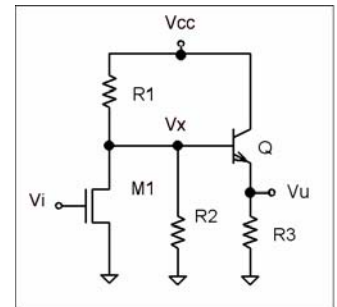


1) Nel circuito in figura, il transistor bipolare può essere descritto da un modello "a soglia" con $V_{\gamma}=0.75\text{ V}$ e $V_{CE,sat}=0.2\text{ V}$, mentre il transistor MOS è caratterizzato dalla tensione di soglia V_{Tn} e dal coefficiente β_n . Si determini il margine d'immunità ai disturbi N_M della rete.

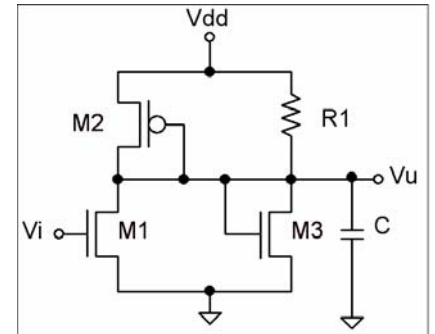
$V_{cc} = 5\text{ V}$, $V_{Tn} = 0.5\text{ V}$, $\beta_n = 5\text{ mA/V}^2$, $\beta_F=100$, $R_1 = 500\ \Omega$, $R_2 = 2\text{ k}\Omega$, $R_3 = 500\ \Omega$.



2) Nel circuito in figura, i transistori MOS sono caratterizzati dalle tensioni di soglia $V_{Tn1}=|V_{Tp2}|=V_{Tn3}=V_T$ e dai coefficienti β_{n1} , β_{p2} , β_{n3} . Il segnale d'ingresso abbia il seguente andamento:

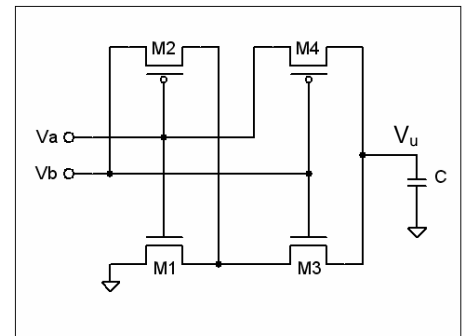
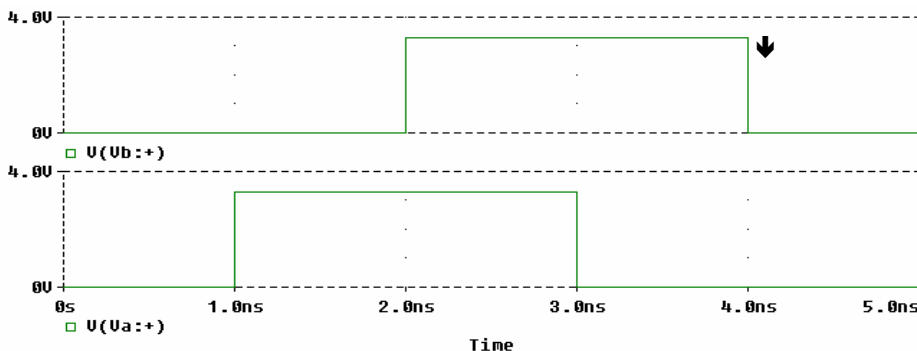
$t < 0$: $V_i = 0$
 $t > 0$: $V_i = V_{dd}$

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



$V_{dd} = 3.5\text{ V}$, $V_T = 0.5\text{ V}$, $\beta_{n1} = 5\text{ mA/V}^2$, $\beta_{p2} = 1\text{ mA/V}^2$, $\beta_{n3} = 0.2\text{ mA/V}^2$, $R_1 = 5\text{ k}\Omega$, $C = 10\text{ pF}$.

3) Nel circuito in figura, i transistori MOS sono caratterizzati dalla tensione di soglia $V_{Tn}=-V_{Tp}=V_T$ e dai coefficienti β_n e β_p . I segnali di ingresso V_a e V_b assumono i valori 0 e V_{dd} , secondo l'andamento seguente:

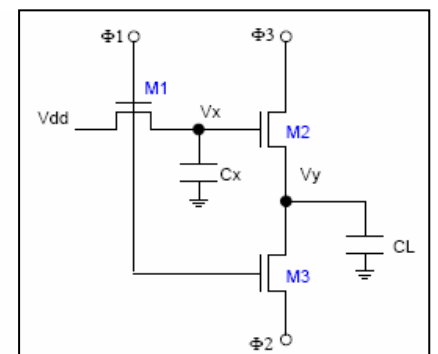
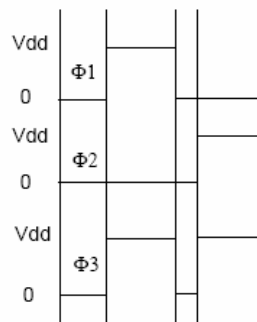


Si determini l'andamento qualitativo del segnale di uscita V_u e si calcoli il tempo di propagazione relativo alla transizione di V_b evidenziata ($t=4\text{ ns}$).

$V_T = 0.45\text{ V}$, $V_{dd} = 3.3\text{ V}$, $\beta_n=\beta_p=1\text{ mA/V}^2$, $C=50\text{ fF}$.

4) Nel circuito in figura, i transistori MOS sono caratterizzati dalla tensione di soglia V_T . I segnali di ingresso Φ_1 , Φ_2 , Φ_3 assumono i valori 0 e V_{dd} secondo l'andamento riportato in figura.

Si determini l'andamento qualitativo di segnali V_x e V_y e si dimensionino i MOS M2 e M3 in modo tale che con $\Phi_1=V_{DD}$, $\Phi_2=0$ e $\Phi_3=V_{DD}$ V_y sia pari a $0.5V$ e la potenza statica dissipata dall'intero circuito sia di 2 mW



$V_T = 0.6\text{ V}$, $V_{dd} = 3.5\text{ V}$

Esame scritto di Fondamenti di Elettronica A – 18.7.2006 - Esercizio #1

Osservazioni preliminari: il transistor Q quando ON è sempre in A.D. Inoltre fintantoché Q è ON, $v_x = v_u + v_\gamma$, e $v_u > 0$ (ie $\neq 0$).

Regione 1: $v_i < v_{tn}$, allora M1 OFF. Q in AD (se $v_x > v_g$, da verificare).

Si rimane in regione 1 fintantoché M1 non va on, ovvero per $v_i > v_{tn}$.

$v_x = v_u + v_\gamma$ (se Q1 on)	$i_e = v_u / r_3$
$i_{r1} = (v_{cc} - v_x) / r_1$	Ma $i_e = (b_f + 1) * (i_{r1} - i_{r2})$
$i_{r2} = v_x / r_2$	da cui si ricava che $v_u = 3.224 \text{ V}$ (e $v_x = 3.974 \text{ V}$). OK Hp su Q.

Regione 2: $v_i > v_{tn}$, quindi M1 ON e SAT se $v_u > v_i - v_{tn} - v_\gamma$ (da verificare), e Q on in AD (sse $v_x > v_\gamma$).

Cerco se in questa regione esistono punti della caratteristica statica di trasferimento a pendenza -1 (cioè cerco i punti tali che $d v_u / d v_i = -1$).

$v_x = v_u + v_\gamma$ (se Q1 on)	Ma
$i_{r1} = (v_{cc} - v_x) / r_1$	$i_{r1} = i_{dm1sat} + i_{r2} + i_b$
$i_{r2} = v_x / r_2$	$d(i_{r1}) / d v_i = d(i_{dm1sat}) / d v_i + d(i_{r2}) / d v_i + d(i_b) / d v_i$
$i_b = v_u / r_3 / (\beta_f + 1)$	
$i_{dm1sat} = \beta_n / 2 * (v_i - v_{tn})^2$	Risolvendo si ricava che $v_u = 2.972 \text{ V}$, $v_i = 1.004 \text{ V}$.
$d(i_{r1}) / d v_i = 1 / r_1$	Tale coppia di valori soddisfa le HP fatte sulla regione di
$d(i_{r2}) / d v_i = -1 / r_2$	funzionamento di M1 $v_u (= 2.972 \text{ V}) > v_i - v_{tn} - v_\gamma (= -0.246 \text{ V})$,
$d(i_b) / d v_i = -1 / r_3 / (\beta_f + 1)$	e di Q.
$d(i_{dm1sat}) / d v_i = \beta_n / 2 * 2 * (v_i - v_{tn}) * 1$	Quindi: $V_{OHMIN} = 2.972 \text{ V}$, $V_{ILMAX} = 1.004 \text{ V}$.

(eq.1)

Regione 3: $v_i > v_{tn}$, quindi M1 ON e LIN se $v_u < v_i - v_{tn} - v_\gamma$ (da verificare), e Q on in AD (sse $v_x > v_\gamma$).

Cerco se in questa regione esistono punti della caratteristica statica di trasferimento a pendenza -1 (cioè cerco i punti tali che $d v_u / d v_i = -1$).

$v_x = v_u + v_\gamma$ (se Q1 on)	da cui si ricavano le seguenti coppie di valori (v_i , v_u):
$i_{r1} = (v_{cc} - v_x) / r_1$	$(v_i = -2.315 \text{ V}, v_u = 1.906 \text{ V})$ e
$i_{r2} = v_x / r_2$	$(v_i = 2.307 \text{ V}, v_u = 0.406 \text{ V})$.
$i_b = v_u / r_3 / (\beta_f + 1)$	Delle due soluzioni quella accettabile è la seconda,
$i_{dm1lin} = \beta_n * ((v_i - v_{tn}) * (v_u + v_\gamma) - 1/2 * (v_u + v_\gamma)^2)$	quindi:
$d(i_{r1}) / d v_i = 1 / r_1$	$V_{IHMIN} = 2.307 \text{ V}$, e $V_{OLMAX} = 0.406 \text{ V}$.
$d(i_{r2}) / d v_i = -1 / r_2$	
$d(i_b) / d v_i = -1 / r_3 / (\beta_f + 1)$	Tale coppia di valori soddisfa l'Hp su M1 lin,
$d(i_{dm1lin}) / d v_i = \beta_n * ((v_i - v_{tn}) * -1 + (v_u + v_\gamma) - 1/2 * 2 * (v_u + v_\gamma) * -1)$	$v_u (= 0.406) < v_i - v_{tn} - v_\gamma (= 1.057 \text{ V})$, e su Q.
Ma	Si ricava allora che:
$i_{r1} = i_{dm1lin} + i_{r2} + i_b$	$NM_H = 2.972 \text{ V} - 2.307 \text{ V} = 0.665 \text{ V}$ e
$d(i_{r1}) / d v_i = d(i_{dm1lin}) / d v_i + d(i_{r2}) / d v_i + d(i_b) / d v_i$	$NM_L = 1.004 \text{ V} - 0.406 \text{ V} = 0.598 \text{ V} = NM$

Regione 4: Per completezza: poi Q andrà off quando $v_x = v_u + v_\gamma = v_\gamma$, sse $v_u = 0 \text{ V}$. Calcolo il valore di v_i per il quale Q va off. M1 è lin.

$i_{r1} = (v_{cc} - (v_\gamma)) / r_1$	Ma $i_{r1} = i_{dm1lin} + i_{r2}$, da cui si ricava che Q andrà
$i_{r2} = (v_\gamma) / r_2$	OFF per:
$i_{dm1lin} = \beta_n * ((v_i - v_{tn}) * (v_\gamma) - 1/2 * (v_\gamma)^2)$	$v_i = 3.042 \text{ V}$

Esame scritto di Fondamenti di Elettronica A – 18.7.2006 - Esercizio #2

OSS. PRELIMINARI:

- 1) M2 è ON quando $v_u < v_{dd} - v_t = 3.0V$, e quando ON è SAT ($v_{dd} - v_u < v_{dd} - v_u + v_t$, $0 < v_t$ sempre).
- 2) M3 è ON quando $v_u > v_t$, e quando ON è SAT ($v_u < v_u + v_t$, $0 < v_t$ sempre).

1) $t < 0$, $v_i = 0V$, allora M_{n1} OFF. Suppongo M2 OFF (sse $v_u > v_{dd} - v_t$, da verificare), e M_{n3} ON (sse $v_u > v_t$, da verificare) e SAT.

$i_{r1} = (v_{dd} - v_u) / r_1$	$v_u = -35.603 V$ o $v_u = 3.27 V$. Delle due
$i_{dn3sat} = \beta_{n3} / 2 * (v_u - v_t)^2$	soluzioni quella accettabile è $v_u = 3.27 V$.
Ma $i_{r1} = i_{dn3sat}$, da cui si ricava che:	Quindi M2 OFF ($v_u > 3.0V$), e M3 ON ($v_u > 0.5V$).

2) Per $t \rightarrow \infty$, $v_i = v_{dd}$, quindi M1 sarà ON e lo suppongo LIN (sse $v_u < v_{dd} - v_t$, da verificare). M2 sarà ON e SAT (da verificare che $v_u < v_{dd} - v_t = 3.0V$) e M_{n3} ON e SAT (sse $v_u > v_t$, da verificare).

$i_{dn1lin} = \beta_{n1} * ((v_{dd} - v_t) * v_u - v_u^2 / 2)$	da cui si ricava che : $v_u = 0.861 V$ o $v_u = 6.460 V$. Delle due
$i_{dp2sat} = \beta_{p2} / 2 * (v_{dd} - v_u - v_t)^2$	soluzioni quella accettabile è $v_u = 0.861 V$.
$i_{dn3sat} = \beta_{n3} / 2 * (v_u - v_t)^2$	Quindi M1 ON e LIN ($v_u = (0.861V) < v_{dd} - v_t (=3.0V)$), e
$i_{r1} = (v_{dd} - v_u) / r_1$	M2 ON ($v_u = (0.861V) < v_{dd} - v_t (=3.0V V)$), e M3 ON
Ma $i_{r1} + i_{dp2sat} = i_{dn1lin} + i_{dn3sat}$	($v_u = (0.861V) > 0.5V$).

3) Il ritardo di propagazione è il tempo necessario al segnale d'uscita v_u per compiere l'escursione da 3.27 \rightarrow (3.27+0.861)/2=2.0655 V con $v_i = v_{dd}$.

Durante questo intervallo di tempo i transistori lavorano nelle seguenti regioni:

- A) $v_{dd} - v_t (=3) < v_u < 3.27$, M2 OFF, M1 ON e SAT, M3 ON e SAT;
- B) $2.0655 < v_u < 3$, M2 ON e SAT, M1 ON e LIN, M3 ON e SAT.

A)	B)
$i_{r1} = (v_{dd} - v_u) / r_1$	$i_{r1} = (v_{dd} - v_u) / r_1$
$i_{dn1sat} = \beta_{n1} / 2 * (v_{dd} - v_t)^2$	$i_{dn1lin} = \beta_{n1} * ((v_{dd} - v_t) * v_u - 1/2 * v_u^2)$
$i_{dn3sat} = \beta_{n3} / 2 * (v_u - v_t)^2$	$i_{dp2sat} = \beta_{p2} / 2 * (v_{dd} - v_u - v_t)^2$
$C dv_u / dt = i_{r1} - i_{dn1sat} - i_{dn3sat}$	$i_{dn3sat} = \beta_{n3} / 2 * (v_u - v_t)^2$
	$C dv_u / dt = i_{r1} + i_{dp2sat} - i_{dn1lin} - i_{dn3sat}$
$t_{phl1} = \int_{3.27}^3 \frac{C}{i_{r1} - i_{dn1sat} - i_{dn3sat}} dv_u$	$t_{phl2} = \int_3^{2.0655} \frac{C}{i_{r1} + i_{dp2sat} - i_{dn1lin} - i_{dn3sat}} dv_u$
$t_{phl1} = 123ps$	$t_{phl2} = 501 ps$
	da cui si ricava che $t_{phl} = t_{phl1} + t_{phl2} = 624ps$.

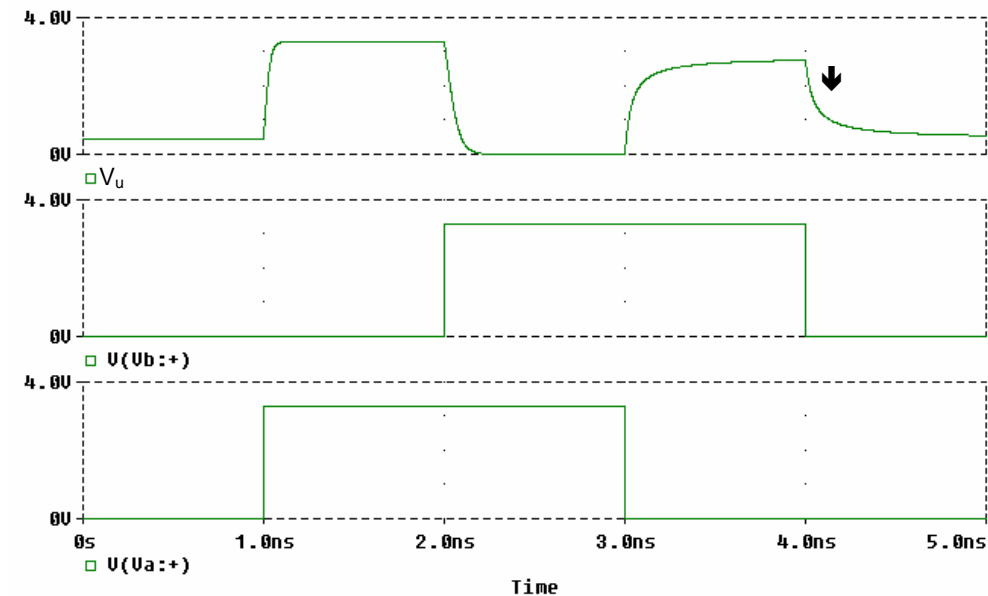
Esame scritto di Fondamenti di Elettronica A – 18.7.2006 - Esercizio #3

La risposta in condizioni statiche è descritta dalla tabella sottostante:

	V_a	V_b	V_u	M_1	M_2	M_3	M_4
(1)	0	0	V_t	OFF	ON	OFF	ON
(2)	0	V_{dd}	$V_{dd} - V_t$	OFF	ON	ON	OFF
(3)	V_{dd}	0	V_{dd}	ON	OFF	OFF	ON
(4)	V_{dd}	V_{dd}	0	ON	OFF	ON	OFF

Si tratta quindi di un XOR basato su pass-transistor; nella condizione (1) il valore di uscita basso è “debole”, poiché il nodo si scarica attraverso il pMOS M_4 , mentre nella condizione (2) il valore di uscita alto è “debole”, poiché il nodo si carica attraverso l'nMOS M_3 in serie al pMOS M_2 .

L'andamento qualitativo dell'uscita è quindi il seguente:



A seguito della transizione evidenziata, il condensatore di uscita, inizialmente carico a $V_{dd} - V_t$, si scarica al valore V_t attraverso il pMOS M_4 . Tale transistor è sempre in saturazione ($V_{sg}=V_{sd}=V_u$), per cui il tempo di propagazione, necessario a compiere metà dell'escursione ($V_u: V_{dd}-V_t \rightarrow V_{dd}/2$) si calcola tramite l'integrale:

$$t_p = \int_{V_{dd}-V_t}^{V_{dd}/2} \frac{-2C}{B_p(V_u - V_t)^2} dV_u$$

la cui soluzione vale circa 41 ps.

Soluzione

C_L e C_X inizialmente scariche

Caso $\phi_1 = \phi_2 = \phi_3 = 0$ M1, M2, M3 OFF

$$\Rightarrow V_Y = 0 \text{ e } V_X = 0$$

Caso $\phi_1 = V_{DD}$ $\phi_2 = 0$ $\phi_3 = V_{DD}$

M1 ON M3 ON M2 inizialmente OFF

V_X cresce, quando arriva a V_T M2 ON, V_X continua a crescere fino a $V_{DD} - V_T$

In condizioni stazionarie $V_X = V_{DD} - V_T$ (M2 ON)

$$V_{G3} = V_{DD} \text{ (M3 ON)}$$

$$I_{M2} = I_{M3}$$

$$M3 \text{ LIN } V_Y < V_{DD} - V_T = 2.9$$

$$M2 \text{ SAT } V_{DD} - V_Y > V_{DD} - V_T - V_Y - V_T = -2V_T$$

$$\left\{ \begin{aligned} \beta_3 \left[(V_{DD} - V_T) V_Y - \frac{V_Y^2}{2} \right] &= \frac{\beta_2}{2} (V_{DD} - V_T - V_Y - V_T)^2 \\ \text{con } V_Y &= 0.5 \text{ V} \end{aligned} \right.$$

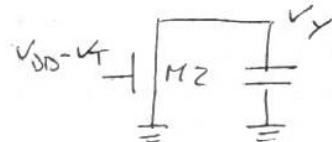
$$P_{\text{statica}} = V_{DD} I_{M2} = \frac{V_{DD} \beta_2}{2} (V_{DD} - V_T - V_Y - V_T)^2$$

$$\text{risolvendo il sistema } \beta_3 = 431.3 \mu\text{A/V}^2 \quad \beta_2 = 352.7 \mu\text{A/V}^2$$

Caso $\phi_1 = \phi_2 = \phi_3 = 0$ M1 OFF M3 OFF

M2 $V_X = V_{DD} - V_T$ inizialmente $V_Y = 0.5 \text{ V}$ M2 ON

C_L si scarica attraverso M2 fino a $V_Y = 0$



Caso $\phi_1 = 0$ $\phi_2 = \phi_3 = V_{DD}$ M1, M3 OFF

M2 ON con $V_X = V_{DD} - V_T$

V_Y cresce fino a che M2 OFF

$$\Rightarrow V_Y = V_{DD} - 2V_T$$

