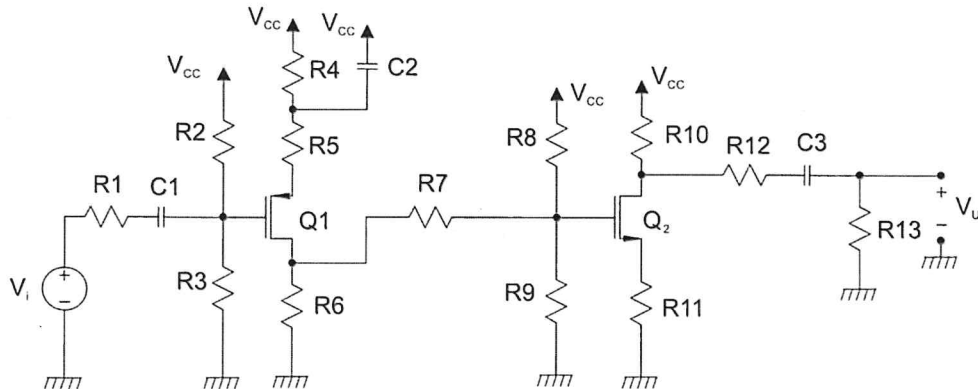


# ELETTRONICA DIGITALE

## Corso di Laurea in Ingegneria Informatica

Prova scritta del 15 gennaio 2024

### Esercizio A



$R1 = 50 \, \Omega$	$R2 = 58 \, k\Omega$	$R4 = 4.9 \, k\Omega$	$R5 = 100 \, \Omega$	$R6 = 9.9 \, k\Omega$	$R7 = 1 \, k\Omega$	$R8 = 100 \, k\Omega$
$R9 = 400 \, k\Omega$	$R10 = 4.5 \, k\Omega$	$R11 = 2.5 \, k\Omega$	$R12 = 1 \, k\Omega$	$R13 = 9 \, k\Omega$	$V_{CC} = 18 \, V$	

Q1 è un transistor MOS a canale p resistivo con  $V_T = -1 \, V$ ; Q2 è un transistor MOS a canale n resistivo con  $V_T = 1 \, V$ ; la corrente di drain in saturazione è data per entrambi 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 R3 in modo che, in condizioni di riposo, la tensione di source di Q2 sia 5V. 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, e C3 possono essere considerati dei corto circuiti.

### Esercizio B

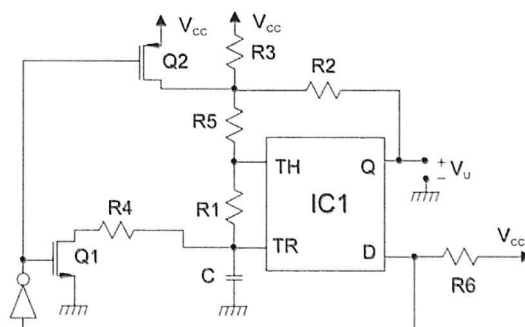
Progettare una porta logica in tecnologia CMOS, utilizzando la tecnica della pull-up network e della pull-down network, che implementi la funzione logica:

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

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.

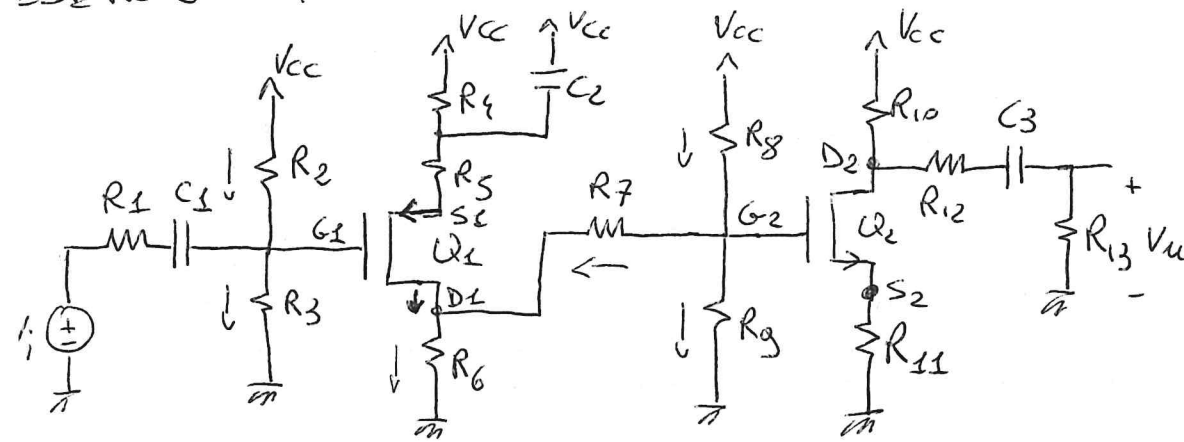
### Esercizio C

$R1 = 400 \, \Omega$	$R5 = 2 \, k\Omega$
$R2 = 1 \, k\Omega$	$R6 = 4 \, k\Omega$
$R3 = 1 \, k\Omega$	$C = 220 \, nF$
$R4 = 100 \, \Omega$	$V_{CC} = 6 \, V$



Il circuito IC1 è un NE555 alimentato a  $V_{CC} = 6 \, V$ ; Q1 ha una  $R_{on} = 0$  e  $V_{Tn} = 1 \, V$ ; Q2 ha una  $R_{on} = 0$  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.

# ESERCIZIO A



- $R_1 = 50 \Omega$
- $R_2 = 58 K\Omega$
- $R_4 = 4.9 K\Omega$
- $R_5 = 100 \Omega$
- $R_6 = 9.9 K\Omega$
- $R_7 = 1 K\Omega$
- $R_8 = 100 K\Omega$
- $R_9 = 400 K\Omega$
- $R_{10} = 4.5 K\Omega$
- $R_{11} = 2.5 K\Omega$
- $R_{12} = 1 K\Omega$
- $R_{13} = 9 K\Omega$
- $V_{CC} = 18V$

1) CALCOLARE  $R_3$  PER  $V_{S2} = 5V$

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

$$I_{S2} = \frac{V_{S2}}{R_{11}} = 2 mA$$

$$V_{D2} = V_{CC} - R_{10} I_{D2} = 9V$$

hp:  $Q_2$  SATURO  $\Rightarrow I_{D2} = K (V_{GS2} - V_{T2})^2$

$$V_{GS2} = V_{T2} \pm \sqrt{\frac{I_{D2}}{K}}$$

POICHE'  $Q_2$  E' UN NMOS, LA CONDUZIONE AVVIENE

PER  $V_{GS2} \geq V_T$  PERTANTO SCELGO LA SOLUZIONE CON IL SEGNO "+".

$$V_{GS2} = V_{T2} + \sqrt{\frac{I_{D2}}{K}} = 1 + 2 = 3V$$

$$V_{DS2} = V_{D2} - V_{S2} = 9 - 5 = 4V$$

VERIFICA SATURAZIONE:  $V_{DS2} \geq V_{GS2} - V_T$

$$4V > (3 - 1) = 2V \Rightarrow \text{VERIFICA OK}$$

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

$$V_{G2} = V_{GS2} + V_{S2} = 3 + 5 = 8V$$

$$I_8 = \frac{V_{CC} - V_{G2}}{R_8} = 0.1 mA$$

$$I_9 = \frac{V_{G2}}{R_9} = 20 \mu A$$

$$I_7 = I_8 - I_9 = 80 \mu A$$

$$Q_2: \begin{cases} I_{D2} = 2 mA \\ V_{DS2} = 4V \\ V_{GS2} = 3V \\ g_{m2} = 2 \times 10^{-3} A/V \end{cases}$$

$$V_{D1} = V_{G2} - R_7 I_7 = 7.92 \text{ V}$$

(2)

$$I_6 = \frac{V_{D1}}{R_6} = 0.8 \text{ mA}$$

$$I_{D1} = I_6 - I_7 = 0.72 \text{ mA}$$

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

$$V_{S1} = V_{CC} - (R_4 + R_5) I_{D1} = 14.4 \text{ V}$$

$$V_{DS1} = V_{D1} - V_{S1} = -6.48 \text{ V}$$

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

$$V_{GS1} = V_{T1} \pm \sqrt{\frac{I_{D1}}{K}} \quad \text{Poiché } Q_1 \text{ è un P-MOS, la conduzione avviene}$$

PER  $V_{GS} \leq V_T$  PERTANTO SCELGO LA SOLUZIONE CON IL SEGNO "-".

$$V_{GS1} = V_{T1} - \sqrt{\frac{I_{D1}}{K}} = -1 - \sqrt{1.44} = -1 - 1.2 = -2.2 \text{ V}$$

$$\text{VERIFICA SATURAZIONE } Q_1: V_{DS1} \stackrel{?}{\leq} V_{GS1} - V_{T1}$$

$$-6.48 \text{ V} < -2.2 - (-1) = -1.2 \text{ V} \quad \underline{\text{OK}}$$

$$g_{m1} = 2K |V_{GS1} - V_{T1}| = 1.2 \times 10^{-3} \text{ A/V}$$

$$V_{G1} = V_{GS1} + V_{S1} = -2.2 + 14.4 = 12.2 \text{ V}$$

$$I_{G1} = 0 \Rightarrow I_2 = I_1$$

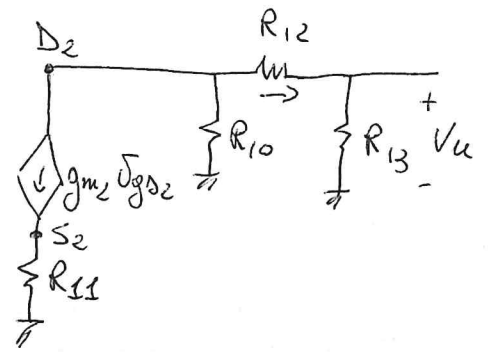
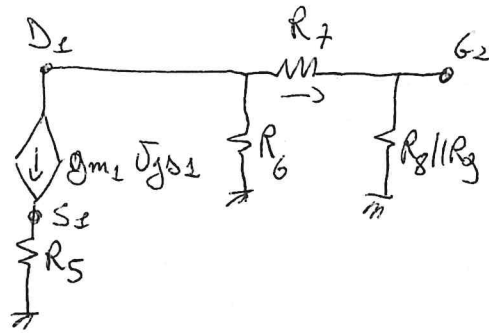
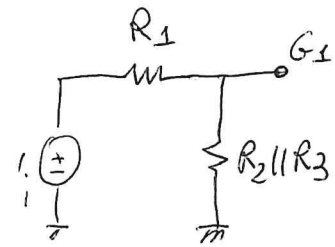
$$I_2 = \frac{V_{CC} - V_{G1}}{R_2} = 0.1 \text{ mA}$$

$$R_3 = \frac{V_{G1}}{I_2} = \underline{\underline{122 \text{ k}\Omega}}$$

$$Q_1: \begin{cases} I_{D1} = 0.72 \text{ mA} \\ V_{DS1} = -6.48 \text{ V} \\ V_{GS1} = -2.2 \text{ V} \\ g_{m1} = 1.2 \times 10^{-3} \text{ A/V} \end{cases}$$

2) DETERMINARE  $V_u/V_i$  CON  $C_1, C_2, C_3$  CORTOCIRCUITATI

(5)



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

$$i_{13} = (-g_{m2} V_{gs2}) \frac{R_{10}}{R_{10} + R_{12} + R_{13}}$$

$$\begin{cases} V_{gs2} = V_{g2} - V_{s2} \\ V_{s2} = (g_{m2} V_{gs2}) R_{11} \end{cases} \Rightarrow V_{gs2} = V_{g2} - g_{m2} V_{gs2} R_{11} \Rightarrow V_{gs2} = \frac{V_{g2}}{1 + g_{m2} R_{11}}$$

$$V_{g2} = (R_8 \parallel R_9) i_7$$

$$i_7 = (-g_{m1} V_{gs1}) \frac{R_6}{R_6 + R_7 + R_8 \parallel R_9}$$

$$\begin{cases} V_{gs1} = V_{g1} - V_{s1} \\ V_{s1} = (g_{m1} V_{gs1}) R_5 \end{cases} \Rightarrow V_{gs1} = V_{g1} - g_{m1} V_{gs1} R_5 \Rightarrow V_{gs1} = \frac{V_{g1}}{1 + g_{m1} R_5}$$

$$V_{g1} = V_i \frac{R_2 \parallel R_3}{R_1 + R_2 \parallel R_3}$$

$$\frac{V_u}{V_i} = (-g_{m2}) \frac{R_{10} R_{13}}{R_{10} + R_{12} + R_{13}} \cdot \frac{1}{1 + g_{m2} R_{11}} \cdot (-g_{m1}) \frac{R_6 R_8 \parallel R_9}{R_6 + R_7 + R_8 \parallel R_9} \cdot \frac{1}{1 + g_{m1} R_5} \cdot \frac{R_2 \parallel R_3}{R_1 + R_2 \parallel R_3}$$

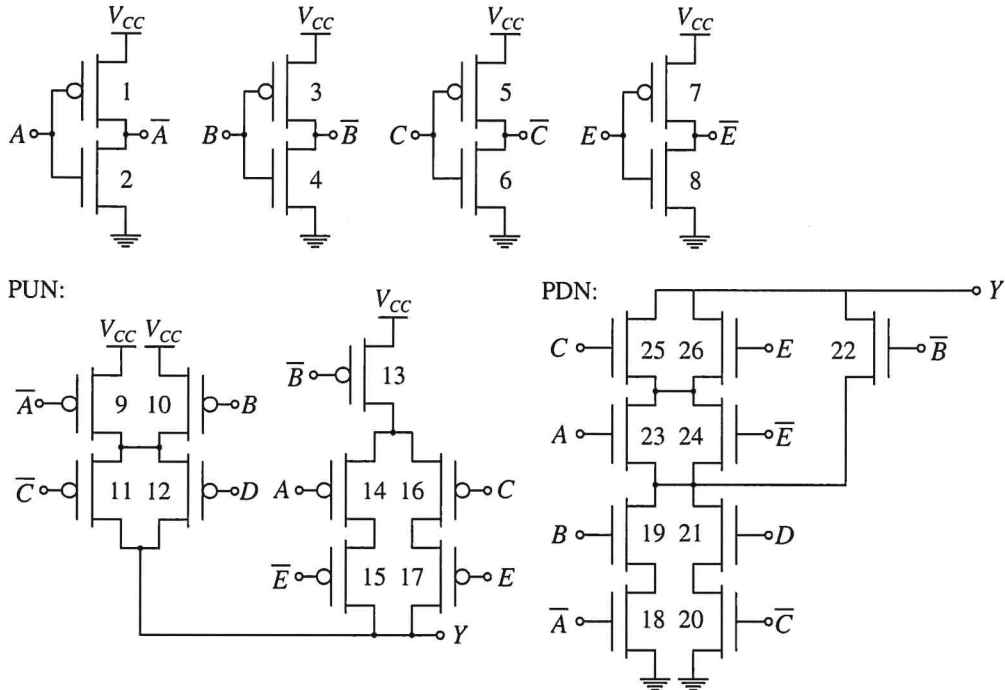
$$= + 8.68$$

**Esercizio B – svolgimento**

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

Numero di MOS:  $9 \times 2 + 4 \times 2 = 26$

Schema completo:



Dimensionamento della PUN, assumendo  $(W/L)_p = p = 5$ :

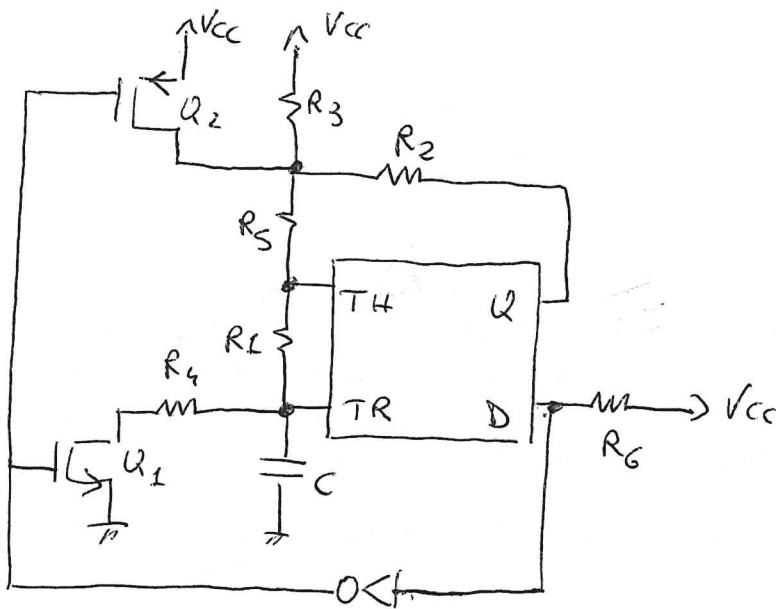
- $(W/L)_{1,3,5,7} = p = 5$
- Percorsi con 3 MOS in serie: (Q13-Q14-Q15), (Q13-Q16-Q17).  
 $(W/L)_{13,14,15,16,17} = x; \quad 3 \times \frac{1}{x} = \frac{1}{p} \implies x = 3p = 15$
- Percorsi con 2 MOS in serie: (Q9, Q11), (Q9, Q12), (Q10, Q11) e (Q10, Q12).  
 $(W/L)_{9,10,11,12} = y; \quad 2 \times \frac{1}{y} = \frac{1}{p} \implies y = 2p = 10$

Dimensionamento della PDN, assumendo  $(W/L)_n = n = 2$ :

- $(W/L)_{2,4,6,8} = n = 2$
- Percorsi con 4 MOS in serie: (Q18-Q19-Q24-Q25), (Q20-Q21-Q23-Q26) possibili, mentre gli altri percorsi sono impossibili a causa delle seguenti coppie di segnali:  $(A, \bar{A})$ ,  $(C, \bar{C})$ ,  $(E, \bar{E})$ . I due percorsi possibili non hanno nessun MOS a comune.  
 $(W/L)_{18,19,20,21,23,24,25,26} = z; \quad 4 \times \frac{1}{z} = \frac{1}{n} \implies z = 4n = 8.$
- Percorsi con 3 MOS in serie: (Q18, Q19, Q22), (Q20, Q21, Q22). Rimane da dimensionare Q22.  
 $(W/L)_{22} = w; \quad 2 \times \frac{1}{z} + \frac{1}{w} = \frac{1}{n} \implies w = \frac{zn}{z-2n} = \frac{4n^2}{(4-2)n} = 2n = 4.$

# ESERCIZIO C

(5)



$$R_1 = 100 \Omega$$

$$R_2 = 1 k\Omega$$

$$R_3 = 1 k\Omega$$

$$R_4 = 100 \Omega$$

$$R_5 = 2 k\Omega$$

$$R_6 = 4 k\Omega$$

$$C = 220 nF$$

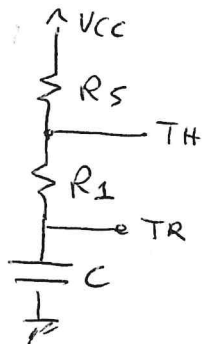
$$V_{CC} = 6V$$

## 1) FASE SET

$$Q = 1$$

$$D = HI \Rightarrow V_{G1} = 0V; V_{S1} = 0V; V_{GS1} = 0 < V_{TH} = 1V \Rightarrow Q_1 \text{ OFF}$$

$$V_{G2} = 0V; V_{S2} = 6V; V_{GS2} = -6V < V_{TP} = -1V \Rightarrow Q_2 \text{ ON}$$



$$V_{i1} = 2V$$

$$V_{P1} = V_{CC} = 6V$$

$$SE \quad V_{TH} = 4V \Rightarrow I_S = I_1 = \frac{V_{CC} - V_{TH}}{R_5} = 1mA$$

$$V_{CEQ1} = V_{TH} - R_1 I_1 = 3.6V$$

$$VERIFICA \text{ COMPUTAZIONE: } V_{i1} < V_{CEQ1} < V_{P1}$$

$$2V < 3.6V < 6V \Rightarrow OK$$

$$R_{v1} = R_1 + R_5 = 2.4 k\Omega$$

$$\tau_1 = CR_{v1} = 528 \mu s$$

$$\underline{T_1} = \tau_1 \ln \left( \frac{V_{i1} - V_{P1}}{V_{CEQ1} - V_{P1}} \right) = \underline{2.697 \times 10^{-4} s}$$

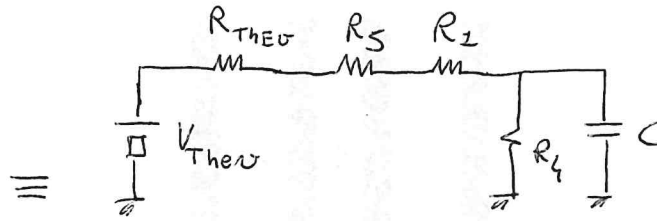
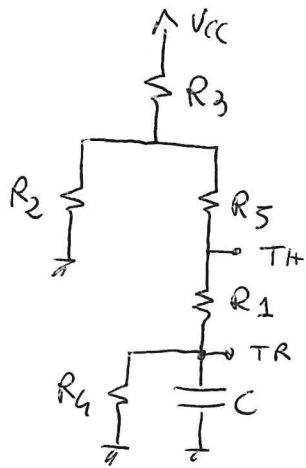
## 2) FASE RESET

(6)

$$Q = \phi$$

$$D = \phi \Rightarrow V_{g1} = 6V; V_{d1} = \phi; V_{gs1} = 6V > V_{Th} = 1V \Rightarrow Q_1 \text{ ON}$$

$$V_{g2} = 6V; V_{d2} = 6V; V_{gs2} = \phi V > V_{Tp} = -1V \Rightarrow Q_2 \text{ OFF}$$



$$V_{Thev} = V_{cc} \frac{R_2}{R_2 + R_3} = 3V$$

$$R_{Thev} = R_2 \parallel R_3 = 500 \Omega$$

$$V_{i2} = V_{cor1} = 3.6V$$

$$V_{cor2} = V_{i1} = 2V$$

$$V_{f2} = V_{Thev} \frac{R_4}{R_{Thev} + R_5 + R_1 + R_4} = 0.1V$$

VERIFICA COMMUTAZIONE: ~~V<sub>i2</sub>~~  $V_{i2} > V_{cor2} > V_{f2}$

$$3.6V > 2V > 0.1V \quad \underline{OK}$$

$$R_{v2} = R_4 \parallel (R_{Thev} + R_5 + R_1) = 36.6 \Omega$$

$$\tau_2 = C R_{v2} = 21.26 \mu s$$

$$T_2 = \tau_2 \ln \left( \frac{V_{i2} - V_{f2}}{V_{cor2} - V_{f2}} \right) = 13 \mu s$$

$$T = T_1 + T_2 = 2.827 \times 10^{-4} s$$

$$f = \frac{1}{T} = \underline{\underline{3532.3 \text{ Hz}}}$$