Fondamenti di Elettronica – Ing. AUTOMATICA e INFORMATICA - AA 2013/2014

Appello del 5 Febbraio 2015

Indicare chiaramente la domanda a cui si sta rispondendo. Ad esempio A1) …

Esercizio A: Si consideri il circuito in figura 1.a realizzato in tecnologia CMOS.
Dati: Vdd=3.3V, R=10kΩ, C=5pF, Vt=0.6V, kp= 1mA/V^2, kn=2mA/V^2

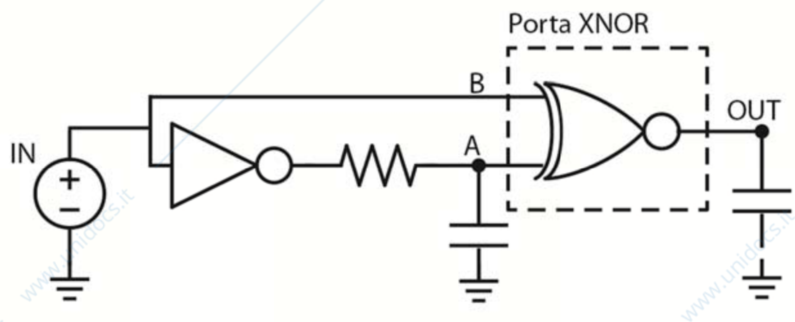


Fig 1.a

Porta XNOR:

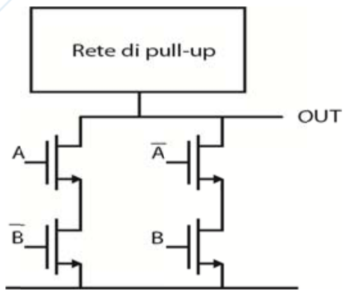


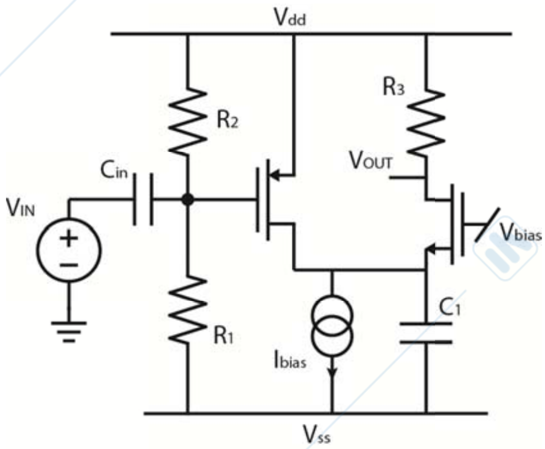
Fig 1.b

La porta XNOR (nel riquadro tratteggiato) realizza la seguente funzione logica:

A	B	OUT
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	1

1) Assumendo trascurabile il tempo di propagazione delle porte logiche e una soglia di commutazione a Vdd/2, disegnare su un grafico quotato la forma d'onda dell'uscita (OUT) quando in ingresso è applicata un'onda quadra di frequenza f= 2MHz.
2) Sempre nell'ipotesi di tempo di propagazione delle porte logiche trascurabile, calcolare la potenza dinamica dissipata dal circuito nelle condizioni del punto 1.
3) Sintetizzare la rete di pull-up della porta XNOR in tecnologia CMOS a partire dalla rete di pull down riportata in figura 1.b
4) Valutare i tempi di propagazione della sola porta XNOR con ingressi $A, B, \bar{A}, \bar{B}$ ideali. Discutere poi l'effetto di questi tempi di propagazione nelle condizioni del punto 1) (cioè tenendo conto della rete RC in ingresso)

Esercizio B: Si consideri il circuito in figura.
Dati:

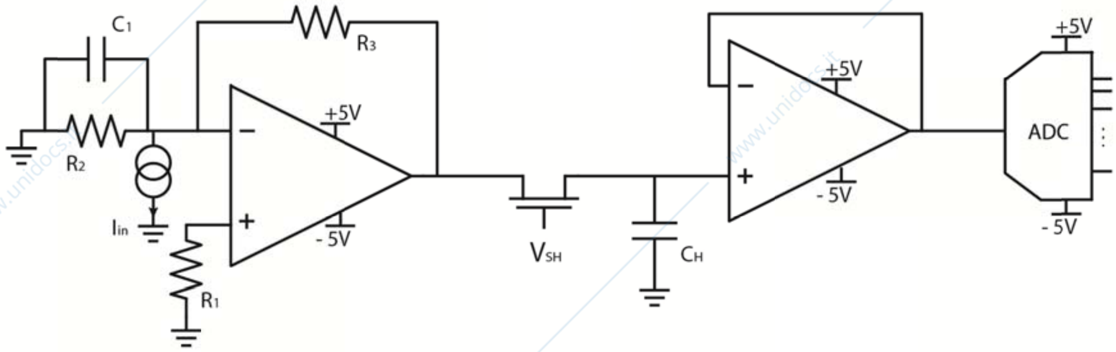


R1=470kΩ, R2=280kΩ , R3=2.5kΩ
Cin=10μF, C1= 10nF
kp=2.5mA/V^2
kn=0.5mA/V^2
$V_{T,p}$=-0.8V
$V_{T,n}$= 0.6V
Ibias= 11mA
Vbias=2.5V
Vdd= 5V
Vss=-2.5V

1) Determinare la polarizzazione del circuito.
2) Determinare il guadagno Vout/Vin a media frequenza (Cin chiusa e C1 aperta) e ad alta frequenza (entrambe le capacità chiuse).
3) Tracciare il diagramma di Bode del trasferimento Vout/Vin quotando i punti più significativi.
4) Valutare l'effetto sull'uscita di un disturbo sinusoidale sovrapposto alla tensione Vbias di ampiezza A=1mV e frequenza f=50Hz.

Esercizio C: Si consideri il circuito in figura in cui I_{in} è un segnale di corrente.

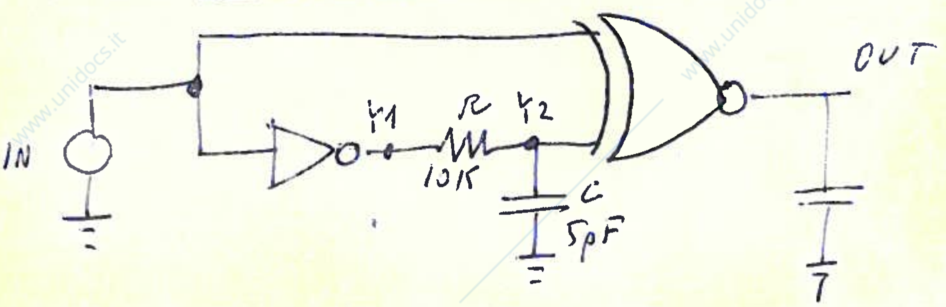
Dati:
R1= 100kΩ, R2=100kΩ, R3=10MΩ
C1=15pF, C_H=10nF
ADC con dinamica di ingresso da -5V a +5V, 14 bit e tempo di conversione di 10μs



1) Calcolare la funzione di trasferimento del primo stadio assumendo l'operazionale ideale e determinare la massima ampiezza del segnale Iin - supposto sinusoidale - che copra l'intera dinamica dell'ADC.
2) Valutare la stabilità del primo stadio di amplificazione considerando l'operazionale a singolo polo con A0=10^5 e polo a 100Hz.
3) Considerando in ingresso un segnale che soddisfi le condizioni del punto 1, calcolare il massimo valore ammissibile della Ron del MOS per avere un errore alla fine della fase di sampling inferiore a ½LSB quando V_{SH} è un'onda quadra avente duty cycle 50% e frequenza pari alla massima frequenza di campionamento ammissibile.
4) Determinare l'errore di conversione in LSB causato dalla tensione di offset (pari a Vos=1mV) e dalle correnti di bias (I_{b+}=I_{b-}=10nA) dei due amplificatori operazionali.

SOLUZIONI T.E. 5/FEB/2015

(A1)

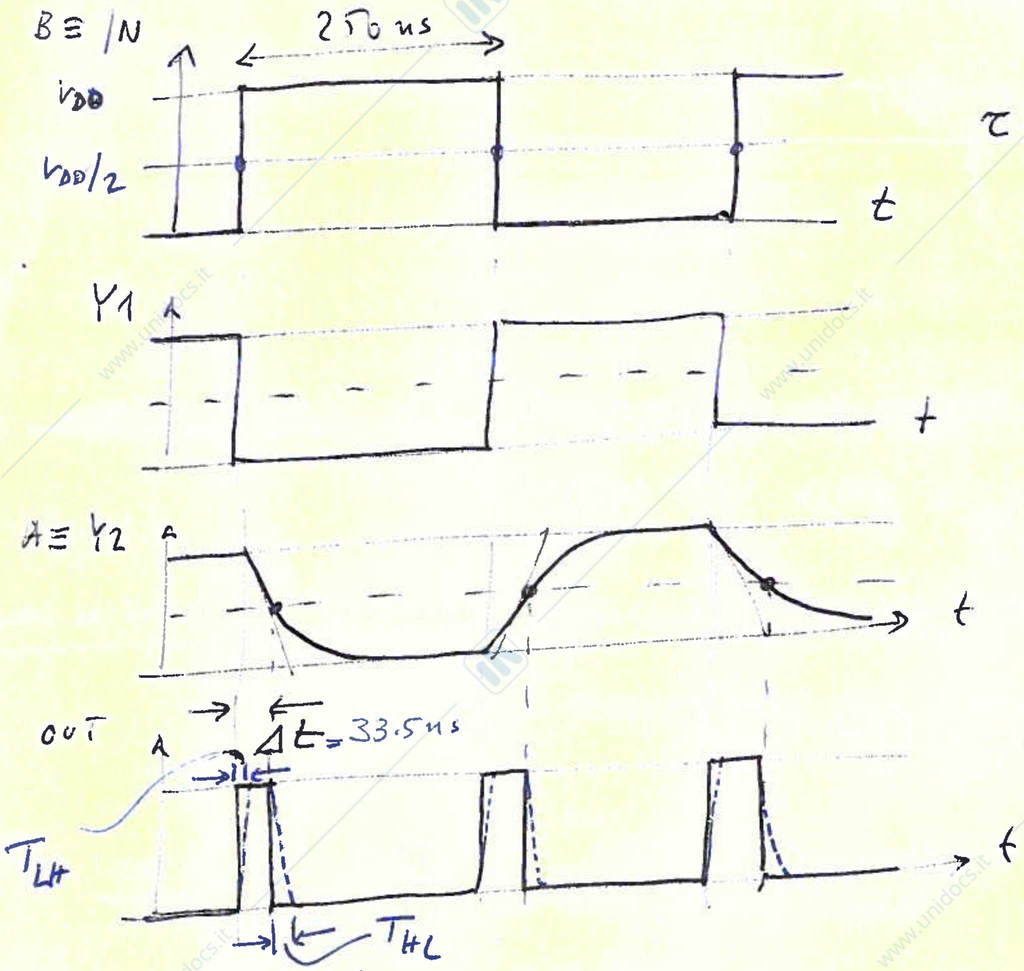


$V_{DD} = 3.3\,V$

$V_T = 0.6\,V$

$|k_p| = 1\,mA/V^2$

$k_n = 2\,mA/V^2$



$\tau = RC = 50\,\mu s$

$OUT = \overline{A \text{ XNOR } B}$

—— con $T_p^{XNOR} = 0$

- - - - con $T_p^{XNOR} \neq 0$

$$V_{DD}\, e^{-\Delta t/\tau} = \frac{V_{DD}}{2}$$

$$\rightarrow \Delta t = \tau \ln 2 \cong 0.67 \times 50\,\mu s = \underline{33.5\,\mu s}$$

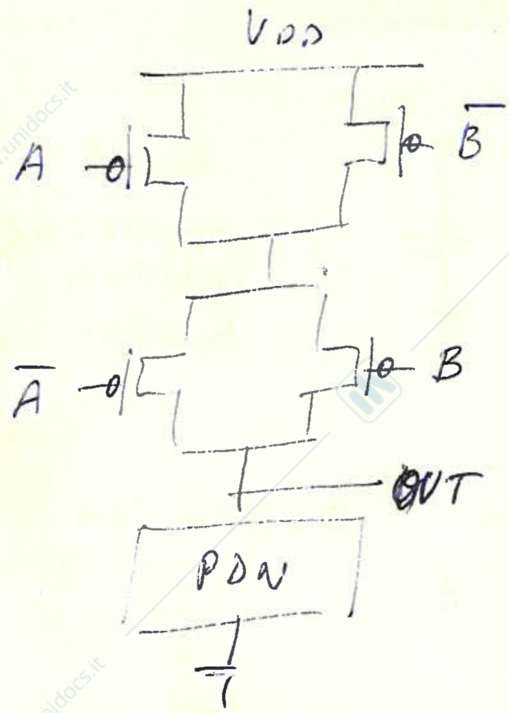
(A2) A commuta a $f = 2\,MHz$ (1 trans. HL, 1 trans. LH)

OUT " " $2 \times f = 4\,MHz$

$$P_{diss} = f C V_{DD}^2 + 2 \times f C V_{DD}^2 = 3 f C V_{DD}^2 =$$

$$= 3 \times 2 \times 10^6 \times 5 \times 10^{-12} \times (3.3^2) = \underline{327\,\mu W}$$

A3



A4 Pull-up: è sempre un pull-up attraverso 2 pMOS in serie

$$\rightarrow k_{p,eq} = \frac{1}{2} k_p = 0.5\ mA/V^2$$

Pull-down: è sempre un pull-down attraverso 2 nMOS in serie

$$\rightarrow k_{n,eq} = \frac{1}{2} k_n = 1\ mA/V^2$$

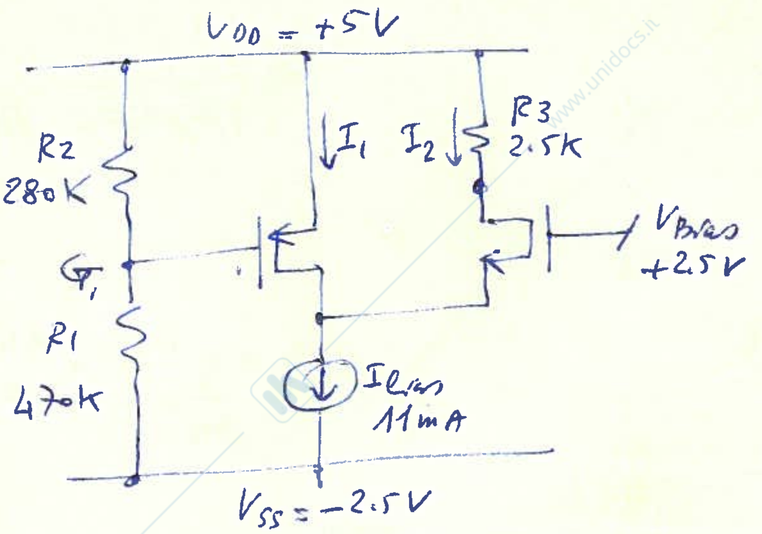
approx saturazione

$$T_{LH} \approx \frac{1}{2} C V_{DD} \frac{1}{I_{p,sat}} = \frac{1}{2} \frac{5\cdot 10^{-12}\ 3.3}{0.5(3.3-0.6)^2} \frac{F\cdot V}{\frac{mA}{V^2}\cdot V^2} = 2.3\ ns$$

$$T_{HL} \approx \frac{1}{2} C V_{DD} \frac{1}{I_{n,sat}} = \frac{1}{2} \frac{5\cdot 10^{-12}\ 3.3}{1(3.3-0.6)^2} = 1.15\ ns$$

La curva di OUT avrà fronti non istantanei, come riportato nel disegno della risposta A1.

B1



$k_n = 0.5 mA/V^2$, $V_{Tn} = 0.6V$

$k_p = 2.5 mA/V^2$, $|V_{Tp}| = 0.8V$

$$V_{G_1} = -2.5V + 7.5V \frac{R_1}{R_1+R_2} = -2.5V + \overbrace{7.5V \frac{470}{750}}^{4.7V} = \underline{+2.2V}$$

$$V_{GS_p} = 2.2V - 5V = -2.8V$$

$$\rightarrow I_1 = k_p (V_{GS_p} - V_{T_p})^2 = 2.5 \frac{mA}{V^2} \times (-2.8V + 0.8V)^2 = 2.5 \frac{mA}{\cancel{V^2}} \times 4\cancel{V^2} = \underline{10 mA}$$

$$\rightarrow I_2 = I_{BIAS} - I_1 = 11mA - 10mA = \underline{1mA}$$

$$I_2 = k_n (V_{GS_n} - V_{Tn})^2 \rightarrow \underline{V_{GS_n}} = \sqrt{\frac{I_2}{k_n}} + V_{Tn} = \overbrace{\sqrt{\frac{1mA}{0.5 \frac{mA}{V^2}}}}^{1.41V} + 0.6V = \underline{+2.01V}$$

$$\rightarrow V_{S_2} = V_{BIAS} - V_{GS_n} = +2.5V - 2.01V = +0.49V$$

$$\rightarrow V_{d_2} = 5V - I_2 \times R_3 = 5V - 2.5V = +2.5V$$

Controllo SAT <u>pMOS</u> : $V_{DS_p} \le V_{GS_p} - V_{Tp}$

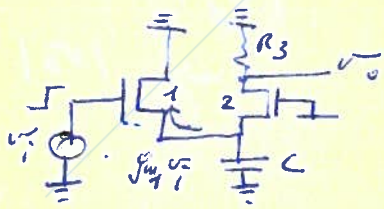
$$\underbrace{+0.49 - 5}_{-4.51} \le \underbrace{-2.8 + 0.8}_{-2} \quad \underline{ok}$$

Controllo SAT <u>nMOS</u> : $V_{DS_n} \ge V_{GS_n} - V_{Tn}$

$$2.5V \ge \underbrace{+2.01 - 0.6}_{+1.41} \quad \underline{ok}$$

B2

$$g_{m_1} = \frac{2 I_1}{|V_{GS_p} - V_{Tp}|} = \frac{2 \times 10 mA}{2V} = \underline{10 mA/V}$$

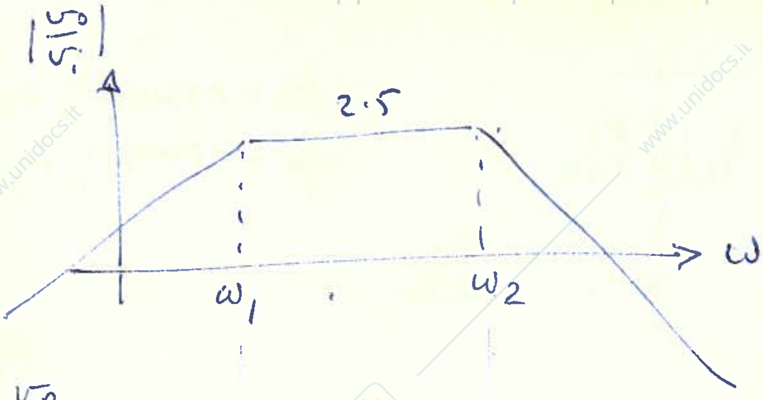


$$g_{m_2} = \frac{2 I_2}{(V_{GS_n} - V_{Tn})} = \frac{2 \times 1 mA}{1.41V} = 1.41 mA/V$$

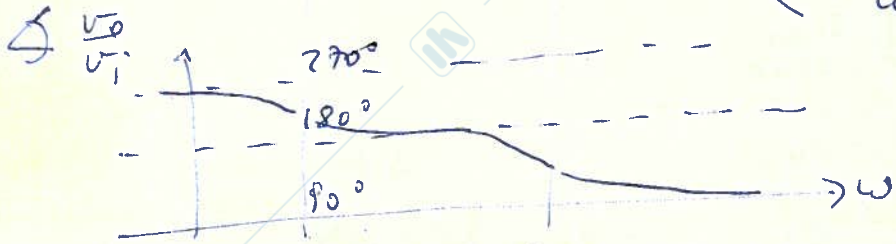
$$v_{out} = -g_{m_1} R_3 = -10 \frac{mA}{V} \times 2.5 k\Omega = \underline{-2.5} \quad (\omega \text{ media freq})$$

$$v_{out} = 0 \quad (\omega \to \infty)$$

B3

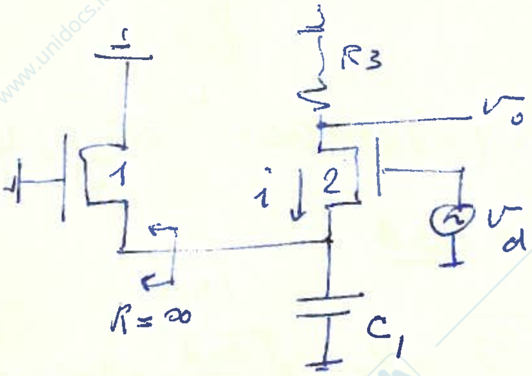


$$\omega_1 = \frac{1}{(R_1 \| R_2) C_{in}} = \frac{1}{175.5k \times 10\mu} = 0.57 \frac{rad}{s}$$



$$\omega_2 = \frac{1}{\frac{1}{g_{m2}} + C_1} = \frac{1.41\,mA/V}{10\,nF} = 141 \frac{krad}{s}$$

B4

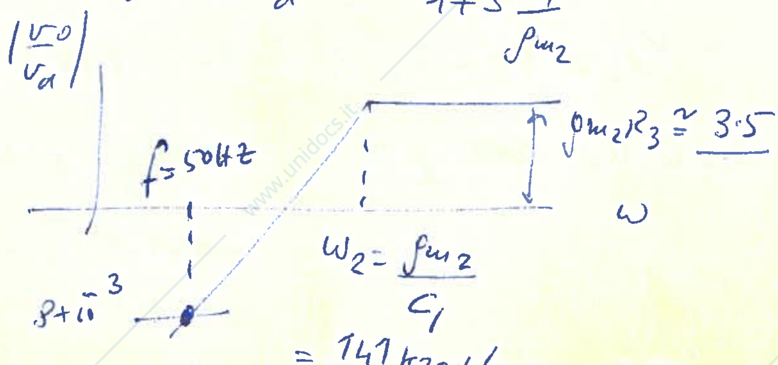


per C_1 aperta $\rightarrow \frac{v_o}{v_d} = 0$

per C_1 chiusa:

$$i = v_d \frac{1}{\frac{1}{g_{m2}} + \frac{1}{sC_1}} = v_d \frac{sC_1}{1 + s\frac{C_1}{g_{m2}}}$$

$$\rightarrow \frac{v_o}{v_d} = -\frac{R_3 i}{v_d} = -\frac{sC_1R_3}{1 + s\frac{C_1}{g_{m2}}}$$

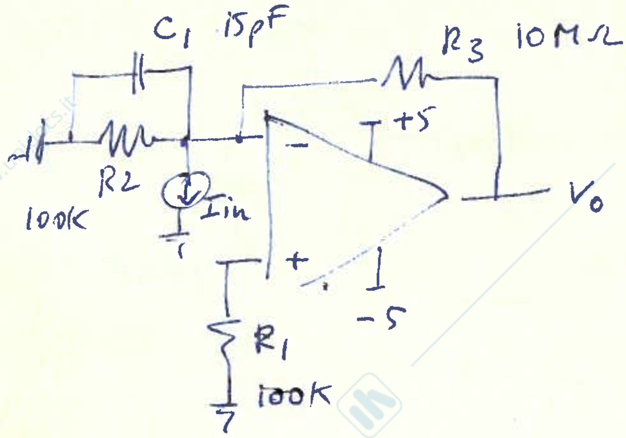


a $f = 50\,Hz$:

$$\left|\frac{v_o}{v_d}\right| = 2\pi f C_1 R_3 = 2\pi \cdot 50 \cdot 25 \cdot 10^{-6} \cong 8 \times 10^{-3}$$

$$\rightarrow |v_o| = |v_d| \cdot 8 \times 10^{-3} = 1\,mV \times 8\,10^{-3} = 8\,\mu V$$

C1



trasferimento $\frac{V_o}{I_{in}}$ con A.O. ideale

$V_o = R_3 I_{in}$ (la corrente in $C_1 /\!/ R_2$ è nulla)

$\rightarrow \frac{V_o}{I_{in}} = R_3 = 10\,M\Omega$

Affinché venga utilizzata tutta la dinamica dell'ADC, V_o deve coprire l'intervallo $-5V \div +5V$.

Da cui:

$$I_{in}|_{min} = \frac{V_o|^{min}}{R_3} = \frac{-5V}{10M\Omega} = -0.5\,\mu A$$

$$I_{in}|_{max} = \frac{V_o|^{max}}{R_3} = \frac{+5V}{10M\Omega} = +0.5\,\mu A$$

$\rightarrow I_{in}(t) = A \sin\omega t$ $\quad$ $\underline{A|_{max} = 0.5\,\mu A}$

C2

$$A(s) = \frac{A_0}{1 + s/\omega_0}$$

$$G_{Loop}(s) = -A(s) \frac{R_2}{1 + sR_2C_1} \frac{1}{R_3 + \frac{R_2}{1 + sR_2C_1}} = -A(s) \frac{R_2}{R_2 + R_3 + sR_2R_3C_1} =$$

$$= -\frac{A_0}{1 + s/\omega_0} \underbrace{\frac{R_2}{R_2 + R_3}}_{\frac{1}{101}} \frac{1}{1 + s\, R_2/\!/R_3\, C_1}$$

$f_0 = 100\,Hz$

$f_1 = \frac{1}{2\pi\, R_2/\!/R_3\, C_1} \cong 117\,kHz$

$|G_{Loop}|$

$f_T = \frac{A_0}{101} \cdot f_0 \cong 100\,kHz$

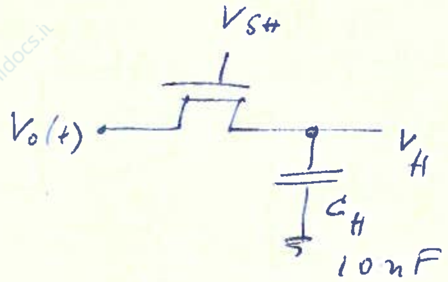
$A_1 = \frac{A_0}{101} \cdot \left(\frac{f_0}{f_1}\right) \cong 0.85 < 1$

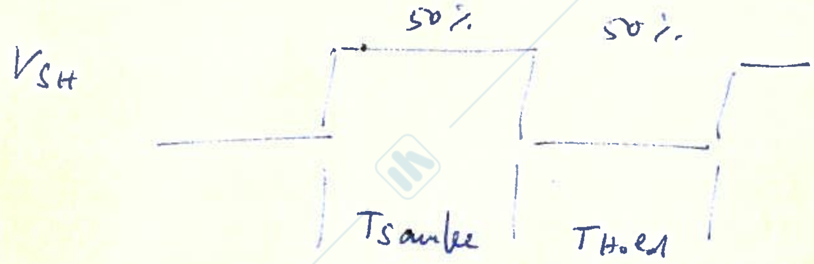
$\varphi_m = 180 - 90 - \arctan\left(\frac{f_T}{f_1}\right) \cong \underline{50°}$

STABILE, MARGINE SUFFICIENTE.

(C3) $I_{in}(t) = 0.5\mu A \cdot \sin 2\pi f t$

$\downarrow$ $V_0(t) = 5V \cdot \sin 2\pi f t$





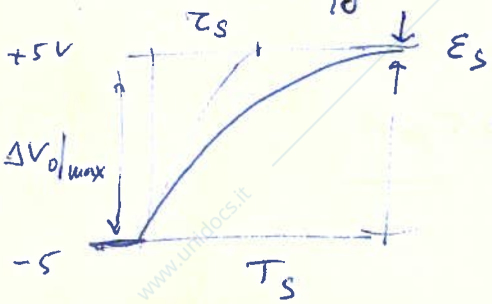
$$f_c = \frac{1}{(T_{Sample} + T_{Hold})} = \frac{1}{2\,T_{Hold}}$$

- Essendo $T_{conv\,ADC} = 10\mu s \rightarrow T_{Hold}|_{min} \simeq 10\mu s$

$$\rightarrow f_c|_{MAX} = \frac{1}{2\,T_{Hold}|_{min}} = \frac{1}{20\mu s} = \underline{50\,kHz}$$

$$\rightarrow T_{Sample} = T_{Hold}|_{min} = \underline{10\mu s}$$

- Situazione peggiore: $\Delta V_0 = 10V$



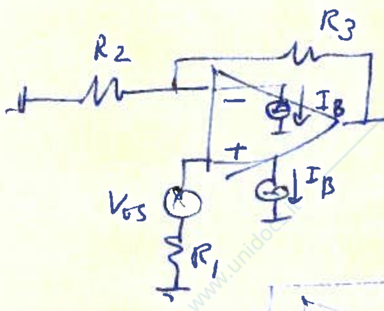
$$\varepsilon_S|_{max} = \Delta V_0|_{max}\, e^{-\frac{T_S}{\tau_S}} \leq \frac{1}{2} LSB$$

$$LSB = \frac{10V}{2^n} = \frac{10V}{2^{14}} = \frac{10V}{16304} = 0.61\,mV$$

$$e^{-T_S/\tau_S} \leq \frac{\frac{1}{2} LSB}{\Delta V_0|_{max}} \rightarrow \tau_S < \frac{T_S}{\ln \frac{\Delta V_0|_{max}}{\frac{1}{2} LSB}} = \underline{0.96\mu s}$$

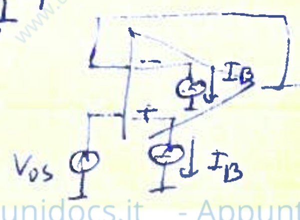
$$\Rightarrow \tau_S = R_{ON}\, C_H < 0.96\mu s \rightarrow R_{ON} < \frac{0.96 \times 10^{-6} s}{10 \times 10^{-9} F} = \underline{96\,\Omega}$$

(C4)



$$V_0|_{V_{OS}} = V_{OS}\left(1+\frac{R_3}{R_2}\right) = 1mV \cdot 101 = 101mV \rightarrow \frac{101mV}{0.61mV} \simeq 166\,LSB$$

$$V_0|_{I_B} = -I_B\, R_1\left(1+\frac{R_3}{R_2}\right) + I_B\, R_3 = -10nA \times 100k\Omega = -1mV \rightarrow \frac{1mV}{0.61mV} \simeq 1.6\,LSB$$



$$V_0|_{V_{OS}} = V_{OS} = 1mV \rightarrow \frac{1mV}{0.61mV} \simeq 1.6\,LSB$$

$$V_0|_{I_B} = \emptyset$$