

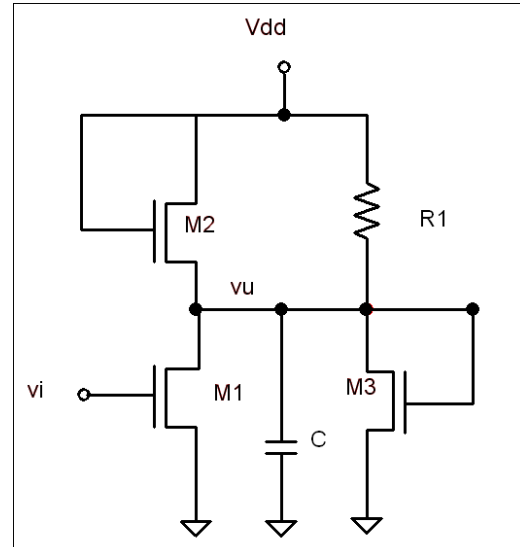
PROVA SCRITTA DI ELETTRONICA 1  
28 GENNAIO 2016

1) Nel circuito in figura, i transistori MOS sono caratterizzati dalle tensioni di soglia  $V_{T1} = V_{T2}$  e  $V_{T3}$  dai coefficienti  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  e  $\beta_3$ . Il segnale d'ingresso abbia il seguente andamento:

$$t < 0: V_i = V_{dd}$$

$$t > 0: V_i = 0$$

Si calcoli il tempo di propagazione  $t_{p,LH}$  relativo al segnale di uscita  $V_u$ .

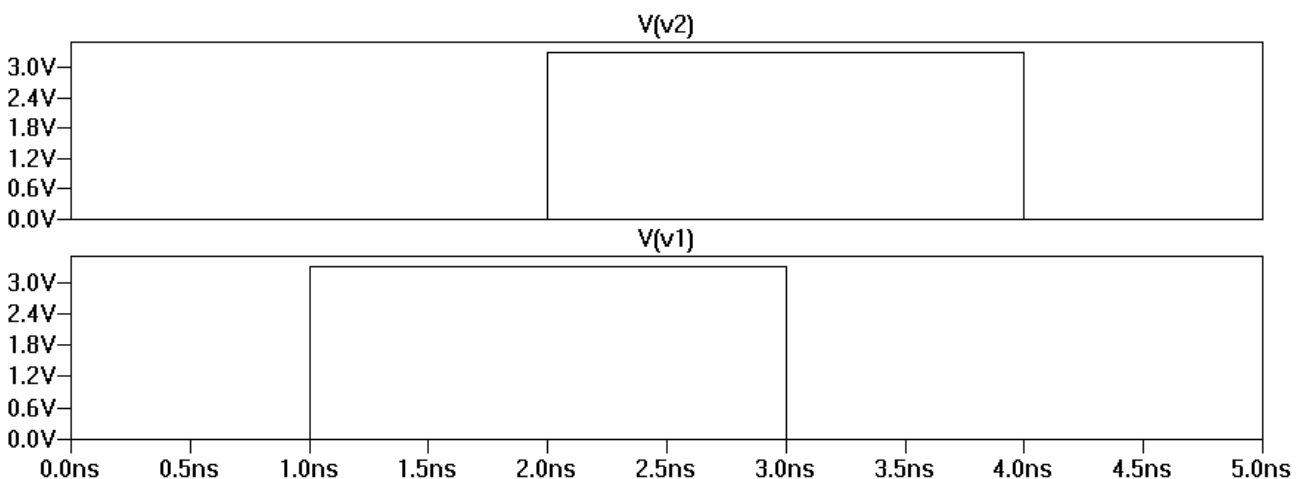
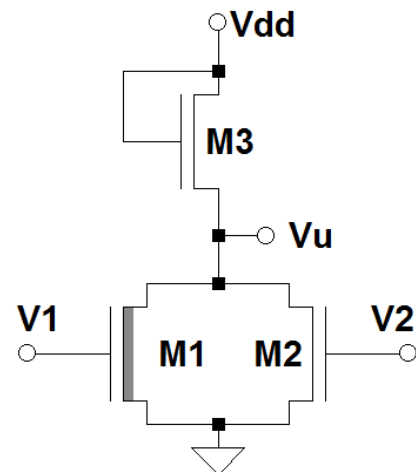


$V_{dd} = 3.5 \text{ V}$ ,  $V_{T1} = V_{T2} = 0.5 \text{ V}$ ,  $V_{T3} = 0.6 \text{ V}$ ,  $\beta_1 = 6 \text{ mA/V}^2$ ,  $\beta_2 = 1 \text{ mA/V}^2$ ,  $\beta_3 = 0.5 \text{ mA/V}^2$ ,  $R_1 = 5 \text{ k}\Omega$ ,  $C = 100 \text{ pF}$ .

2) Nel circuito in figura, i transistori MOS sono caratterizzati dalle tensioni di soglia  $V_{T1} (< 0)$  e  $V_{T2} = V_{T3}$  e dai coefficienti  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  e  $\beta_3$ . I segnali di ingresso  $V_1$  e  $V_2$  abbiano l'andamento periodico mostrato in figura, con periodo pari a 4 ns. Si determini:

- l'andamento del segnale di uscita  $V_u$ ;
- la potenza statica media dissipata  $\tilde{P}_s$

$V_{dd} = 3.3 \text{ V}$ ,  $V_{T1} = -0.2 \text{ V}$ ,  $V_{T2} = V_{T3} = 0.3 \text{ V}$ ,  $\beta_1 = 1 \text{ mA/V}^2$ ,  $\beta_2 = 2 \text{ mA/V}^2$ ,  $\beta_3 = 0.5 \text{ mA/V}^2$ .



Esame di ELETTRONICA AB (mod. B): svolgere l'esercizio 1 (tempo disponibile 1h 15m).

Esame di ELETTRONICA DEI SISTEMI DIGITALI A: l'esercizio 2 (tempo disponibile 1h 15m).

Esame di ELETTRONICA 1 / FONDAMENTI DI ELETTRONICA A: svolgere gli esercizi 1 e 2 (tempo disponibile 2h e 30m).

- Indicare su ciascun foglio nome, cognome, data e numero di matricola
- Non usare penne o matite rosse
- L'elaborato deve essere contenuto in un unico foglio (4 facciate) protocollo

# Compito del 28-01-2016 - Esercizio #1

Osservazioni preliminari: M2 quando ON è in SAT.

1)  $t < 0$ ,  $v_i = V_{dd}$ , M1 ON e LIN (sse  $v_u < v_{dd} - v_{t1}$ , da verificare); M2 on e sat (sse  $v_u < v_{dd} - v_{t2}$ ); M3 off (sse  $v_u < v_{t3}$ , da verificare)

$id_{n1lin} = \beta_1 * ((v_{dd} - v_{t1}) * v_u - 0.5 * v_u^2)$ $id_{n2sat} = \beta_2 / 2 * (v_{dd} - v_u - v_{t2})^2$ $ir_1 = (v_{dd} - v_u) / r_1$ Ma $id_{n2sat} + ir_1 = id_{n1lin}$	Risolvendo si ricavano i seguenti valori: $v_u = 0.256 \text{ V}$ , $v_u = 5.801 \text{ V}$ . La soluzione accettabile è <b><math>v_u = 0.256 \text{ V}</math></b> , che soddisfa la Hp di linearità di M1 ( $v_u < v_{dd} - v_{t1} = 3 \text{ V}$ ), di accensione di M2 ( $v_u < 3 \text{ V}$ ) e di spegnimento di M3 ( $v_u < v_{t3} (= 0.6 \text{ V})$ ).
---	--

2) Per  $t \rightarrow \infty$ ,  $v_i = 0$ , quindi suppongo M1 OFF. Suppongo M2 (sse  $v_u < v_{dd} - v_{t2}$ ) e sat, M3 on e sat (sse  $v_u > v_{t3}$ ), da verificare.

$id_{n2sat} = \beta_2 / 2 * (v_{dd} - v_u - v_{t2})^2$ $id_{n3sat} = \beta_3 / 2 * (v_u - v_{t3})^2$ $ir_1 = (v_{dd} - v_u) / r_1$ Ma $id_{n2sat} + ir_1 = id_{n3sat}$	Risolvendo si ricavano i seguenti valori: $v_u = 2.167 \text{ V}$ , $v_u = 9.433 \text{ V}$ . La soluzione accettabile è <b><math>v_u = 2.167 \text{ V}</math></b> , che soddisfa la Hp di accensione di M2 ( $v_u < 3 \text{ V}$ ) e M3 ( $v_u > 0.6 \text{ V}$ ).
--	---

Il ritardo di propagazione è il tempo necessario al segnale d'uscita  $v_u$  per compiere l'escursione  $0.256 \text{ V} \rightarrow (0.256 + 2.167) / 2 \text{ V} = 1.211 \text{ V}$ , con  $v_i = 0 \text{ V}$ .

3)  $t = 0^+$ ,  $v_i = 0$ , la tensione ai capi del condensatore non cambia rispetto all'istante  $t = 0^-$ , ovvero  $v_u(0^-) = v_u(0^+) = 0.256 \text{ V}$ , M1 è off, M2 sat, e M3 off fintantoché  $v_u$  non raggiunge  $v_{t3}$ , dopodiché anche M3 si accende

I) $0.256 \text{ V} < v_u < 0.6 \text{ V} (= v_{t3})$ : M1 off, M2 sat, M3 off;	
II) $0.6 \text{ V} < v_u < 1.211 \text{ V}$ : M1 off, M2 sat, M3 sat.	
I) $id_{n2sat} = \beta_2 / 2 * (v_{dd} - v_u - v_{t2})^2$ $ir_1 = (v_{dd} - v_u) / r_1$ $ic = C * dv_u / dt$ Ma $ic = ir_1 + id_{n2sat}$ $t_{p,LH1} = \int_{0.256}^{0.6} \frac{C}{ir_1 + id_{n2sat}} dv_u = 8.8 \text{ ns}$	II) $id_{n2sat} = \beta_2 / 2 * (v_{dd} - v_u - v_{t2})^2$ $id_{n3sat} = \beta_3 / 2 * (v_u - v_{t3})^2$ $ir_1 = (v_{dd} - v_u) / r_1$ $ic = C * dv_u / dt$ Ma $ic = ir_1 + id_{n2sat} - id_{n3sat}$ $t_{p,LH2} = \int_{0.6}^{1.211} \frac{C}{ir_1 + id_{n2sat} - id_{n3sat}} dv_u = 23.3 \text{ ns}$  <b><math>t_{p,LH} = t_{p,LH1} + t_{p,LH2} = 32.1 \text{ ns}</math></b>

## 28/1/2016 – Esercizio 2

Il transistor  $M_1$  (depletion) è acceso per ogni valore di interesse. Infatti:  $M_1 \text{ off} \rightarrow V_{GS1} = V_1 < V_{T1} < 0$   
 Il transistor  $M_3$ , se acceso, è necessariamente in saturazione ( $V_{GS3} = V_{DS3} < V_{DS3} + V_{T3}$ ).

1)  $0 < t < 1ns$  :

$V_1 = V_2 = 0 \rightarrow M_1 \text{ on (HP: sat *)}, M_2 \text{ off} :$

$$\left. \begin{aligned} I_{D1} &= \frac{\beta_1}{2} (0 - V_{T1})^2 \\ I_{D2} &= 0 \\ I_{D3} &= \frac{\beta_3}{2} (V_{DD} - V_u - V_{T3})^2 \end{aligned} \right\} \xrightarrow{I_{D3} = I_{D1} + I_{D2}} V_u = \mathbf{2.717V}, \quad I_{D1} = I_{D3} = I_{DD,1} = \mathbf{20.0\mu A}$$

La soluzione  $V_u = 3.282$  va scartata perchè incompatibile con l'ipotesi  $M_3 \text{ on}$ :  $V_{GS3} = V_{DD} - V_u = 0.018V < V_{T3}$   
 Verifica (\*):  $V_{GS1} = V_1 = 0 < V_{DS1} + V_{T1} = V_u - |V_{T1}| = 2.717 - 0.2 \rightarrow \text{OK}$

2)  $1ns < t < 2ns$  :

$V_1 = V_{DD}, V_2 = 0 \rightarrow M_1 \text{ on (HP: lin **)}, M_2 \text{ off} :$

$$\left. \begin{aligned} I_{D1} &= \beta_1 \left( (V_{DD} - V_{T1})V_u - \frac{V_u^2}{2} \right) \\ I_{D2} &= 0 \\ I_{D3} &= \frac{\beta_3}{2} (V_{DD} - V_u - V_{T3})^2 \end{aligned} \right\} \xrightarrow{I_{D3} = I_{D1} + I_{D2}} V_u = \mathbf{0.485V}, \quad I_{D1} = I_{D3} = I_{DD,2} = \mathbf{1.58 mA}$$

La soluzione  $V_u = 6.181 V$  va scartata perchè incompatibile con l'ipotesi  $M_3 \text{ on}$ :  $V_{GS3} = V_{DD} - V_u = -2.88V < V_{T3}$   
 Verifica (\*\*):  $V_{GS1} = V_1 = 3.3 > V_{DS1} + V_{T1} = V_u - |V_{T1}| = 0.485 - 0.2 \rightarrow \text{OK}$

3)  $2ns < t < 3ns$  :

$V_1 = V_2 = V_{DD} \rightarrow M_1 \text{ on (HP: lin ***)}, M_2 \text{ on (HP: lin ***)} :$

$$\left. \begin{aligned} I_{D1} &= \beta_1 \left( (V_{DD} - V_{T1})V_u - \frac{V_u^2}{2} \right) \\ I_{D2} &= \beta_2 \left( (V_{DD} - V_{T2})V_u - \frac{V_u^2}{2} \right) \\ I_{D3} &= \frac{\beta_3}{2} (V_{DD} - V_u - V_{T3})^2 \end{aligned} \right\} \xrightarrow{I_{D3} = I_{D1} + I_{D2}} V_u = \mathbf{0.212V}, \quad I_{D1} = I_{D3} = I_{DD,3} = \mathbf{1.94 mA}$$

La soluzione  $V_u = 6.074 V$  va scartata perchè incompatibile con l'ipotesi  $M_3 \text{ on}$ :  $V_{GS3} = V_{DD} - V_u = -2.77V < V_{T3}$   
 Verifica (\*\*):

$$\begin{aligned} V_{GS1} = V_1 = 3.3 > V_{DS1} + V_{T1} = V_u - |V_{T1}| &= 0.212 - 0.2 \rightarrow \text{OK} \\ V_{GS2} = V_2 = 3.3 > V_{DS2} + V_{T2} = V_u + V_{T2} &= 0.212 + 0.3 \rightarrow \text{OK} \end{aligned}$$

4)  $3ns < t < 4ns$  :

$V_1 = 0, V_2 = V_{DD} \rightarrow M_1 \text{ on (HP: sat ****)}, M_2 \text{ on (HP: lin ****)} :$

$$\left. \begin{aligned} I_{D1} &= \frac{\beta_1}{2} (0 - V_{T1})^2 \\ I_{D2} &= \beta_2 \left( (V_{DD} - V_{T2})V_u - \frac{V_u^2}{2} \right) \\ I_{D3} &= \frac{\beta_3}{2} (V_{DD} - V_u - V_{T3})^2 \end{aligned} \right\} \xrightarrow{I_{D3} = I_{D1} + I_{D2}} V_u = \mathbf{0.313V}, \quad I_{D1} = I_{D3} = I_{DD,4} = \mathbf{1.80 mA}$$

La soluzione  $V_u = 5.686 V$  va scartata perchè incompatibile con l'ipotesi  $M_3 \text{ on}$ :  $V_{GS3} = V_{DD} - V_u = -2.38V < V_{T3}$   
 Verifica (\*\*\*\*):

$$\begin{aligned} V_{GS1} = V_1 = 0 < V_{DS1} + V_{T1} = V_u - |V_{T1}| &= 0.313 - 0.2 \rightarrow \text{OK} \\ V_{GS2} = V_2 = 3.3 > V_{DS2} + V_{T2} = V_u + V_{T2} &= 0.313 + 0.3 \rightarrow \text{OK} \end{aligned}$$

La potenza media complessivamente dissipata vale quindi:

$$\tilde{P}_S = \frac{1}{T} \int_0^{4ns} V_{DD} * I_{DD} dt = \frac{V_{DD}}{T} \left( \int_0^{1ns} I_{DD,1} dt + \int_{1ns}^{2ns} I_{DD,1} dt + \int_{2ns}^{3ns} I_{DD,1} dt + \int_{3ns}^{4ns} I_{DD,1} dt \right) = \mathbf{4.41 mW}$$