$t < 0 \qquad V_i = V_{dd}$
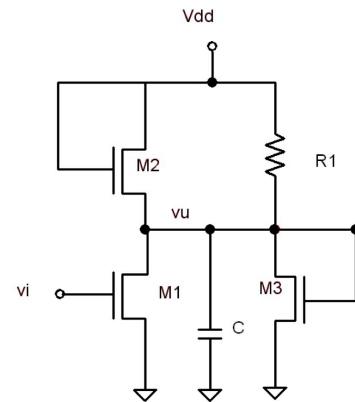
$t > 0 \qquad V_i = 0$

$t_{pLH} = ? \qquad \longrightarrow$ tempo propagazione
basso-alto

M_2, M_3 se sono accesi sono in SAT

$\qquad V_{DS} \geq V_{GS} - V_t$

$\qquad V_G = V_D \Rightarrow V_{DS}$ per $M_2 = V_{dd} - V_u$ e $V_{GS} = V_{dd} - V_u$

$\qquad \cancel{V_{dd}} - \cancel{V_u} \geq \cancel{V_{dd}} - \cancel{V_u} - V_t \Rightarrow 0 \geq -V_t$

$\rightarrow$ calcolare valore di uscita

$\rightarrow$ si ignora condensatore, vale solo per il transitorio $\dashv\vdash$

$t < 0$

IPOTESI $\quad M_1$ ON LIN $\qquad M_3$ OFF $\quad M_2$ ON SAT

$\rightarrow$ ridisegno circuito con ipotesi
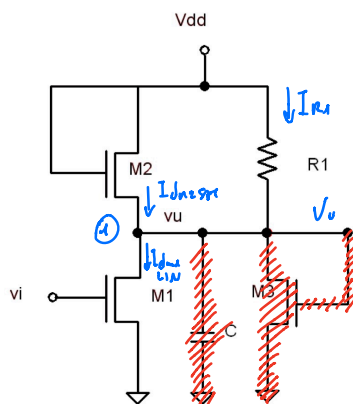
$\rightarrow$ eq. nodo ①

$\qquad I_{dM_1 LIN} = I_{dM_2 SAT} + I_{R1}$

$\rightarrow$ riscrivere correnti con relazioni conosciute

$\qquad I_{R1} = \dfrac{V_{dd} - V_u}{R_1}$

$\qquad I_{dM_2 SAT} = \dfrac{\beta_2}{2}\left(V_{GS} - V_{t2}\right)^2 = \dfrac{\beta_2}{2}\left(V_{dd} - V_u - V_{t2}\right)^2$

$\qquad I_{dM_1 LIN} = \beta_1\left[\left(V_{GS} - V_{t1}\right)\cdot V_{DS} - \dfrac{V_{DS}^2}{2}\right] = \beta_1\left[\left(V_i - V_{ti}\right)V_u - \dfrac{V_u^2}{2}\right]$

$\rightarrow$ riscrivo equazione

$\beta_1\left[\left(V_i - V_{ti}\right)V_u - \dfrac{V_u^2}{2}\right] = \dfrac{\beta_2}{2}\left(V_{dd} - V_u - V_{t2}\right)^2 + \dfrac{V_{dd} - V_u}{R_1}$

$6\cdot 10^{-3}\left[\left(3.5 - 0.5\right)V_u - \dfrac{V_u^2}{2}\right] = \dfrac{10^{-3}}{2}\left(3.5 - 0.5 - V_u\right)^2 + \dfrac{3.5 - V_u}{5\cdot 10^2}$

$35\,V_u^2 - 211\,V_u + 48.5 = 0 \quad \Rightarrow \quad V_{u1} = 0.236\,V$

$\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad V_{u2} = 5.801\,V$

→ verificare ipotesi di partenza

→ con $V_u = 5V$ non va in saturazione, considerare il primo

$V_{u1} = 0.256 V$

→ verificare M_1 LIN M_2 SAT

M_3 OFF → $V_{GS} < V_{t3}$
$V_{u1} < V_{t3} \Rightarrow 0.256 < 0.6 V$ <u>ok</u>

M_2 SAT → $V_{GS} > V_{t_2}$ → $V_{dd} - V_u > V_{t_2}$ → $3.5V - 0.265V > 0.5V$ <u>ok</u>

M_1 LIN → $V_{DS} > V_{GS} - V_t$ → $V_u \leq V_i - V_t$ → $0.256V \leq 3.5 - 0.5V$ <u>ok</u>

quindi è verificato che per $t < 0$ $V_u = 0.256V$

$t > 0$
IPOTESI M_2 ON SAT M_1 OFF M_3 ON SAT
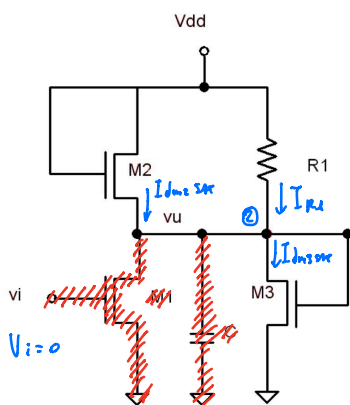
→ eq al nodo ②

$I_{dM3 SAT} = I_{dM2 SAT} + I_{R1}$

$\frac{\beta_3}{2}\left[V_u - V_{t_3}\right] = \frac{V_{dd} - V_u}{R_1} + \frac{\beta_2}{2}\left(V_{dd} - V_u - V_{t_2}\right)^2$

$\frac{10^{-3}}{4}\left(V_u - 0.6\right)^2 = \frac{3.5 - V_u}{5 \cdot 10^3} + \frac{10^{-3}}{2}\left(3.5 - 0.5 - V_u\right)^2$

$5 V_u^2 - 38 V_u + 102.2 = 0$

$V_{u1} = 2.167 V$

$V_{u2} = 9.433 V$

→ verifica ipotesi con $V_{u1} = 2.167V$

M_1 OFF → $V_{i=0} < V_{t_1}$:   <u>ok</u>

M_2 SAT → $V_{GS} > V_{t_2}$ → $V_{dd} - V_u > V_{t_2}$ → $3.5 - 2.167 > 0.5$ <u>ok</u>

M_3 SAT → $V_{GS} > V_{t_3}$ → $V_u > V_{t_3}$ → $2.167 > 0.6$ <u>ok</u>

→ ok, uscita alta con $V_{i=0}$

CALCOLO TEMPO PROPAGAZIONE

→ tempo per passare da stato basso a stato alto 0.2

→ transitorio legato alla capacità

→ segnale diventa HIGH quando supera 50% ΔV

$$V_L = 0.25 \, V \qquad V_H = \frac{0.256 + 2.167}{2} = 1.211 \, V$$

M_3 cambia stato → considerare tutte condizioni circuito

→ calcolare due tempi propagazione diversi → Σ

t_{pLH_1} per $0.256 \, V < V_u < 0.6 \, V$ con M_3 off ← tensione uscita più bassa della tensione di soglia

$t_0^- = t_0^+$ per V_u, un T_1 si spegne comunque istantaneamente
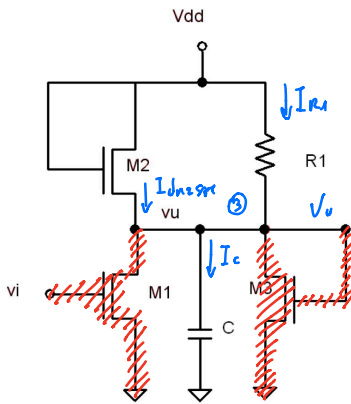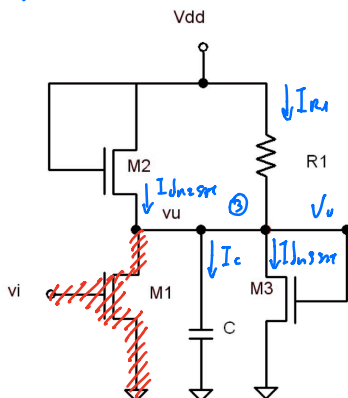

eq. nodo ⑤

$$I_c = I_{dM2 \, SAT} + I_{R1}$$

$$C \frac{dV_u}{dt} = I_{dM2 \, SAT} + I_{R1} \Rightarrow dt = \frac{C}{I_{dM2 SAT} + I_{a1}} dV_u$$

$$t_{LH_1} = \int_{0.256V}^{0.6V} \frac{C}{I_{dM2 SAT} + I_{a1}} dV_u$$

$$= \int_{0.256 \, V}^{0.6 \, V} \frac{C}{\frac{\beta_2}{2}(V_{dd} - V_u - V_{t_2})^2 + \frac{V_{dd} - V_u}{R_1}} dV_u$$

$$= \int_{0.256}^{0.6} \frac{100 \cdot 10^{-12}}{\frac{10^{-3}}{2}(3 - V_u)^2 + \frac{3.3 - V_u}{3 \cdot 10^3}} dV_u = \frac{10^{-6}}{5} \int_{0.256}^{0.6} \frac{1}{V_u^2 - 6.4 V_u + 10.6} dV_u = 8.8 \, nS$$

t_{pLH_2} per $0.6 < V_u < 1.211 \, V$ con M_3 on

→ eq. nodo ⑤

$$I_c + I_{dM3 \, SAT} = I_{dM2 \, SAT} + I_{R1}$$

$$I_c = -I_{dM3 \, SAT} + I_{dM2 \, SAT} + I_{R1}$$

$$C \frac{dV_u}{dt} = I_{dM2 SAT} + I_{a1} \cdots$$

$$t_{pLH\_2} = \int_{0.6}^{1.2\text{''}} \frac{c}{\frac{\beta_2}{2}\left(V_{dd}-V_v-V_{t_2}\right)^2 + \frac{V_{dd}-V_v}{R_L} - \frac{\beta_3}{2}\left(V_v-V_{t_3}\right)^2} \, dV_v$$

$$= \frac{2 \cdot 10^{-6}}{5} \int_{0.6}^{1.2\text{''}} \frac{1}{V_v^2 - 11.6\,V_v + 20.44} \, dV_v = 23.3 \text{ nS}$$

$$t_{pLH\_TOT} = 8.8 \text{ nS} + 23.3 \text{ nS} = 32.1 \text{ nS}$$