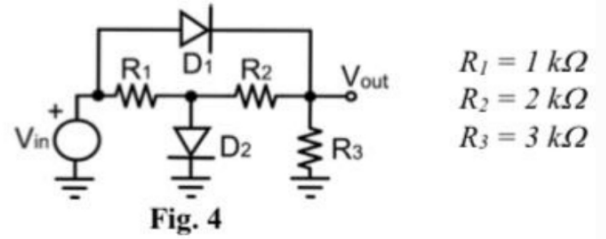


Esercizio 1

Si consideri il circuito riportato in Fig. 4. I diodi conducono quando sono polarizzati in diretta con una tensione ai loro capi pari a 0.7 V . V_{in} e' un segnale di tensione sinusoidale con ampiezza fino a 5 V e periodo 10 ms . Disegnare la caratteristica di trasferimento ingresso-uscita, quotandone tutti i punti ritenuti significativi e giustificando la risposta.

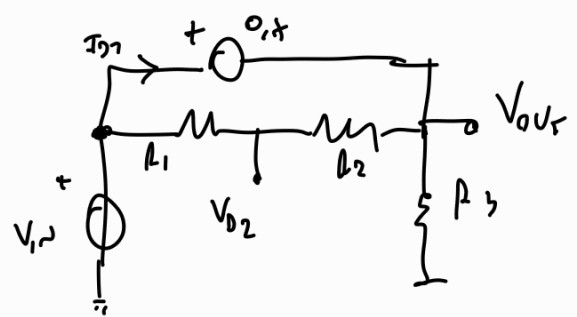
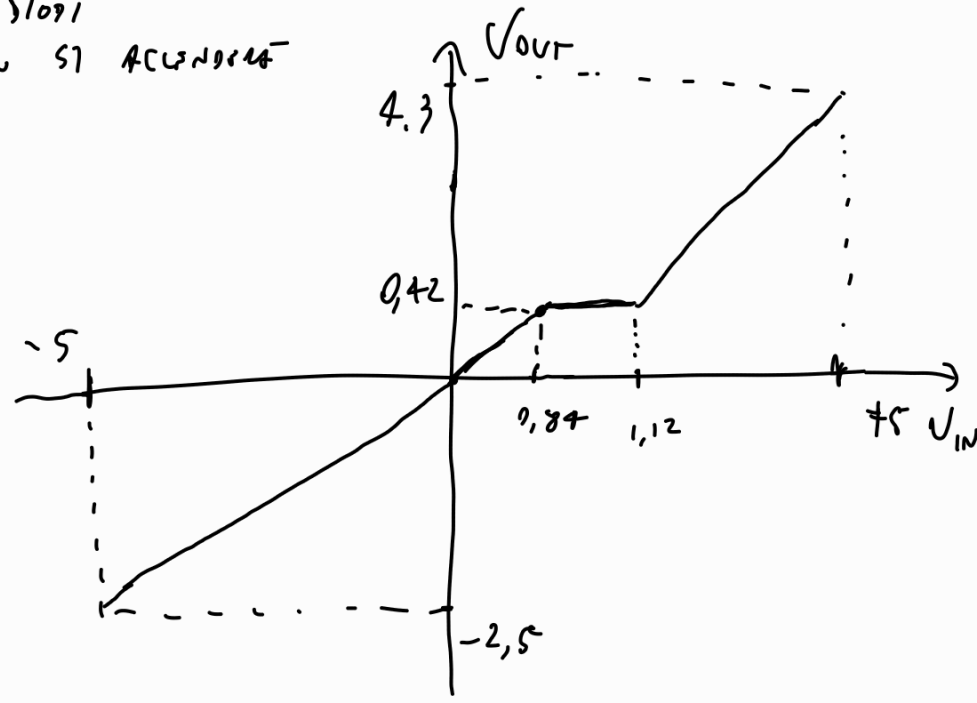


QUANDO $V_{in} \leq 0$ ENTRAMBI I DIODI SONO SPENSI. ALLORA QUANDO V_{in} SI ACCENDE UNO DEI 2 (O ENTRAMBI)

D1 OFF
D2 OFF

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3} = 0,5$$

D1 SI ACCENDE
D2 OFF



$$I_{D1} = \frac{V_{in}}{R_3} - \frac{0,7}{(R_1 + R_2) \parallel R_3}$$

$$= \frac{V_{in}}{3k} - 46,7 \mu A$$

$I_{D1} > 0 \rightarrow V_{in} > 1,4\text{ V}$

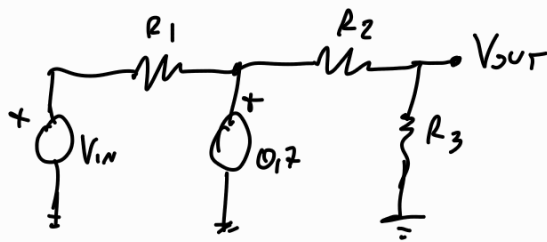
CHECK V_{D2}

$$V_{D2} = V_{in} - V_{R1} = V_{in} - 0,7 \frac{R_1}{R_1 + R_2} = V_{in} - 0,23\text{ V}$$

$V_{in} = 1,4\text{ V} \rightarrow V_{D2} = 7,17\text{ V}$ ACCESO

D2 OFF & D1 ON NON SI VERIFICA

D_1 OFF
 D_2 SI ACCENDE



CHECK V_{D1}

$$V_{D1} = V_{IN} - V_{OUT}$$

$$V_{OUT} = 0,7 \cdot \frac{R_3}{R_2 + R_3} = 0,42 \text{ V}$$

$$V_{D1} = V_{IN} - 0,42 \text{ V}$$

$$\text{PER } V_{IN} = 0,84 \text{ V}$$

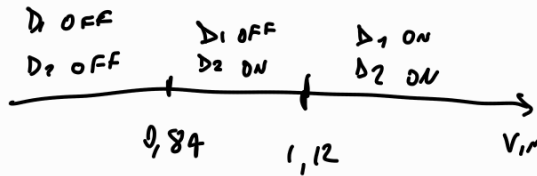
$$\hookrightarrow V_{D1} = 0,84 - 0,42 = 0,42 \text{ V}$$

D_1 OFF

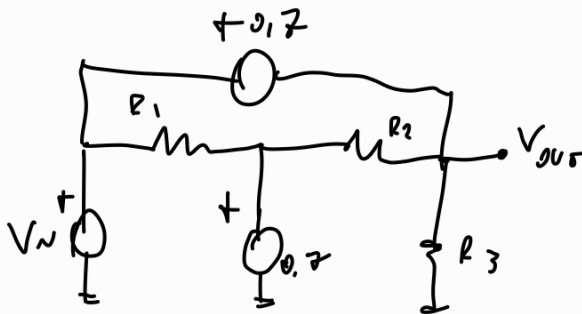
$$I_{D1} = \frac{V_{IN}}{R_1} - \frac{0,7}{R_1 \parallel (R_2 + R_3)} = \frac{V_{IN}}{R_1} - 840 \mu\text{A} > 0$$

$$V_{IN} > 0,84 \text{ V}$$

ALIMENTANDO V_{IN} , D_1 SI ACCENDE \rightarrow $V_{D1} = V_{IN} - 0,42 \text{ V} > 0,7 \text{ V}$
 $V_{IN} > 1,12 \text{ V}$



D_1 ON
 D_2 ON



$$V_{OUT} = V_{IN} - 0,7 \text{ V}$$

CHECK CONTINUITA'

$$V_{IN} = 1,12 \text{ V}$$

$$V_{OUT} = 1,12 - 0,7 = 0,42 \text{ V}$$

PTO MIN VOLT

$$V_{OUT} (V_{IN} = 5 \text{ V}) = 4,3 \text{ V}$$

Esercizio 2

Si consideri il circuito a MOSFET riportato nella Fig. 3, in cui v_{in} e' un generatore di tensione di piccolo segnale e I_0 e' un generatore di corrente DC.

- Determinare la polarizzazione del circuito (tensioni a tutti i nodi e correnti in tutti i rami), sapendo che la tensione di uscita in DC e' pari a 0 V.
- Determinare l'espressione ed il valore del guadagno di piccolo segnale v_{out}/v_{in} a bassa frequenza.
- Tracciare il diagramma di Bode del modulo del trasferimento di piccolo segnale v_{out}/v_{in} , quotandone tutti i punti significativi.
- Nelle ipotesi di sostituire ad I_0 una resistenza R_0 di valore opportuno per non alterare la polarizzazione, determinare come cambia il guadagno di piccolo segnale v_{out}/v_{in} a bassa frequenza ed il numero di quadri necessario per tale resistenza, potendo disporre di diffusionsi di Boro con una dose di $D = 1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$.

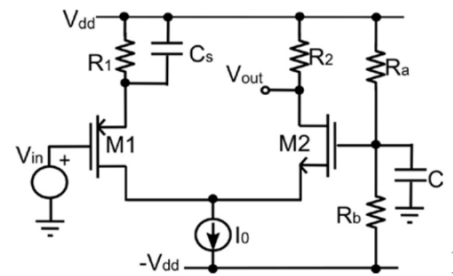
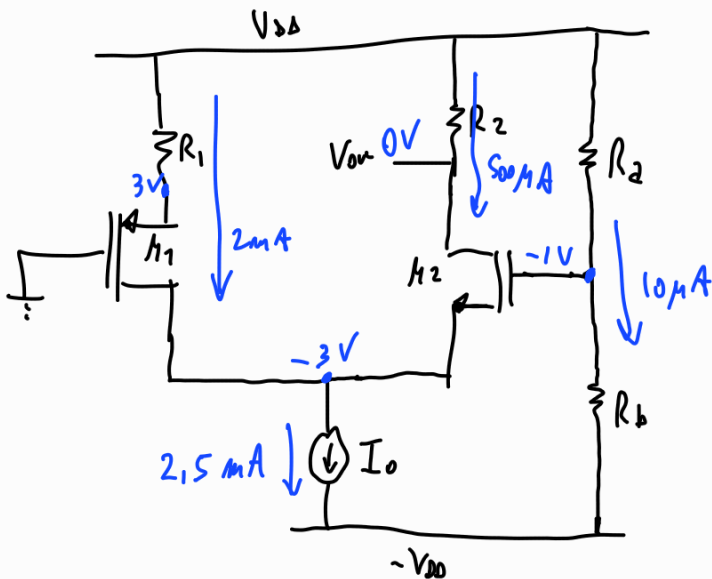


Fig. 3

$$\begin{aligned}
 V_{Tn} = -V_{Tp} &= 1V & V_{dd} &= 5V \\
 k_n &= 0.5 \text{ mA/V}^2 & |k_p| &= 0.5 \text{ mA/V}^2 \\
 R_a &= 600 \text{ k}\Omega & R_b &= 400 \text{ k}\Omega \\
 C_s &= 470 \text{ nF} & C &= 47 \mu\text{F} \\
 R_1 &= 1 \text{ k}\Omega & R_2 &= 10 \text{ k}\Omega \\
 I_0 &= 2.5 \text{ mA} \\
 \mu_n &= 1200 \text{ cm}^2/(\text{Vs}) & \mu_p &= 450 \text{ cm}^2/(\text{Vs})
 \end{aligned}$$



$$I_{M2} = \frac{V_{DD} - V_{out}}{R_2} = 500 \mu\text{A}$$

$$I_{e2} = I_{R_b} = \frac{V_{DD} - (-V_{DD})}{R_2 + R_b} = 10 \mu\text{A}$$

$$V_{G2} = -V_{DD} + R_b \cdot I_{R_b} = -1 \text{ V}$$

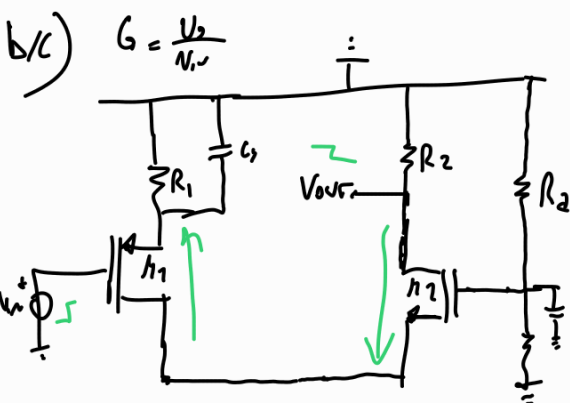
$$V_{GS2} = V_{TN} + \sqrt{\frac{I_{M2}}{k_n}} = 2 \text{ V} \rightarrow V_{S2} = -3 \text{ V}$$

$$I_{M1} = I_0 - I_{M2} = 2 \text{ mA}$$

$$V_{S1} = V_{DD} - R_1 \cdot I_{M1} = 3 \text{ V}$$

$$g_{m1} = 2 \text{ mS} \rightarrow \frac{1}{g_{m1}} = 500 \Omega$$

$$g_{m2} = 1 \text{ mS} \rightarrow \frac{1}{g_{m2}} = 1 \text{ k}\Omega$$



$$i_1 = V_{in} \cdot g_{m1} \cdot \frac{1/g_{m1}}{1/g_{m1} + R_1} = V_{in} \cdot \frac{g_{m1}}{1 + g_{m1} R_1} \rightarrow G(d) = \frac{-g_{m2} R_2}{1 + g_{m1} R_1} = -6,67$$

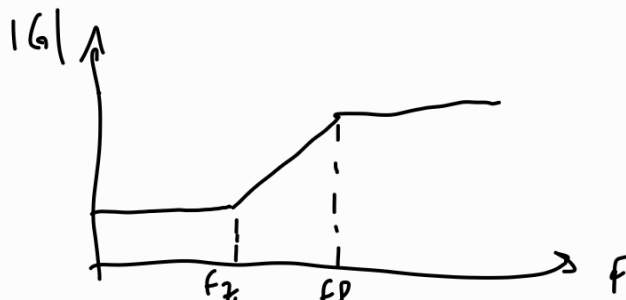
SOLO C_s INNOVAZIONE SINCOLMATA

POLO $\rightarrow \tau_s = C_s \cdot R_1 \parallel \frac{1}{g_{m1}} = 157 \mu\text{s} \rightarrow F_p = 1014 \text{ Hz}$

ZERO PER ISOLAZIONE

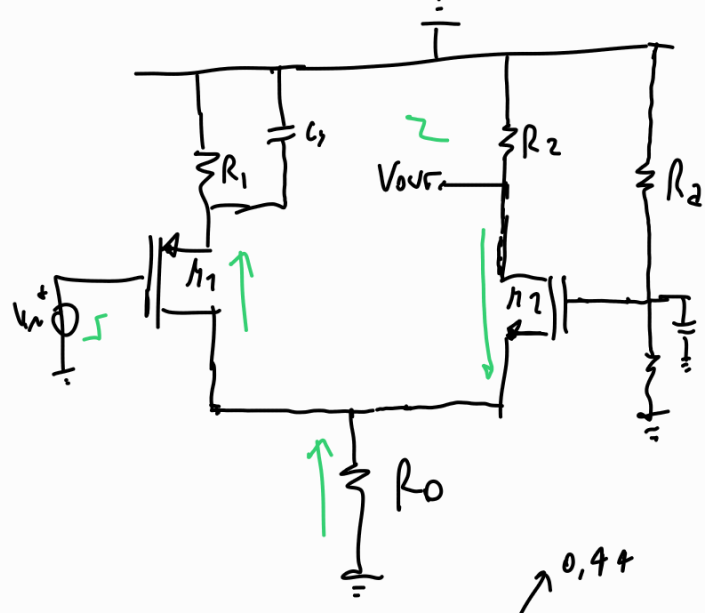
$$R_1 \parallel \frac{1}{5C_s} = \infty \rightarrow \tau_z = C_s \cdot R_1 = 470 \mu\text{s}$$

$$F_z = 338 \text{ Hz}$$



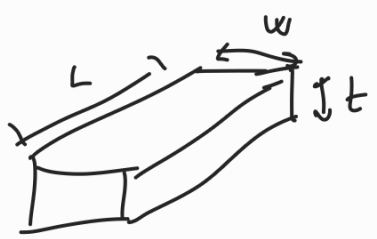
$$\left(G_{HF} = -g_{m1} R_2 = -20 \right)$$

d)



$$R_o = \frac{V_s - (-V_{DD})}{I_o} = 800 \Omega$$

$$G = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{g_{m1}}{1 + g_{m1} R_1} \cdot \frac{R_o}{R_o + \frac{1}{g_{m2}}} \cdot R_2 = 2,96$$



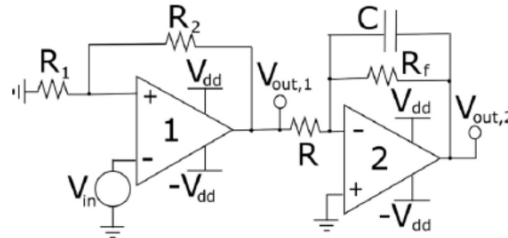
$$R = \rho \cdot \frac{L}{w \cdot t}$$

$$= \frac{1}{9 N \mu} \cdot \frac{L}{w \cdot t} = \frac{1}{9 \mu D} \cdot \frac{L}{w} = \rho_D \cdot N_{quasi}$$

Bolo \rightarrow LACUNE \rightarrow $\mu_p \rightarrow N_Q = \frac{R}{\rho_D} = R \cdot 9 D \mu_p = 0,576$

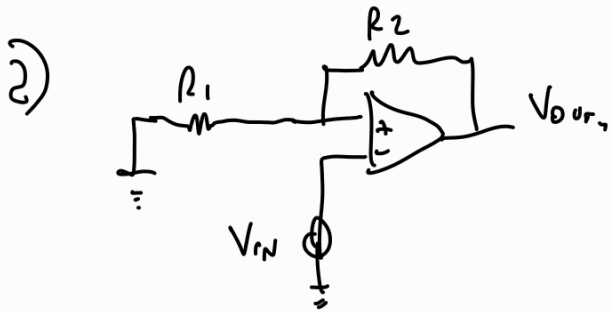
Esercizio 3

Si consideri il circuito basato su amplificatori operazionali, mostrato in Fig. 3. Gli amplificatori operazionali saturano alle tensioni di alimentazione e V_{in} sia un generatore di tensione di segnale sinusoidale con ampiezza 3.5 V e frequenza 10 MHz .



$$R_1 = R_2 = 10\text{ k}\Omega \quad V_{dd} = 5\text{ V} \quad R = 6.25\text{ k}\Omega \quad R_f = 6\text{ k}\Omega \quad C = 1.5\text{ pF}$$

- Disegnare in due diagrammi temporali, temporalmente allineati, il segnale di ingresso $V_{in}(t)$ dato e ed il corrispondente segnale $V_{out,1}(t)$, quotandone tutti i punti significativi ed assumendo gli amplificatori operazionali ideali.
- Determinare il massimo valore della resistenza R_f che garantisca che il contributo delle correnti di bias, pari a 100 nA , sulla tensione di uscita $V_{out,2}$ sia al più 6 mV .
- Tracciare i diagrammi di Bode del modulo e della fase della funzione di trasferimento $V_{out,2}/V_{out,1}$, assumendo gli amplificatori operazionali ideali.
- Se l'amplificatore operazionale 2 è caratterizzato da uno Slew-Rate $SR = 100\text{ V}/\mu\text{s}$, determinare se la la forma d'onda di uscita subisca o meno distorsioni e motivare la risposta.
- Determinare il margine di fase del blocco amplificatore se il prodotto guadagno-larghezza di banda del secondo amplificatore operazionale è pari a $GBWP = 80\text{ MHz}$.



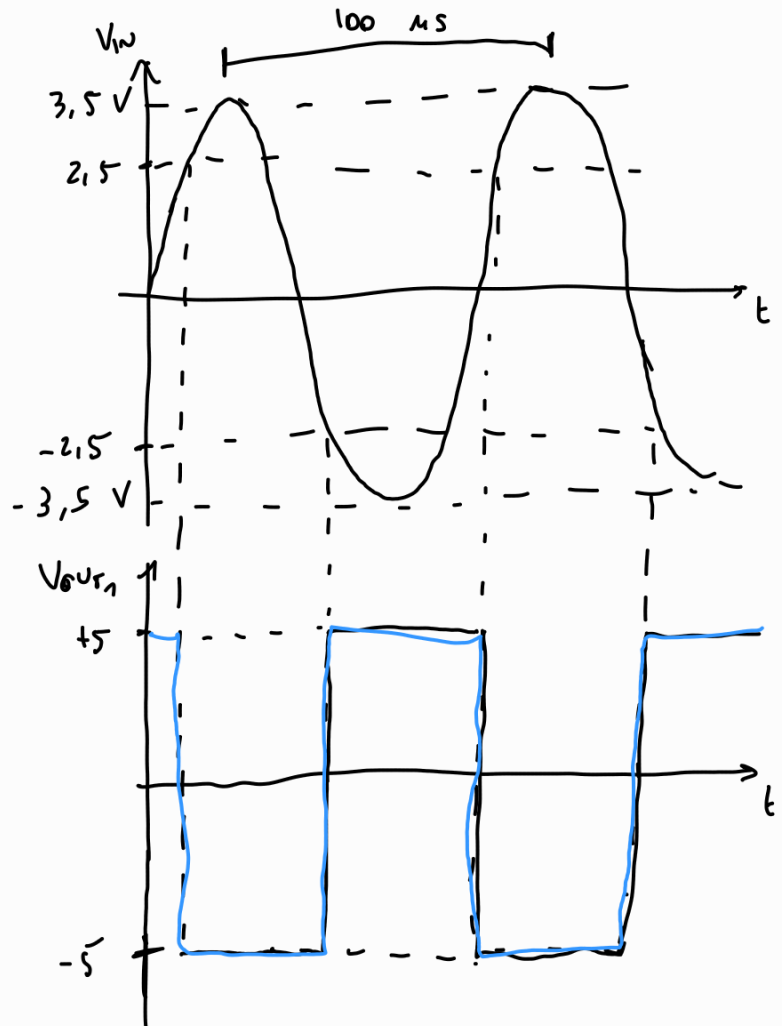
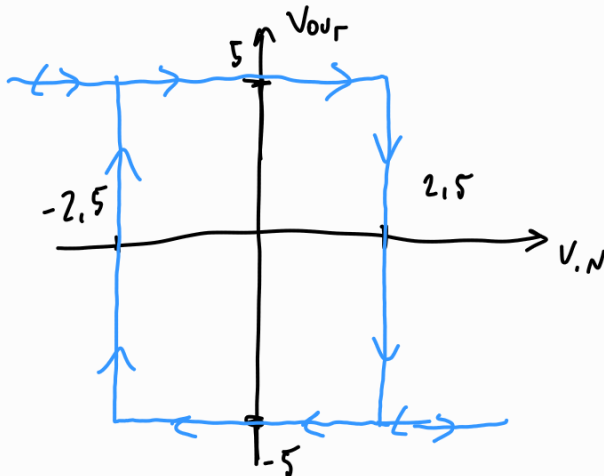
CARATTERISTICHE STATICHE

• $V_{out} = V_{DD}$

$$V^+ = V_{DD} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} = 2.5\text{ V}$$

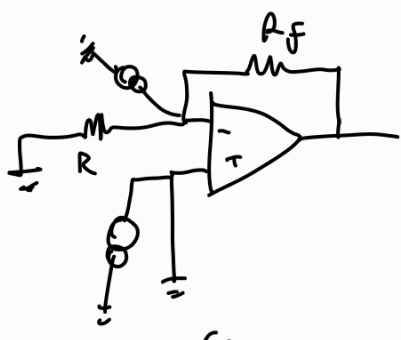
• $V_{out} = -V_{DD}$

$$V^- = -V_{DD} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} = -2.5\text{ V}$$



b) OA1 → I_B NON HA EFFETTO SU V_{OUT1}

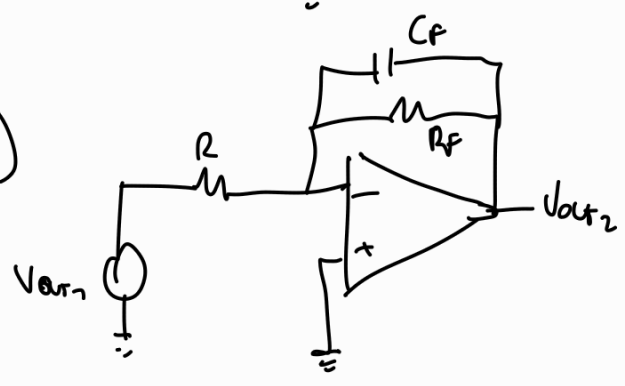
OA2



$$V_{OUT} |_{I_B} = I_B \cdot R_F < 6mV$$

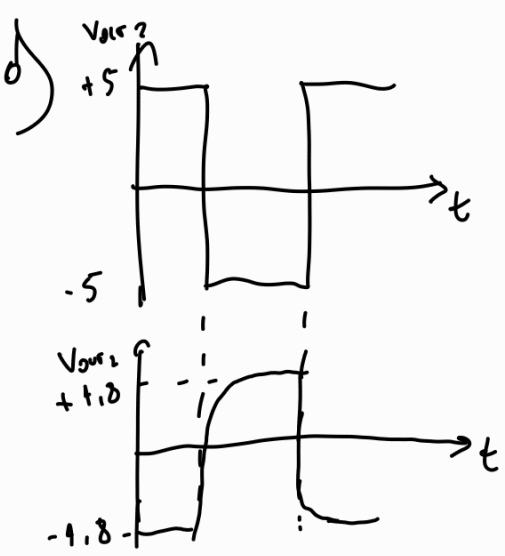
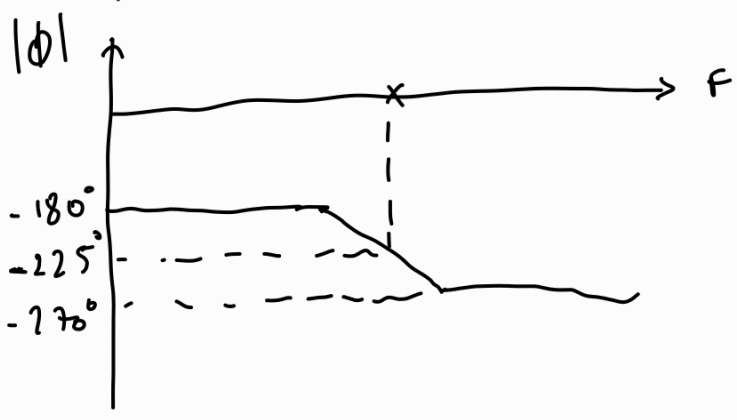
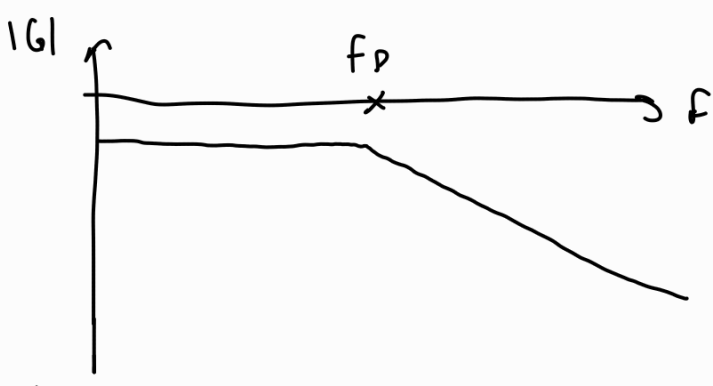
$$R_F < \frac{6mV}{100 \mu A} = 60k\Omega$$

c)



$$G(0) = -\frac{R_F}{R} = -0,96$$

1 POLO $\tau_p = R_F C_F = 3 \mu S$
 $f_p = 17,7 MHz$



CIRCUITO A SINGOLO POLO

$$V_{OUT2} = \pm 5V \cdot G(0) = \mp 4,8 V$$

$T/2 = 50 \mu S > 5 \tau \rightarrow$ CIRCUITO A REGIME IN OGNI SEMPERIODO

$$V_{OUT2LH} = -4,8 + 9,6 (1 - e^{-t/2})$$

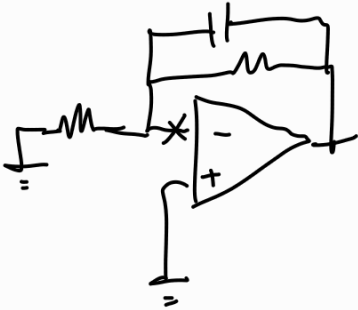
IN ASSENZA DI SLEW RATE

SLZ u R+R?

$$\frac{dV_{out2}}{dt} = -9,6 \frac{1}{\tau} e^{-t/\tau} \rightarrow \left. \frac{dV_{out2}}{dt} \right|_{max} = \frac{9,6}{\tau} = 1067 \frac{V}{\mu s} > SR$$

V_{out2} DISTORTA

e)

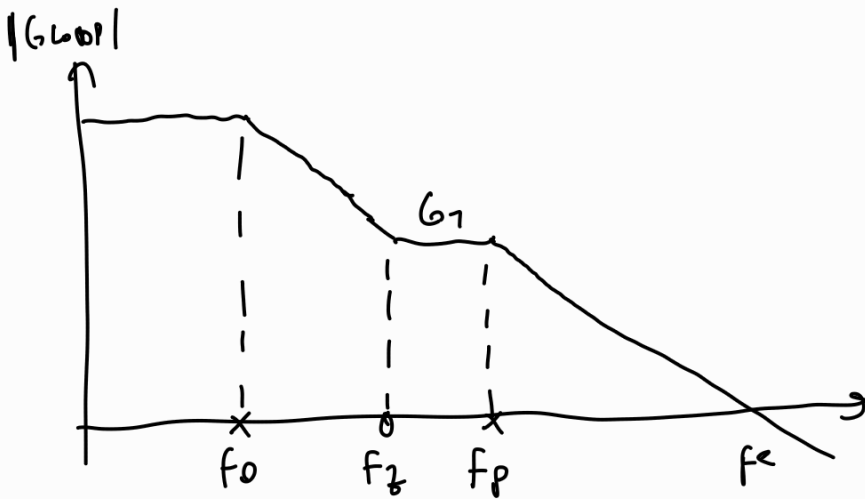


$$G_{loop}(s) = -A_o \cdot \frac{R}{R + R_F}$$

SNCOUPLIR
Z_{p0} OPAMP

$$Z_p = C(R_F // R) = 4,53 \text{ nS} \quad f_p = 34,7 \text{ MHz}$$

$$R_F // R_c = \infty \rightarrow \tau_z = C \cdot R_F = 3 \text{ nS} \rightarrow f_z = 17,7 \text{ MHz}$$



$$A_o \cdot \frac{R}{R + R_F} \cdot f_o = G_1 \cdot f_z$$

$$G_1 = 2,31$$

$$G_1 \cdot f_p = 1 \cdot f^*$$

$$f^* = 80 \text{ MHz}$$

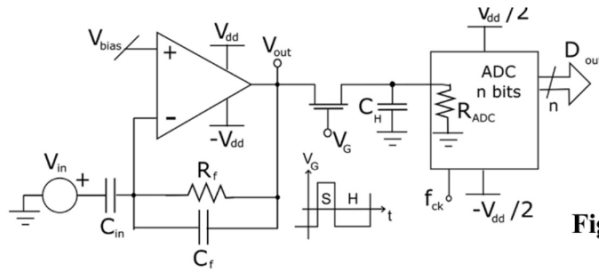
$$\varphi_n = 360^\circ - 180^\circ - 2 \tan^{-1} \left(\frac{f_c}{f_o} \right) + 2 \tan^{-1} \left(\frac{f_c}{f_z} \right) - 2 \tan^{-1} \left(\frac{f_c}{f_p} \right)$$

∴

$$90^\circ + 72,5^\circ - 66,6^\circ = 100,9^\circ$$

Esercizio 4

Si consideri la catena di acquisizione mostrata in Fig. 2. Gli amplificatori operazionali saturano alle tensioni di alimentazione. L'ADC sia del tipo a doppia rampa.



$$V_{dd} = +5V$$

$$V_{Tn} = 1V$$

$$k_n = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} (W/L)_n = 10mA/V^2$$

$$C_{in} = 8pF$$

$$C_f = 2pF$$

$$R_f = 280k\Omega$$

$$C_H = 470pF$$

Fig. 2

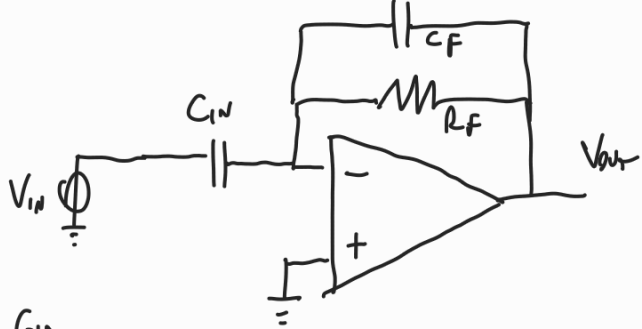
- Tracciare l'andamento temporale della tensione di uscita $v_{out}(t)$, quotandone tutti i punti significativi, nelle ipotesi di amplificatore operazionale ideale e assumendo un segnale di ingresso a gradino positivo di ampiezza $A = 90mV$.
- Determinare il valore di V_{bias} ed il numero di bit n dell'ADC richiesti per garantire una risoluzione di $100\mu V$ per un segnale di ingresso in grado di fornire alla uscita V_{out} un segnale di ampiezza $0.9 \times V_{dd}$.
- Determinare il margine di fase dello stadio amplificatore se l'amplificatore operazionale e' caratterizzato da un prodotto guadagno-larghezza di banda, $GBWP = 30MHz$ (A_0 non e' noto separatamente).
- Assumendo ora un segnale di ingresso sinusoidale di massima ampiezza compatibile con il funzionamento del circuito e frequenza $10kHz$ e la relativa V_{bias} necessaria, determinare la minima frequenza di clock richiesta per la corretta conversione, se l'ADC presenta una resistenza di ingresso $R_{ADC} = 50M\Omega$ e $n = 12bits$.

2) RISPONDA A UNO SCALINO OPAMP $\uparrow 90mV$

CI SONO 2 INGRESSI: V_{in} E V_{bias} \rightarrow SOVRAPPOSIZIONE

L'EFFETTO DI V_{bias} E' $V_{out} = V_{bias}$

PER L'EFFETTO DI V_{in} CALCOLO GIDALE (SPERANZANDO V_{bias})



$$G_{ID}(0) = 0$$

$$G_{ID}(\infty) = - \frac{Z_F}{Z_{IN}} = - \frac{C_{IN}}{C_F} = -4$$

POLI

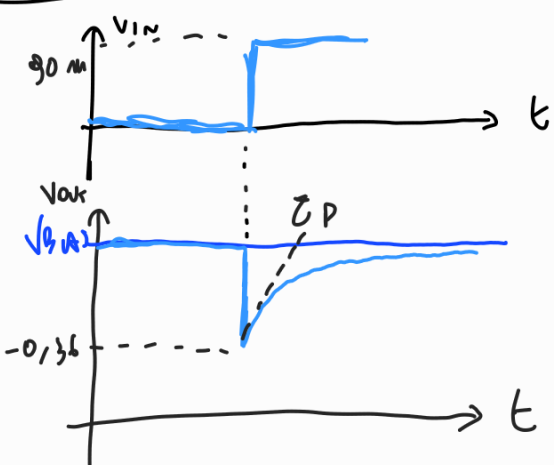
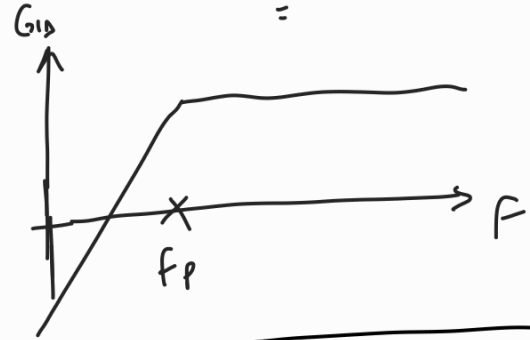
$C_{IN} \rightarrow$ POLO ALL'INFINITO

$$C_F \rightarrow Z_P = C_F R_F = 560ns \rightarrow f_P = 284,2kHz$$

ZERI

$C_{IN} \rightarrow$ ZERO NELL'ORIGINE

$C_F \rightarrow$ ZERO ALL'INFINITO ($Z=0$)



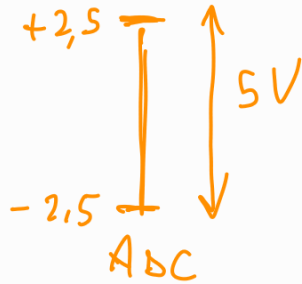
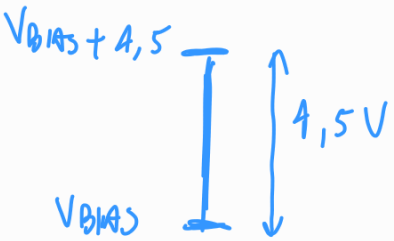
RISPONDA A UNO SCALINO DI CIRCUITO
SINGOLO POLO DI TIPO PASSA ALTO

$$G_{FRONTE} = -4 \rightarrow \Delta V_{out} = -0,36V$$

b) 1) V_{BIAS}

FULL SCALE RANGE ADC : $\left[-\frac{V_{DD}}{2}; +\frac{V_{DD}}{2}\right] \rightarrow FSR = V_{DD} = 5V$

$$V_{OUT}^{MAX} = V_{BIAS} + \Delta V_{OUT} = V_{BIAS} + 0,9 V_{DD} = V_{BIAS} + 4,5V$$



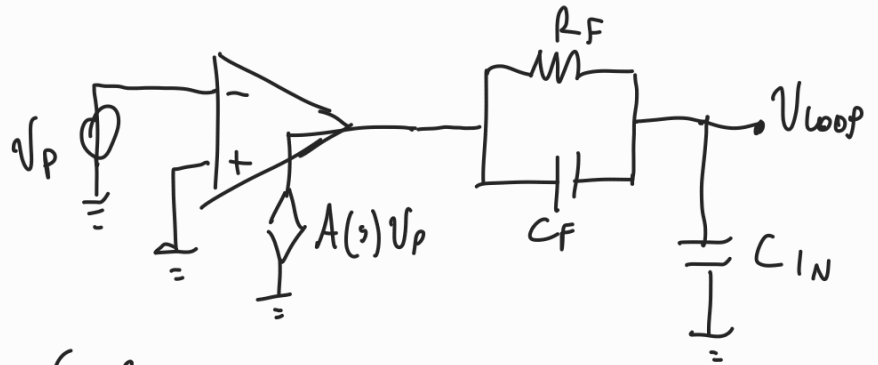
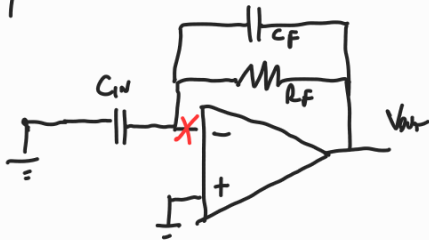
$$V_{BIAS} + 4,5V < 2,5V \rightarrow \underline{V_{BIAS} < -2V}$$

$$\underline{V_{BIAS} > -2,5V}$$

2) $100\mu V$ ALL'INGRESSO $\rightarrow 400\mu V$ ALL'INPUT DELL'ADC

$$LSB = \frac{FSR}{2^m} = 400\mu V \rightarrow m \geq \log_2 \frac{V_{DD}}{400\mu} = 13,6 \rightarrow m = 14 \text{ BIT}$$

c) $\varphi_m = ?$



$$G_{loop}(0) = -A_0$$

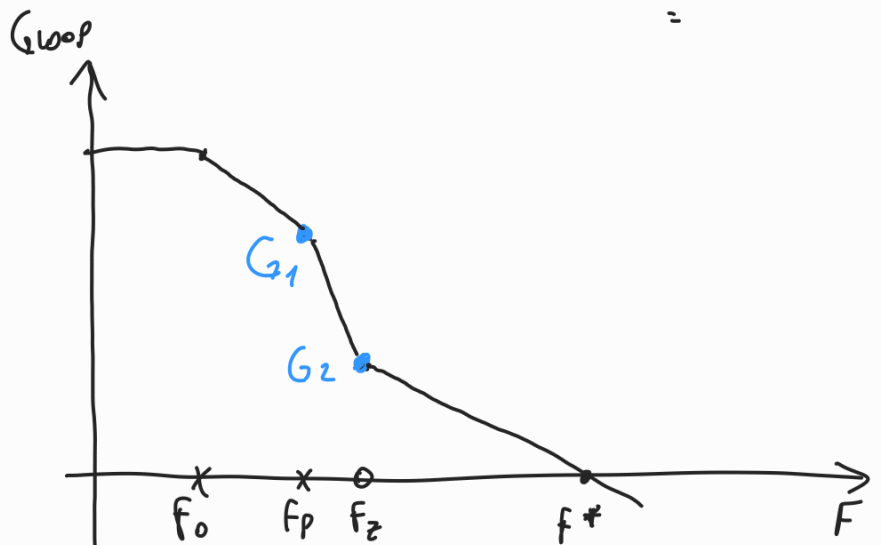
POLI

• τ_0 OPA MP

• $C_F + C_{IN}$ IN PARALLELO

$$\tau_p = (C_F + C_{IN}) R_F = 2,8 \mu s$$

$$f_p = 56,84 \text{ KHz}$$



ZERI

$$R_F // \frac{1}{s C_F} = \infty$$

$$\tau_2 = R_F C_F = 560 \mu s$$

$$f_2 = 284,2 \text{ KHz}$$

$$A_0 \cdot f_0 = G_1 f_p \rightarrow G_1 = 527,8$$

$$G_1 \cdot f_p^2 = G_2 \cdot f_2^2 \rightarrow G_2 = 21,1$$

$$G_2 \cdot f_2 = 1 \cdot f^* \rightarrow f^* = 5,97 \text{ MHz}$$

$$\varphi_m = 360 - 180 - 2 \tan^{-1} \left(\frac{f}{f_0} \right) - 2 \tan^{-1} \left(\frac{f}{f_p} \right) + 2 \tan^{-1} \left(\frac{f}{f_2} \right) = 87,82^\circ$$

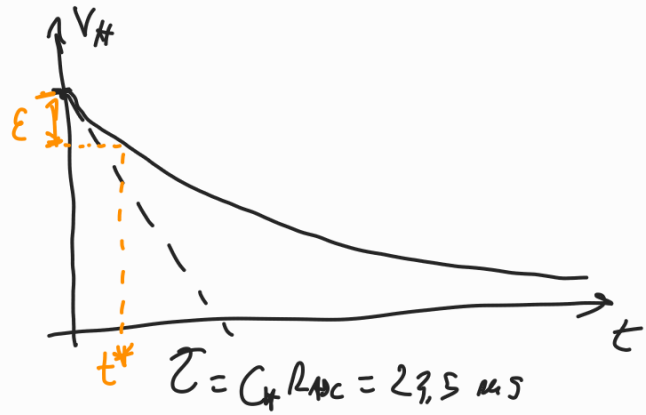
$$d) V_{OUT} = \frac{V_{DD}}{2} \quad V_{BIAS} = 0 \text{ V}$$



CASO PEGGIORE

$$V_H = \pm \frac{V_{DD}}{2}$$

$$V_H(t) = \frac{V_{DD}}{2} e^{-t/\tau}$$



ERRORE AMMESSO

$$\epsilon = \frac{LSB}{2} = \frac{1}{2} \frac{FSR}{2^n} = \frac{1}{2} \frac{V_{DD}}{2^{12}}$$

IPOTESI $t^* \ll \tau \rightarrow$ APPROSSIMO SCARICA LINEARE

$$\frac{\Delta V_H(t)}{\Delta t} \approx \frac{V_{DD}}{2} \frac{1}{\tau} \rightarrow \frac{V_{DD}}{2} \cdot \frac{1}{\tau} \cdot t^* = \epsilon$$

$$\frac{V_{DD}}{2} \cdot \frac{1}{\tau} t^* = \frac{1}{2} \frac{V_{DD}}{2^{12}} \rightarrow t^* = \frac{\tau}{2^{12}} = 5,74 \mu\text{s}$$

IPOTESI: T_{SAMPLE} TRASCURGIBILE RISPETTO A T_{HOLD}

$$T_{CONV}^{ADC} = \frac{2 \cdot 2^M}{F_{CLK}} < 5,74 \mu\text{s} \rightarrow F_{CLK} > 1,43 \text{ GHz} \quad \left(\text{NYQUIST RISPETTO} \right)$$