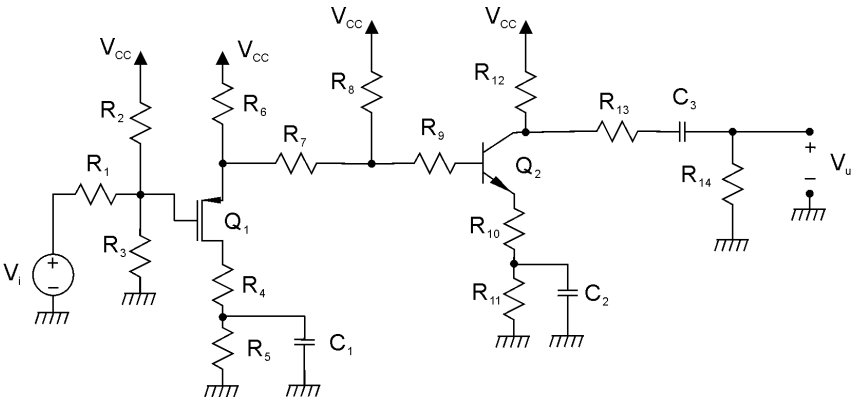
# ELETTRONICA DIGITALE

Corso di Laurea in Ingegneria Informatica

Prova scritta del 30 giugno 2016

## Esercizio A

| | |
|---|---|
| $R_1$ =20 kΩ | $R_{11}$ = 3.4 kΩ |
| $R_2$ = 26 kΩ | $R_{12}$ = 3 kΩ |
| $R_3$ = 20 kΩ | $R_{13}$ = 1 kΩ |
| $R_4$ = 500 Ω | $R_{14}$ = 20 kΩ |
| $R_5$ = 1.5 kΩ | $C_1$ = 100 nF |
| $R_7$ = 2 kΩ | $C_2$ = 83 nF |
| $R_8$ = 101 kΩ | $C_3$= 68 nF |
| $R_9$ = 29 kΩ | $V_{CC}$ = 18 V |
| $R_{10}$ = 100 Ω | |




$Q_1$ è un transistore MOS a canale p resistivo, con la corrente di drain in saturazione data da $I_D=k(V_{GS}-V_T)^2$ con $k$ = 0.5 mA/V$^2$ e $V_T$ = -1 V; $Q_2$ è un transistore BJT BC109B resistivo con $h_{re} = h_{oe}= 0$.
Con riferimento al circuito in figura:

1) Calcolare il valore della resistenza $R_6$ in modo che, in condizioni di riposo, la tensione sul collettore di $Q_2$ sia 12 V. Determinare, inoltre, il punto di riposo dei due transistori e verificare la saturazione di $Q_1$. (R: $R_6$ = 7478 Ω)
2) Determinare l'espressione e il valore di $V_U/Vi$ alle frequenze per le quali $C_1$, $C_2$ e $C_3$ possono essere considerati dei corto circuiti. (R: $V_U/Vi$ = -3.69)
3) (**Solo per 12 CFU**) Determinare la funzione di trasferimento $V_U/V_i$ e tracciarne il diagramma di Bode quotato asintotico del modulo. ( R: $f_{z1}=f_{p1}$; $f_{z2}$=564 Hz; $f_{p2}$=9259 Hz; $f_{z3}$=0 Hz; $f_{p3}$=97 Hz)

## Esercizio B

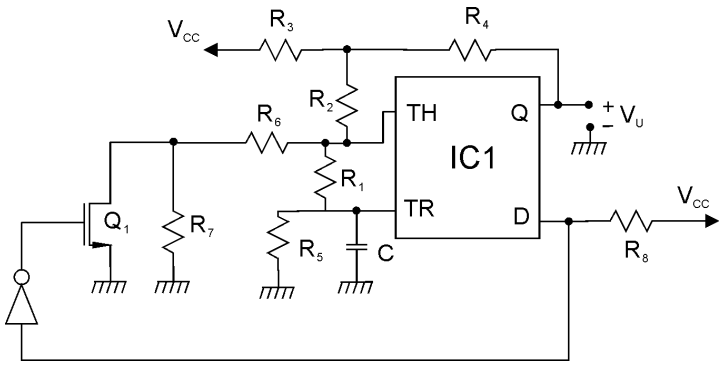
Progettare una porta logica in tecnologia CMOS, utilizzando la tecnica della pull-up network e della pull-down network, che implementi la funzione logica:

$$Y = \overline{BC}\left(\overline{A}\,D + \overline{D}\,E\right) + \left(\overline{\overline{A} + \overline{D}}\right)\overline{BC} + B\,\overline{D}\,E$$

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.

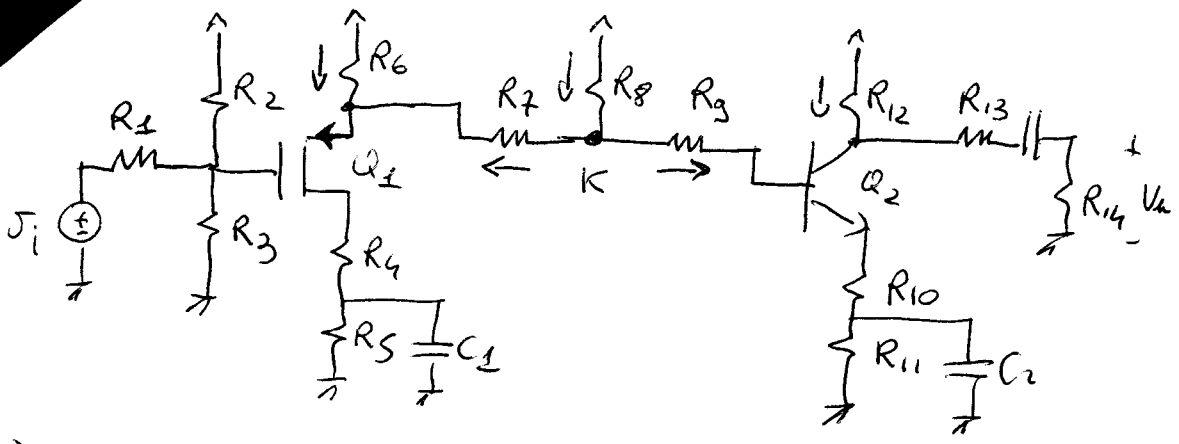
## Esercizio C

| | |
|---|---|
| $R_1$ =200 Ω | $R_6$ = 500 Ω |
| $R_2$ = 500 Ω | $R_7$ = 7500 Ω |
| $R_3$ = 1 kΩ | $R_8$ = 1 kΩ |
| $R_4$ = 1 kΩ | C = 15 nF |
| $R_5$ = 7800 Ω | **$V_{CC}$ = 6 V** |




Il circuito $IC_1$ è un NE555 alimentato a $\mathbf{V_{CC}}$ **= 6V**, $Q_1$ ha una $R_{on}$ = 0 e $V_T$ = 1V; l'inverter è ideale. Determinare la frequenza del segnale di uscita del multivibratore in figura. (R: f = 46367 Hz)

APPELLO 30/06/2016




$V_{cc} = 18V$

$R_1 = 20k\Omega$
$R_2 = 26k\Omega$
$R_3 = 20k\Omega$
$R_4 = 500\Omega$
$R_5 = 1.5k\Omega$
$R_7 = 2k\Omega$
$R_8 = 101k\Omega$
$R_9 = 29k\Omega$
$R_{10} = 100\Omega$
$R_{11} = 3.4k\Omega$
$R_{12} = 3k\Omega$
$R_{13} = 1k\Omega$
$R_{14} = 20k\Omega$
$K = 0.5 \frac{mA}{V^2}$
$V_T = -1V$

1) Det $R_6$ per $V_c = 12V$

$$I_{12} = I_C = \frac{V_{cc} - V_c}{R_{12}} = \frac{18-12}{3000} = 2mA$$

$I_B << I_C \Rightarrow I_E \simeq I_C = 2mA$

$V_E = I_E (R_{10} + R_{11}) = 7V$

$V_{CE} = V_C - V_E = 12 - 7 = 5V$

$\Rightarrow \beta_F = 290 \Rightarrow I_B = \frac{I_C}{290} = 6.896\mu A$

$I_B << I_C$ (OK)

$Q_2$: $I_C = 2mA$, $V_{CE} = 5V$, $I_B = 6.896\mu A$, $\beta_F = 290$, $h_{fe} = 300$, $h_{ie} = 4800\Omega$

$V_B = V_E + V_\gamma = 7 + 0.7 = 7.7V$

$V_K = V_B + R_9 I_B = 7.9V$

$I_8 = \frac{V_{cc} - V_K}{R_8} = 100\mu A$

$I_7 = I_8 - I_B = 9.31 \times 10^{-5} A$

$V_S = V_K - I_7 R_7 = 7.7138V$

$V_G = V_{cc} \frac{R_1 \| R_3}{R_2 + R_1 \| R_3} = 5V$

$V_{GS} = -2.7138V$

$V_{GS} - V_T = -1.7138V$

$I_D = K(V_{GS} - V_T)^2 = 1.468mA$

$I_6 = I_D - I_7 = 1.3754mA$

$Q_1$: $V_{DS} = -4.7778V$, $I_D = 1.468mA$, $V_{GS} = -2.7138V$

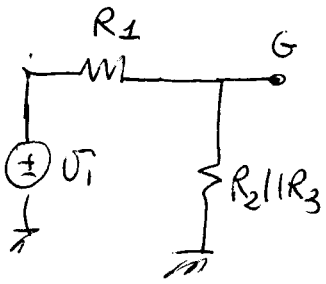
$g_m = 2k|V_{GS} - V_T| = 1.7138\ 10^{-3} \frac{A}{V}$

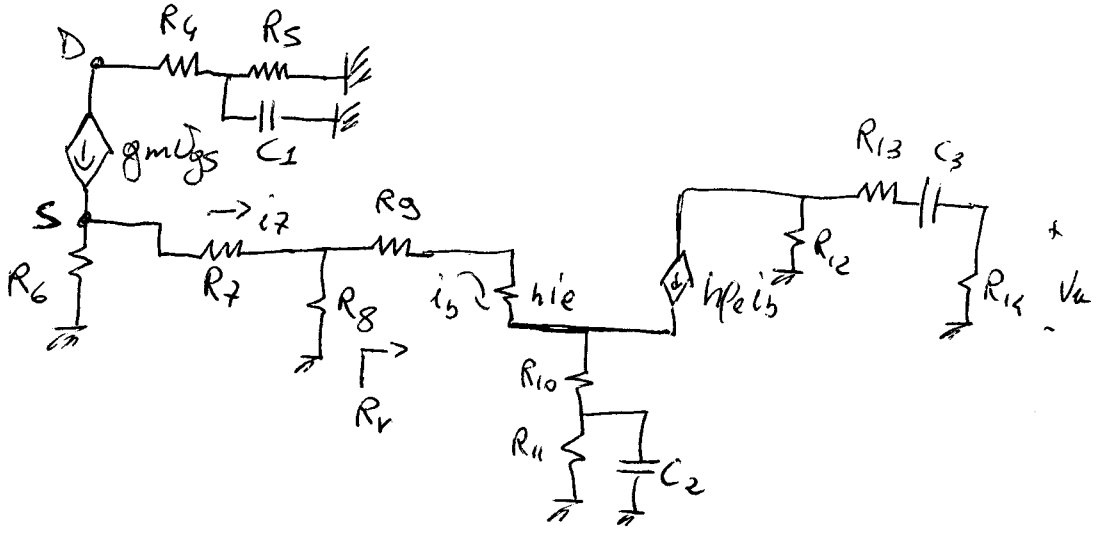
$$= \frac{V_{cc} - V_S}{I_6} = \underline{\underline{7478.48\,\Omega}}$$

$$V_D = I_D (R_4 + R_5) = 2.936\,V$$

$$V_{DS} = -4.7278 < -1.7138 = (V_{GS} - V_T)$$

---




$A_{CB}$ :

$$V_u = \left(-h_{fe} i_b\right) \frac{R_{12}}{R_{12} + R_{13} + R_{14}} \cdot R_{14}$$

$$i_b = i_7 \frac{R_8}{R_8 + \underbrace{R_g + h_{ie} + R_{10}(h_{fe}+1)}_{R_V}} = i_7 \frac{R_8}{R_8 + R_V}$$

$$i_7 = g_m V_{gs} \frac{R_6}{R_6 + R_7 + (R_8 \| R_V)}$$

$$R_V = R_g + h_{ie} + R_{10}(h_{fe}+1) = 63900\,\Omega$$

$$V_S = g_m V_{gs} \underbrace{\left\{ R_6 \| \left[ R_7 + (R_8 \| R_V) \right] \right\}}_{R^*} = g_m V_{gs} R^*$$

$$R^* = R_6 \| \left[ R_7 + (R_8 \| R_V) \right] = 6328.1\,\Omega$$

$$V_{gs} = V_g - g_m V_{gs} R^* \Rightarrow V_{gs} = \frac{V_g}{1 + g_m R^*}$$

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

$$A_{CB} = \frac{V_u}{V_i} = -h_{fe} \underbrace{\frac{R_{12} R_{14}}{R_{12} + R_{13} + R_{14}}}_{2500} \cdot \underbrace{\frac{R_8}{R_8 + R_V}}_{0.61249} g_m \underbrace{\frac{R_6}{R_8 + R_7 + (R_8 \| R_V)}}_{0.1538} \underbrace{\frac{1}{1 + g_m R^*}}_{8.44 \times 10^{-2}} \cdot \underbrace{\frac{R_2 \| R_3}{R_1 + R_2 \| R_3}}_{0.36\bar{1}} =$$

$$= -3.632 \qquad |A_{CB}| = 11.345\,dB$$

ZERI

$C_1$: poli e zeri coincidenti

$C_2$: $f_{z2} = \frac{1}{2\pi C_2 R_{11}} = 563.98\ Hz$

$f_{p2} = \frac{1}{2\pi C_2 R_{V2}} = 9259.16\ Hz$

$R_{V2} = R_{11} \,||\, \left\{ R_{10} + \frac{h_{ie} + R_9 + R_8 \,||\, [R_7 + (R_6 \,||\, \frac{1}{g_m})]}{(h_{fe}+1)} \right\} = 207.095\ \Omega$

$C_3$: $f_{z3} = 0$

$f_{p3} = \frac{1}{2\pi C_3 (R_{12}+R_{13}+R_{14})} = 97.52\ Hz$

$A' = A_{CBB} \frac{f_{z2}}{f_{p2}} = -3.692 \frac{563.98}{9259.16} = 0.22488 \quad (-12.96\ dB)$

---

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

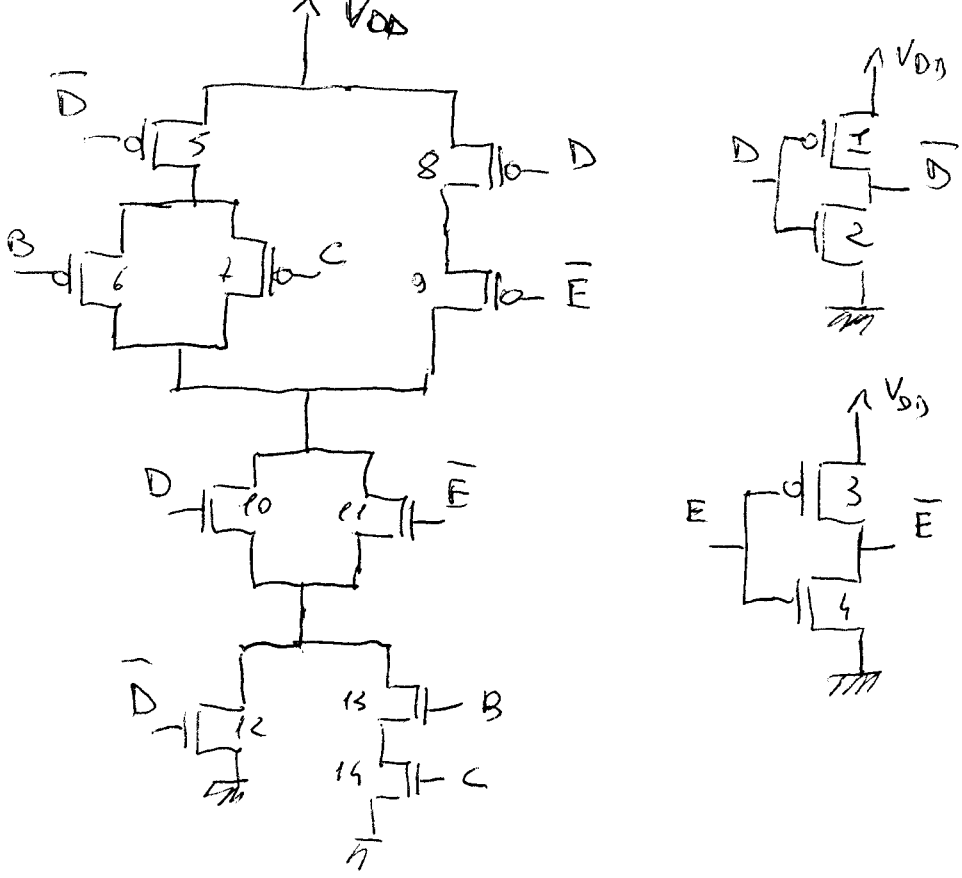
$= (\bar{B}+\bar{C})(\bar{A}D + \bar{D}E) + AD(\bar{B}+\bar{C}) + B\bar{D}E =$

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

$= \bar{B}D + \bar{D}E + \bar{C}D =$

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

N MOS: 14




$$\begin{cases} \left(\frac{W}{L}\right)_1 = \left(\frac{W}{L}\right)_3 = p = 5 \\ \left(\frac{W}{L}\right)_2 = \left(\frac{W}{L}\right)_4 = n = 2 \end{cases}$$

INVERTER

P.U.N.

·) SERIE $Q_5 - Q_6$ ; $Q_5 - Q_7$ ; $Q_8 - Q_9$

$$\frac{2}{x} = \frac{1}{p} \Rightarrow x = 2p = 10$$

$$\left(\frac{W}{L}\right)_{5,6,7,8,9} = 2p = 10$$

P.D.N.

·) SERIE $Q_{11} - Q_{13} - Q_{14}$ ; $Q_{10} - Q_{13} - Q_{14}$

$$\frac{3}{x} = \frac{1}{n} \Rightarrow x = 3n = 6$$

$$\left(\frac{W}{L}\right)_{10,11,13,14} = 3n = 6$$

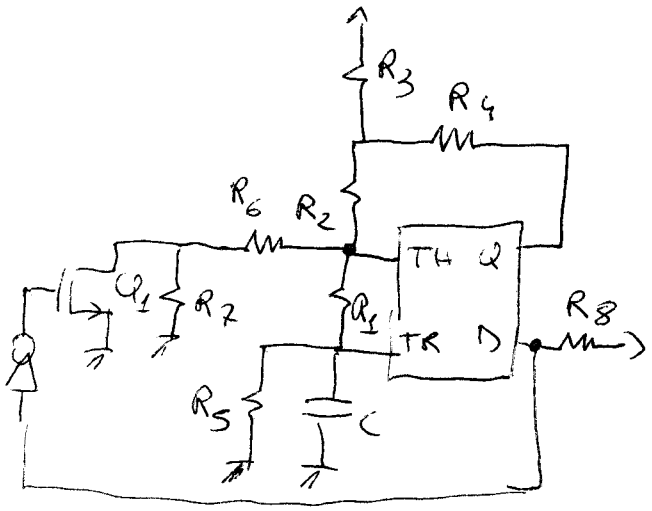
Se consideriamo che $Q_{10}$ e $Q_{12}$ siano sempre uno acceso e uno spento allora $Q_{10} - Q_{13} - Q_{14}$ : $3n = 6$

$Q_{11} - Q_{12}$ : $2n = 4$

·) SERIE $Q_{11} - Q_{12}$ (la serie $Q_{10} - Q_{12}$ non è possibile)

$$\frac{1}{x} + \frac{1}{3n} = \frac{1}{n} \Rightarrow \frac{1}{x} = \frac{2}{3n} \Rightarrow x = 1.5n = 3$$

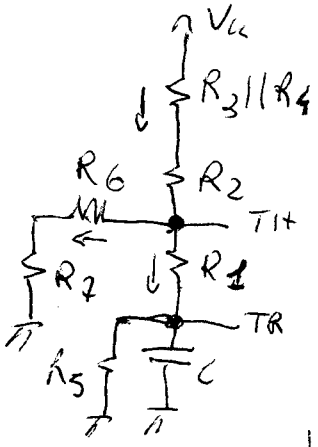
$$\left(\frac{W}{L}\right)_{12} = 1.5n = 3$$




$R_1 = 200\,\Omega$
$R_2 = 500\,\Omega$
$R_3 = 1\,k\Omega$
$R_4 = 1\,k\Omega$
$R_5 = 7800\,\Omega$
$R_6 = 500\,\Omega$
$R_7 = 7500\,\Omega$
$R_8 = 1\,k\Omega$
$C = 15\,nF$
$V_{cc} = 6\,V$

1) $Q = 1$

$D = HI \Rightarrow V_{G1} = \phi \quad V_{S1} = \phi \quad V_{GS1} = \phi V < V_T \Rightarrow Q_1$ off




$$V_i = \frac{1}{3} V_{cc} = 2V$$

$$V_f = \frac{V_{cc}}{(R_3 \| R_4) + R_2 + [(R_6+R_7) \| (R_1+R_5)]} \cdot \frac{R_6+R_7}{R_6+R_7+R_1+R_5} \cdot R_5$$

$$= 4.68\,V$$

$V_{com}$ per $V_{TH} = \frac{2}{3} V_{cc} = 4V$

$V_i < V_{com} < V_f$
$2V < 3.8V < 4.68V$

$$I_{R2} = \frac{V_{cc} - V_{TH}}{R_3 \| R_4 + R_2} = 2\,mA$$

$$I_6 = \frac{V_{TH}}{R_6+R_7} = 0.5\,mA$$

$$I_{R1} = I_{R2} - I_6 = 1.5\,mA$$

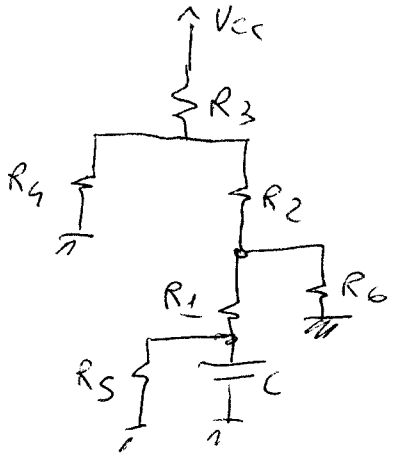
$$V_{com} = V_{TH} - R_1 I_{R1} = 3.7V$$

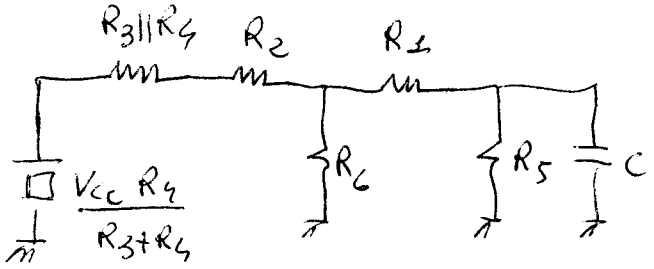
$$R_{VC_1} = R_5 \| [R_1 + (R_6+R_7) \| (R_2 + R_3 \| R_4)] = 955.5\,\Omega$$

$$\tau_1 = C \cdot R_{VC_1} = 14.33\,\mu s$$

$$T_1 = \tau_1 \ln\left(\frac{V_i - V_f}{V_{com} - V_f}\right) = 14.418\,\mu s$$

$t=0 \quad V_{G1} = 6V \Rightarrow V_{GS1} = 6V > V_T \Rightarrow Q_1$ ON




$V_{i2} = V_{con1} = 3.7\,V$

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

$V_{i2} > V_{con2} > V_{f2}$

$$V_{f2} = \frac{V_{cc}\,R_4}{R_3+R_4} \cdot \frac{1}{(R_3\|R_4) + R_2 + R_6\|(R_1+R_5)} \cdot \frac{R_6}{R_6+R_1+R_5} \cdot R_5 = 0.936\,V$$

$$R_{VC2} = R_5 \| \left[ R_1 + R_6 \| \left( R_2 + R_3\|R_4 \right) \right] = 499.2\,\Omega$$

$$\tau_2 = C R_{VC2} = 7.488\,\mu s$$

$$T_2 = \tau_2 \ln\left( \frac{V_i - V_f}{V_{con} - V_f} \right) = 7.148\,\mu s$$

$$T = T_1 + T_2 = 2.1567 \times 10^{-5}\,s$$

$$f = \frac{1}{T} = 46366.82\,Hz$$