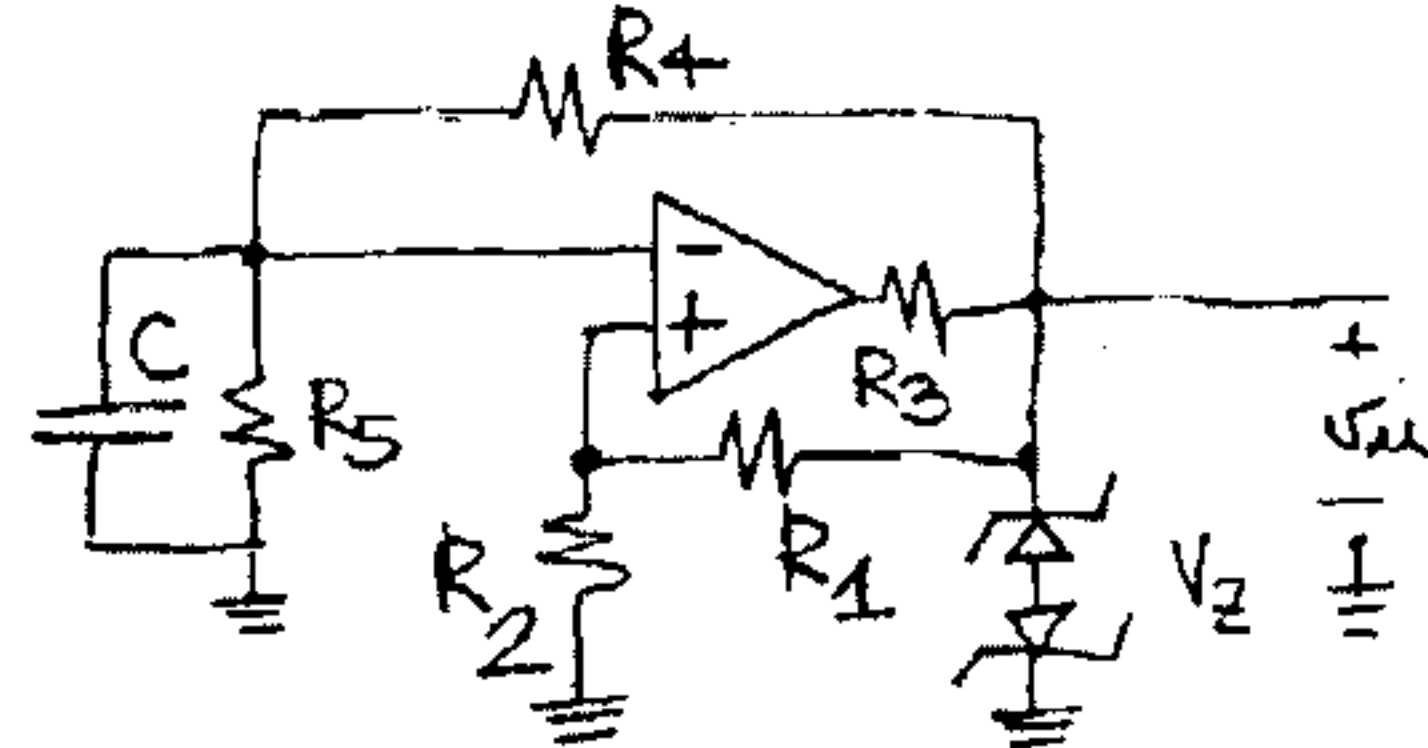


Parte A

1. Si consideri un amplificatore con amplificazione di tensione $A_{v0}=2000$, $R_{in} = 50 \text{ K}\Omega$, $R_{out} = 800 \Omega$, un polo a frequenza $f_p = 150 \text{ Hz}$. Si reazioni in modo da ottenere una resistenza di ingresso uguale a $10 \text{ M}\Omega$, una resistenza di uscita minore di 10Ω . Si consideri la resistenza del generatore nulla, e la resistenza del carico di 200Ω . Si calcoli la nuova amplificazione del sistema.

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. $R_1=50 \text{ K}\Omega$, $R_2=R_4=R_5=10 \text{ K}\Omega$, $R_3=1\text{K}\Omega$, $C=47 \text{ nF}$, $V_Z=5.6 \text{ V}$.



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. Calcolare il tempo di propagazione da basso ad alto di un inverter CMOS, assumendo che $K_n=K_p=1\text{mA/V}^2$, $V_{tn}=-V_{tp}=0.5 \text{ V}$, $V_{dd}=1.5 \text{ V}$, e che la capacita' di carico dell'inverter sia 0.1 pF . Definire il tempo di propagazione e giustificare il procedimento.

Punteggio totale Parte A: 14

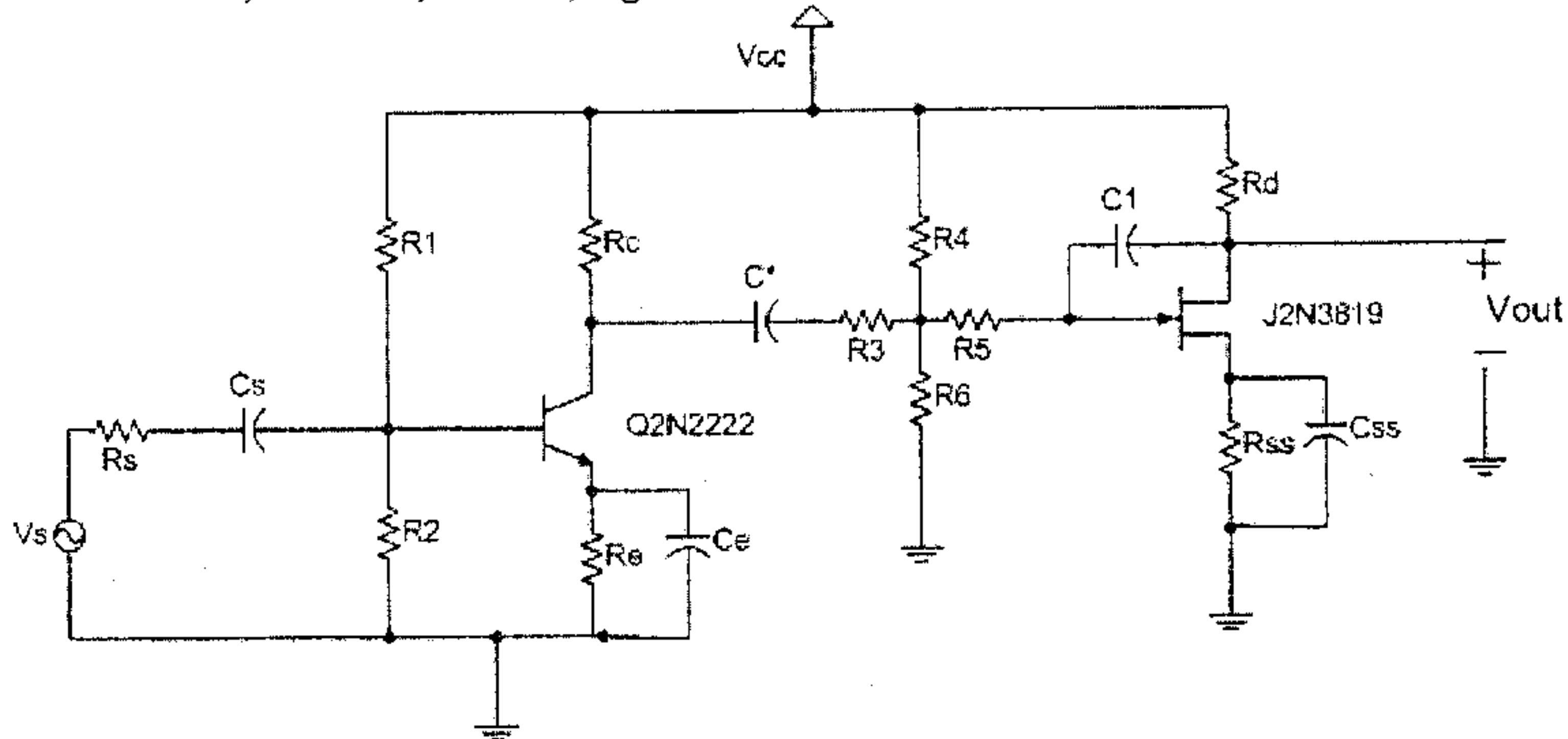
Parte B

Con riferimento al circuito mostrato a lato, calcolare:

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

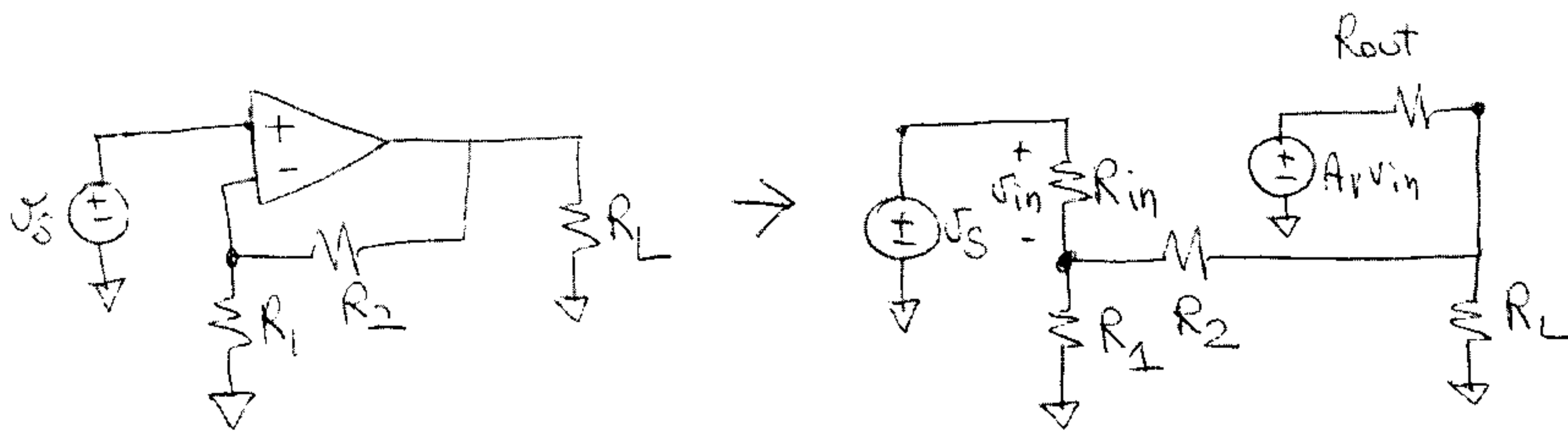
Si consideri C_{ss} e $C_e \rightarrow \infty$, $r_d \rightarrow \infty$, $h_{oe} = 0$, V_{gsoff} del JFET = -3V . $V_{cc}=15 \text{ V}$.

- $R_s = 10 \text{ K}\Omega$
- $C_s = 1 \mu\text{F}$
- $R_1 = 10 \text{ K}\Omega$
- $R_2 = 5 \text{ K}\Omega$
- $R_c = 3 \text{ K}\Omega$
- $R_e = 2 \text{ K}\Omega$
- $C^* = 1 \mu\text{F}$
- $R_3 = 1 \text{ K}\Omega$
- $R_4 = 100 \text{ K}\Omega$
- $R_5 = 1 \text{ K}\Omega$
- $R_6 = 10 \text{ K}\Omega$
- $C_1 = 10 \text{ pF}$
- $R_d = 1 \text{ K}\Omega$
- $R_{ss} = 500 \Omega$

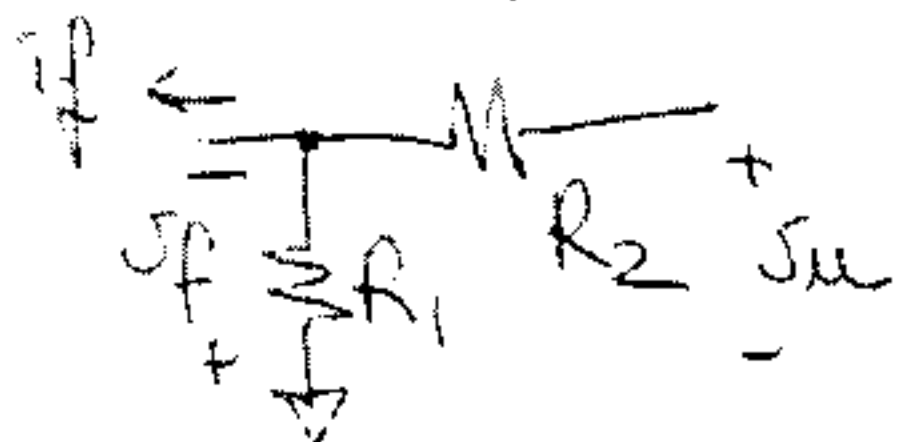


Punteggio totale Parte B: 14/30

1) Reazione con inserzione SERIE e prelievo parallelo



rete del β



$$v_f = \beta v_u + R_o \beta i_f$$

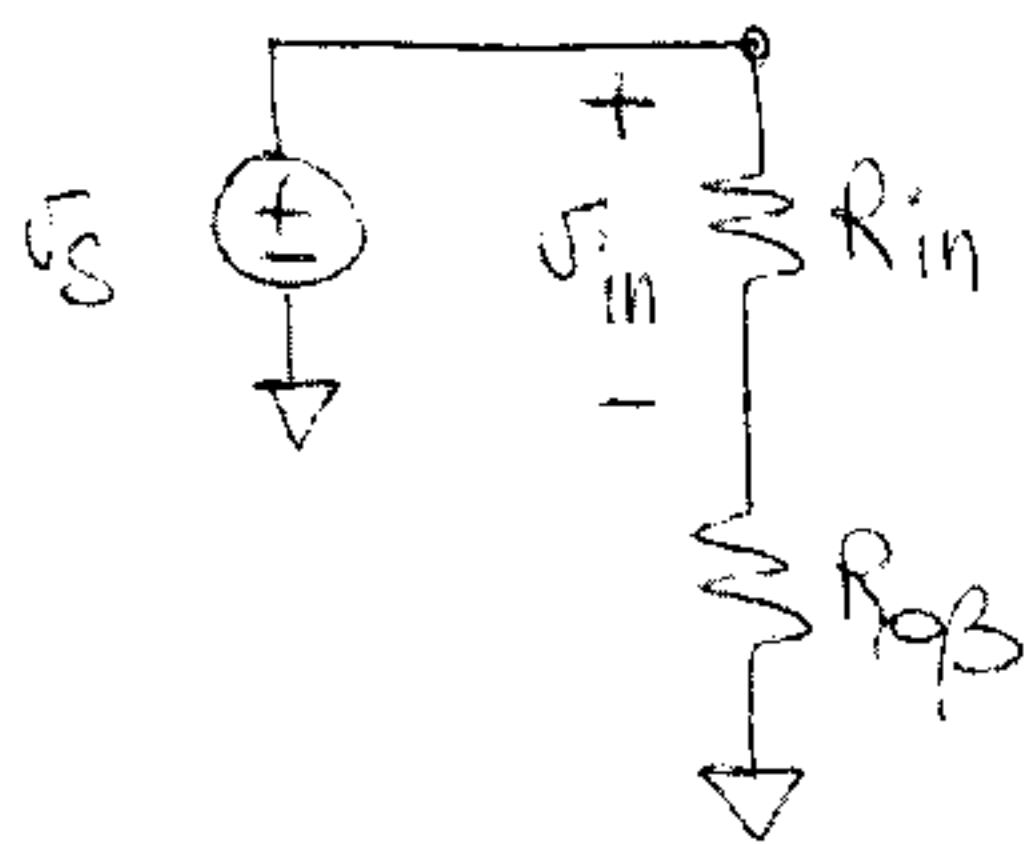
$$i_u = \frac{v_u}{R_{i\beta}} \leftarrow \times i_f$$

$$\beta = \left. \frac{v_f}{v_u} \right|_{f=0} = -\frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

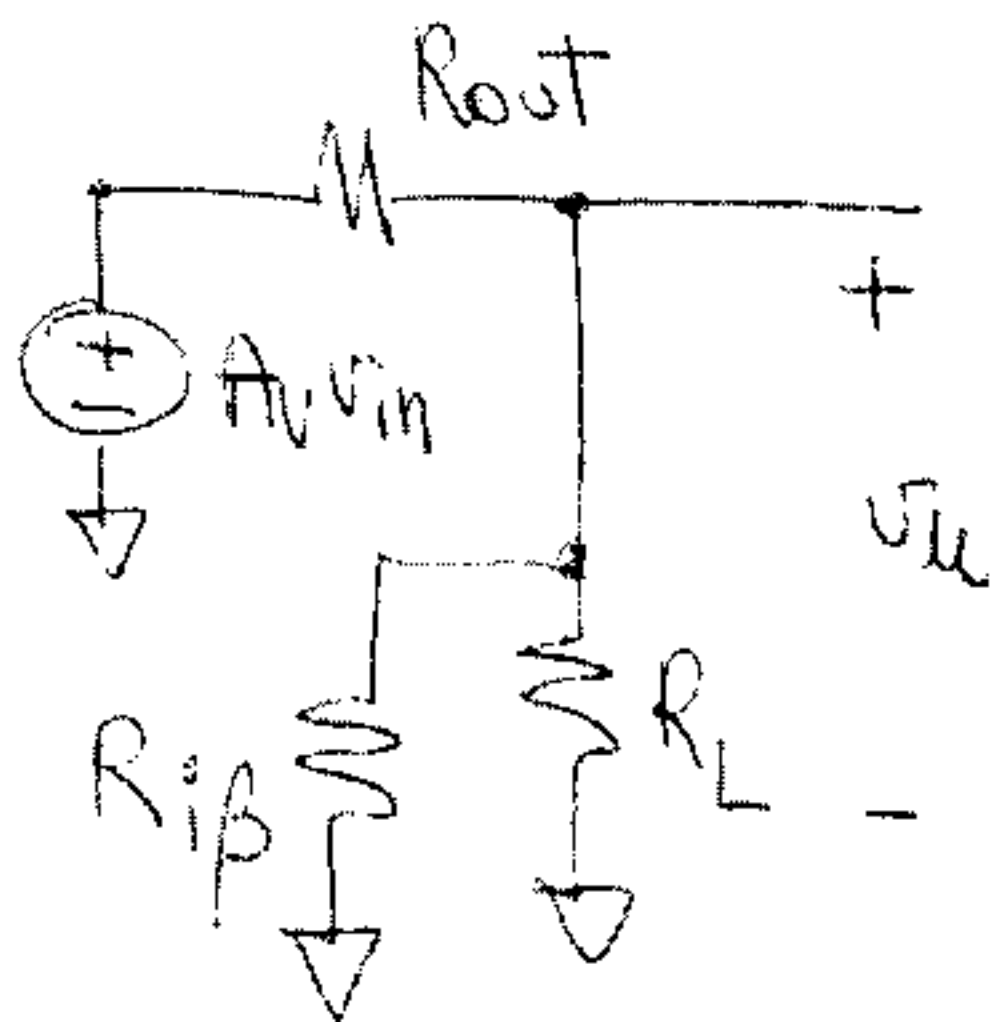
$$R_o \beta = \left. \frac{v_f}{i_f} \right|_{v_u=0} = R_1 \parallel R_2$$

$$R_{i\beta} = \left. \frac{v_u}{i_f} \right|_{\beta=0} = R_1 + R_2$$

rete di A_e



$$v_{in} = \frac{R_{in}}{R_{in} + R_o \beta} v_s$$



$$v_u = A_v v_{in} \frac{R_L \parallel R_{i\beta}}{R_{out} + R_L \parallel R_{i\beta}}$$

$$A_e = \left. \frac{v_u}{v_s} \right|_{\beta=0} = \frac{A_v \frac{R_L \parallel R_{i\beta}}{R_{out} + R_L \parallel R_{i\beta}}}{\frac{R_{in}}{R_{in} + R_o \beta}}$$

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

$$= [R_{in} + R_{o\beta}] \left[1 + \frac{R_1}{R_1 + R_2} A_v \frac{R_L // R_{i\beta}}{R_{out} + R_L // R_{i\beta}} \frac{R_{in}}{R_{in} + R_{o\beta}} \right] =$$

$$= R_{in} + R_{o\beta} + \frac{R_1}{R_1 + R_2} A_v \frac{R_L // R_{i\beta}}{R_{out} + R_L // R_{i\beta}} \frac{R_{in}}{R_{in} + R_{o\beta}}$$

\parallel
 $50k$

\uparrow 2000

\uparrow 800 \uparrow 200

\uparrow $50k$

poniamo $R_1 + R_2 = R_{i\beta} = 1000 \Omega$

abbiamo

$$R_{IF} = R_{in} + R_{o\beta} + \frac{R_1}{R_1 // R_2} \times A_{2000} \times \frac{167}{967} \times 50000 =$$

$$R_{IF} = 50000 + R_1 // R_2 + R_1 \cdot 17270$$

possiamo sicuramente trascurare $R_1 // R_2$ nella somma (da verificare)

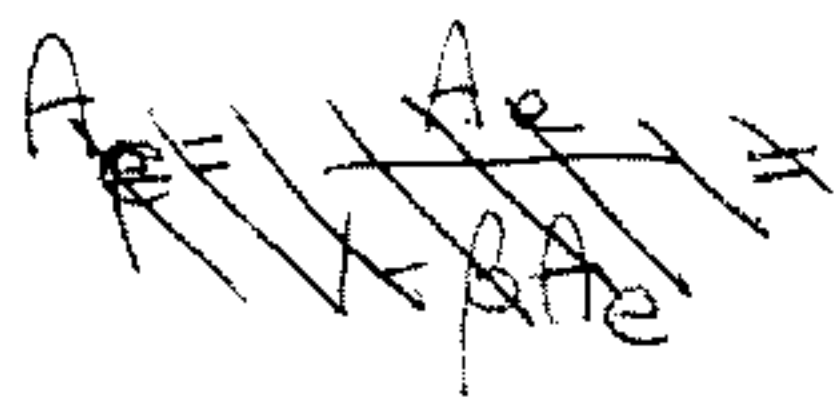
se poniamo $R_{IF} = 10 M\Omega$ otteniamo $R_1 = 576 \Omega$

quindi $R_2 = 424 \Omega$

si può verificare che $R_1 // R_2 \approx 244 \Omega$ è quindi trascurabile nella somma

$$R_{oF} = \frac{(R_{out} // R_{i\beta})}{(1 - \beta A_e)} = \frac{800 // 1000}{1 + \frac{R_1}{R_1 + R_2} A_v \frac{R_{i\beta}}{R_{i\beta} + R_{out}} \frac{R_{in}}{R_{in} + R_{i\beta}}} = \frac{444}{637} = 0.7 \Omega$$

$R_L \rightarrow \infty$



$$A_e = 343,7$$

$$\beta = -0,576$$

$$1 - \beta A_e = 200$$

$$A_{FO} = \frac{A_e}{1 - \beta A_e} = 1,718$$

$$f_H = f_p (1 - \beta A_e) = 150 \times 200 = 30 \text{ KHz}$$

$$A_F(\omega) = \frac{A_{FO}}{\left(1 + j \frac{\omega}{2\pi f_H}\right)}$$

2) Soglie

$$V_A = \frac{(V_2 + V_f) R_2}{R_1 + R_2} = \frac{(5,6 + 0,6) 10}{60} = 1,033 \text{ V}$$

$$V_B = -1,033 \text{ V}$$

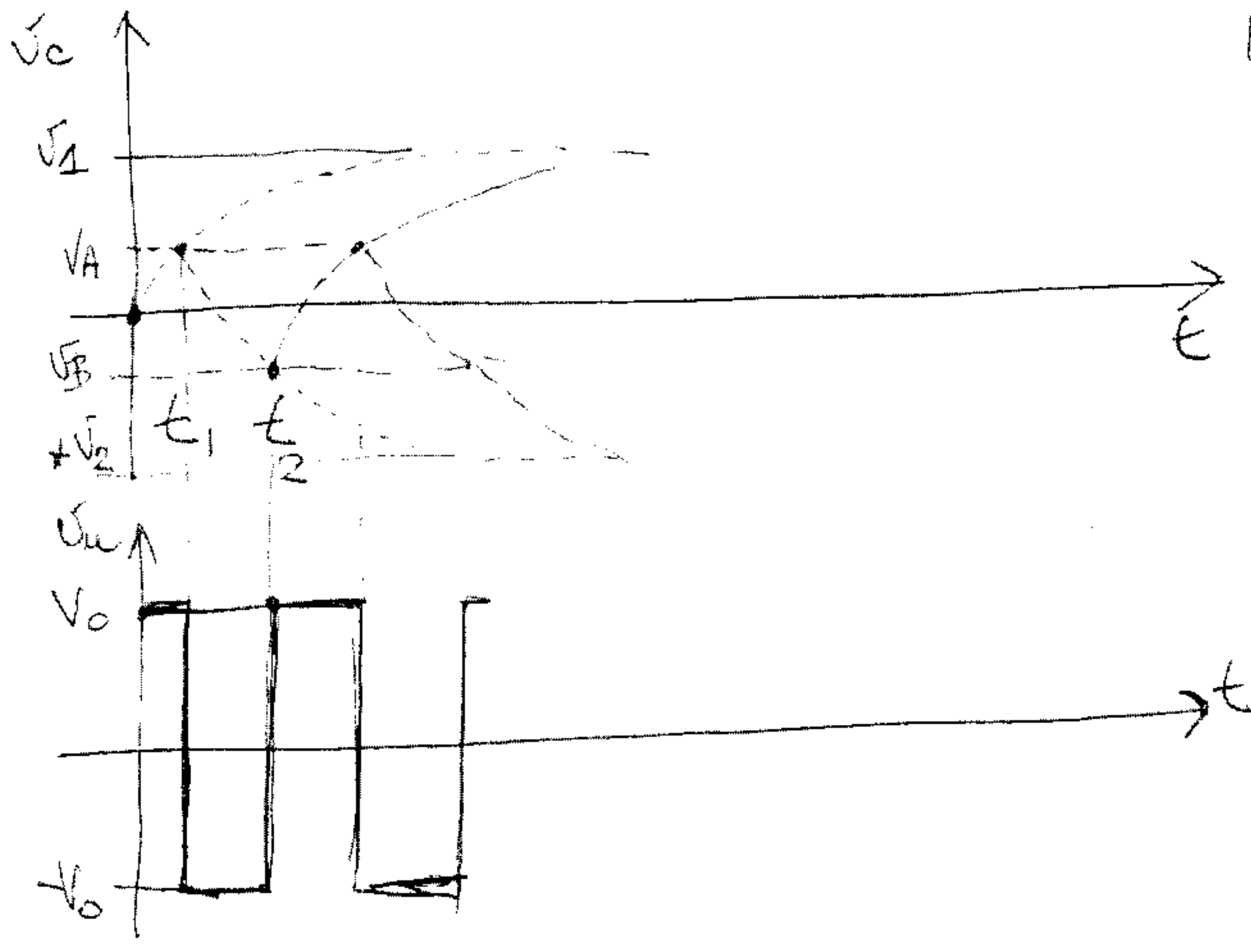
$$\tau \text{ (carica e scarica)} = R_4 // R_5 C = 5000 \cdot 47 \cdot 10^{-9} = 0,235 \text{ ms}$$

Asintoti nella carica della capacità

$$V_1 = \frac{(V_2 + V_f) R_5}{R_5 + R_4} = 3,1 \text{ V}$$

$$V_2 = -3,1 \text{ V}$$

supponiamo che in $t=0$
la capacità sia scarica
e $V_u = +V_2 + V_f = V_0$



Si ottiene un'onda quadra di ampiezza ~~V_0~~ V_0 (4)
 e di periodo T dove

$$\frac{T}{2} = t_2 - t_1$$

Scarica: ~~tra~~ per $t_1 < t < t_2$

$$V_c(t) = (V_A + V_2) e^{-\frac{t-t_1}{\tau}} + V_2$$

per t_2 abbiamo

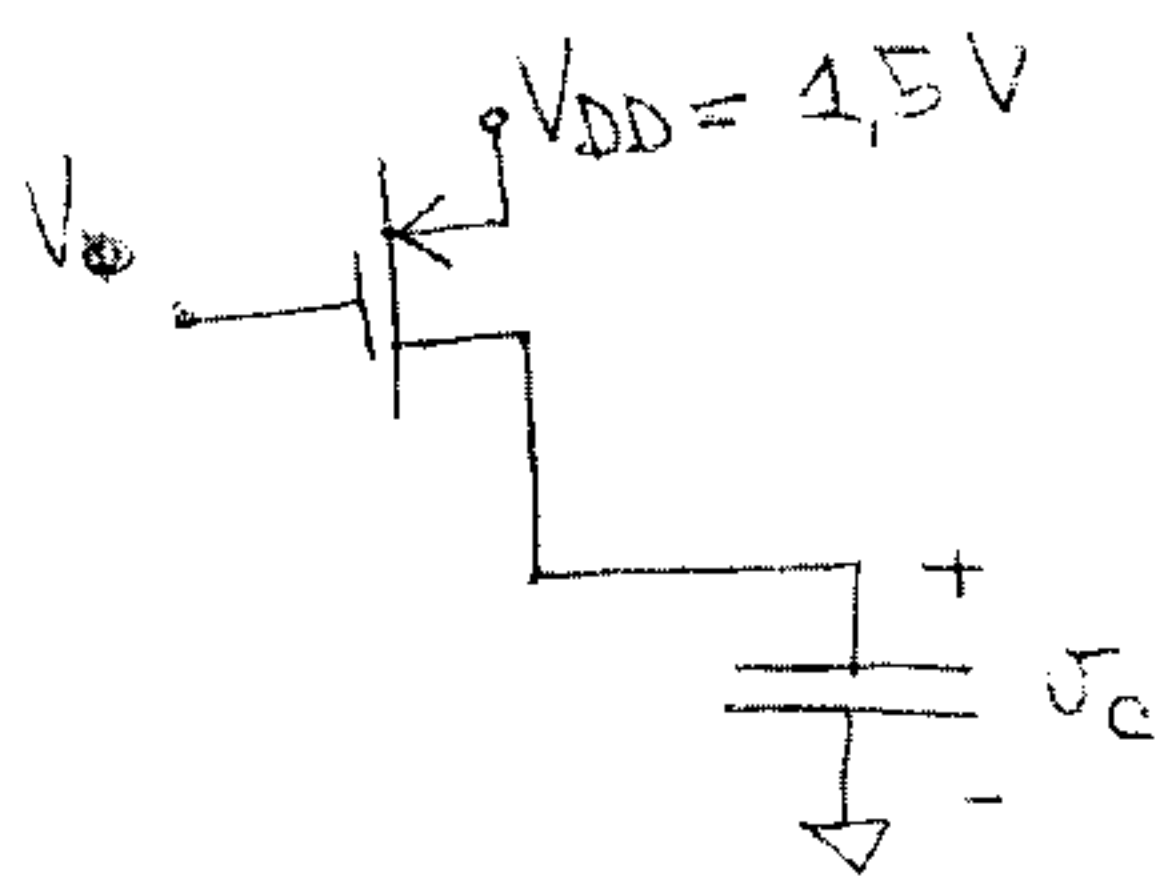
$$V_B = V_c(t_2) = (V_A + V_2) e^{-\frac{t_2-t_1}{\tau}} + V_2$$

$$\tau \ln\left(\frac{V_B + V_2}{V_A + V_2}\right) = -T/2$$

$$T = 2\tau \ln\left(\frac{V_A + V_2}{V_B + V_2}\right) = 0.47 \cdot 10^{-3} \ln\left(\frac{1.033 + 3.1}{-1.033 + 3.1}\right) = 0.325 \text{ ms}$$

3) Controllare sugli appunti delle lezioni

4) Nella commutazione da basso ad alto conduce solo il transistor P_{max}



$$V_c(0) = 0$$

Definiamo prima di tutto il tempo di propagazione: \checkmark
 il tempo di propagazione t_{pLH} è il tempo necessario all'uscita
 per passare dal valore basso al 50% del valore alto
 dell'uscita stessa.

All'istante della commutazione, supponiamo $t=0$, abbiamo

$$v_c(0) = v_o(0) = 0$$

$$V_{GS}(0) = -V_{DD} \quad (\text{costante nel tempo})$$

$$V_{DS}(0) = v_c(0) - V_{DD} = -V_{DD}$$

Il PMOS è quindi in saturazione, dato che

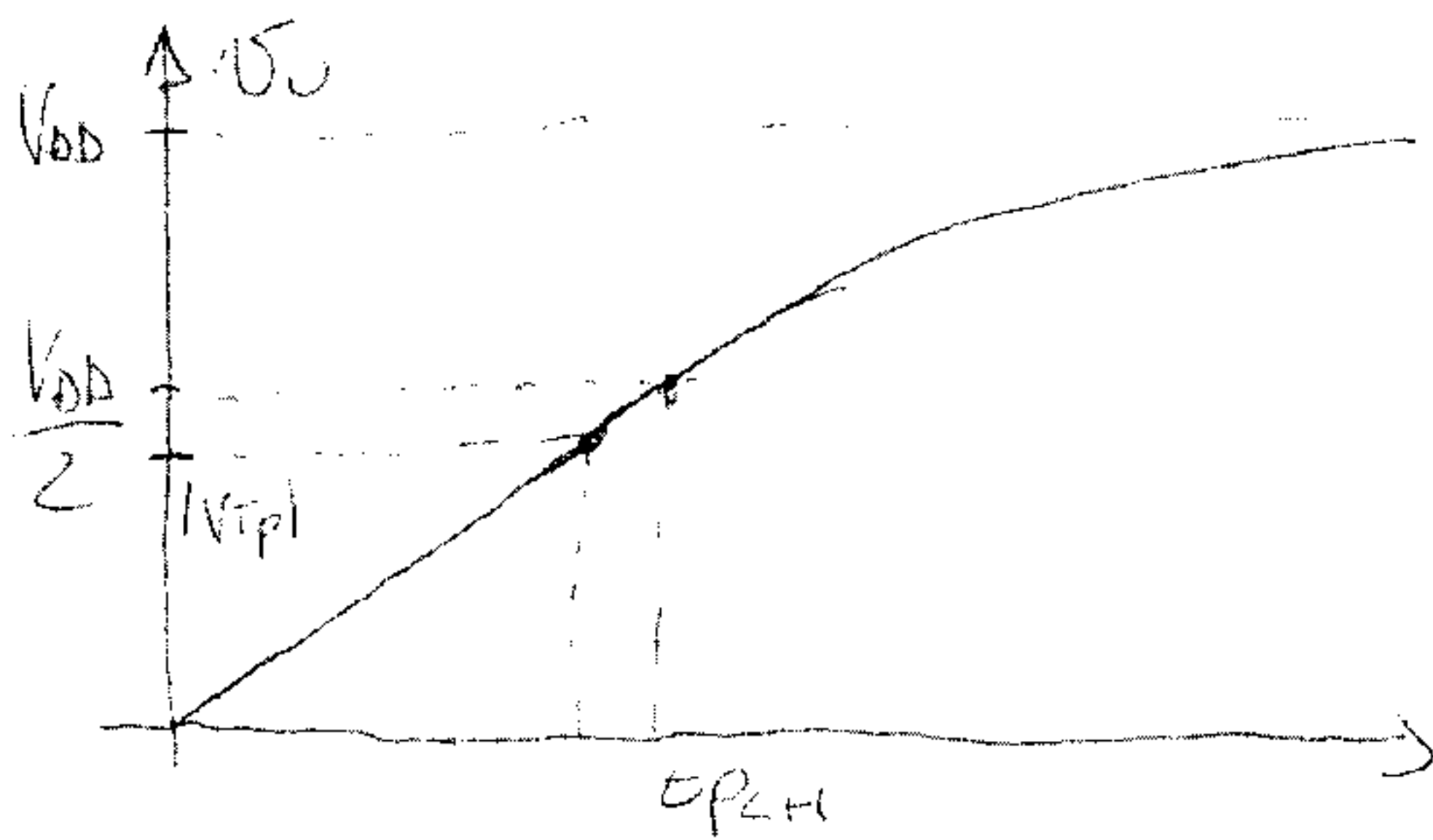
$$|V_{DS}| \geq |V_{GS}| - |V_{TP}|$$

Il condensatore comincia quindi a caricarsi con corrente
 costante, per cui

$$i_{DS}(t) = -K_p (V_{GS} - V_{TP})^2$$

Quindi il condensatore comincia a caricarsi con corrente
 costante e quindi con una tensione $v_c(t)$ che varia linearmente
 con il tempo, visto che

$$v_c(t) = \frac{1}{C} \int i_c(t) dt \implies v_c(t) = \frac{I_{DS}}{C} t$$



Il PMOS è in saturazione
 fino a quando

$$|V_{DS}| \geq |V_{GS}| - |V_{TP}|$$

$$|V_{DD} - v_c| \geq V_{DD} - |V_{TP}|$$

Ossia

$$v_c \leq |V_{TP}| = 0,5 V$$

All'istante t_{pLH} il PMOS è in zona triodo visto che

$$\frac{V_{DD}}{2} > |V_{TP}|$$

Calcoliamo anche la corrente all'istante t_{pLH}

①

$$i_{DS}(t_{pLH}) = -2K_p \left[(V_{GS} - V_{TP}) \frac{V_{DD}}{2} - \frac{V_{DD}^2}{8} \right]$$

Come visto e lezione prendiamo i valori medi.

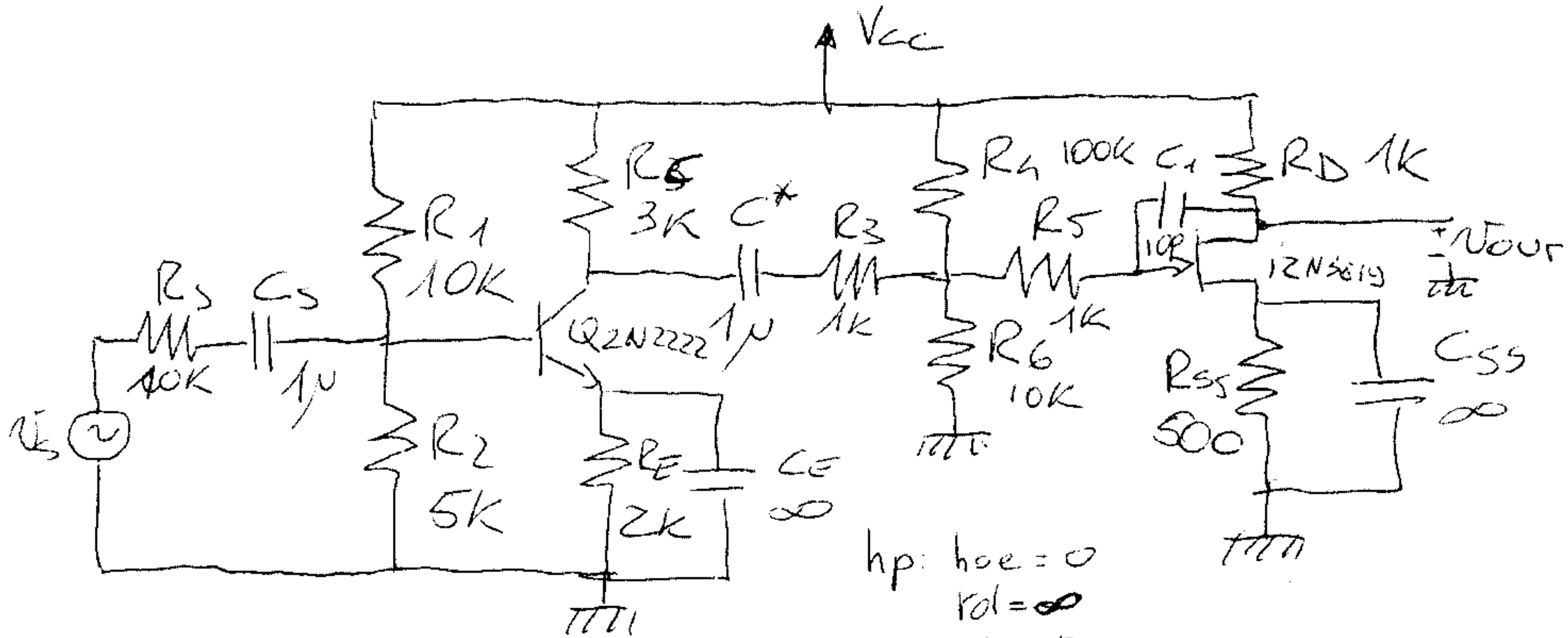
$$i_{DS_{AV}} = \frac{i_{DS}(0) + i_{DS}(t_{pLH})}{2}$$

e quindi, $\frac{\Delta V_U}{\Delta t} = - \frac{i_{DS_{AV}}}{C}$

t_{pLH} ricavare allora facilmente.

$$\frac{\Delta V_U}{\Delta t} = \frac{V_{DD}/2}{t_{pLH}} \Rightarrow t_{pLH} = \frac{V_{DD}/2}{|i_{DS_{AV}}|/C} = \frac{V_{DD}}{2} \cdot \frac{C}{|i_{DS_{AV}}|}$$

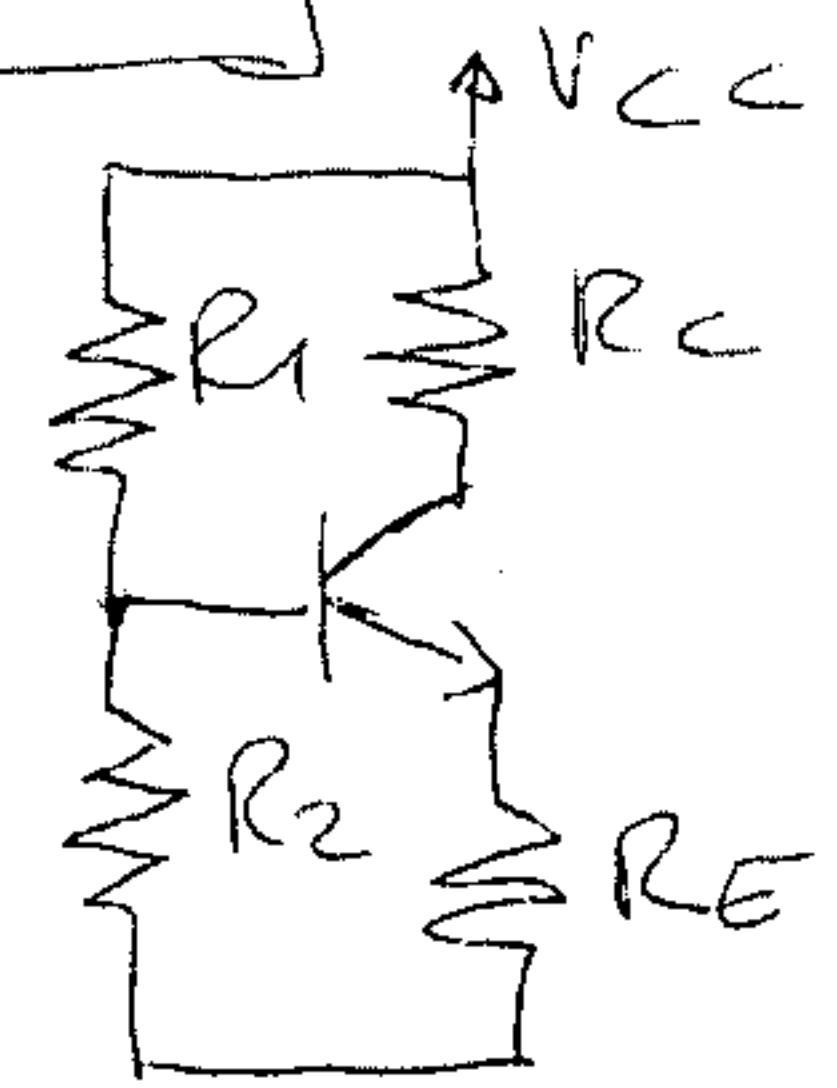
$$t_{pLH} = 77,42 \text{ psec.}$$



PUNTO DI RIPOSO

I due stadi sono disaccoppiati dalla capacit  C^* , quindi studiamo due circuiti separati.

BJT.



Facciamo come al solito l'ipotesi di partitore pesante. $I_B \ll I_{R1, R2}$

$$V_B = \frac{V_{CC}}{R_1 + R_2} \cdot R_2 \approx 5V$$

Segue $V_E = V_B - V_{BE} = 4,3V$, da cui

$$I_E = \frac{V_E}{R_E} = 2,15 mA$$

$$V_{CE} = V_{CC} - (R_C + R_E) I_E = 4,25V \text{ (BJT in zona attiva diretta)}$$

$$I_B = \frac{I_C}{h_{FE}} \quad h_{FE} @ 2,15mA \approx 150 \text{ (da caratteristiche)}$$

$$I_B = \frac{I_C}{h_{FE}} = 14,3 \mu A$$

$$I_{R1, R2} = \frac{V_{CC}}{R_1 + R_2} = 1mA$$

} Verificato partitore pesante

Calcoliamo i parametri di piccolo segnale.

$$h_{fe} \approx 175 \text{ (da caratteristiche)}$$

Calcolo di r_b

$$h_{ie} @ 1mA = 5K \Omega = r_b + \frac{h_{fe}}{g_m @ 1mA} = r_b + \frac{175}{1mA / 25,9mV} \Rightarrow$$

$$r_b = 450 \Omega$$

$$h_{ie} @ 2,15 \text{ mA} = r_b + r_{\pi} = r_b + \frac{V_T}{I_C} \quad h_{fe} = 2,55 \cdot K \Omega$$

$$g_m = \frac{I_C}{V_T} = 83 \text{ mS}$$

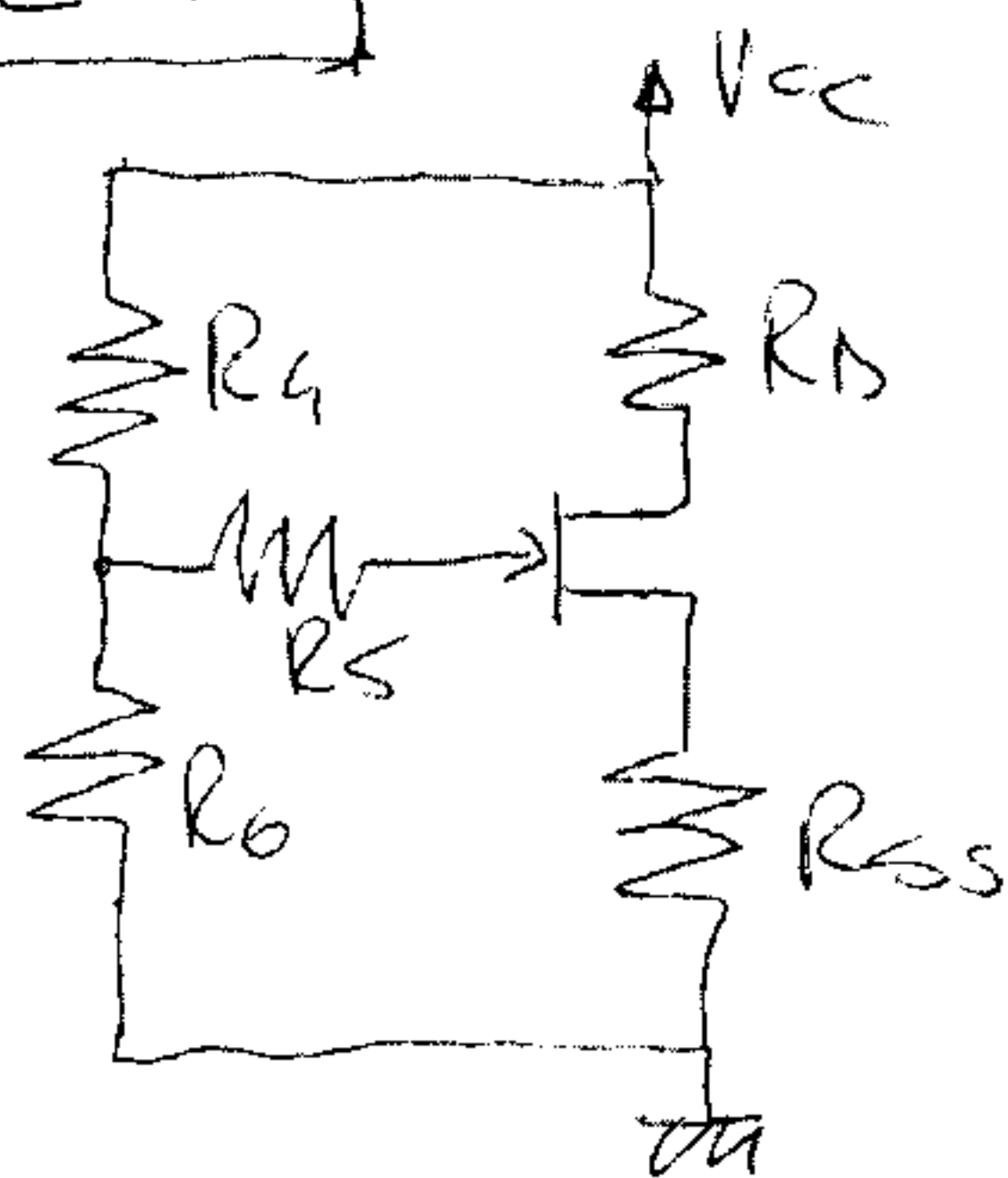
$$V_{CB} = V_{CE} - V_{BE} = 3,55 \text{ V}$$

$$f_T \approx 150 \text{ MHz}$$

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

$$C_{\pi} = \frac{g_m}{2\pi f_T} - C_{\mu} = 83 \text{ pF}$$

JFET



$$V_{GS \text{ off}} = -3$$

$$V_G = \frac{V_{CC}}{R_4 + R_6} \cdot R_6 = 1,36 \text{ V}$$

$$V_{GS} = V_G - R_{SS} I_{DS}$$

$$\begin{cases} V_{GS} = -1 \text{ V} \\ I_{DS} = 4,8 \text{ mA} \end{cases}$$

$$V_{DS} = V_{CC} - (R_D + R_S) I_{DS} = 7,65 \text{ V}$$

$V_{DS} \gg V_{GS} - V_{GS \text{ off}}$ per la zona di saturazione
 $7,65 \text{ V} \gg 2 \text{ V}$ verificata!

$$g_m = 4,7 \text{ mS}$$

$$C_{iss} \approx 2,5 \text{ pF} \quad C_{rss} \approx 1,2 \text{ pF}$$

$$C_{GS} \approx 1,3 \text{ pF} \quad C_{GD} \approx 1,2 \text{ pF}$$

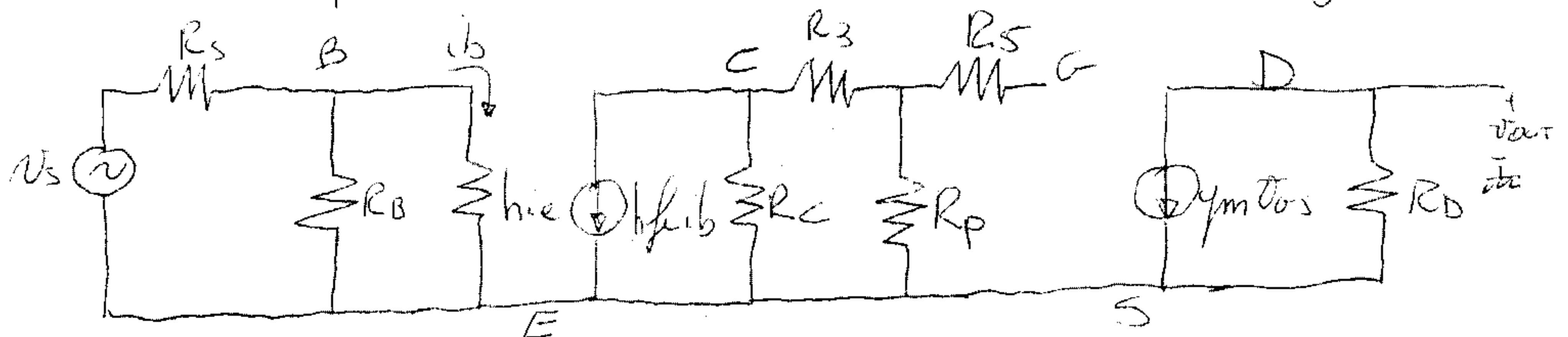
I valori sono presi da caratteristiche e sono solo indicativi

AMPLIFICAZIONE DI CENTRA BANDA.

Prima di tutto dobbiamo verificare il ruolo delle varie capacità presenti nel circuito.

- C_E e C_{SS} sono da considerare sempre cortocircuiti, hanno un valore molto alto di capacità.
- C_S e C^* sono capacità di disaccoppiamento e dato il loro valore è ragionevole pensare che intervengano alle basse frequenze.
- La capacità C_1 ha un valore dell'ordine dei pF, quindi comparabile con le capacità intrinseche del JFET e del BJT. L'unico effetto che ha è di finire in parallelo a C_{GD} , quindi in pratica è come avere un JFET con una $C'_{GD} = C_{GD} + C_1 = 11,2 \text{ pF}$.

Il circuito per lo studio a centro banda è il seguente



$$R_B = R_1 // R_2 = 3,33 \text{ K}\Omega$$

$$R_p = R_4 // R_0 = 9 \text{ K}\Omega$$

$$v_{out} = -g_m v_{gs} R_D$$

$$v_{gs} = v_G = -h_{fe} i_b \cdot \left[\frac{R_C \cdot R_p}{R_C + R_3 + R_p} \right]$$

$$i_b = \frac{v_s}{R_s + R_B // h_{ie}} \cdot \frac{R_B // h_{ie}}{h_{ie}}$$

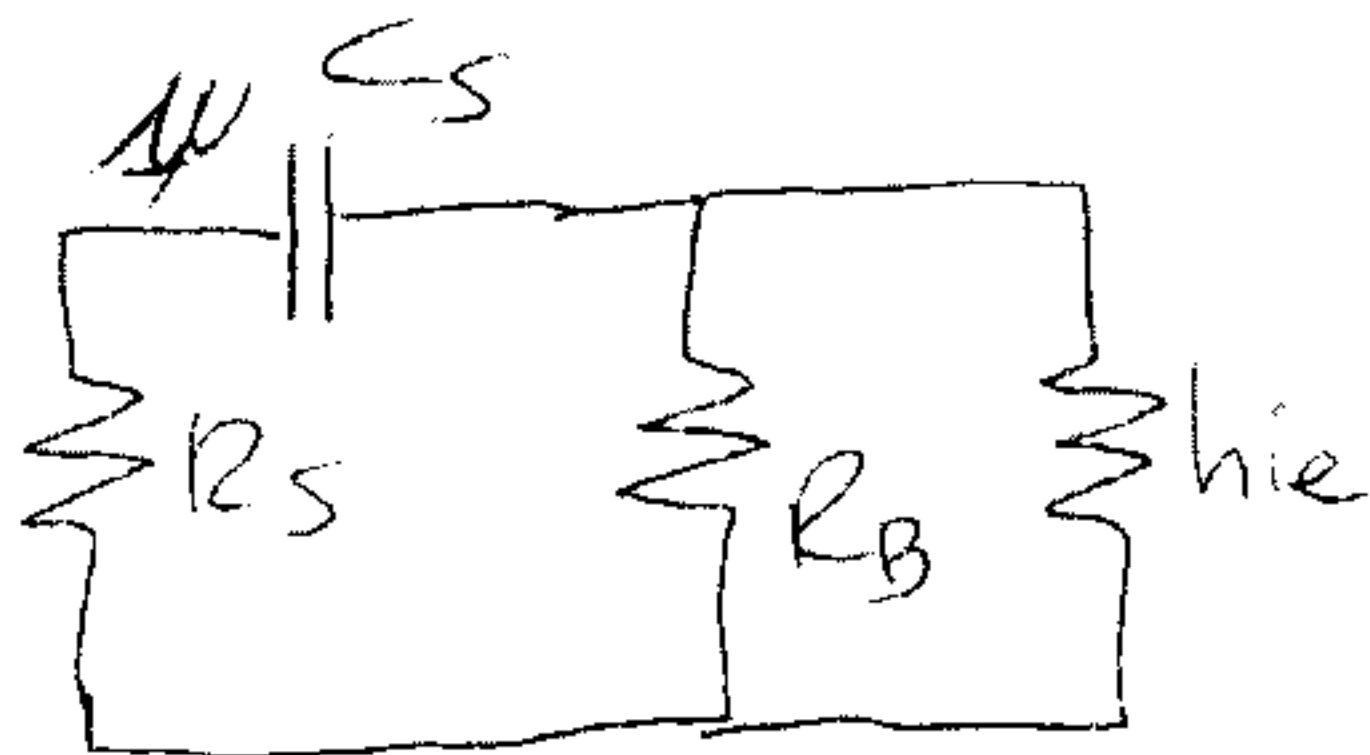
$$v_{out} = \frac{g_m R_D h_{fe} (R_C \cdot R_p)}{R_C + R_3 + R_p} \cdot \frac{R_B // h_{ie}}{h_{ie} (R_s + R_B // h_{ie})} \cdot v_s$$

Da cui infine:

$$A_{CB} = \frac{V_{out}}{V_S} = 84,5$$

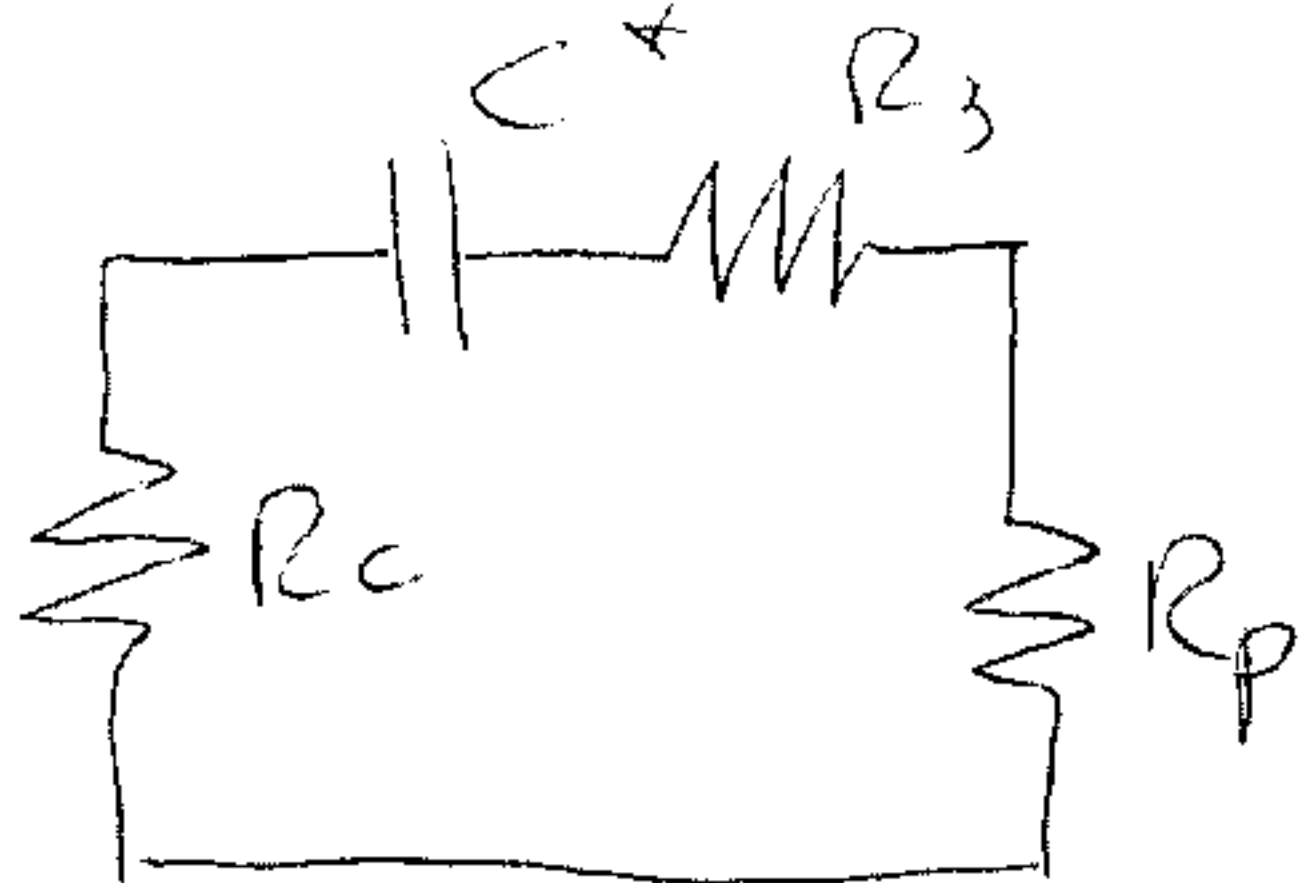
FREQUENZA DI TAGLIO INFERIORE

Calcoliamo il contributo di C_S



$$R_{V_{C_S}} = R_S + (R_B // h_{ie}) = 11,4 \text{ k}\Omega$$

Calcoliamo adesso il contributo di C^*



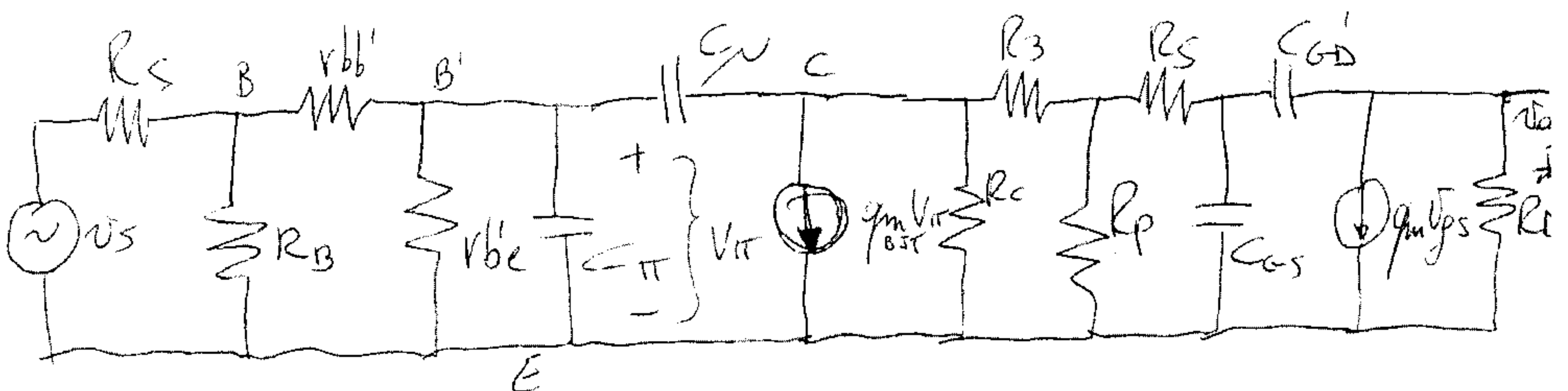
$$R_{V_{C^*}} = R_3 + R_C + R_P = 13 \text{ k}\Omega$$

$$f_L = \frac{1}{2\pi} \sum \frac{1}{R_{V_{C_i}} \cdot C_i} = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{1}{R_{V_{C_S}} \cdot C_S} + \frac{1}{R_{V_{C^*}} \cdot C^*} \right]$$

$$f_L = 26 \text{ Hz}$$

FREQUENZA DI TAGLIO SUPERIORE

Disegniamo il circuito alle alte frequenze.



Cominciamo con $R_{V_{CE\pi}}$ ($r_{b'e} = r_{\pi}$ e $r_{bb'} = r_b$)

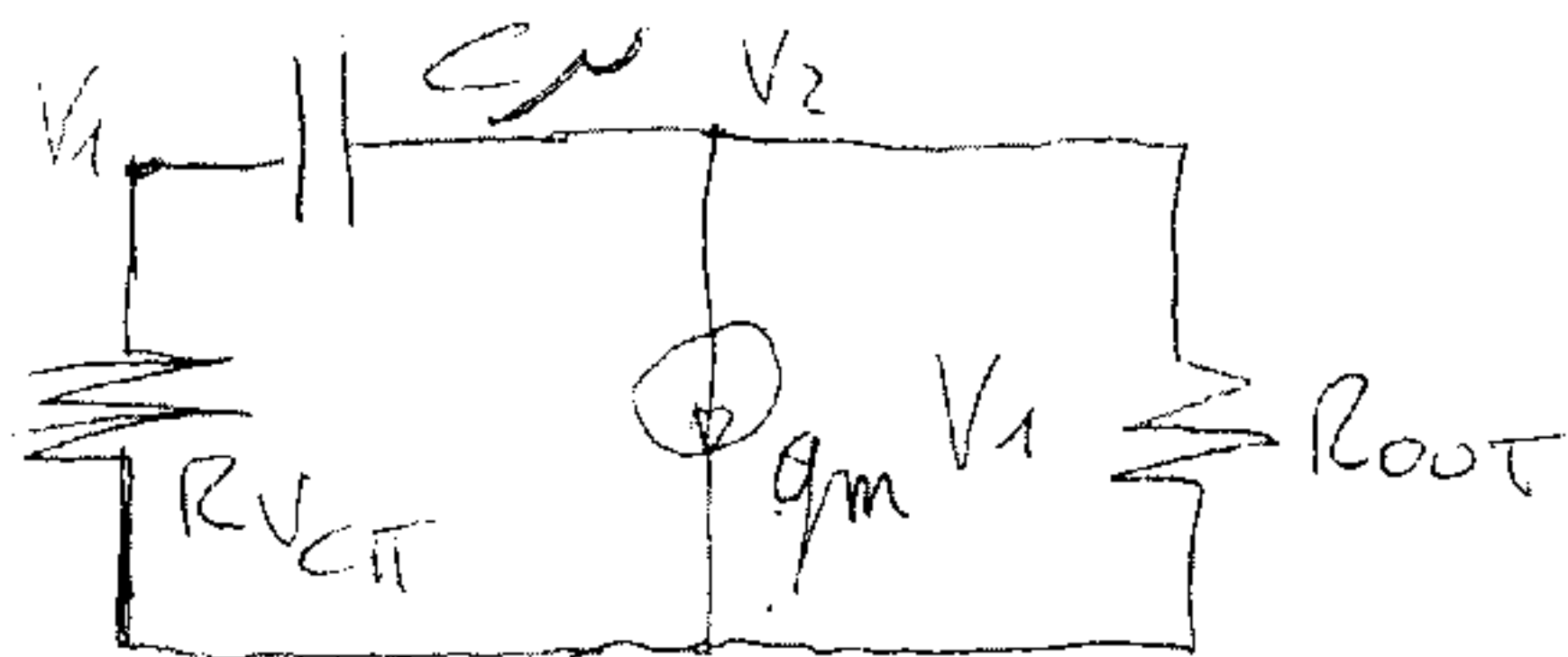
$$R_{V_{CE\pi}} = r_{b'e} // [r_{bb'} + R_B // R_S] =$$

$$r_{b'e} = r_{\pi} = 2,1 \text{ k}\Omega$$

$$r_{bb'} = r_b = 450 \Omega$$

$$R_{V_{CE\pi}} = 1,22 \text{ k}\Omega$$

Vediamo adesso il contributo di C_{μ}



$$R_{oot} = R_c // [R_3 + (R_p \text{ ~~XXXXXXXXXX~~})] = 2,3 \text{ k}\Omega$$

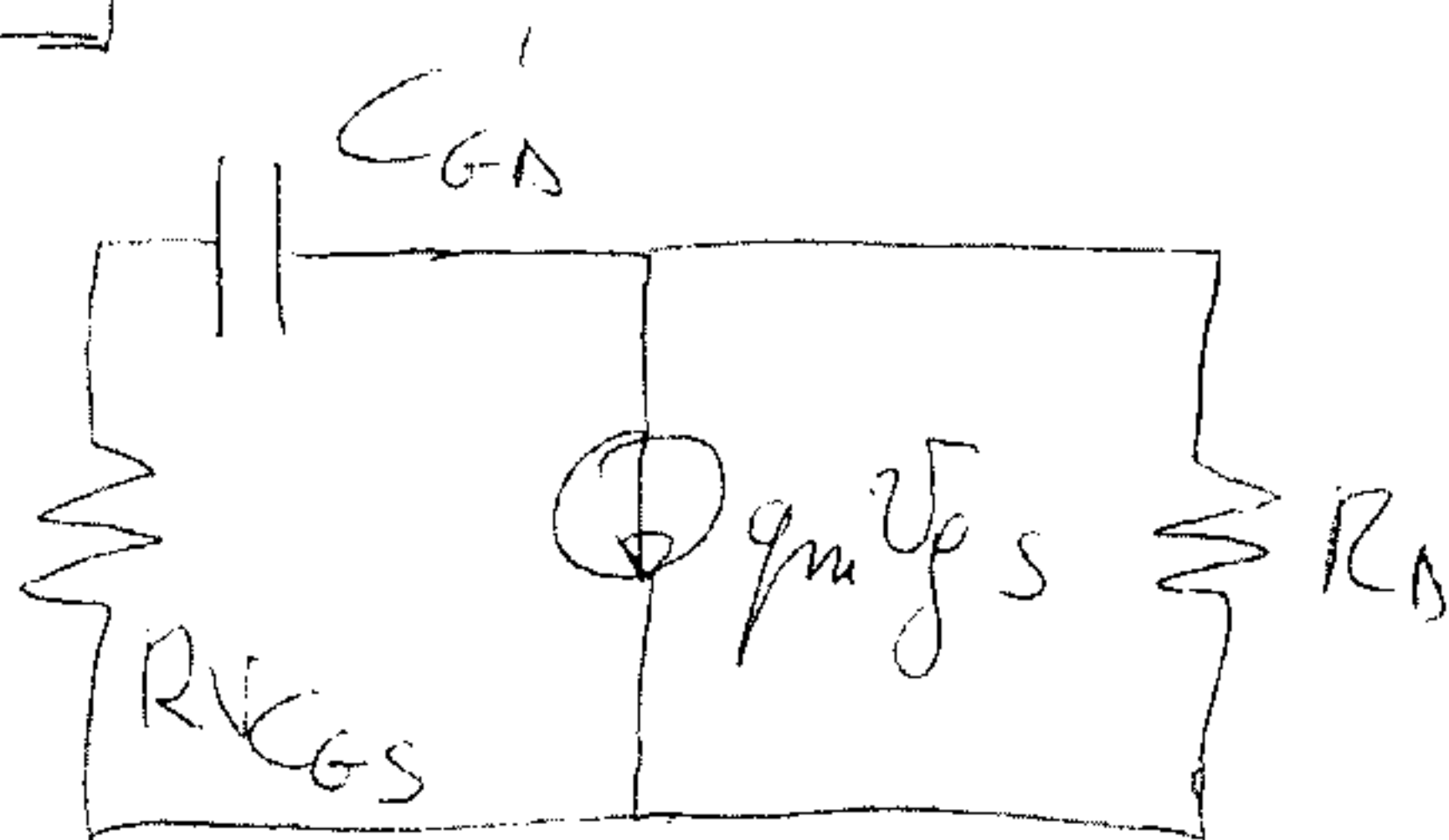
$$A_v = g_m R_{oot} = 190$$

$$R_{V_{C\mu}} = R_{V_{CE\pi}} (1 + A_v) // R_{oot} = 236,5 \text{ k}\Omega$$

C_{GS}

$$R_{V_{C_{GS}}} = R_S + [R_p // (R_3 + R_c)] = 3,77 \text{ k}\Omega$$

C_{GD}



con lo stesso procedimento
to usato per C_{μ}
troviamo

$$R_{V_{C_{GD}}} = R_{V_{C_{GS}}} (1 + g_m R_D) + R_D = 22,5 \text{ k}\Omega$$

$$f_L = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{R_{V_{CE\pi}} C_{\pi} + R_{V_{C\mu}} C_{\mu} + R_{V_{C_{GS}}} C_{GS} + R_{V_{C_{GD}}} C_{GD}} \right) = 121 \text{ kHz}$$