω	R8 = 8 kΩ
R9 = 32 kΩ	R10 = 3 kΩ	R11 = 100 Ω	R12 = 2.4 kΩ	R13 = 1 kΩ	R14 = 20 kΩ	VCC = 18 V

Q1 è un transistore BJT BC109B resistivo con $h_{re} = h_{oe} = 0$; Q2 è un transistore MOS a canale n resistivo con $V_T = 1$ V e la corrente di drain in saturazione è data da $I_D = k(V_{GS} - V_T)^2$ con $k = 0.5$ mA/V^2;
Con riferimento al circuito in figura:

1) Calcolare il valore della resistenza R4 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 verificare la saturazione di Q2.
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

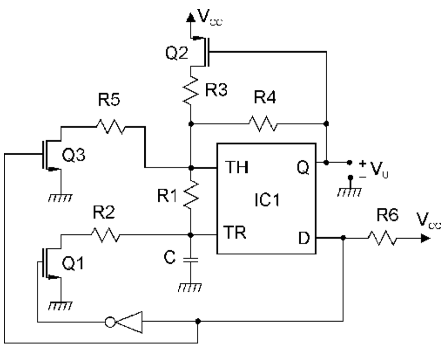
Progettare una porta logica in tecnologia CMOS, utilizzando la tecnica della pull-up network e della pull-down network, che implementi la funzione logica:

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

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

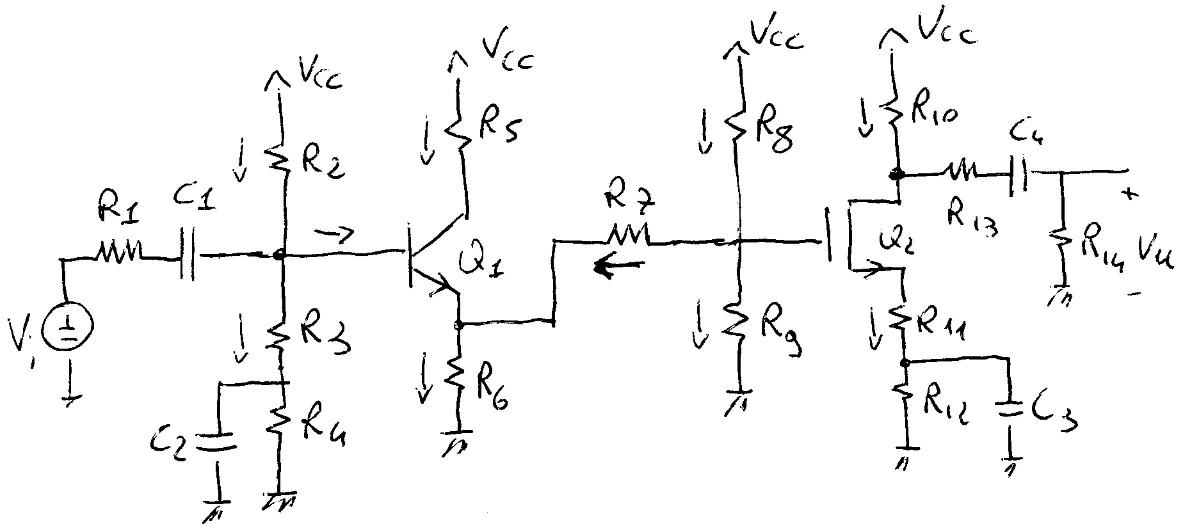
R_1 = 400 Ω	R_5 = 5 kΩ
R_2 = 100 Ω	R_6 = 2 kΩ
R_3 = 1 kΩ	C = 470 nF
R_4 = 1 kΩ	V_{CC} = 6 V



Il circuito IC_1 è un NE555 alimentato a $V_{CC} = 6$ V; Q_1 e Q_3 hanno $R_{on} = 0$ e $V_{Tn} = 1$V; Q2 ha $R_{on} = 0$ e $V_{Tp} = -1$V; l'inverter è ideale. Verificare che il circuito si comporta come un multivibratore astabile e determinare la frequenza del segnale di uscita.

APPELLO 16/01/2023

ESERCIZIO A



$R_1 = 50\,\Omega$
$R_2 = 20.2\,K\Omega$
$R_3 = 15\,K\Omega$
$R_5 = 2.9\,K\Omega$
$R_6 = 2.4\,K\Omega$
$R_7 = 800\,\Omega$
$R_8 = 8\,K\Omega$
$R_9 = 32\,K\Omega$
$R_{10} = 3\,K\Omega$
$R_{11} = 100\,\Omega$
$R_{12} = 2.4\,K\Omega$
$R_{13} = 1\,K\Omega$
$R_{14} = 20\,K\Omega$

1) Det. R_4 PER $V_{DRAIN} = 12V$

$$I_{10} = \frac{V_{cc} - V_D}{R_{10}} = 2\,mA = I_D$$

$I_G = 0$ PERCHE' Q_2 E' UN MOS $\Rightarrow I_{10} = I_{11}$ $(I_D = I_S)$

$$V_S = I_{11}(R_{11} + R_{12}) = 5V$$

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

$\Rightarrow V_{GS} = V_T \pm \sqrt{\frac{I_D}{K}}$ POICHE' Q_2 E' MOS A CANALE N CHE CONDUCE PER

$V_{GS} \geq V_T$ SCELGO LA SOLUZIONE CON IL SEGNO POSITIVO

$\Rightarrow V_{GS} = V_T + \sqrt{\frac{I_D}{K}} = 3V$

$V_{DS} = V_D - V_S = 12 - 5 = 7V$

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

$7V > 2V$ VERIFICATO !

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

$$Q_1: \begin{cases} I_D = 2\,mA \\ V_{DS} = 7\,V \\ V_{GS} = 3V \\ g_m = 2 \times 10^{-3}\,A/V \end{cases}$$

$$V_G = V_{GS} + V_S = 3 + 5 = 8\,V$$

$$I_8 = \frac{V_{cc} - V_G}{R_8} = 1.25\,mA$$

$$I_9 = \frac{V_G}{R_9} = 0.25\,mA$$

$I_7 = I_8 - I_9 = 1\ mA$

$V_E = V_G - R_7 I_7 = 7.2 V$

$I_6 = \dfrac{V_E}{R_6} = 3\ mA$

$I_E = I_6 - I_7 = 2\ mA$

·) hp Q_1 : $I_B << I_C \Rightarrow I_C \simeq I_E$

$V_C = V_{CC} - R_5 I_C = 12.2\ V$

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

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

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

$I_B = \dfrac{I_C}{h_{FE}} = 6.8965\ \mu A$; $I_B << I_C$ E' VERIFICATA

$Q_2 : \begin{cases} I_C = 2mA \\ V_{CE} = 5V \\ I_B = 6.8965 \mu A \\ h_{fe} = 300 \\ h_{ie} = 4800\ \Omega \end{cases}$

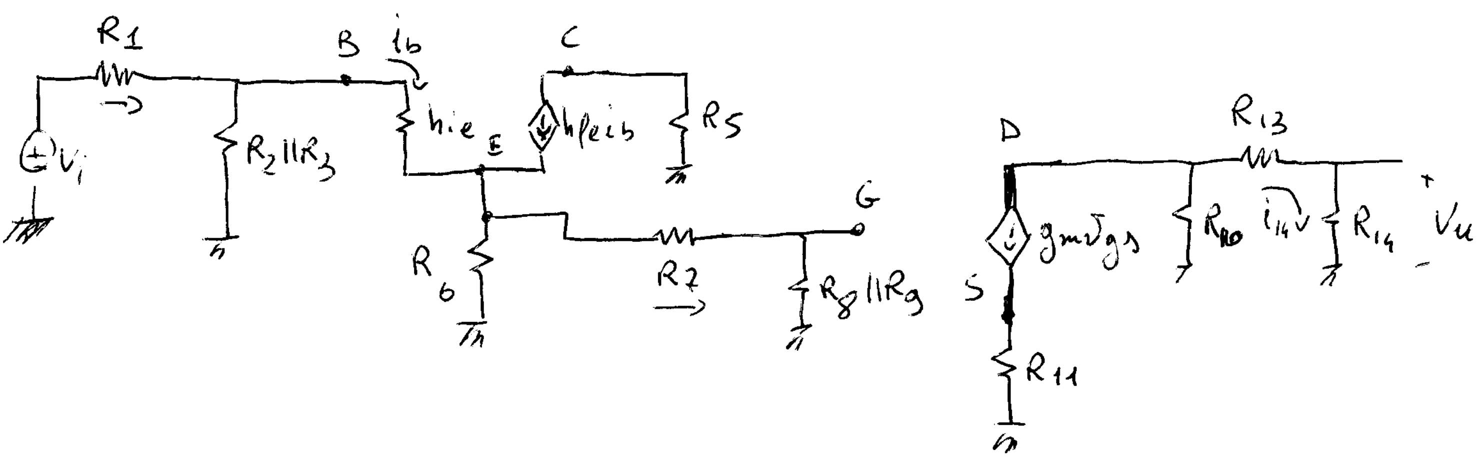
$V_B = V_E + V_\gamma = 7.9\ V$

$I_2 = \dfrac{V_{CC} - V_B}{R_2} = 0.5\ mA$

$I_3 = I_2 - I_B = 0.4931\ mA$

$\underline{R_4} = \dfrac{V_B}{I_3} - R_3 = \underline{\underline{1021.09\ \Omega}}$

CIRCUITO CON C_1, C_2, C_3, C_4 CORTOCIRCUITATI



$V_u = R_{14} \cdot i_{14}$

$$i_{14} = (-g_m v_{gs}) \frac{R_{10}}{R_{10} + R_{13} + R_{14}}$$

$$\left.\begin{array}{l} v_s = R_{11}\, g_m v_{gs} \\ v_{gs} = v_g - v_s = v_g - R_{11}\, g_m v_{gs} \end{array}\right\} \Rightarrow v_{gs} = \frac{v_g}{1 + g_m R_{11}}$$

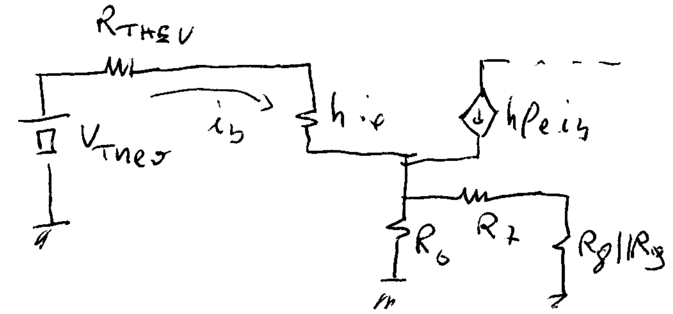
$$v_g = (R_8 \| R_9)\, i_7$$

$$i_7 = (h_{fe}+1)\, i_b \frac{R_6}{R_6 + R_7 + (R_8 \| R_9)}$$

$$i_b = i_1 \frac{(R_2 \| R_3)}{(R_2 \| R_3) + h_{ie} + \{[R_6 \| (R_7 + R_8 \| R_9)](h_{fe}+1)\}}$$

$$i_1 = \frac{V_i}{R_1 + R_2 \| R_3 \| \{ h_{ie} + [R_6 \| (R_7 + R_8 \| R_9)](h_{fe}+1)\}}$$

PER DETERMINARE ~~calcolare~~ IL LEGAME TRA i_b e v_i SI PUÒ PROCEDERE ANCHE FACENDO IL CIRCUITO EQ. DI THEVENIN ~~dell'ingr~~ DELL'INGRESSO



$$V_{THEV} = V_i \frac{R_2 \| R_3}{R_1 + R_2 \| R_3}$$

$$R_{THEV} = R_1 \| R_2 \| R_3$$

$$V_{THEV} = (R_{THEV} + h_{ie})\, i_b + (h_{fe}+1)\, i_b [R_6 \| (R_7 + R_8 \| R_9)]$$

$$i_b = V_i \frac{R_2 \| R_3}{R_1 + R_2 \| R_3} \frac{1}{(R_1 \| R_2 \| R_3) + h_{ie} + (h_{fe}+1)[R_6 \| (R_7 + R_8 \| R_9)]}$$

$$\frac{V_u}{V_i} = -\overset{2\times10^{-3}}{g_m} \overset{0.125}{\frac{R_{10}}{R_{10} + R_{13} + R_{14}}} \overset{20\times10^{3}}{R_{14}} \overset{0.8\overline{3}}{\frac{1}{1 + g_m R_{11}}} \overset{6400}{(R_8 \| R_9)} \overset{301}{(h_{fe}+1)} \overset{0.25}{\frac{R_6}{R_6 + R_7 + (R_8 \| R_9)}}$$

$$\overset{0.994}{\frac{R_2 \| R_3}{R_1 + R_2 \| R_3}} \overset{1.829\times10^{-6}}{\frac{1}{(R_1 \| R_2 \| R_3) + h_{ie} + (h_{fe}+1)[R_6 \| (R_7 + R_8 \| R_9)]}} = -3.65$$

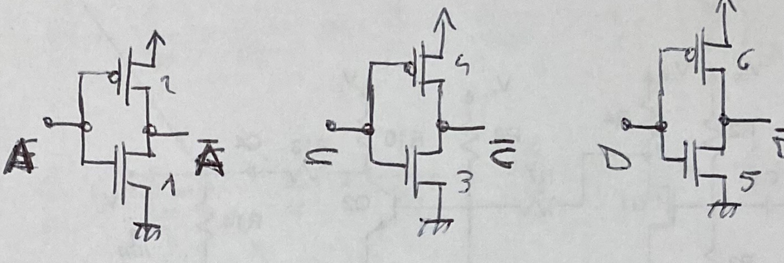
$$Y = (\bar{A}\cdot\bar{B} + C)\cdot D + A\bar{D}\bar{C}$$

$$N = 2\times(7+3) = 20$$

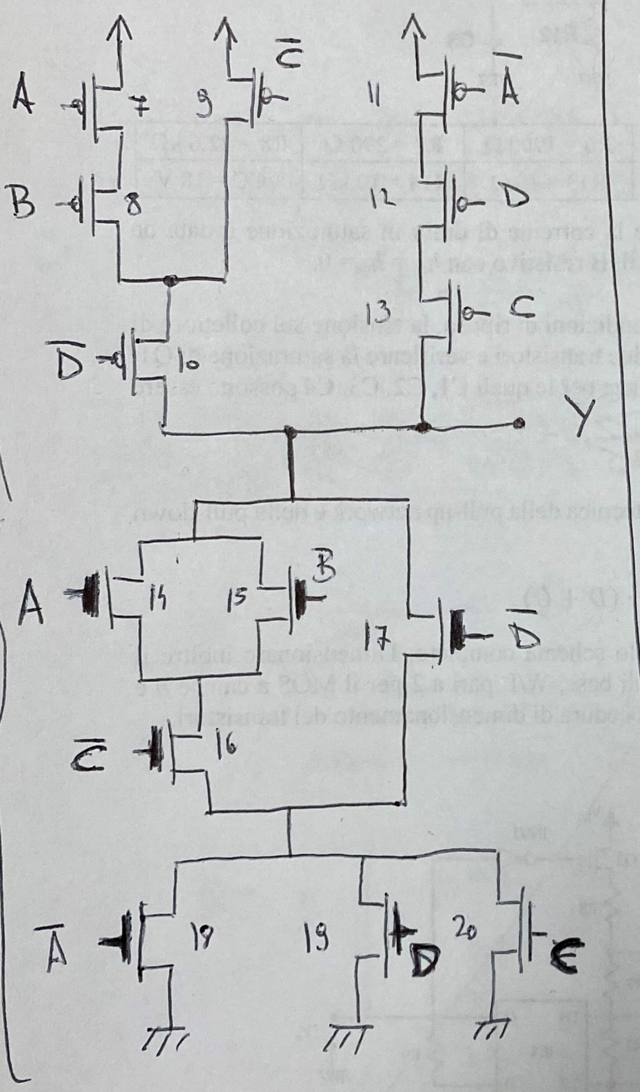
$$\left(\frac{W}{L}\right)_{1,3,5} = n = 2$$

$$\left(\frac{W}{L}\right)_{2,4,6} = p = 5$$

INVERTER:



PUN



PDN

$\boxed{\text{DIM PUN:}}$

① PERCORSI DA 3 PMOS: 7-8-10, 11-12-13 } POSSIBILI

$$\left(\frac{W}{L}\right)_{7,8,10,11,12,13} = x \rightarrow \frac{1}{x}+\frac{1}{x}+\frac{1}{x} = \frac{3}{x} = \frac{1}{p}$$

$$x = 3p = 15 = \left(\frac{W}{L}\right)_{7,8,10,11,12,13}$$

② PERCORSO DA 2 PMOS: 9-10: POSSIBILE (10 GIÀ DIM.)

$$\left(\frac{W}{L}\right)_{9} = t \qquad \frac{1}{t}+\frac{1}{3p} = \frac{3}{3p} \rightarrow \frac{1}{t} = \frac{2}{3p}$$

$$t = \left(\frac{W}{L}\right)_{9} = \frac{3p}{2} = 7.5$$

DIM. PDN: PERCORSI DA 3 NMOS:

14-16-18 IMPOSSIBILE (A e $\bar{A}$)
14-16-19 POSS.
14-16-20 IMPOSSIBILE ($\bar{C}$ e C)
15-16-18 } POSS.
15-16-19 }
15-16-20 IMPOSSIBILE ($\bar{C}$ e C)

$$\left(\frac{W}{L}\right)_{14,15,16,18,19} = z \qquad \frac{1}{z}+\frac{1}{z}+\frac{1}{z} = \frac{3}{z} = \frac{1}{n} \rightarrow \left(\frac{W}{L}\right)_{14,15,16,18,19} = 3n = 6$$

GIÀ DIM.

PERCORSI DA 2 NMOS:

17-18 POSS.
17-19 IMPOSSIBILE ($\bar{D}$ e D)
17-20 POSS.

OPZ. A.

USO 17-18 PER DIM. 17

POI USO 17-20 PER DIM. 20

$\left(\frac{W}{L}\right)_{17} = f \qquad \frac{1}{f} + \frac{1}{3m} = \frac{3}{3m} \rightarrow \frac{1}{f} = \frac{2}{3m} \rightarrow \left(\frac{W}{L}\right)_{17} = f = \frac{3m}{2} = 3$

$\left(\frac{W}{L}\right)_{20} = h \qquad \frac{1}{h} + \frac{1}{\frac{3m}{2}} = \frac{1}{h} + \frac{2}{3m} = \frac{3}{3m} \rightarrow \frac{1}{h} = \frac{1}{3m} \rightarrow h = \left(\frac{W}{L}\right)_{20} = 3m = 6$

OPZ. B

DIMENSIONO 17 E 20 USANDO 17-20

VERIFICO LA CONDIZIONE SU RON NEL PERCORSO 17-18 (RON $\leq$ RON EQ. INV)

$\left(\frac{W}{L}\right)_{17,20} = c \qquad \frac{1}{c} + \frac{1}{c} = \frac{2}{c} = \frac{1}{m} \rightarrow c = \left(\frac{W}{L}\right)_{17,20} = 2m = 4$

~~$\frac{1}{2m} + \frac{1}{3m} \rightarrow \ldots \frac{2}{6m} \ldots \frac{1}{m}$~~ ~~OK VERIFICATO~~

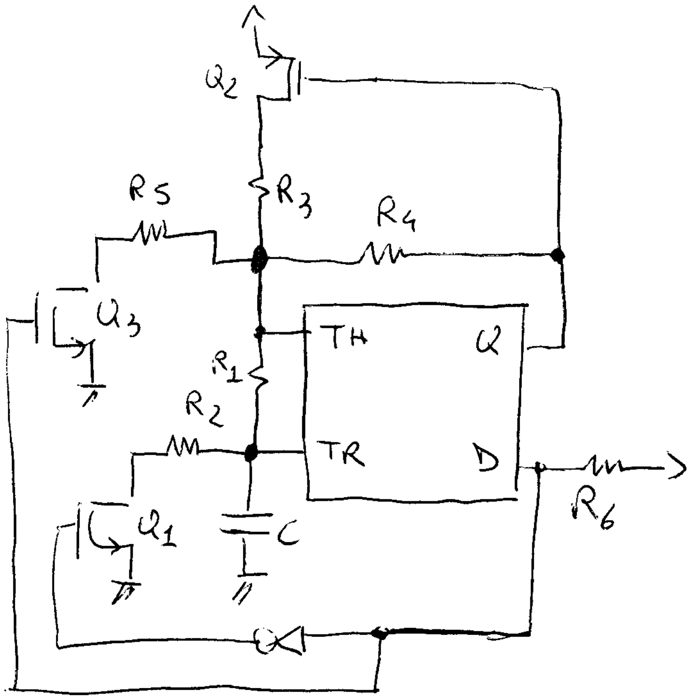
$\frac{1}{2m} + \frac{1}{3m} = \frac{5}{6m} < \frac{1}{m}$ OK

CONFRONTO IN AREA USANDO I $\frac{W}{L}$, ASSUMENDO $L = L_{min}$

	OPZ. A	OPZ. B
17	$\frac{3m}{2} = 3$	$2m = 4$
20	$3m = 6$	$2m = 4$
SOMMA	$\frac{9m}{2} = 9$	$4m = 8$

OPZ. B DA PREFERIRE PERCHÉ AD AREA MINIMA

ESERCIZIO C



$R_1 = 400\,\Omega$

$R_2 = 100\,\Omega$

$R_3 = 1\,k\Omega$

$R_4 = 1\,k\Omega$

$R_5 = 5\,k\Omega$

$R_6 = 2\,k\Omega$

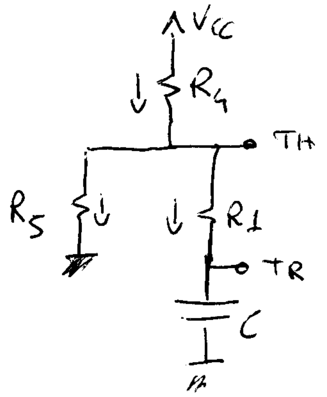
$C = 470\,nF$

$V_{cc} = 6\,V$

FASE 1

·) $Q = 1 \Rightarrow V_{G2} = 6V \quad V_{S2} = 6V \Rightarrow V_{GS2} = \varnothing V > V_{T2} = -1V \Rightarrow Q_2$ OFF

$D = HI \Rightarrow \begin{cases} V_{G1} = \varnothing V \quad V_{S1} = \varnothing V \Rightarrow V_{GS1} = \varnothing V < V_{T1} = 1V \Rightarrow Q_1 \text{ OFF} \\ V_{G3} = 6V \quad V_{S3} = \varnothing V \Rightarrow V_{GS3} = 6V > V_{T3} = 1V \Rightarrow Q_3 \text{ ON} \end{cases}$



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

$\underline{\underline{V_{f1}}} = V_{cc} \dfrac{R_5}{R_4 + R_5} = \underline{\underline{5V}}$

$Se\ V_{TH} = \dfrac{2}{3} V_{cc} = 4V \Rightarrow I_4 = \dfrac{V_{cc} - V_{TH}}{R_4} = 2mA$

$I_5 = \dfrac{V_{TH}}{R_5} = 0.8\,mA$

$I_1 = I_4 - I_1 = 1.2\,mA$

$\underline{\underline{V_{com1}}} = V_{TH} - R_1 I_1 = \underline{\underline{3.52\,V}}$

VERIFICA COMMUTAZIONE : $V_i < V_{com} < V_f$

$2V < 3.52V < 5V$ $\underline{OK}$

$R_{v1} = R_1 + (R_4 \| R_5) = 1233.\overline{3}\,\Omega$

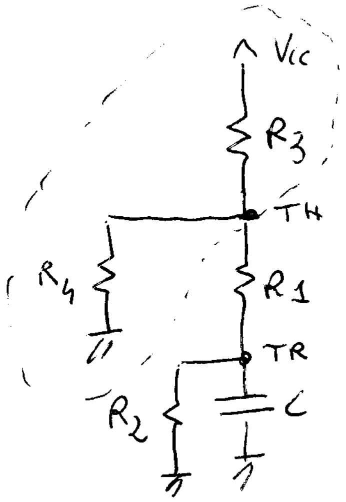
$\tau_1 = C R_{v1} = 5.79\overline{6} \times 10^{-4}\,s$

$T_1 = \tau_1 \ln\left(\dfrac{V_{i1} - V_{f1}}{V_{com1} - V_{f1}}\right) = 4.09575 \times 10^{-4}\,s$

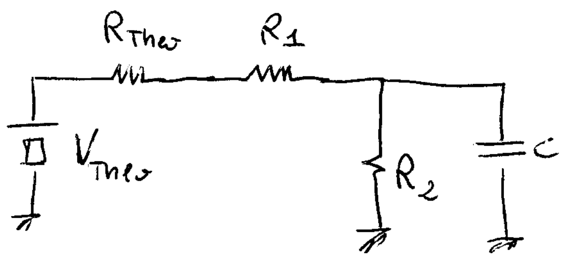
FASE 2

$Q=0 \Rightarrow V_{G2}=\phi V \quad V_{S2}=6V \Rightarrow V_{GS2}=-6V < V_{T2}=-1V \Rightarrow Q_2$ ON

$D=0 \Rightarrow \begin{cases} V_{G1}=6V \quad V_{S1}=\phi V \Rightarrow V_{GS1}=6V > V_{T1}=1V \Rightarrow Q_1 \text{ ON} \\ V_{G3}=\phi V \quad V_{S3}=\phi V \Rightarrow V_{GS3}=\phi V < V_{T2}=1V \Rightarrow Q_3 \text{ OFF} \end{cases}$



$\Rightarrow$



$R_{Ther}=R_3 \| R_4 = 500\Omega$

$V_{Ther}=V_{CC}\dfrac{R_4}{R_3+R_4}=3V$

$V_{i2}=V_{com1}=3.52V$

$V_{com2}=V_{i1}=2V$

$V_{f2}=V_{Ther}\cdot\dfrac{R_2}{R_{Ther}+R_1+R_2}=\underline{0.3V}$

VERIFICA COMMUTAZIONE : $V_{i2}>V_{com2}>V_{f2}$

$3.52V > 2V > 0.3V$ OK

$R_{V2}=R_2 \| (R_1+R_{Th})=90\Omega$

$\tau_2 = C R_{V2} = 42.3\ \mu s$

$T_2=\tau_2 \ln\left(\dfrac{V_{i2}-V_{f2}}{V_{com2}-V_{f2}}\right)=2.702\times10^{-5}\ s$

$T=T_1+T_2 = 4.366\times10^{-4}\ s$

$f=\dfrac{1}{T}=\underline{2290.45}\ \underline{Hz}$