

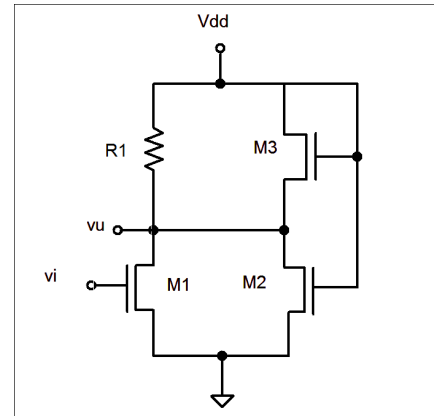
PROVA SCRITTA DI FONDAMENTI DI ELETTRONICA A  
18 FEBBRAIO 2010

1) Nel circuito in figura, i transistori MOS sono caratterizzati dalle tensioni di soglia  $V_{T1}=V_{T2}=V_{T3}=V_T$  e dai coefficienti  $\beta_1, \beta_2=\beta_3$ .

- Si dimensiona la resistenza R1 in modo tale che in corrispondenza della soglia logica ( $v_i=v_u=v_{LT}$ ) la differenza di potenziale su R1 sia pari a 2.627 V.

Si determinino quindi i margini d'immunità ai disturbi  $N_{ML}$ ,  $N_{MH}$  e  $N_M$  della rete.

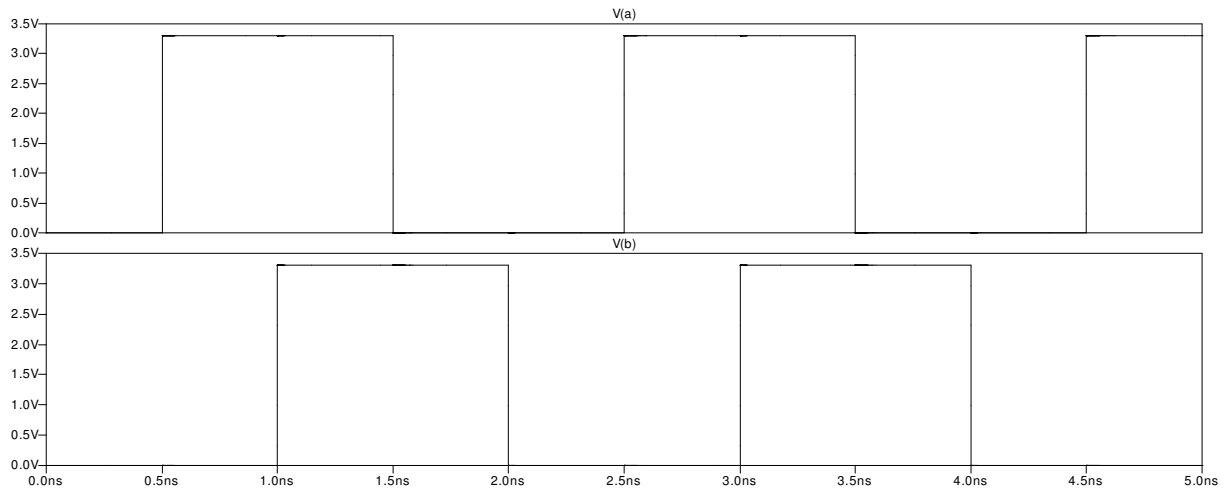
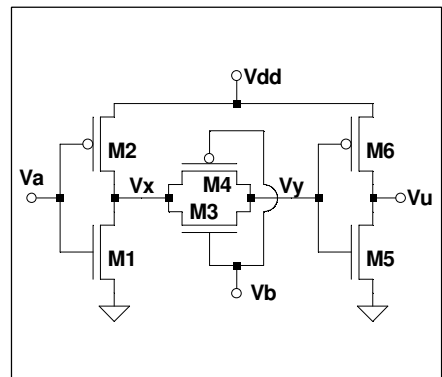
$V_{dd} = 3.5 \text{ V}$ ,  $V_T = 0.55 \text{ V}$ ,  $\beta_1=10 \text{ mA/V}^2$ ,  $\beta_2=\beta_3=0.1 \text{ mA/V}^2$ .



2) Nel circuito in figura, i transistori MOS sono caratterizzati dalle tensioni di soglia  $V_{Ti}$  e dai coefficienti  $\beta_i$ . I segnali di ingresso  $V_a$  e  $V_b$  sono periodici ed hanno l'andamento mostrato in figura.

Si determini l'andamento di  $V_u$ , trascurando i fenomeni di transitorio.

Si determini infine la potenza statica media erogata dal generatore  $V_{dd}$ .



$V_{dd} = 3.3 \text{ V}$ ,  $V_{T1}=V_{T5}=0.4 \text{ V}$ ,  $V_{T2}=V_{T6}=-0.4 \text{ V}$ ,  $V_{T3}=1.2 \text{ V}$ ,  $V_{T4}=-1.2 \text{ V}$ ,  $\beta_1=\beta_3=\beta_5=1 \text{ mA/V}^2$ ,  $\beta_2=\beta_4=\beta_6=700 \mu\text{A/V}^2$ .

Esame di ELETTRONICA AB (mod. B): svolgere l'esercizio 1 (tempo disponibile 1h 30m).

Esame di ELETTRONICA DEI SISTEMI DIGITALI A: l'esercizio 2 (tempo disponibile 1h 30m).

Esame di FONDAMENTI DI ELETTRONICA A: svolgere gli esercizi 1 e 2 (tempo disponibile 2h 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

Oss. preliminare: M3 quando on (se  $v_u < v_{dd} - v_t$ ) è sat ( $0 < v_t$ ).

Dimensionamento di R1. Alla soglia logica  $v_u = v_i = v_{LT}$ . M1lin, M2 lin, M3sat

|  |   |
|--|---|
| <p>Alla soglia logica <math>v_u = v_i = v_t</math><br/>         La differenza di potenziale ai capi di R1 vale <math>v_{dd} - v_u = v_{dd} - v_{lt} = 2.627 \text{ V}</math>,<br/>         quindi <math>v_{lt} = 0.873 \text{ V}</math><br/> <math>i_{dn1sat} = \beta_1/2 * (v_i - v_t)^2</math><br/> <math>i_{dn2lin} = \beta_2 * ((v_{dd} - v_t) * v_u - v_u^2/2)</math></p> | <p><math>i_{dn3sat} = \beta_3/2 * (v_{dd} - v_u - v_t)^2</math><br/> <math>i_{r1} = (v_{dd} - v_u)/r1</math><br/><br/>         Ma <math>i_{r1} + i_{dn3sat} = i_{dn2lin} + i_{dn1sat}</math><br/>         Da cui si ricava che <math>R1 = 5000.22 \Omega</math><br/><br/>         Si assume <math>R1 = 5 \text{ k}\Omega</math></p> |
|--|---|

**Regione 1:**  $v_i < v_t$ , allora M1 OFF. Suppongo M2 lin (se  $v_u < v_{dd} - v_t = 2.95 \text{ V}$ ), M3 sat.

|  |  |
|--|--|
| <p><math>i_{dn2lin} = \beta_2 * ((v_{dd} - v_t) * v_u - v_u^2/2)</math><br/> <math>i_{dn3sat} = \beta_3/2 * (v_{dd} - v_u - v_t)^2</math><br/> <math>i_{r1} = (v_{dd} - v_u)/r1</math><br/>         Ma <math>i_{r1} + i_{dn3sat} = i_{dn2lin}</math></p> | <p>Da cui si ricavano i seguenti valori di <math>v_u</math>:<br/> <math>v_u = 1.888 \text{ V}</math>, <math>v_u = 6.013 \text{ V}</math>.<br/>         Delle due soluzioni la prima è quella accettabile:<br/> <math>1.888 \text{ V} (=v_u) &lt; 2.95 (=v_{dd} - v_t) \text{ V}</math> e soddisfa le Hp fatte.</p> |
|--|--|

**Regione 2:**  $v_i > v_t$  M1 sat (se  $v_i < v_u + v_t$  da verificare). Inoltre M2 lin e M3 sat.

|   |   |
|---|---|
| <p>Cerco se in questa regione esistono punti della caratteristica statica di trasferimento a pendenza <math>-1</math> (cioè cerco i punti tali che <math>dv_u/dv_i = -1</math>).</p>  |   |
| <p><math>i_{r1} = (v_{dd} - v_u)/r1</math><br/> <math>i_{dn1sat} = \beta_1/2 * (v_i - v_t)^2</math><br/> <math>i_{dn2lin} = \beta_2 * ((v_{dd} - v_t) * v_u - v_u^2/2)</math><br/> <math>i_{dn3sat} = \beta_3/2 * (v_{dd} - v_u - v_t)^2</math><br/>         Cerco i punti tali che <math>dv_u/dv_i = -1</math><br/> <math>d(i_{dn1sat})/dv_i = \beta_1 * (v_i - v_t)</math><br/> <math>d(i_{dn2lin})/dv_i = \beta_2 * (-1 * (v_{dd} - v_t) - v_u * -1)</math><br/> <math>d(i_{dn3sat})/dv_i = \beta_3 * (v_{dd} - v_u - v_t) * (-1 * -1)</math><br/> <math>d(i_{r1})/dv_i = -1/r1 * -1</math><br/>         Ma <math>i_{r1} + i_{dn3sat} = i_{dn2lin} + i_{dn1sat}</math><br/> <math>d(i_{r1})/dv_i + d(i_{dn3sat})/dv_i = d(i_{dn2lin})/dv_i + d(i_{dn1sat})/dv_i</math></p> | <p>Risolvendo si ricavano le seguenti coppie di valori (<math>v_i</math>, <math>v_u</math>):<br/> <math>(v_i = 0.508 \text{ V}, v_u = 6.033 \text{ V})</math> e,<br/> <math>(v_i = 0.592 \text{ V}, v_u = 1.867 \text{ V})</math>.<br/>         Delle due soluzioni quella accettabile è la seconda, quindi:<br/> <math>V_{OHMIN} = 1.867 \text{ V}</math>, e <math>V_{ILMAX} = 0.592 \text{ V}</math>.<br/>         Tale coppia di valori soddisfa l'Hp di saturazione di M1 [<math>v_u (=1.867) &gt; v_i - v_t (=0.042 \text{ V})</math>], M2 e M3.</p> |

**Regione 3:** Suppongo M1 lin ( $v_i > v_u + v_t$  da verificare). Inoltre M2 lin e M3 sat.

|   |  |
|---|--|
| <p>Cerco se in questa regione esistono punti della caratteristica statica di trasferimento a pendenza <math>-1</math> (cioè cerco i punti tali che <math>dv_u/dv_i = -1</math>).</p>  |  |
| <p><math>i_{r1} = (v_{dd} - v_u)/r1</math><br/> <math>i_{dn1lin} = \beta_1 * ((v_i - v_t) * v_u - v_u^2/2)</math><br/> <math>i_{dn2lin} = \beta_2 * ((v_{dd} - v_t) * v_u - v_u^2/2)</math><br/> <math>i_{dn3sat} = \beta_3/2 * (v_{dd} - v_u - v_t)^2</math><br/>         Cerco i punti tali che <math>dv_u/dv_i = -1</math><br/> <math>d(i_{dn1lin})/dv_i = \beta_1 * (v_u - 1 * (v_i - v_t) - v_u * -1)</math><br/> <math>d(i_{dn2lin})/dv_i = \beta_2 * (-1 * (v_{dd} - v_t) - v_u * -1)</math><br/> <math>d(i_{dn3sat})/dv_i = \beta_3 * (v_{dd} - v_u - v_t) * (-1 * -1)</math><br/> <math>d(i_{r1})/dv_i = -1/r1 * -1</math><br/>         Ma<br/> <math>d(i_{r1})/dv_i + d(i_{dn3sat})/dv_i = d(i_{dn2lin})/dv_i + d(i_{dn1lin})/dv_i</math><br/> <math>i_{r1} + i_{dn3sat} = i_{dn2lin} + i_{dn1lin}</math></p> | <p>da cui si ricavano le seguenti coppie di valori (<math>v_i, v_u</math>): (<math>v_i = -0.083 \text{ V}, v_u = -0.274 \text{ V}</math>) e (<math>v_i = 1.025 \text{ V}, v_u = 0.274 \text{ V}</math>).</p> <p>Delle due soluzioni quella accettabile è la seconda, quindi: <math>V_{IHMIN} = 1.025 \text{ V}</math>, e <math>V_{OLMAX} = 0.274 \text{ V}</math>.</p> <p>Tale coppia di valori soddisfa l'Hp di linearità di M1 [<math>v_u (=0.274) &lt; v_i - v_t (=0.475 \text{ V})</math>], M2 e M3.</p> <p>Si ricava allora che:<br/> <math>NM_H = 1.867 \text{ V} - 1.025 \text{ V} = 0.842 \text{ V}</math> e<br/> <math>NM_L = 0.592 \text{ V} - 0.274 \text{ V} = 0.318 \text{ V} (=NM)</math>.</p> |

Il segnale  $V_x$  è l'uscita di un invertitore CMOS, e ha quindi l'andamento complementare di  $V_a$ .  $V_x$  è trasferito su  $V_y$  attraverso i pass-transistor  $M_3$  e  $M_4$  in parallelo. A causa delle limitazioni di escursione nel trasferimento del segnale attraverso i pass transistor,  $V_y$  può assumere valori diversi da 0 e  $V_{dd}$ , in ingresso all'invertitore CMOS formato da  $M_5$  e  $M_6$ .

Intervallo (1) [0-0.5 ns]

$$V_a = V_b = 0 \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} V_x = V_{dd} \\ M_3 \text{ off}, M_4 \text{ on} \end{array} \right\} \rightarrow V_y = V_{dd} \rightarrow V_u = 0$$

Intervallo (2) [0.5-1 ns]

$$V_a = V_{dd}, V_b = 0 \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} V_x = 0 \\ M_3 \text{ off}, M_4 \text{ on} \end{array} \right\} \rightarrow V_y = |V_{T4}| = 1.2 \text{ V}$$

Il transistor  $M_4$  funge da pull-down, trasferendo un valore basso "debole". L'invertitore  $M_5/M_6$  "lavora" quindi in un punto intermedio della propria caratteristica di trasferimento:

$$\left. \begin{array}{l} V_y > V_{T5} \rightarrow M_5 \text{ on (HP: SAT)} \rightarrow I_{D5} = \frac{\beta_5}{2} (V_y - V_{T5})^2 = \mathbf{0.32 \text{ mA}} \\ V_y < V_{dd} - |V_{T6}| \rightarrow M_6 \text{ on (HP: LIN)} \rightarrow I_{D6} = \beta_6 \left( (V_{dd} - V_y - |V_{T6}|)(V_{dd} - V_u) - \frac{(V_{dd} - V_u)^2}{2} \right) \end{array} \right\} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} V_u = 0.19 \text{ V (non soddisfa HP)} \\ V_u = \mathbf{3.01 \text{ V (soddisfa HP)}} \end{array} \right.$$

$$I_{D5} = I_{D6}$$

Intervallo (3) [1-1.5 ns]

$$V_a = V_b = V_{dd} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} V_x = 0 \\ M_3 \text{ on}, M_4 \text{ off} \end{array} \right\} \rightarrow V_y = 0 \rightarrow V_u = V_{dd}$$

Intervallo (4) [1.5-2 ns]

$$V_a = 0, V_b = V_{dd} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} V_x = V_{dd} \\ M_3 \text{ on}, M_4 \text{ off} \end{array} \right\} \rightarrow V_y = V_{dd} - V_{T3} = 2.1 \text{ V}$$

Il transistor  $M_3$  funge da pull-up, trasferendo un valore alto "debole". L'invertitore  $M_5/M_6$  "lavora" quindi in un punto intermedio della propria caratteristica di trasferimento:

$$\left. \begin{array}{l} V_y > V_{T5} \rightarrow M_5 \text{ on (HP: LIN)} \rightarrow I_{D5} = \beta_5 \left( (V_y - V_{T5})V_u - \frac{V_u^2}{2} \right) \\ V_y < V_{dd} - |V_{T6}| \rightarrow M_6 \text{ on (HP: SAT)} \rightarrow I_{D6} = \frac{\beta_6}{2} (V_{dd} - V_y - |V_{T6}|)^2 = \mathbf{0.224 \text{ mA}} \end{array} \right\} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} V_u = 3.26 \text{ V (non soddisfa HP)} \\ V_u = \mathbf{0.137 \text{ V (soddisfa HP)}} \end{array} \right.$$

$$I_{D5} = I_{D6}$$

Il circuito dissipa potenza statica negli intervalli (2) e (4), nei quali sono simultaneamente accese le reti di pull-up e pull-down dell'invertitore  $M_5/M_6$ . La potenza statica media dissipata vale quindi:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T V_{dd} \cdot I(V_{dd}) dt = \frac{V_{dd}}{2 \text{ ns}} \left\{ \int_0^{0.5 \text{ ns}} 0 dt + \int_{0.5 \text{ ns}}^{1 \text{ ns}} (0.32 \text{ mA}) dt + \int_{1 \text{ ns}}^{1.5 \text{ ns}} 0 dt + \int_{1.5 \text{ ns}}^{2 \text{ ns}} (0.224 \text{ mA}) dt \right\} = \mathbf{448.8 \mu W}$$

