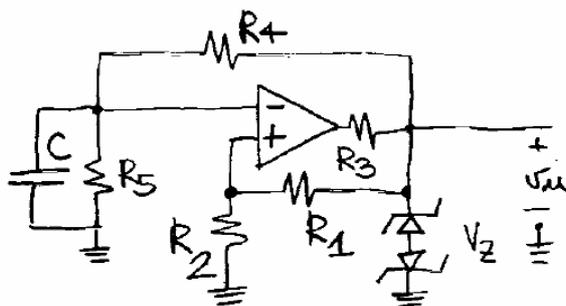


**Parte A**

1. Si supponga di avere a disposizione un amplificatore differenziale con guadagno di tensione a centrobanda  $A_V = 100000$  e limite superiore di banda 10 Hz. Si supponga che l'impedenza di ingresso sia 3 K $\Omega$  e l'impedenza di uscita 1 K $\Omega$ . Si introduca una reazione in modo da ottenere un'impedenza di uscita inferiore a 10  $\Omega$  e impedenza d'ingresso inferiore a 100  $\Omega$ , giustificando il procedimento. Calcolare la nuova amplificazione a centro banda e il limite superiore di banda.

2. Del generatore d'onda quadra mostrato a lato, calcolare frequenza, ampiezza e duty cycle della forma d'onda in uscita, *giustificando il procedimento*. Disegnare e *quotare*, sullo stesso asse dei tempi, l'andamento delle tensioni di ciascun ingresso dell'operazionale e dell'uscita.  $R_1=50$  K $\Omega$ ,  $R_2=R_4=10$  K $\Omega$ ,  $R_5=20$ K $\Omega$ ,  $R_3=1$ K $\Omega$ ,  $C=47$  nF,  $V_Z=4.7$



3. Calcolare il guadagno di corrente di corto circuito di un transistor bipolare in funzione della frequenza. Enunciare la definizione di frequenza di transizione di un BJT e ricavare l'espressione del suo valore in funzione dei parametri del circuito di piccolo segnale.
4. Disegnare il circuito e descrivere il funzionamento di una memoria SRAM a 4 bit con indirizzamento bidimensionale realizzata con tecnologia CMOS.

Punteggio totale Parte A: 14

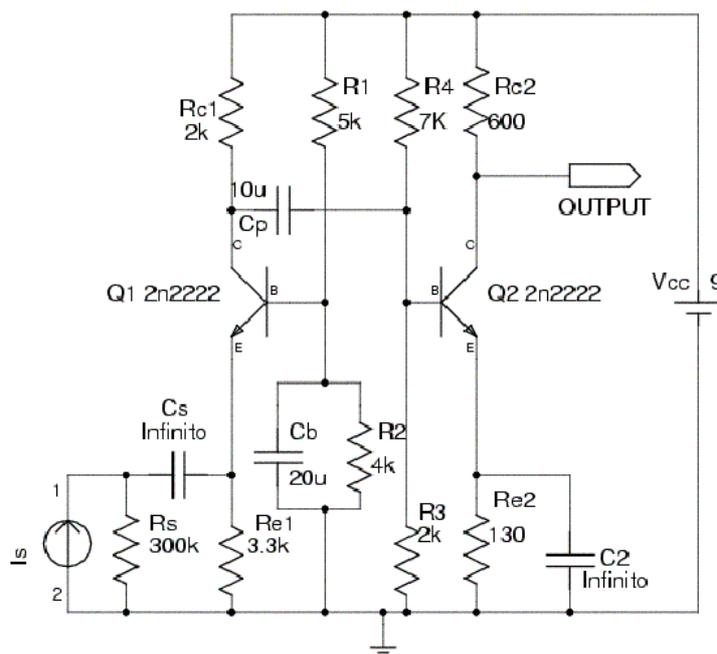
**Parte B**

Dato l'amplificatore disegnato in figura, calcolare:

- il punto di riposo dei due transistori,
- la caratteristica di trasferimento  $V_u/I_s$  a centrobanda,
- il limite superiore di banda e il limite inferiore di banda

Ipotesi semplificative:

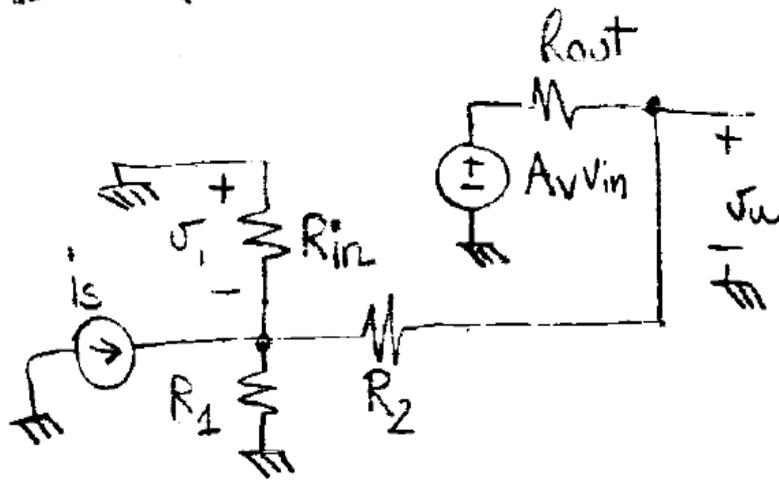
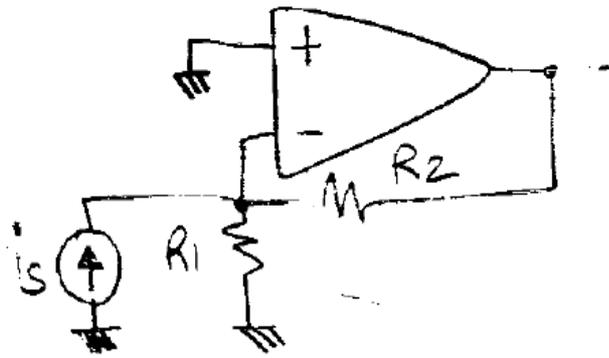
- $C_s$  e  $C_2$  hanno valore infinito (a qualunque frequenza non nulla hanno impedenza nulla).



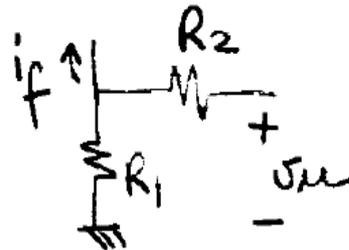
Punteggio totale Parte B: 14.

1) dobbiamo effettuare una reazione con prelievo di tensione e inserzione di corrente, per esempio

1



rete per  $\beta$

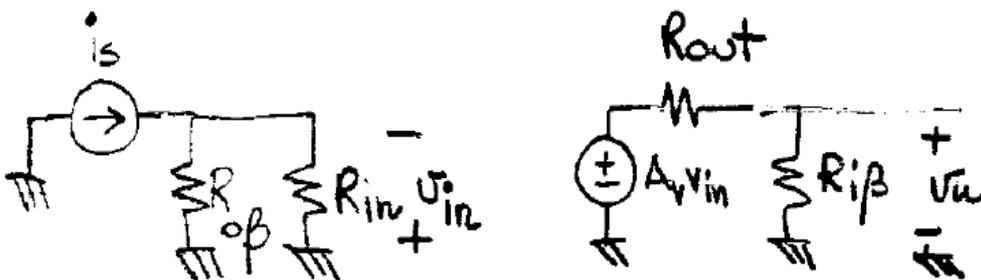


$$\beta = \frac{1}{R_2}$$

$$R_{i\beta} = R_2$$

$$R_{o\beta} = R_1 // R_2$$

rete per  $A_e$



$$A_e = (R_{o\beta} // R_{in}) A_v \frac{R_{i\beta}}{R_{i\beta} + R_{out}}$$

(2)

$$R_{IF} = \frac{R_{o\beta} // R_{in}}{1 - \beta A_e} < 100 \Omega \quad R_{OF} = \frac{R_{i\beta} // R_{out}}{1 - \beta A_e} < 10 \Omega$$

Supponendo che  $R_{i\beta} = R_2$  sia  $\gg$  di  $1 \text{ K}\Omega$ , possiamo approssimare  $R_{i\beta} // R_{out}$  con  $R_{out} = 1 \text{ K}\Omega$ . Per soddisfare la condizione su  $R_{OF}$  dobbiamo avere  $1 - \beta A_e > 100$ . Con questo valore  $R_{IF} = \frac{R_{o\beta} // R_{in}}{1 - \beta A_e} < \frac{3 \text{ K}}{100} = 30 \Omega < 100 \Omega$ ,

quindi anche la condizione su  $R_{IF}$  è soddisfatta

poniamo

$$\beta A_e \leq -99$$

$$\frac{1}{R_2} (R_{o\beta} // R_{in}) A_v \frac{R_{i\beta}}{R_{i\beta} + R_{out}} \geq 99$$

$$R_{i\beta} = R_1$$

$$R_{o\beta} = R_1 // R_2$$

$$\text{poniamo } R_{i\beta} = 20 \text{ K}\Omega = R_2$$

$$\frac{R_{o\beta} // R_{in}}{R_2} \geq \frac{99}{A_v} \frac{R_{i\beta} + R_{out}}{R_{i\beta}}$$

$$\frac{R_1 // R_2 // R_{in}}{R_2} \geq \frac{99}{10^5} \frac{21}{20} = 1.04 \cdot 10^{-3}$$

se il rapporto è così piccolo vuol dire che  $R_1 // R_2 // R_{in} = R_i$

$$\frac{R_1}{R_2} = 1.04 \cdot 10^{-3} \rightarrow \underline{R_1 = 20.1 \Omega}$$

$$R_1 = 20.1 \Omega$$

$$R_{i\beta} = R_2 = 20 \text{ k}\Omega$$

$$R_{o\beta} = 20 \Omega$$

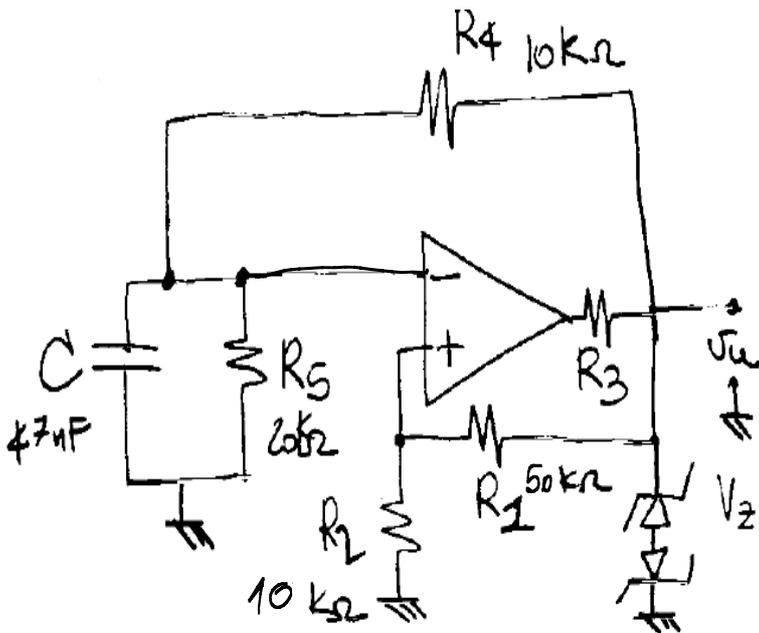
$$\beta A_e = -\frac{1}{10^3} \cdot 10^5 \cdot \frac{20000}{21000} = -95.23$$

$$R_{iF} = 0.21 \Omega$$

$$R_{oF} = 9.9 \Omega$$

$$A_f = \frac{A_e}{1 - \beta A_e} = \frac{95.23 \cdot 20 \cdot 10^3}{96.23} \approx 20 \cdot 10^3$$

### Esercizio 2

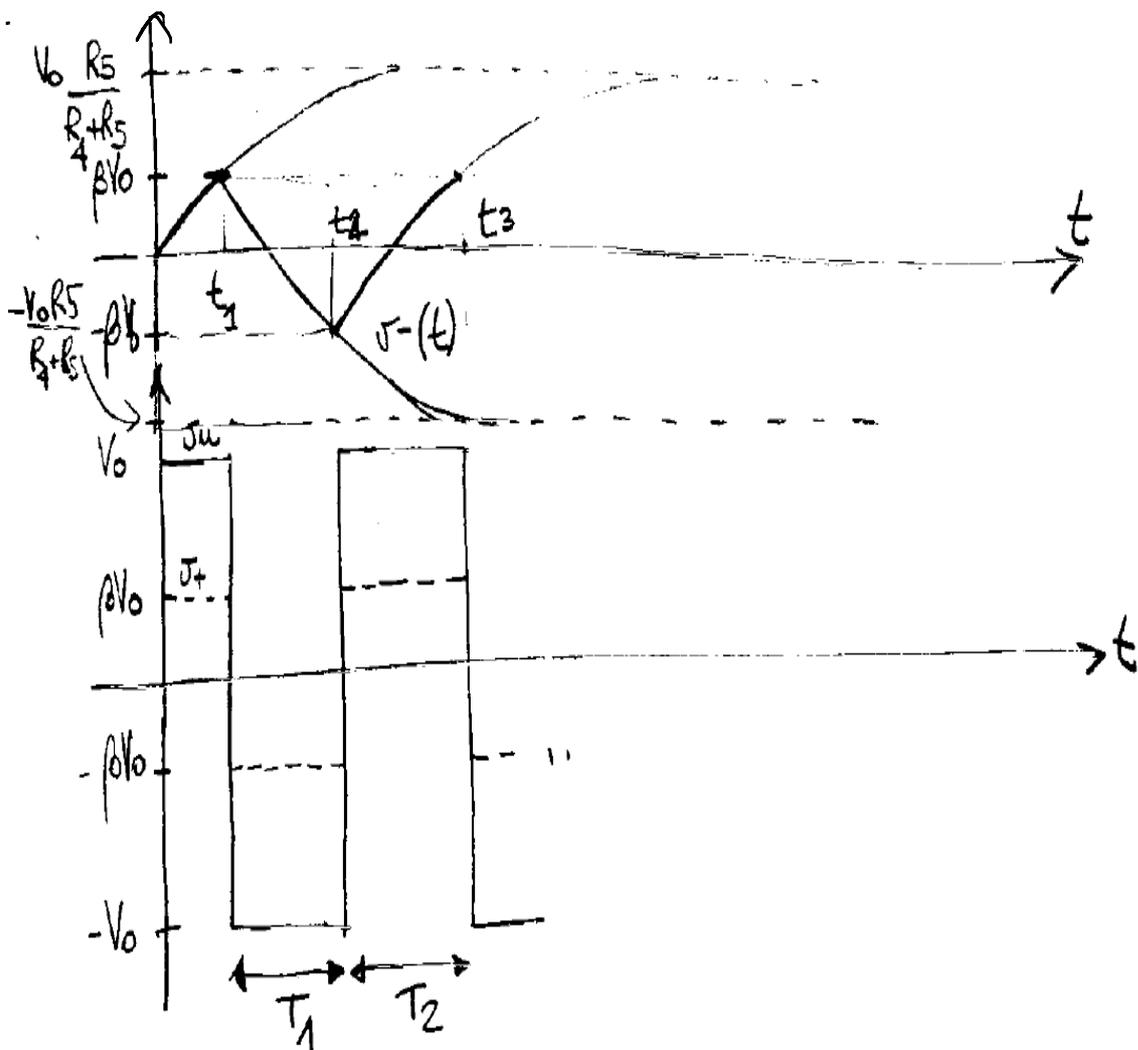


$$V_0 = V_2 + V_f = 5.4 \text{ V}$$

immaginiamo che per  $t=0$  C sia scarico.

$$\tau = (R_4 \parallel R_5) C = 0.28 \text{ ms}$$

$$\beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2} = \frac{1}{6}$$



$\frac{T}{2} = T_1 = T_2$  scriviamo  $\bar{v}(t)$  tra  $t_1$  e  $t_2$

$$\bar{v}(t) = \beta V_0 + \left( -\beta V_0 - \frac{V_0 R_5}{R_4 + R_5} \right) \left( 1 - e^{-\frac{t-t_1}{\tau}} \right)$$

$$\bar{v}(t_2) = -\beta V_0$$

$$-\beta V_0 = \beta V_0 - \left[ \beta V_0 + \frac{R_5 V_0}{R_4 + R_5} \right] \left( 1 - e^{-\frac{T}{2\tau}} \right)$$

$$-\beta V_0 = \cancel{\beta V_0} - \cancel{\beta V_0} - \frac{R_5}{R_4 + R_5} V_0 + e^{-\frac{T}{2\tau}} \left( \cancel{\beta V_0} + \frac{R_5 V_0}{R_4 + R_5} \right)$$

$$-\ln \left[ \frac{\frac{R_5}{R_5+R_4} - \beta}{\frac{R_5}{R_5+R_4} + \beta} \right] = \frac{T_1}{\tau} \rightarrow T_1 = \tau \ln \frac{\beta + \frac{R_5}{R_5+R_4}}{\frac{R_5}{R_4+R_5} - \beta} = \tau \ln \frac{\frac{1}{6} + \frac{2}{3}}{\frac{2}{3} - \frac{1}{6}} =$$

$$T_1 = \tau \ln \frac{5}{3} = 0.143 \text{ ms}$$

$$T = 2T_1$$

$$T = 0.286 \text{ ms}$$

Le soluzioni degli esercizi 3 e 4 si possono trovare negli appunti del corso o nel libro di testo.

# Punto di Riposo

$$R_{E2} = 130 \Omega \quad (1)$$

$$R_{C1} = 2 \text{ k}\Omega$$

$$R_1 = 5 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 4 \text{ k}\Omega$$

$$R_{E1} = 3.3 \text{ k}\Omega$$

$$C_P = 10 \mu\text{F}$$

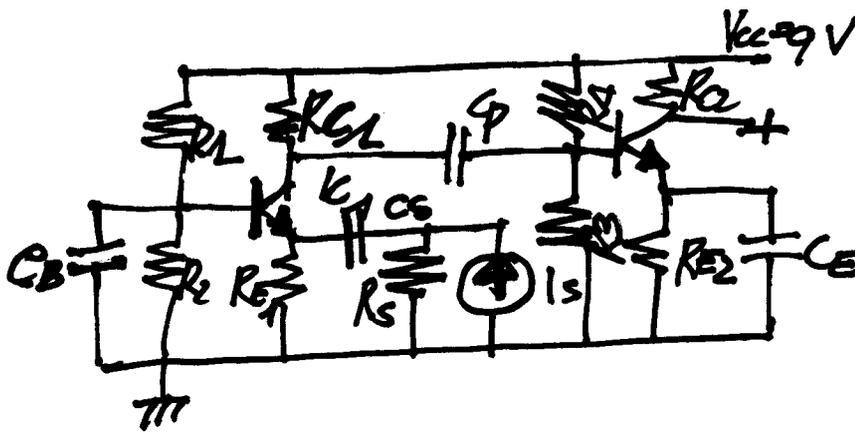
$$C_B = 90 \mu\text{F}$$

$$C_S = \infty \text{ F}$$

$$C_E = \infty \text{ F}$$

$$R_{C2} = 600 \Omega$$

$$R_3 = 2 \text{ k}\Omega ; R_4 = 7 \text{ k}\Omega$$



$$R_S = 300 \text{ k}\Omega$$

$$V_{CC} = 9 \text{ V}$$

$$I_{R12} = \frac{V_{CC}}{R_1 + R_2} = 1 \text{ mA} \rightarrow V_{B1} = 4 \text{ V}$$

$$V_{E1} = V_{B1} - V_{BE} = 3.3 \text{ V}$$

$$I_{E1} = \frac{V_{E1}}{R_{E1}} = 1 \text{ mA} \rightarrow h_{FE} @ 1 \text{ mA} \approx 150 \rightarrow I_{B1} \approx 6.6 \mu\text{A}$$

$$I_{B1} \ll I_{R12} \quad \text{Ipotesi: P.E. verificata.}$$

$$V_{C1} = V_{CC} - R_{C1} I_{C1} = 7 \text{ V} \rightarrow V_{CE1} = 3.7 \text{ V} \quad \text{Zona Attiva Diretta}$$

$$V_{B2} = \frac{R_3}{R_3 + R_4} V_{CC} = 2 \text{ V} \rightarrow V_{E2} = V_{B2} - V_{BE} = 1.3 \text{ V}$$

$$I_{E2} = \frac{V_{E2}}{R_{E2}} = 10 \text{ mA} \rightarrow V_{C2} = V_{CC} - I_{E2} R_{C2} = 3 \text{ V}$$

$$V_{CE2} = 1.7 \text{ V} \quad \text{Zona Attiva Diretta.}$$

$$h_{FE2} = 200 \rightarrow I_B \approx \frac{I_{C2}}{h_{FE2}} = 50 \mu\text{A} \ll I_{R34} \quad \text{Ipotesi P.E. verificata}$$

$$V_{CB1} = 3 \text{ V}$$

$$V_{CB2} = 1 \text{ V}$$

# Parametri Piccolo Segnale

1 bis

**Q1**

$$hfe_1 = 175$$

$$r_b = 450 \Omega$$

$$g_{m1} = \frac{I_{c1}}{V_T} \approx 38 \text{ mS}$$

$$r_o = \frac{V_A}{I_{c1}} = 50 \text{ k}\Omega$$

$$r_{\pi 1} = \frac{hfe_1}{g_{m1}} = 4605 \Omega$$

$$r_{i1} = r_b + r_{\pi 1} = 5005 \Omega$$

$r_{o1}$  si può trascurare

$$f_{T1} = 90 \text{ MHz}$$

$$C_{\mu 1} = 5,5 \text{ pF}$$

$$C_{\pi 1} = \frac{g_{m1}}{2\pi f_{T1}} - C_{\mu 1} \approx 62 \text{ pF}$$

**Q2**

$$hfe_2 = 225$$

$$r_b = 165 \Omega$$

$$g_{m2} = \frac{I_{c2}}{V_T} = 380 \text{ mS}$$

$$r_o = 5 \text{ k}\Omega$$

$$r_{\pi 2} = \frac{hfe_2}{g_{m2}} = 592 \Omega$$

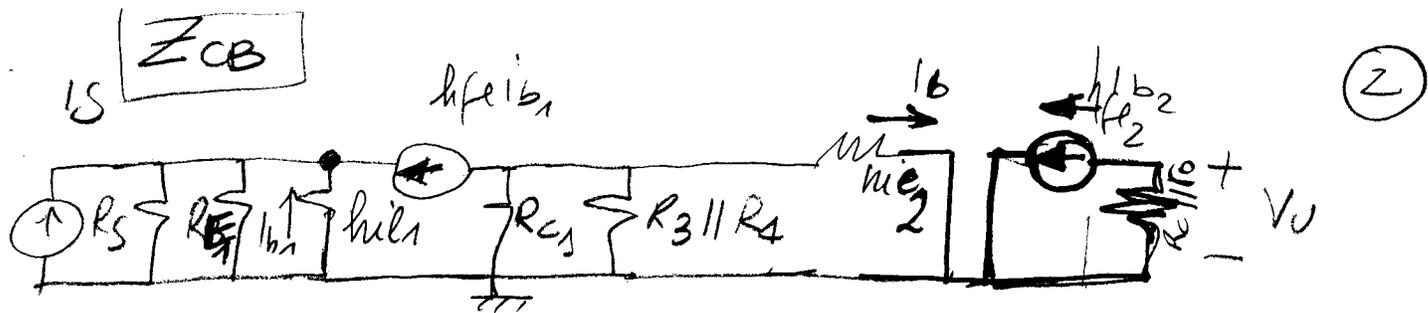
$$r_{i2} = r_b + r_{\pi 2} = 757 \Omega$$

$r_{o2}$  **NON** si può trascurare

$$f_{T2} \approx 290 \text{ MHz}$$

$$C_{\mu 2} = 7 \text{ pF}$$

$$C_{\pi 2} = \frac{g_{m2}}{2\pi f_{T2}} - C_{\mu 2} = 201 \text{ pF}$$



$$-I_{b1} = \frac{I_S R_S \parallel R_{E1}}{(R_S \parallel R_{E1} + \frac{h_{ie1}}{1+h_{fe1}})} \cdot \frac{1}{1+h_{fe1}} = \theta_1 I_S = 5,6 \cdot 10^{-3} I_S$$

$$I_{b2} = \frac{-R_{C1} \parallel R_3 \parallel R_4 h_{fe1} I_{b1}}{R_{C1} \parallel R_3 \parallel R_4 + h_{ie2}} = \theta_2 I_{b1} = 94 I_{b1}$$

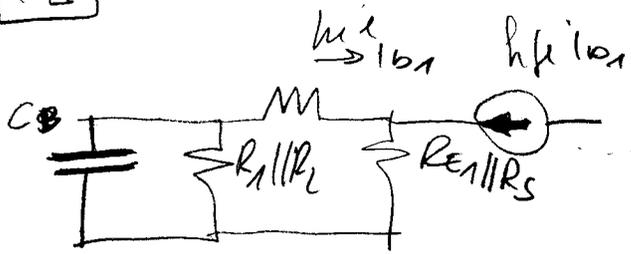
$$V_U = -R_{C2} \parallel R_{L2} h_{fe2} I_{b2} = \theta_3 I_{b2} = 120 \cdot 10^3 \cdot I_{b2}$$

$$\frac{V_U}{I_S} = - \frac{(R_{C2} \parallel R_{L2} h_{fe2}) (R_{C1} \parallel R_3 \parallel R_4 h_{fe1})}{(R_{C1} \parallel R_3 \parallel R_4 + h_{ie2})} \cdot \frac{R_S \parallel R_{E1}}{(1+h_{fe1}) (R_S \parallel R_{E1}) + h_{ie1}} =$$

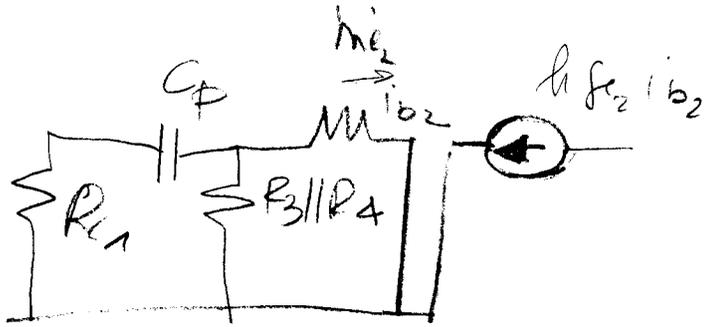
$\approx -54,5 \text{ K}\Omega$  transimpedenza a centro banda

$f_L$ :

(3)

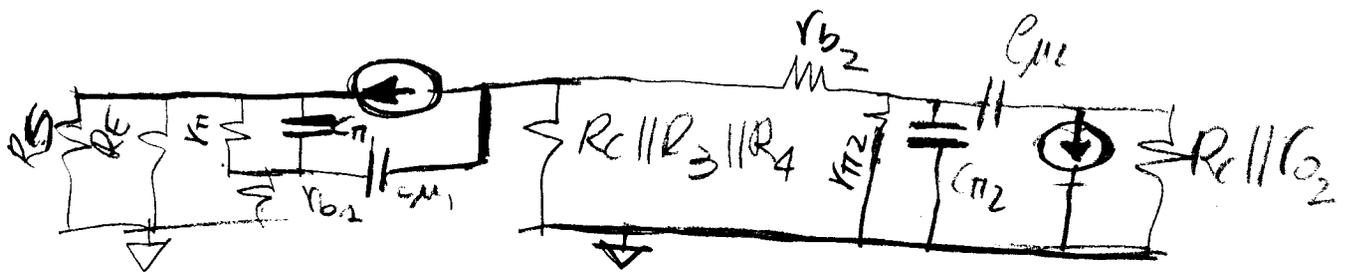


$$R_{VCB} = R_1 \parallel R_2 \parallel (h_{ie1} + (R_{e1} \parallel R_s)(h_{\beta 1} + 1)) = 2213 \Omega$$



$$R_{VCP} = R_{e1} + R_3 \parallel R_4 \parallel h_{ie2} = 2000 \Omega$$

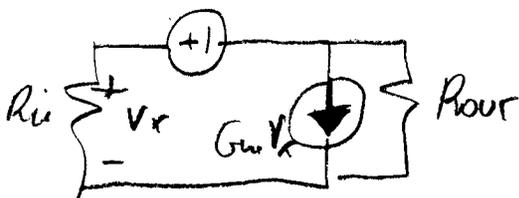
$$f_L = \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{1}{R_{VCB} C_B} + \frac{1}{R_{VCP} C_P} \right] \approx 7.2 \text{ Hz}$$



$$R_{V\pi 1} = \left( \frac{R_s \parallel R_{e1} + V_{b1}}{1 + g_{m1} R_s \parallel R_{e1}} \right) \parallel V_{\pi 1} = 29 \Omega$$

$$R_{V\mu 1} = R_{in} + R_{out} + R_{in} R_{out} G_m$$

where:



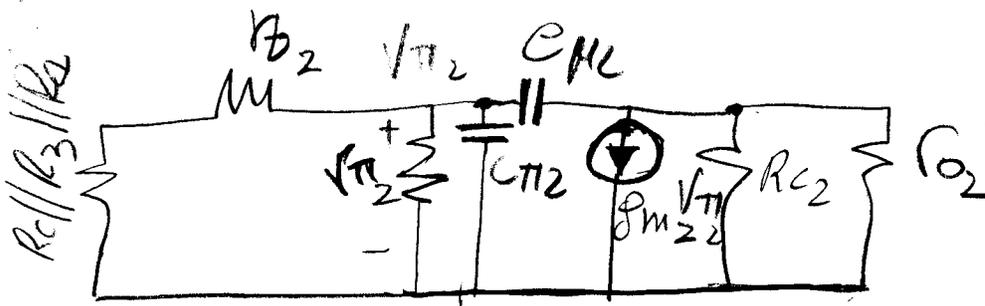
$$R_{in} = V_{b1} \parallel [V_{\pi 1} + R_{e1} \parallel R_s (1 + h_{\beta 1})]$$

$$R_{out} = R_c \parallel R_3 \parallel R_4 \parallel (h_{ie2})$$

$$G_m = g_{m1}$$

$$1 + \frac{R_{e1} \parallel R_s (1 + h_{\beta 1})}{V_{\pi 1}}$$

$$R_{V\mu 1} = 907 \Omega$$



(4)

$$R_{in}^* = (V_{b_2} + R_{c_1} \parallel R_3 \parallel R_4) \parallel V_{\pi_2}$$

$$R_{out}^* = R_{c_2} \parallel R_{o_2}$$

$$R_{v_{c_{\pi_2}}} = R_{in}^* + R_{v_{\pi_2}} R_{out}^* g_m + R_{out}^* = 78,1 \text{ k}\Omega$$

$$R_{v_{c_{\pi_2}}} = V_{\pi_2} \parallel [V_{b_2} + R_{c_1} \parallel R_3 \parallel R_4] = 373 \Omega = R_{in}^*$$

Quindi

$$f_H = \frac{1}{2\pi [R_{v_{c_{\pi_2}}} C_{\pi_1} + R_{v_{c_{\pi_1}}} C_{\pi_1} + R_{v_{c_{\pi_2}}} C_{\pi_2} + R_{v_{c_{\pi_2}}} C_{\pi_2}]}$$

$$= 253,17 \text{ kHz}$$