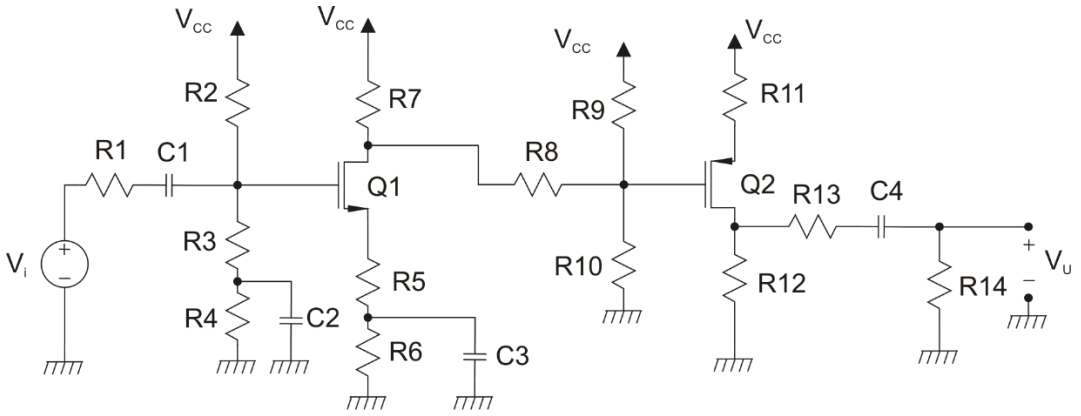
ELETTRONICA DIGITALE

Corso di Laurea in Ingegneria Informatica

Prova scritta del 25 luglio 2022

Esercizio A



R1 = 100 Ω	R2 = 11 kΩ	R3 = 6 kΩ	R5 = 100 Ω	R6 = 1900 Ω	R7 = 19 kΩ	R8 = 1 kΩ
R9 = 4 kΩ	R10 = 20 kΩ	R11 = 2.5 kΩ	R12 = 4.5 kΩ	R13 = 500 Ω	R14 = 10 kΩ	VCC = 18 V

Q1 è un transistore MOS a canale n resistivo con $V_T = 1$ V; Q2 è un transistore MOS a canale p resistivo con $V_T = -1$ V; per entrambi i MOS 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 gate di Q2 sia 10 V. Determinare, inoltre, il punto di riposo dei due transistori e verificarne la saturazione.
2) Determinare l'espressione e il valore di V_U/Vi alle frequenze per le quali C1, C2, C3, C4 possono essere considerati dei corto circuiti.

Esercizio B

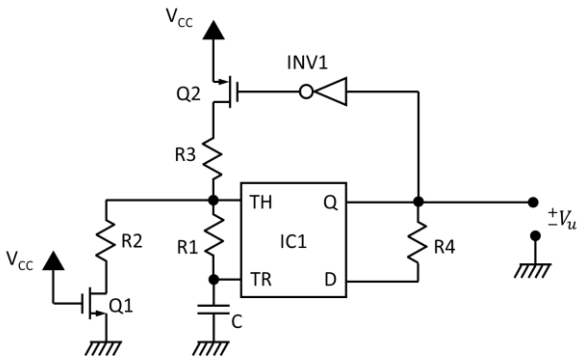
Progettare una porta logica in tecnologia CMOS, utilizzando la tecnica della pull-up network e della pull-down network, che implementi la funzione logica:

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

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

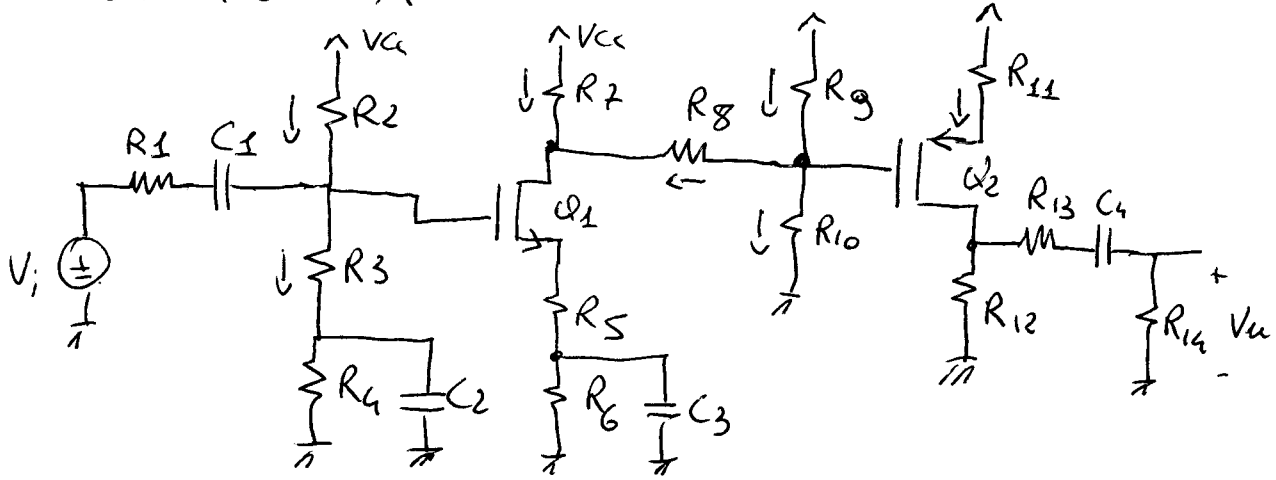
R_1 = 1 kΩ	R_4 = 1 kΩ
R_2 = 10 kΩ	C = 100 nF
R_3 = 2 kΩ	V_{CC} = 6 V



Il circuito IC_1 è un NE555 alimentato a $V_{CC} = 6$ V; Q1 ha $R_{on} = 0$ 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 25/07/2022

ESERCIZIO A



$R_1 = 100\,\Omega$
$R_2 = 11\,k\Omega$
$R_3 = 6\,k\Omega$
$R_5 = 100\,\Omega$
$R_6 = 1900\,\Omega$
$R_7 = 19\,k\Omega$
$R_8 = 1\,k\Omega$
$R_9 = 4\,k\Omega$
$R_{10} = 20\,k\Omega$
$R_{11} = 2.5\,k\Omega$
$R_{12} = 4.5\,k\Omega$
$R_{13} = 500\,\Omega$
$R_{14} = 10\,k\Omega$
$V_{T1} = +1\,V$
$V_{T2} = -1$

1) DETERMINARE R_4 PER $V_{G2} = 10\,V$ E PUNTI RIPOSO

hp Q_2 IN SATURAZIONE $\Rightarrow I_{SD_2} = K(V_{GS2} - V_{T2})^2$

$I_{G2} = 0 \Rightarrow I_{S2} = I_{D2} = I_{SD2}$

$V_{S2} = V_{CC} - R_{11} I_{SD2}$

$I_{SD2} = K(V_{G_2} - V_{S2} - V_{T2})^2 = K\left[10 - V_{CC} + R_{11} I_{SD2} - (-1)\right]^2 =$

$= (0.5 \times 10^{-3})\left[-7 + 2.5 \times 10^3 I_{SD2}\right]^2 =$

$= 0.5 \times 10^{-3}\left[49 - 35 \times 10^3 I_{SD2} + 6.25 \times 10^6 I_{SD2}^2\right] =$

$= 3125\, I_{SD2}^2 - 17.5\, I_{SD2} + 24.5 \times 10^{-3}$

$\Rightarrow 3125\, I_{SD2}^2 - 18.5\, I_{SD2} + 24.5 \times 10^{-3} = 0$

$$I_{SD2} = \frac{18.5 \pm \sqrt{342.25 - 306.25}}{6250} = \frac{18.5 \pm 6}{6250} = \begin{cases} I_{SD_{21}} = 3.92\,mA \\ I_{SD_{22}} = 2\,mA \end{cases}$$

SE $I_{SD2} = 3.92\,mA \Rightarrow V_{S2} = 8.2\,V \Rightarrow V_{GS2} = 1.8\,V > V_{T2} = -1\,V$ NON ACCETTABILE

SE $I_{SD2} = 2\,mA \Rightarrow V_{S2} = 13\,V \Rightarrow V_{GS2} = -3\,V < V_{T2} = -1\,V$ SOL. ACCETTABILE

$V_{D2} = R_{12} I_{SD2} = 9\,V$

$V_{DS2} = V_{D2} - V_{S2} = 9 - 13 = -4\,V$

VERIFICA SATURAZIONE Q_2

$V_{DS2} \overset{?}{\leq} V_{GS2} - V_T$

$(-4V) < (-3-(-1)) = -2V$ => VERIFICA OK

$g_m = 2K|V_{GS} - V_T| = +2\times10^{-3}\ A/V$

Q_2: $I = 2\,mA$, $V_{DS} = -4V$, $V_{GS} = -3V$, $g_m = 2\times10^{-3}\ A/V$

$I_g = \frac{V_{CC} - V_{G2}}{R_g} = 2\,mA$

$I_{10} = \frac{V_{G2}}{R_{10}} = 0.5\,mA$

$I_8 = I_g - I_{10} = 1.5\,mA$

$V_{D1} = V_{G2} - R_8 I_8 = 8.5V$

$I_7 = \frac{V_{CC} - V_{D1}}{R_7} = 0.5\,mA$

$I_{DS1} = I_7 + I_8 = 2\,mA$

$I_{G1} = 0 \Rightarrow I_{S1} = I_{D1} = I_{DS1}$

hp: Q_1 IN SATURAZIONE $\Rightarrow I_{D1} = K(V_{GS1} - V_{T1})^2$

$V_{GS1} = V_{T1} \pm \sqrt{\frac{I_{D1}}{K}}$

UN NMOS CONDUCE PER $V_{GS} \geq V_T$ PER CUI SCELGO LA SOLUZIONE CON IL SEGNO POSITIVO

$V_{GS1} = V_{T1} + \sqrt{\frac{I_{D1}}{K}} = 3V$

$V_{S1} = I_{D1}(R_5 + R_6) = 4V$

$V_{DS1} = V_{D1} - V_{S1} = 8.5V - 4V = 4.5V$

VERIFICA SATURAZIONE Q_1

$V_{DS1} \overset{?}{\geq} V_{GS1} - V_{T1}$

$4.5V > (3-1) = 2V$ => VERIFICA OK

$V_{G1} = V_{GS1} + V_{S1} = 3 + 4 = 7V$

$g_{m1} = 2K(V_{GS1} - V_{T1}) = 2\times10^{-3}\ A/V$

$$I_{R2} = \frac{V_{CC} - V_{G1}}{R_2} = 1\ mA$$

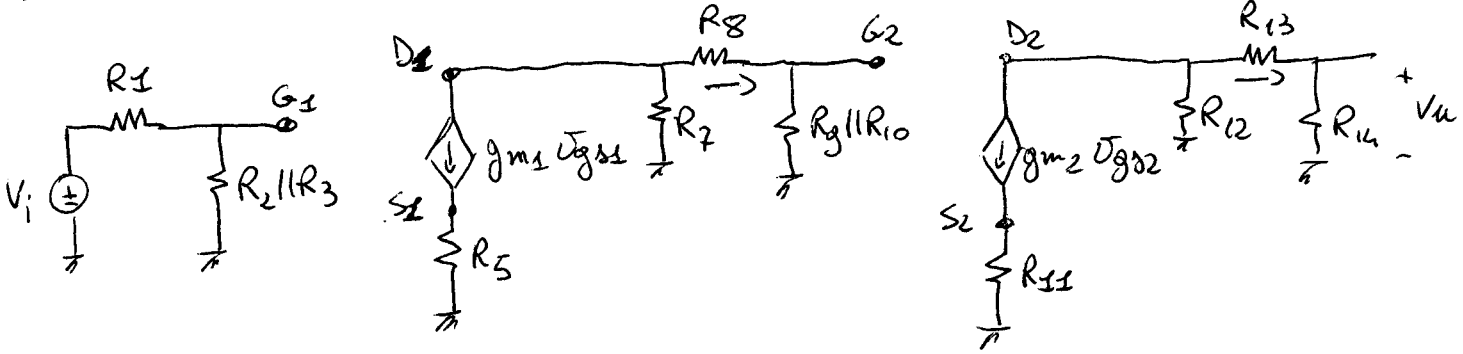
$$V_{G1} = (R_3 + R_4) I_{R2}$$

$$\Rightarrow \underline{\underline{R_4}} = \frac{V_{G1}}{I_{R2}} - R_3 = \underline{\underline{1000\ \Omega}}$$

Q_1:
- $I = 2\ mA$
- $V_{DS1} = 4.5\ V$
- $V_{GS1} = 3\ V$
- $g_{m1} = 2 \times 10^{-3}\ A/V$

---

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



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

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

$$\left.\begin{aligned} v_{s2} &= g_{m2}\, v_{gs2}\, R_{11} \\ v_{gs2} &= v_{g2} - v_{s2} \end{aligned}\right\} \Rightarrow v_{gs2} = v_{g2} - g_{m2} v_{gs2} R_{11} \Rightarrow v_{gs2} = \frac{v_{g2}}{1 + g_{m2} R_{11}}$$

$$v_{g2} = (-g_{m1} v_{gs1}) \frac{R_7}{R_7 + R_8 + (R_g \| R_{10})} \cdot (R_g \| R_{10})$$

$$\left.\begin{aligned} v_{s1} &= g_{m1}\, v_{gs1}\, R_5 \\ v_{gs1} &= v_{g1} - v_{s1} \end{aligned}\right\} \Rightarrow v_{gs1} = \frac{v_{g1}}{1 + g_{m1} R_5}$$

$$v_{g1} = v_i \frac{R_2 \| R_3}{R_1 + R_2 \| R_3}$$

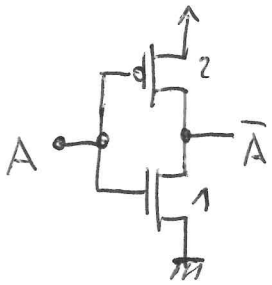
$$\frac{V_u}{V_i} = \underbrace{(-g_{m2})}_{2\times10^{-3}} \underbrace{\frac{R_{12} R_{14}}{R_{12} + R_{13} + R_{14}}}_{3000} \underbrace{\frac{1}{1 + g_{m2} R_{11}}}_{0.1\overline{6}} \underbrace{(-g_{m1})}_{2\times10^{-3}} \underbrace{\frac{R_7 (R_g \| R_{10})}{R_7 + R_8 + (R_g \| R_{10})}}_{2714.2857} \cdot \underbrace{\frac{1}{1 + g_{m1} R_5}}_{0.8\overline{3}} \cdot \underbrace{\frac{R_2 \| R_3}{R_1 + (R_2 \| R}}_{0.974889}$$

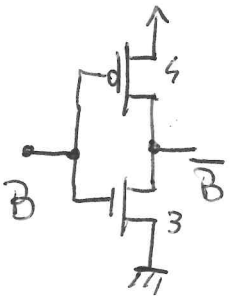
$$= +4.41$$

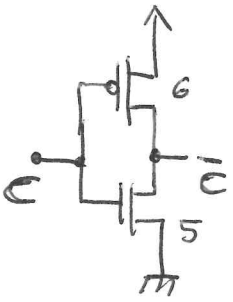
$$Y = \bar{A}\cdot B + \bar{B}C(A+\bar{D}) + A\bar{D}$$

$$N = 2\times(8+3) = 22$$

INVERTOR:

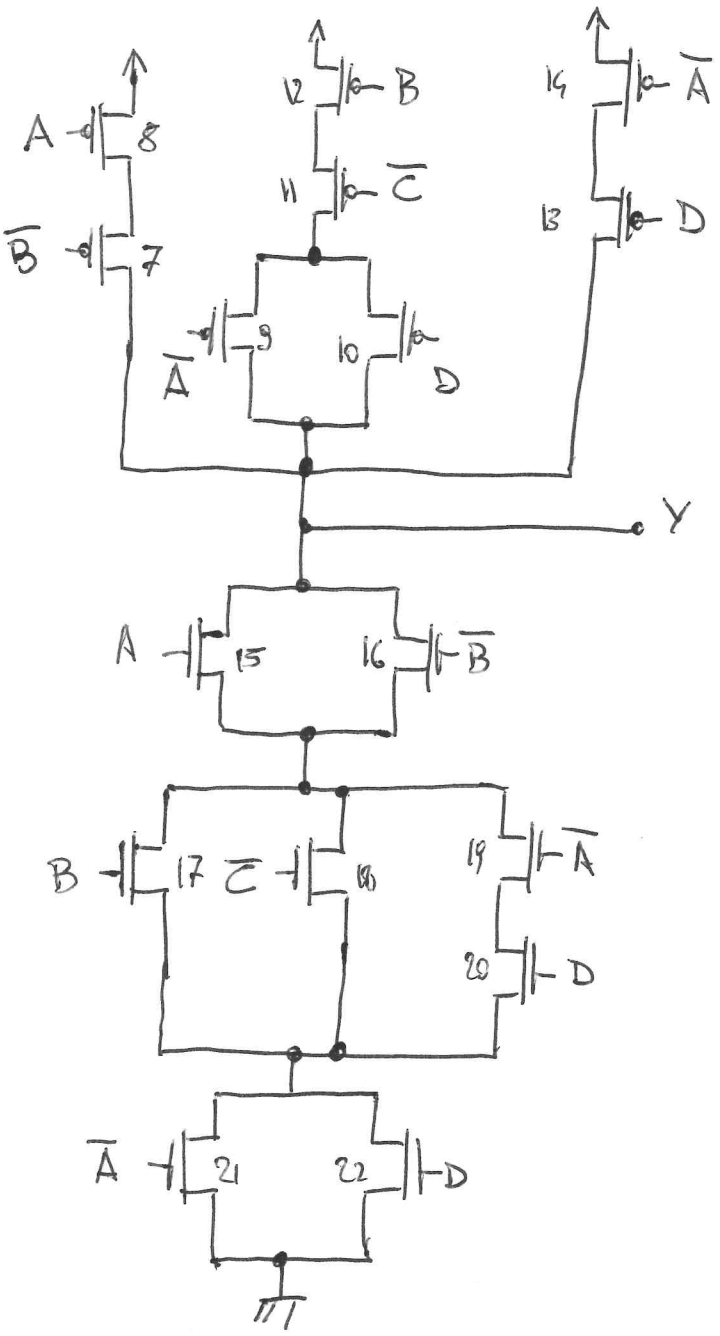






$$\left(\frac{W}{L}\right)_{1,3,5} = n = 2$$

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



DIM. PUN:

* PERCORSO DA 3 PMOS

  12 - 11 - 9
  12 - 11 - 10
  } POSSIBILI

$$\left(\frac{W}{L}\right)_{9,10,11,12} = x$$

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

$$x = \left(\frac{W}{L}\right)_{9,10,11,12} = 3p = 15$$

* PERCORSO DA 2 PMOS

  7 - 8
  13 - 14
  } POSSIBILI

$$\left(\frac{W}{L}\right)_{7,8,13,14} = t$$

$$\frac{1}{t} + \frac{1}{t} = \frac{2}{t} = \frac{1}{p}$$

$$t = \left(\frac{W}{L}\right)_{7,8,13,14} = 2p = 10$$

DIM PDN:

PERCORSO DA 4 NODI:

15 - 19 - 20 - 21 IMPOSSIBILE (A e $\bar{A}$)

16 - 19 - 20 - 21

15 - 19 - 20 - 22 IMPOSSIBILE (A e $\bar{A}$)

16 - 19 - 20 - 22

$$\left(\frac{w}{L}\right)_{16,19,20,21,22} = f \qquad \frac{1}{f} + \frac{1}{f} + \frac{1}{f} + \frac{1}{f} = \frac{4}{f} = \frac{1}{m}$$

$$f = \left(\frac{w}{L}\right)_{16,19,20,21,22} = 4m = 8$$

PERCORSO DA 3 NODI:

15 - 17 - 21 IMPOSSIBILE (A e $\bar{A}$)

15 - 17 - 22 POSSIBILE

16 - 17 - 21 IMPOSSIBILE (B e $\bar{B}$)

16 - 17 - 22 IMPOSSIBILE (B e $\bar{B}$)

15 - 18 - 21 IMPOSSIBILE (A e $\bar{A}$)

15 - 18 - 22 POSSIBILE

16 - 18 - 21 POSSIBILE

16 - 18 - 22 POSSIBILE

15, 17, 18 | DA DIMENSIONARE

16 e 21, 22 GIÀ DIMENSIONATI

OPZ (A): DIMENSIONO 18 CONSIDERANDO 16 - 18 - 21 o 16 - 18 - 22

DIMENSIONO 15 CONSIDERANDO 15 - 18 - 22

DIMENSIONO 17 CONSIDERANDO 15 - 17 - 22

OPZ (B): DIMENSIONO 18 COME IN OPZ (A)

DIMENSIONO 15 e 17 CONSIDERANDO 15 - 17 - 22

VERIFICO CONDIZIONE Row di 15 - 18 - 22

OPZ (C): DIMENSIONO 15 e 17 CONSIDERANDO 15 - 17 - 22

DIMENSIONO 18 CONSIDERANDO IL PIÙ CRITICO TRA

I PERCORSI 15 - 18 - 22 ≡ 16 - 18 - 22 $\left(\left(\frac{w}{L}\right)_{15} \neq \left(\frac{w}{L}\right)_{16}\right)$

OPZ A: (16-18-21 o 16-18-22)

1] $\left(\frac{w}{L}\right)_{18} = h$ $\quad \frac{1}{h} + \frac{1}{4m} + \frac{1}{4m} = \frac{1}{h} + \frac{1}{2m} = \frac{1}{m} = \frac{2}{2m} \rightarrow \frac{1}{h} = \frac{1}{2m}$

$h = \left(\frac{w}{L}\right)_{18} = 2m = 4$

(15-18-22)

2] $\left(\frac{w}{L}\right)_{15} = k$ $\quad \frac{1}{k} + \frac{1}{2m} + \frac{1}{4m} = \frac{1}{k} + \frac{2}{4m} + \frac{1}{4m} = \frac{1}{k} + \frac{3}{4m} = \frac{1}{m} = \frac{4}{4m}$

$\frac{1}{k} = \frac{1}{4m}$

$k = \left(\frac{w}{L}\right)_{15} = 4m = 8$

(15-17-22)

3] $\left(\frac{w}{L}\right)_{17} = R$ $\quad \frac{1}{R} + \frac{1}{4m} + \frac{1}{4m} = \frac{1}{R} + \frac{1}{2m} = \frac{1}{m} = \frac{2}{2m} \rightarrow \frac{1}{R} = \frac{1}{2m}$

$R = \left(\frac{w}{L}\right)_{17} = 2m = 4$

OPZ B:

1] $\left(\frac{w}{L}\right)_{18} = h = 2m = 4$

(15,-17,-22)

2] $\left(\frac{w}{L}\right)_{15,17} = 5$ $\quad \frac{1}{5} + \frac{1}{5} + \frac{1}{4m} = \frac{2}{5} + \frac{1}{4m} = \frac{1}{m} = \frac{4}{4m} \rightarrow \frac{2}{5} = \frac{3}{4m}$

$5 = \left(\frac{w}{L}\right)_{15,17} = \frac{8m}{3} = 16/3 = 5.\hat{3}$

3] VERIFICO 15-18-22: $\quad \frac{1}{5} + \frac{1}{h} + \frac{1}{F} = \frac{3}{8m} + \frac{1}{2m} + \frac{1}{4m} = \frac{3+4+2}{8m} =$

$= \frac{9}{8m} > \frac{1}{m}$: CONDIZIONE SU R NON RISPETTATA DIMENSIONAMENTO NON VALIDO

OPZ. C :

(15 - 17 - 22)

17] $\left(\frac{W}{L}\right)_{15,17} = m$ $\qquad \frac{1}{m} + \frac{1}{m} + \frac{1}{4m} = \frac{1}{m} = \frac{4}{4m} \rightarrow \frac{2}{m} = \frac{3}{4m}$

$$m = \left(\frac{W}{L}\right)_{15,17} = \frac{8m}{3} = 16/3 = 5.\hat{3}$$

18] $\left(\frac{W}{L}\right)_{18} = b$ $\qquad \left(\frac{W}{L}\right)_{15} = \frac{8m}{3} < \left(\frac{W}{L}\right)_{16} = 4m$

↓

PERCORSO (15) - 18 - 22 PIÙ CRITICO

RISPETTO AL (16) - 18 - 22

CONFRONTO 15 - 18 - 22 :

$$\frac{1}{b} + \frac{1}{\frac{8m}{3}} + \frac{1}{4m} = \frac{1}{b} + \frac{3}{8m} + \frac{2}{8m} = \frac{1}{b} + \frac{5}{8m} = \frac{1}{m} = \frac{8}{8m}$$

$$\frac{1}{b} = \frac{3}{8m} \rightarrow b = \left(\frac{W}{L}\right)_{18} = \frac{8m}{3} = 5.\hat{3}$$

CONFRONTO OPZ A & OPZ C IN AREA USANDO $\frac{W}{L}$ $\left(L = 4mm\right)$

	Q15	Q17	Q18	TOT
OPZ. A	4m	2m	2m	8m = 16
OPZ. C	$\frac{8m}{3}$	$\frac{8m}{3}$	$\frac{8m}{3} = 5.\hat{3}$	8m = 16

LE DUE OPZIONI SONO EQUIVALENTI DAL PUNTO DI VISTA DELL'AREA OCCUPATA NEL COMPLESSO

85 (E):

$R_1 = 1K\Omega$ $R_4 = 1K\Omega$

$R_2 = 10K\Omega$

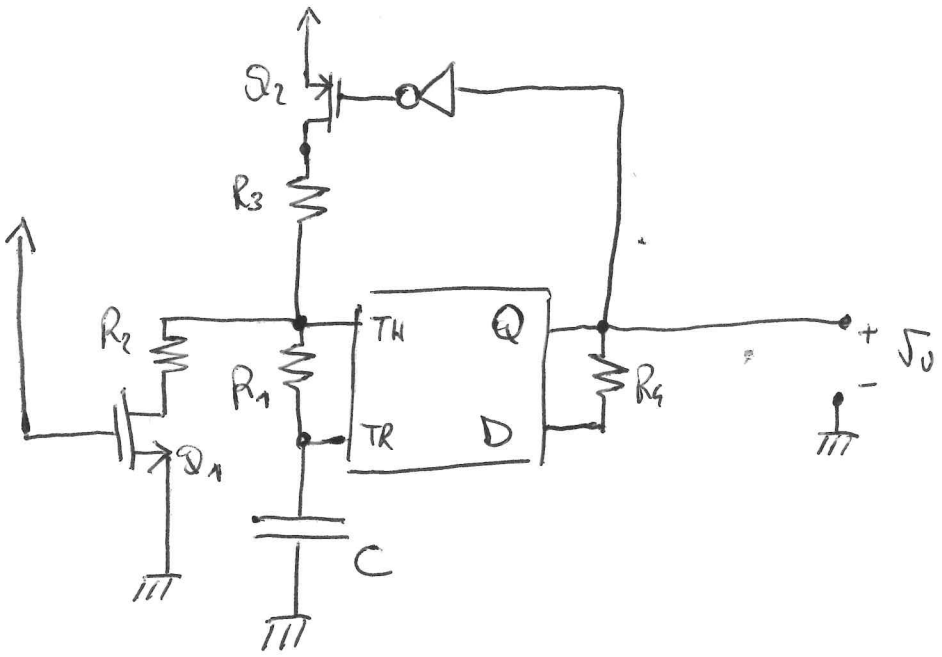
$R_3 = 2K\Omega$

$C = 100\ mF$

$V_{CC} = 6V$

$V_{TP} = -1V$

$V_{TN} = +1V$



VALE SEMPRE CHE $V_{GS[Q_1]} = V_{CC} = 6V > V_{TN} = 1V$

Q_1 SEMPRE ON

FASE DI SET

$Q = '1' \rightarrow V_Q = V_{CC} = 6V$

$D: 'HZ' \rightarrow I_{R4} = 0 \rightarrow V_D = V_Q - 6V$

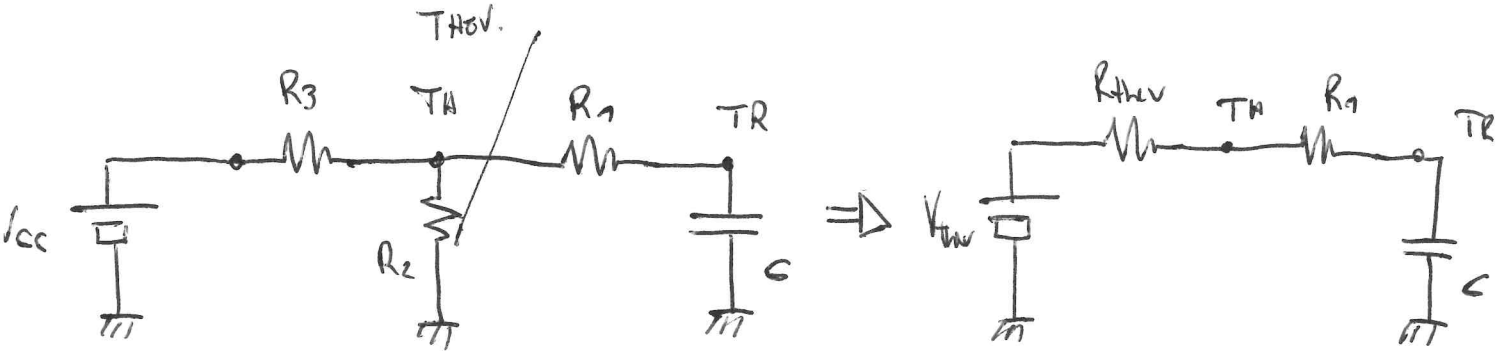
$\rightarrow V_{GS2} = 0V$

$V_{GS2} = -6V < V_{TP} = -1V$

$\Downarrow$

Q2 ON

RETE EQUIVALENTE IN SET:



$$V_{Thev} = V_{CC} \cdot \frac{R_2}{R_2 + R_3} = 5V$$

$$R_{Thev} = R_2 // R_3 = 1666.\hat{6}\ \Omega$$

$$V_{i1} = \frac{1}{3} V_{cc} = 2V$$

$$V_{f1} = V_{thev} = 5V$$

COM1 SUANDO $V_{TH} = \frac{2}{3} V_{cc} = 4V$.

$$I_1 = \frac{V_{thev} - V_{TH}}{R_{thev}} = 0.6\ mA$$

$$V_{com1} = \frac{2}{3} V_{cc} - R_1 \cdot I_1 = 3.4V$$

VERIFICO CHE

$V_{i1} < V_{com1} < V_{f1}$

$2V < 3.4V < 5V$

OK

$$R_{V1} = R_{thev} + R_1 = 2666,\hat{6}\ \Omega$$

$$\tau_1 = R_{V1} \cdot C = 266,\hat{6}\ \mu S$$

$$T_1 = \tau_1 \cdot \ln\left\{\frac{V_{f1} - V_{i1}}{V_{f1} - V_{com1}}\right\} = 167.63\ \mu S$$

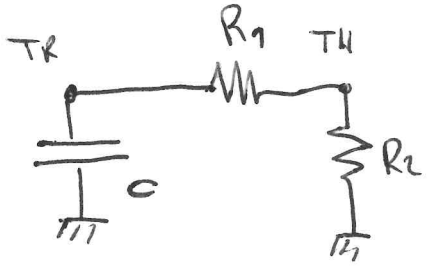
~~Falso~~ RESET

$V_{i2} = V_{com1} = 3.4V$

$V_{com2} = V_{i1} = \frac{1}{3} V_{cc} = 2V$

RESET: $Q = '0'$, $\overline{Q} = '0'$ $\rightarrow$ $V_{G2} = V_{cc} = 6V$, $V_{GS2} = 0V > V_{TP} = -1V$

Q_2 OFF



$V_{f2} = 0V$

VERIFICO CHE $V_{i2} > V_{com2} > V_{f2}$

$3.4V > 2V > 0$

OK

$R_{V2} = R_1 + R_2 = 11\ k\Omega$

$\tau_2 = R_{V2} \cdot C = 1,1\ mS$

$$T_2 = \tau_2 \cdot \ln\left\{\frac{V_{f2} - V_{i2}}{V_{f2} - V_{co\,n2}}\right\} = 583,69 \ \mu s$$

$$T = T_1 + T_2 = 751,32 \ \mu s$$

$$f_{osc} = \frac{1}{T} = 1,331 \ kHz \ .$$