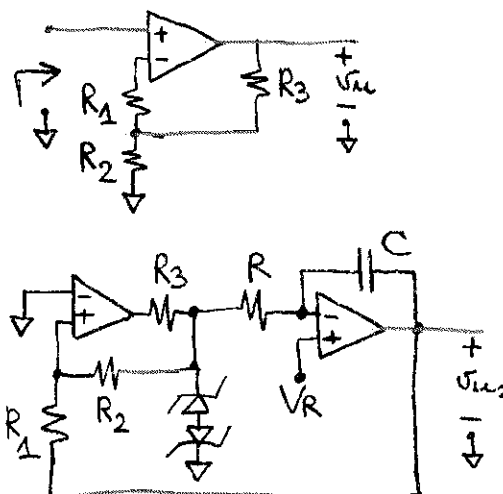


Parte A

1. Sia dato il circuito mostrato a lato. Ricavare la resistenza d'ingresso del circuito sapendo che  $R_1=1K\Omega$ ,  $R_2=2K\Omega$ ,  $R_3=3K\Omega$ , e che l'amplificatore operazionale ha  $R_{in}=100K\Omega$ ,  $R_{out}=100\Omega$ ,  $A_v=1000$ .
2. Sia dato il circuito a lato, calcolare il periodo delle onde triangolare e rettangolare ottenute in uscita e il loro duty cycle, giustificando il procedimento. Disegnare l'andamento nel tempo delle tensioni all'uscita all'ingresso degli operazionali, sullo stesso asse dei tempi ( $R = 1 K\Omega$ ,  $C = 100 \mu F$ ,  $R_1 = R_2 = 2K\Omega$ ,  $R_3 = 500\Omega$ ,  $V_Z = 5.6 V$ ,  $V_R = 2 V$ ).



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 di una memoria SRAM a 4 bit realizzata con tecnologia CMOS e descriverne il funzionamento

*Punteggio totale Parte A: 14*

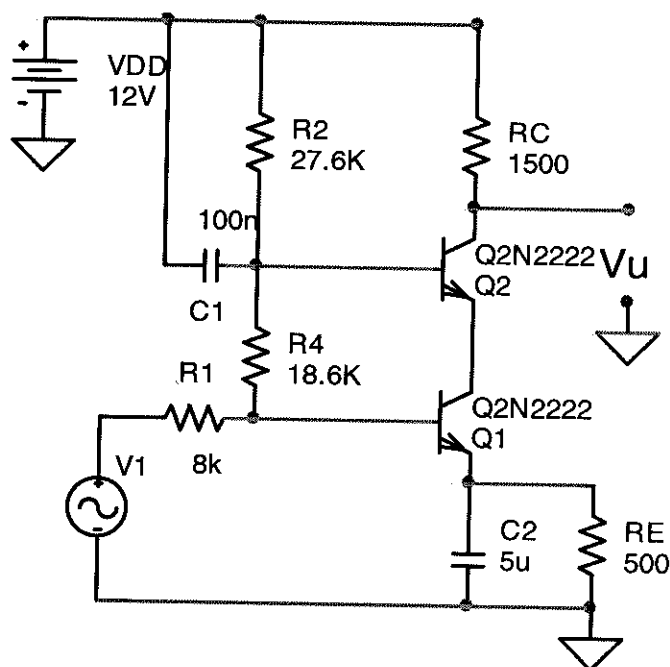
Parte B

Con riferimento al circuito mostrato a lato, calcolare:

- il punto di riposo dei due transistori Q1 e Q2 e i parametri del circuito di piccolo segnale
- la funzione di trasferimento a centro banda
- il limite inferiore di banda
- il limite superiore di banda

Fare le seguenti ipotesi semplificative:

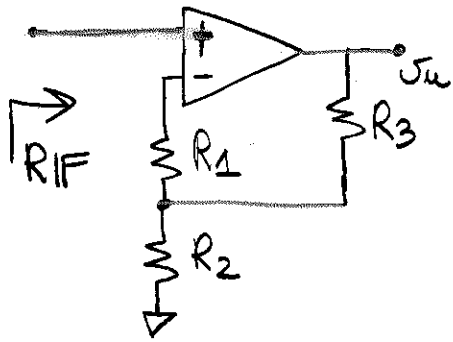
- Q1 totalmente resistivo
- Q1 e Q2 hanno  $h_{oe}$  nullo



*Punteggio totale Parte B: 14/30*

# Parte A

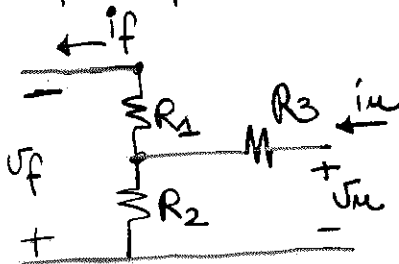
1) Calcolare l'impedenza d'ingresso del circuito:



- $R_{in} = 100\text{ K}\Omega$
- $A_v = 10^3$
- $R_{out} = 100\ \Omega$
- $R_1 = 1\text{ K}\Omega$
- $R_2 = 2\text{ K}\Omega$
- $R_3 = 3\text{ K}\Omega$

Reazione con inserzione SERIE e prelievo PARALLELO

Rete per il  $\beta$



$$V_f = \beta V_u + R_o \beta i_f$$

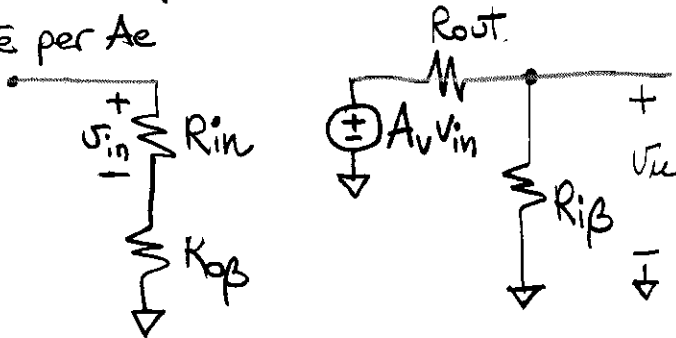
$$i_u = \frac{V_u}{R_i \beta} + \cancel{R_o i_f}$$

$$\beta = \left. \frac{V_f}{V_u} \right|_{i_f=0} = -\frac{R_2}{R_2 + R_3} = -\frac{2}{5} = -0.4$$

$$R_{o\beta} = \left. \frac{V_f}{i_f} \right|_{V_u=0} = R_1 + R_2 // R_3 = 1 + \frac{2 \cdot 3}{2+3} = 1 + 1.2 = 2.2\text{ K}\Omega$$

$$R_i \beta = \left. \frac{V_u}{i_u} \right|_{V_f=0} = R_2 + R_3 = 5\text{ K}\Omega$$

Rete per \$A\_e\$



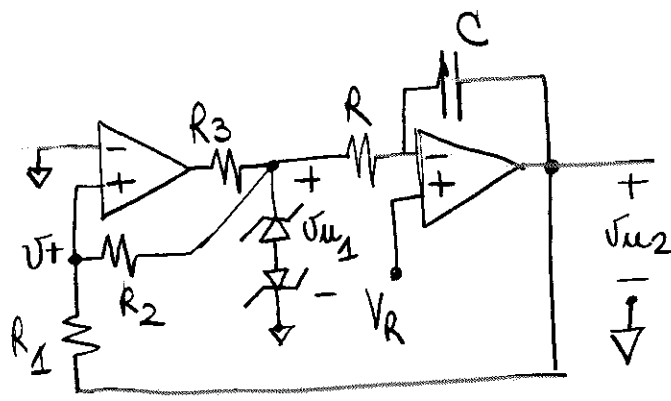
$$A_e = \frac{R_{in}}{R_{in} + R_{o\beta}} \cdot A_v \frac{R_i \beta}{R_i \beta + R_{out}} =$$

$$= \frac{100}{102.2} \cdot 10^3 \cdot \frac{5}{5 + 0.1} =$$

$$= 961.1$$

$$R_{IF} = (R_{in} + R_{o\beta})(1 - \beta A_e) =$$

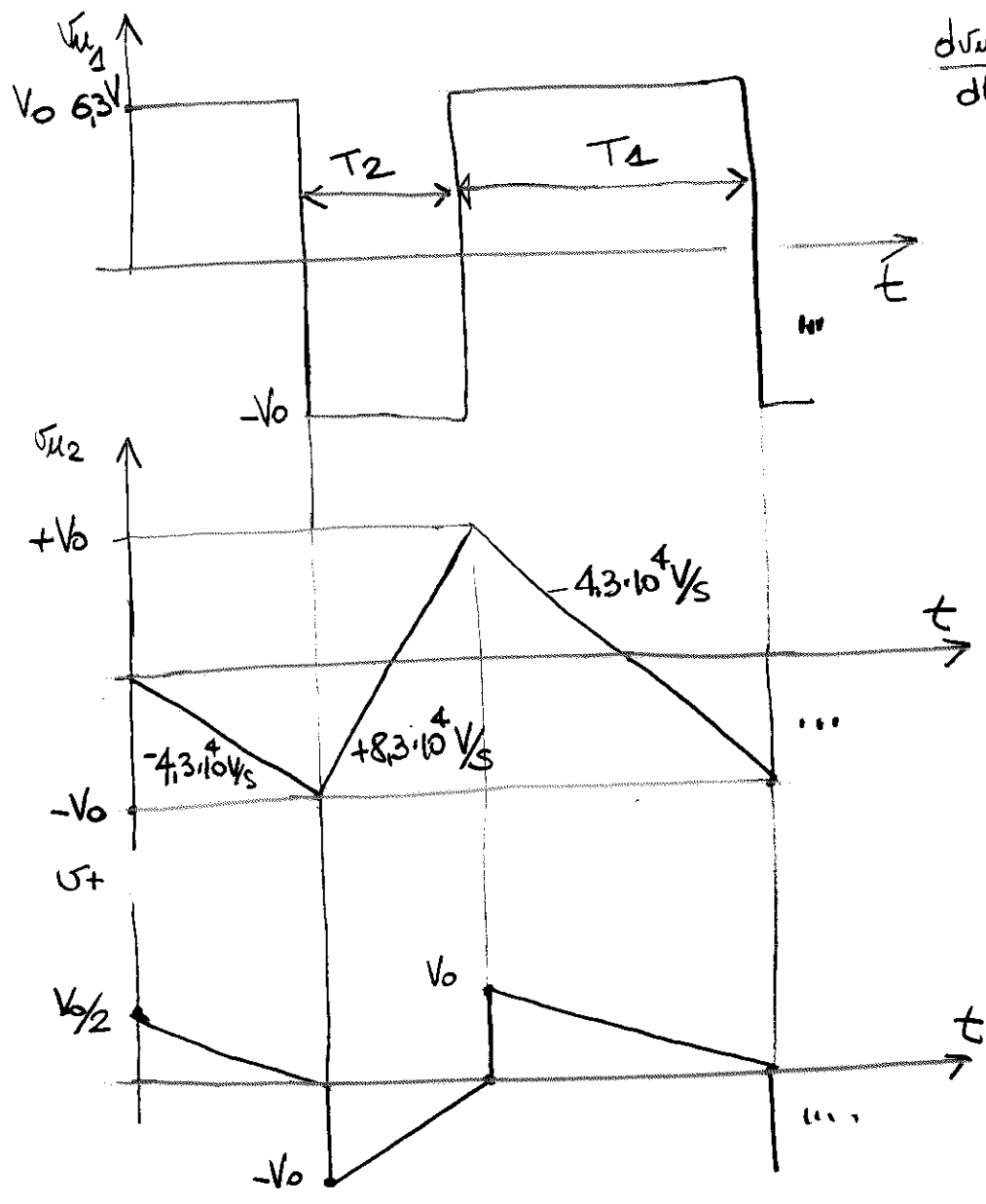
$$= (100000 + 2200)(1 + 0.4 \cdot 961.1) = 39.4\text{ M}\Omega$$



- $R_1 = 2k\Omega$
- $R_2 = 2k\Omega$
- $R_3 = 500\Omega$
- $R = 1k\Omega$
- $C = 100nF$
- $V_R = 2V$
- $V_2 = 5.6V$

poniamo che all'istante  $t=0$  la capacità sia scarica e  $V_{u2}$  sia alto ( $V_{u1} = V_0 \equiv V_2 + V_f$ )

$$V_0 = \frac{V_2 + V_f}{2} = 6.3V$$



$$\frac{dV_{u2}}{dt} = \frac{-V_0 - V_R}{RC} = -4.3 \cdot 10^4 V/s$$

$$V^+ = \frac{V_{u2} R_2 + V_{u1} R_1}{R_2 + R_1}$$

il trigger di Schmitt commuta quando  $V^+ = 0$

$$V_{u2} R_2 + V_{u1} R_1 = 0$$

$$V_{u2} = -\frac{R_1}{R_2} V_0 = -V_0$$

dopo la prima commutazione

$$V_{u1} = -V_0$$

$$\frac{dV_{u2}}{dt} = \frac{V_0 + V_R}{RC} = 8.3 \cdot 10^4 V/s$$

il trigger commuta nuovamente quando  $V^+ = 0$

$$V_{u2} R_2 + V_{u1} R_1 = 0$$

$$V_{u2} = +V_0$$

e così via

calcoliamo il duty cycle e il periodo dell'onda quadra

③

$$T_1 = \frac{2V_0}{\left(\frac{V_0 + V_R}{RC}\right)} = \frac{12.6}{8.3} \cdot 10^{-4} = 1.52 \cdot 10^{-4} \text{ s} = 152 \mu\text{s}$$

$$T_2 = \frac{2V_0}{\left(\frac{V_0 - V_R}{RC}\right)} = \frac{12.6}{4.3} \cdot 10^{-4} = 2.93 \cdot 10^{-4} \text{ s} = 293 \mu\text{s}$$

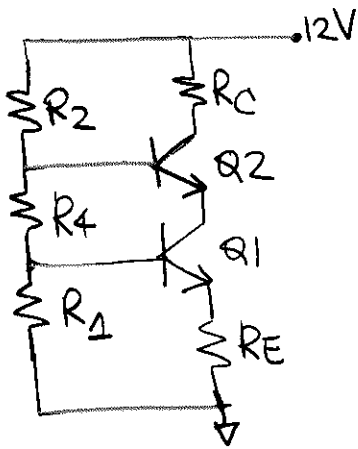
$$T = T_1 + T_2 = 445 \mu\text{s} \quad \delta = \frac{T_1}{T} = \frac{152}{445} = 0.34$$

Es. 3, Es. 4 Consultare il libro di testo o gli appunti del corso.

## Parte B

④

Punto di RIPOSO



$$V_{B1} = \frac{R_1}{R_1 + R_4 + R_2} V_{CC} = \frac{8}{8 + 27,6 + 8,6} \cdot 12 = 1,77 \text{ V}$$

$$V_{E1} = V_{B1} - V_{BE} = 1,07$$

$$I_{E1} = \frac{V_{E1}}{R_E} = \frac{1,07}{500} = 2,14 \text{ mA} = I_{C1} = I_{E2} = I_{C2}$$

$$V_{B2} = \frac{(R_1 + R_4) V_{CC}}{R_1 + R_4 + R_2} = \frac{8 + 18,6}{8 + 27,6 + 18,6} \cdot 12 = 5,88 \text{ V}$$

$$V_{E2} = V_{B2} - V_{BE} = 5,18 \text{ V} = V_{C1}$$

$$V_{C2} = V_{CC} - R_C I_{C2} = 12 - 1,5 \cdot 2,03 = 8,79 \text{ V}$$

$$V_{CE2} = V_{C2} - V_{E2} = 3,6 \text{ V}$$

$$V_{CE1} = V_{C1} - V_{E1} = 4,11 \text{ V}$$

$$h_{fe1} = h_{fe2} = 175 \quad (\text{prendiamo il valore per } I_C = 1 \text{ mA})$$

$$r_{\pi 1} = \frac{h_{fe1} \cdot V_T}{I_{C1}} = \frac{175 \cdot 26 \cdot 10^{-3}}{2,03 \cdot 10^{-3}} = 2,126 \text{ K}\Omega = r_{\pi 2}$$

Ricaviamo  $r_b$  dai dati sulle caratteristiche per  $I_C = 1 \text{ mA}$

$$h_{ie@1\text{mA}} = 5 \text{ K}\Omega$$

$$r_{\pi@1\text{mA}} = \frac{h_{fe} V_T}{I_C} = \frac{175 \cdot 26}{1} = 4550 \Omega$$

$$r_b@1\text{mA} = h_{ie@1\text{mA}} - r_{\pi@1\text{mA}} = 450 \Omega$$

$r_b$  dipende poco dalla corrente  $I_C$ , quindi nel nostro caso prendiamo per buono il valore per  $1 \text{ mA}$

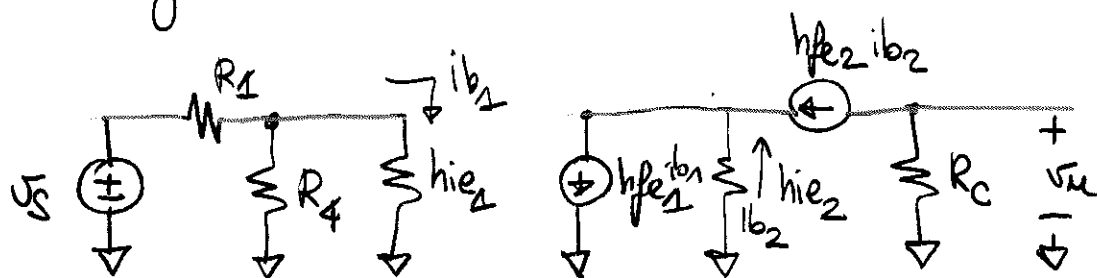
$$h_{ie1} = r_{b1} + r_{\pi1} = 450 + 2126 = 2576 \Omega = \underline{h_{ie2}}$$

$$f_T = 140 \text{ MHz}$$

$$C_{\mu1} = C_{\mu2} = 5 \text{ pF}$$

$$f_T = \frac{g_m}{2\pi(C_{\mu1} + C_{\pi1})} \rightarrow C_{\pi1} = \frac{g_m}{2\pi f_T} - C_{\mu1} = 88.56 \text{ pF} = C_{\pi2}$$

Guadagno a centrobanda



$$i_{b1} = \frac{v_s R_4}{(R_1 + R_4 \parallel h_{ie1})(R_4 + h_{ie1})}$$

$$i_{b2} = \frac{i_{b1} h_{fe1}}{h_{fe1} + 1}$$

$$v_U = -h_{fe2} i_{b2} R_C$$

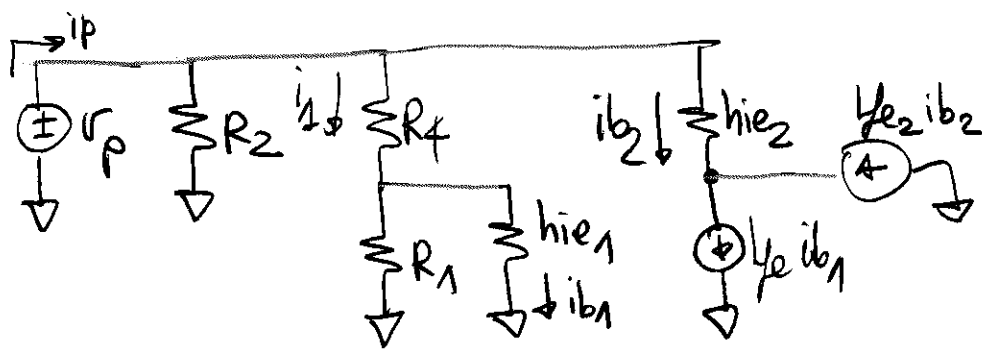
$$\rightarrow \frac{v_U}{v_s} = - \frac{R_4 \left( \frac{h_{fe1}}{h_{fe1} + 1} \right) h_{fe2} R_C}{(R_1 + R_4 \parallel h_{ie1})(R_4 + h_{ie1})}$$

$$= \frac{-18600 \left( \frac{175}{176} \right) 175 \cdot 1500}{(8000 + 2263)(18600 + 2576)} = -22.34$$

Limite inferiore di banda

6

$R_{Vc1}$



$$i_{b2} = i_{b1} \frac{h_{fe1}}{h_{fe1} + 1} \approx i_{b1}$$

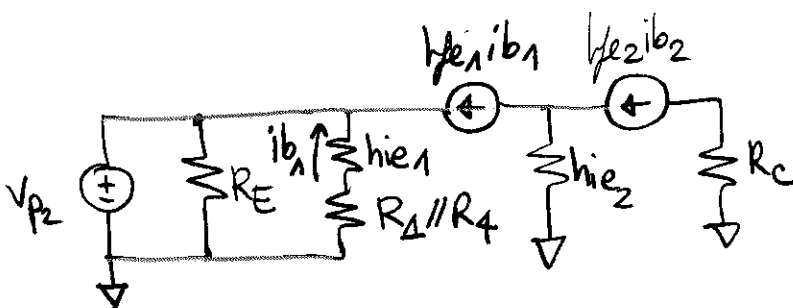
$$i_{b1} = i_1 \cdot \frac{R_1}{R_1 + h_{ie1}}$$

$$i_p = \frac{v_p}{R_2} + i_1 \left[ 1 + \frac{R_4}{R_1 + h_{ie1}} \right] = \frac{v_p}{R_2} + \frac{v_p}{R_4 + R_1 \parallel h_{ie1}} \frac{(2R_1 + h_{ie1})}{(R_1 + h_{ie1})}$$

$$R_{Vc1} = R_2 \parallel \left[ \frac{(R_4 + R_1 \parallel h_{ie1})(R_1 + h_{ie1})}{2R_1 + h_{ie1}} \right] = 27600 \parallel \left[ \frac{[(8600 + 8000 \parallel 2576)(8000 + 2576)]}{2 \cdot 8000 + 2576} \right]$$

$$= 8217 \Omega$$

$R_{Vc2}$



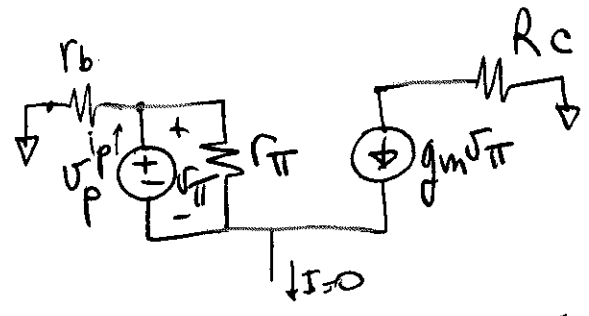
$$R_{Vc2} = R_E \parallel \left[ \frac{h_{ie1} + R_1 \parallel R_4}{h_{fe1} + 1} \right] = 500 \parallel \left[ \frac{2576 + 5590}{176} \right] = 42 \Omega$$

$$f_L = \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{1}{R_{Vc2} C_2} + \frac{1}{R_{Vc1} C_1} \right] = \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{1}{42 \cdot 5 \cdot 10^{-6}} + \frac{1}{8217 \cdot 10^{-7}} \right] = 952 \text{ Hz}$$

# Limite superiore di banda

(7)

$R_{V\pi}$

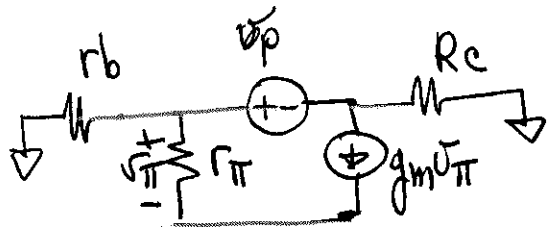


sovrapposizione degli effetti:

$$i_p = \frac{v_p}{r_\pi} + g_m v_p$$

$$\frac{v_p}{i_p} = \frac{r_\pi}{1 + g_m r_\pi} = \frac{2126}{1 + h_e} = 12,08 \Omega$$

$R_{V\mu}$



$v_\pi \rightarrow 0$

$$R_{V\mu} = r_b + R_c = 450 + 1500 = \underline{\underline{1950 \Omega}}$$

$$f_H = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{R_{V\pi} C_\pi + R_{V\mu} C_\mu} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{12,08 + 88,56 \cdot 10^{-12} + 1950 \cdot 5 \cdot 10^{-12}}$$

$$= 14 \text{ MHz}$$