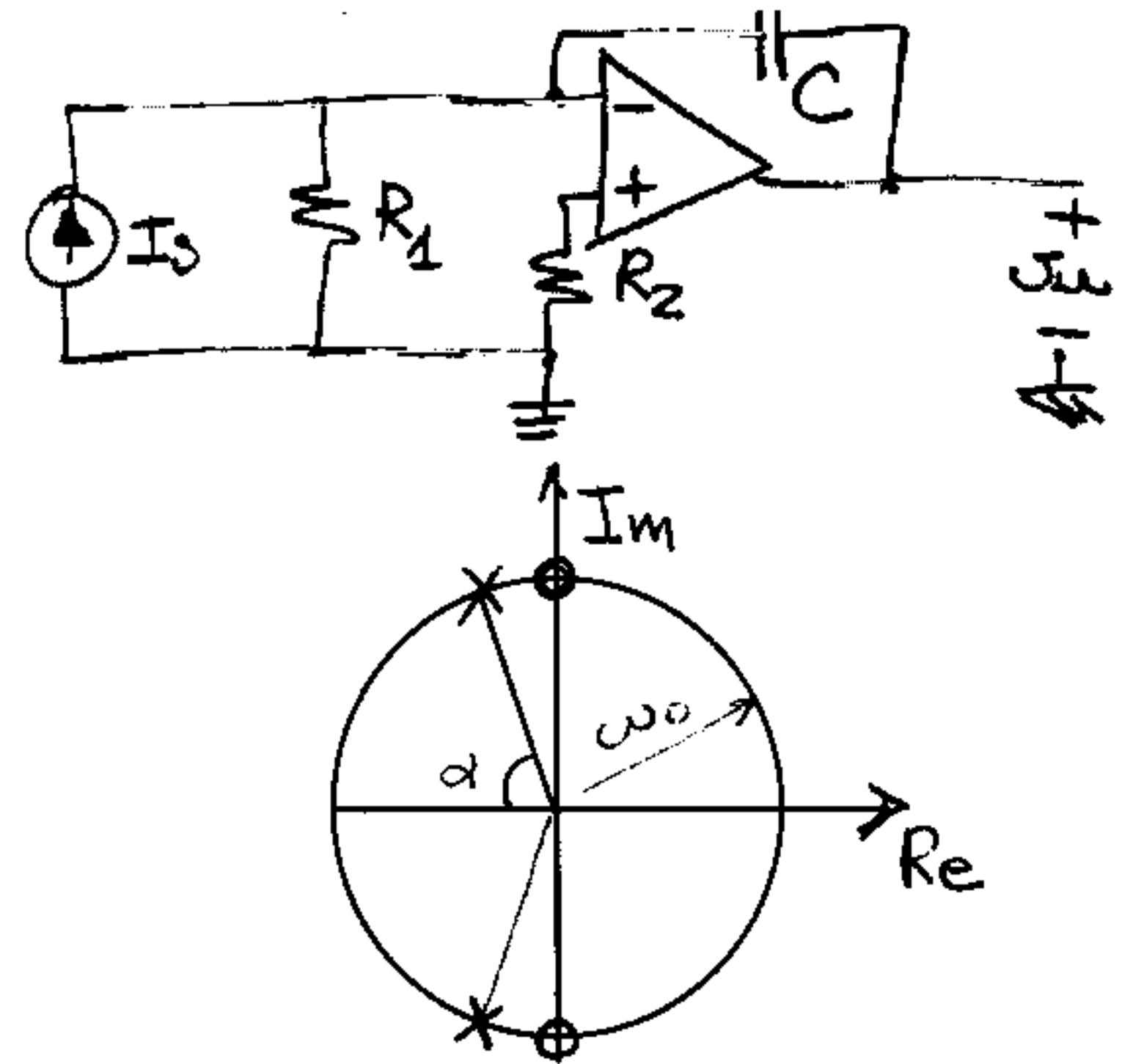


Parte A

1. Calcolare, giustificando il procedimento, l'impedenza di ingresso del circuito a lato, e disegnarne il diagramma di Bode. Dati: $R_1=10\text{ K}\Omega$, $R_2 = 5\text{ K}\Omega$, $C = 10\ \mu\text{F}$; l'amplificatore operazionale ha impedenza di ingresso infinita, impedenza di uscita nulla, amplificazione di tensione $A_v = 2000$.
2. Disegnare e dimensionare lo schema del circuito elettronico che abbia le singolarità indicate a lato ($\omega_0=2\text{ KHz}$, $\alpha=60^\circ$), giustificando il procedimento (la crocetta indica un polo, il cerchio uno zero).
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



Parte B

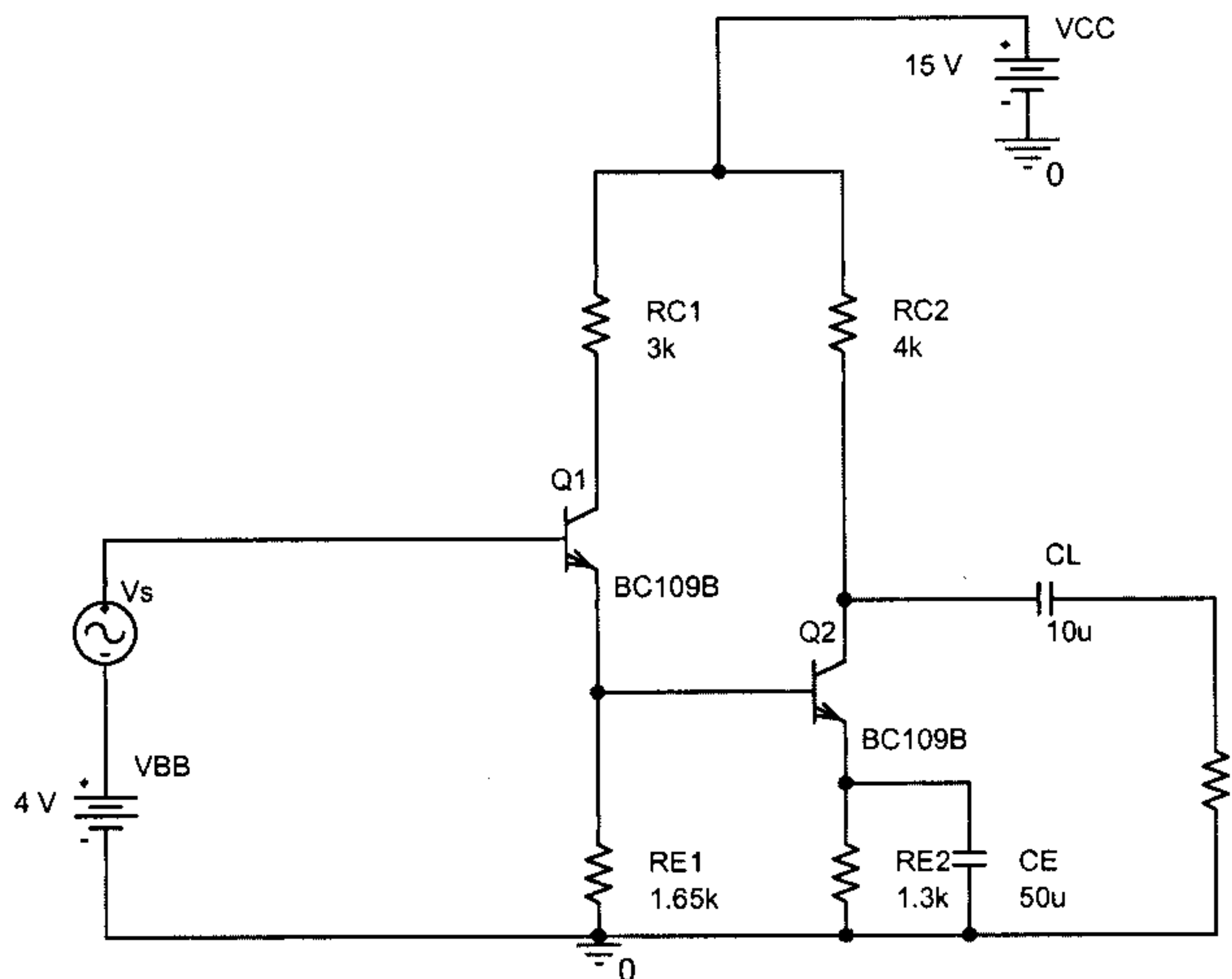
Con riferimento al circuito mostrato a lato, calcolare:

- 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 superiore di banda
- il limite inferiore di banda

Assunzioni semplificative:

- considerare $h_{oe} = 0$ e $h_{re}=0$ per i due transistori.
- Considerare Q1 resistivo

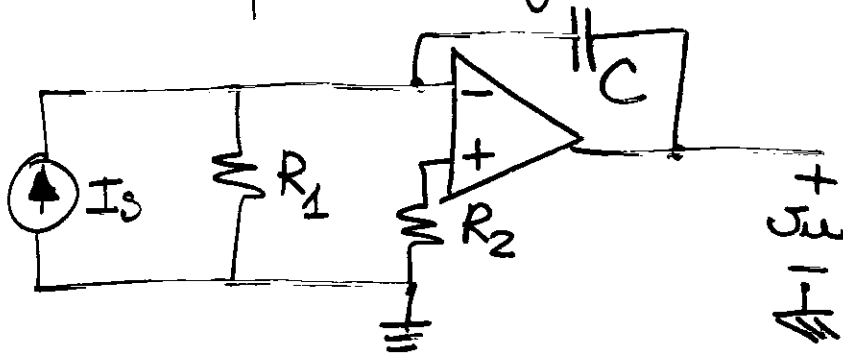
Punteggio totale Parte B: 14/30



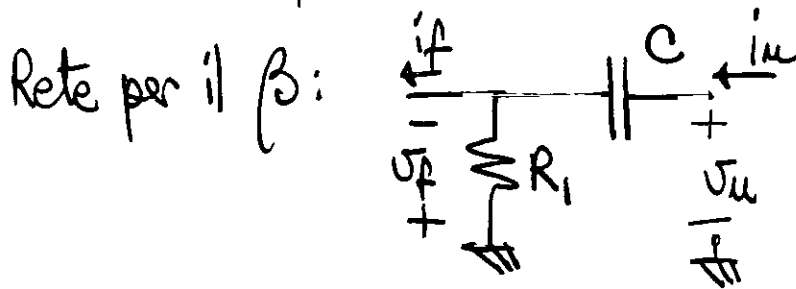
Parte A

Esercizio 1

Calcolare l'impedenza d'ingresso del circuito



Reazione con prelievo di tensione e inserzione di corrente



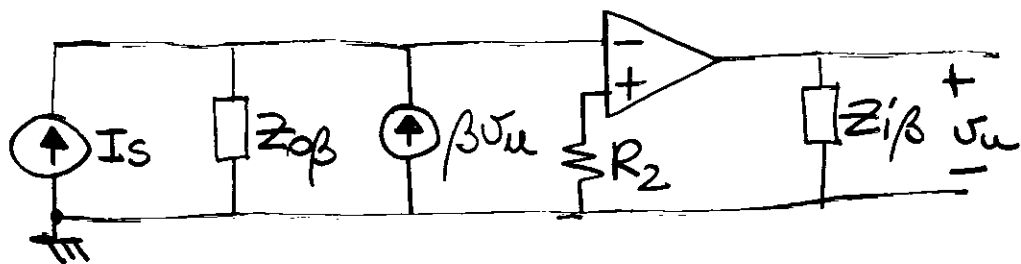
$$i_f = \beta v_u + \frac{v_f}{R_o \beta}$$

$$i_u = \frac{v_u}{R_i \beta} + K \frac{v_f}{f}$$

$$\beta = \frac{i_f}{v_u} \Big|_{v_f=0} = Cs \quad R_i \beta = \frac{v_u}{i_u} \Big|_{v_f=0} = \frac{1}{Cs}$$

$$Z_{o\beta} = \frac{v_f}{i_f} \Big|_{v_u=0} = R_1 \parallel \frac{1}{Cs} = \frac{R_1}{R_1 Cs + 1}$$

②



$$A_e = \frac{V_u}{I_s} = -Z_o\beta A_v$$

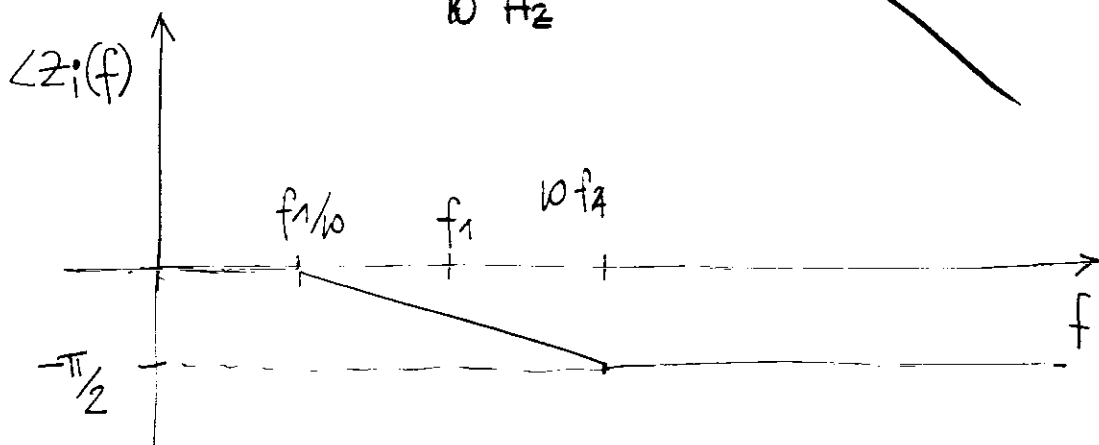
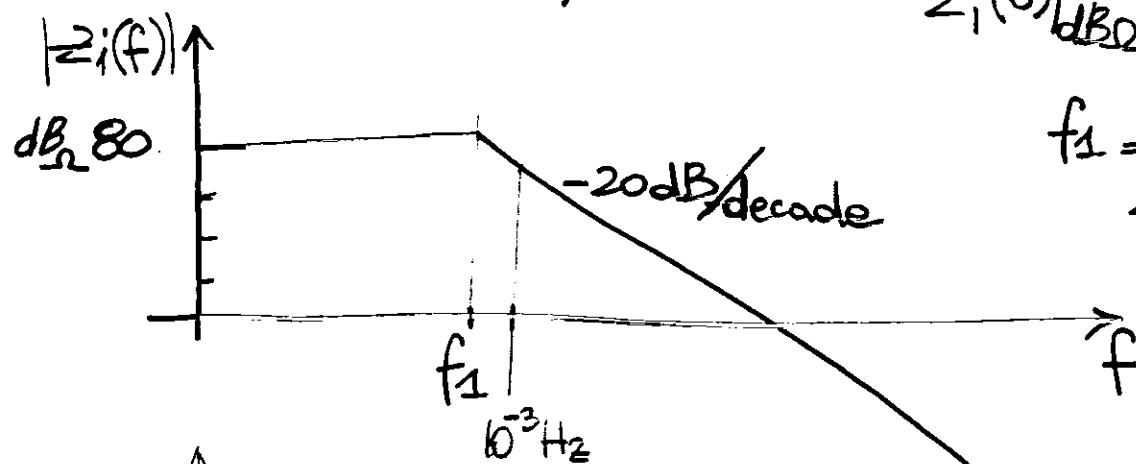
$$Z_i = \frac{Z_o\beta}{1 - \beta A_e} = \frac{Z_o\beta}{1 + C_s Z_o\beta A_v} = \frac{R_1}{R_1 C_s + 1 + R_1 C_s A_v}$$

$$= \frac{R_1}{1 + R_1 C_s (A_v + 1) s}$$

$$Z_i(0) |_{dB_{\Omega}} = 20 \log 10^4 = 80$$

$$f_1 = \frac{1}{2\pi R_1 C_s (A_v + 1)}$$

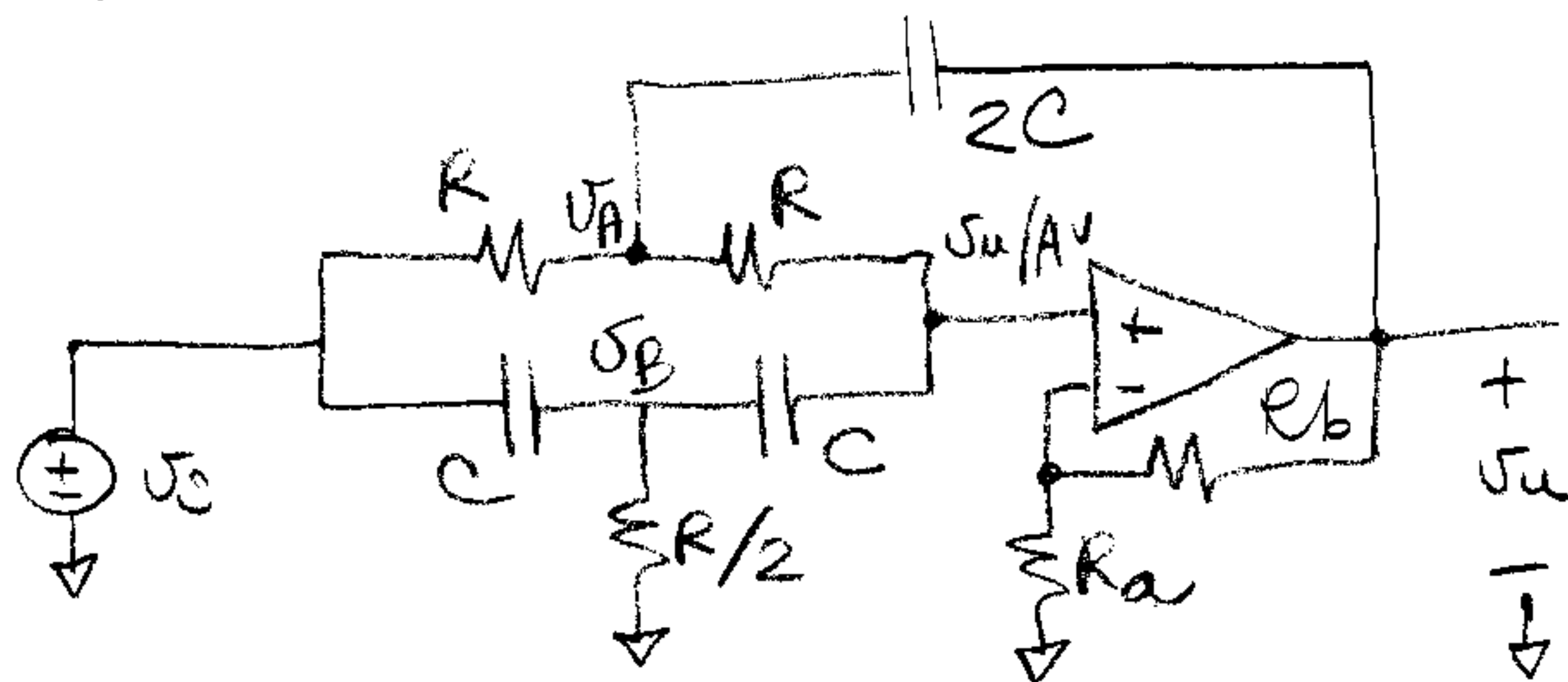
$$= 7.96 \times 10^{-4} \text{ Hz}$$



Esercizio 1

3

il circuito con le singolarità indicate è un filtro selettivo di banda
e si può realizzare con un filtro a doppio T



$$A_v = 1 + \frac{R_b}{R_a}$$

$$1) \quad V_A \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R} + 2Cs \right) - V_S \frac{1}{R} - \frac{V_u}{A_v R} - V_u 2Cs$$

$$2) \quad V_B \left(2Cs + \frac{2}{R} \right) - V_S Cs - \frac{V_u}{A_v} Cs = 0$$

$$\frac{V_u}{A_v} = \frac{V_A \frac{1}{Cs} + V_B R}{\frac{1}{Cs} + R} = \frac{V_A + V_B R Cs}{1 + R Cs}$$

$$(1) + R Cs (2) =$$

$$(V_A + V_B R Cs) \left(\frac{2}{R} + 2Cs \right) - \frac{V_S}{R} - V_S Cs R Cs - \frac{V_u}{A_v R} (1 + Cs R Cs) - V_u 2Cs = 0$$



$$2 \frac{V_u}{A_v} (1 + R Cs) (1 + R Cs) - V_S (1 + (R Cs)^2) - \frac{V_u}{A_v} (1 + (R Cs)^2) - V_u 2R Cs = 0$$

$$\frac{V_u}{A_v} \left[2 + 4R Cs + 2(R Cs)^2 - 1 - (R Cs)^2 - 2A_v R Cs \right] = V_S (1 + (R Cs)^2)$$

$$\frac{V_u}{V_S} = \frac{A_v [1 + (R Cs)^2]}{(R Cs)^2 + (4 - 2A_v) R Cs + 1}$$

Possiamo scrivere la funzione di Trasferimento come

4

$$H(s) = \frac{H(0) \left(1 + \frac{s^2}{\omega_0^2}\right)}{1 + \frac{s}{Q\omega_0} + \frac{s^2}{\omega_0^2}}$$

$$\rightarrow \omega_0 = \frac{1}{RC}$$

$$Q = \frac{1}{2(2 - A_V)}$$

perché $Q = \frac{1}{2\cos\varphi} = 1$

$\hookrightarrow A_V = 1,5 \rightarrow R_b/R_a = 0,5$ ed esempio

$$R_a = 10 \text{ k}\Omega$$

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

$$\omega_0 = 2\pi \cdot 2000 = \frac{1}{RC}$$

se scegliamo $R = \underline{\underline{10 \text{ k}\Omega}}$

$$C = \frac{1}{2\pi R \cdot 2000} = \underline{\underline{7,96 \text{ nF}}}$$

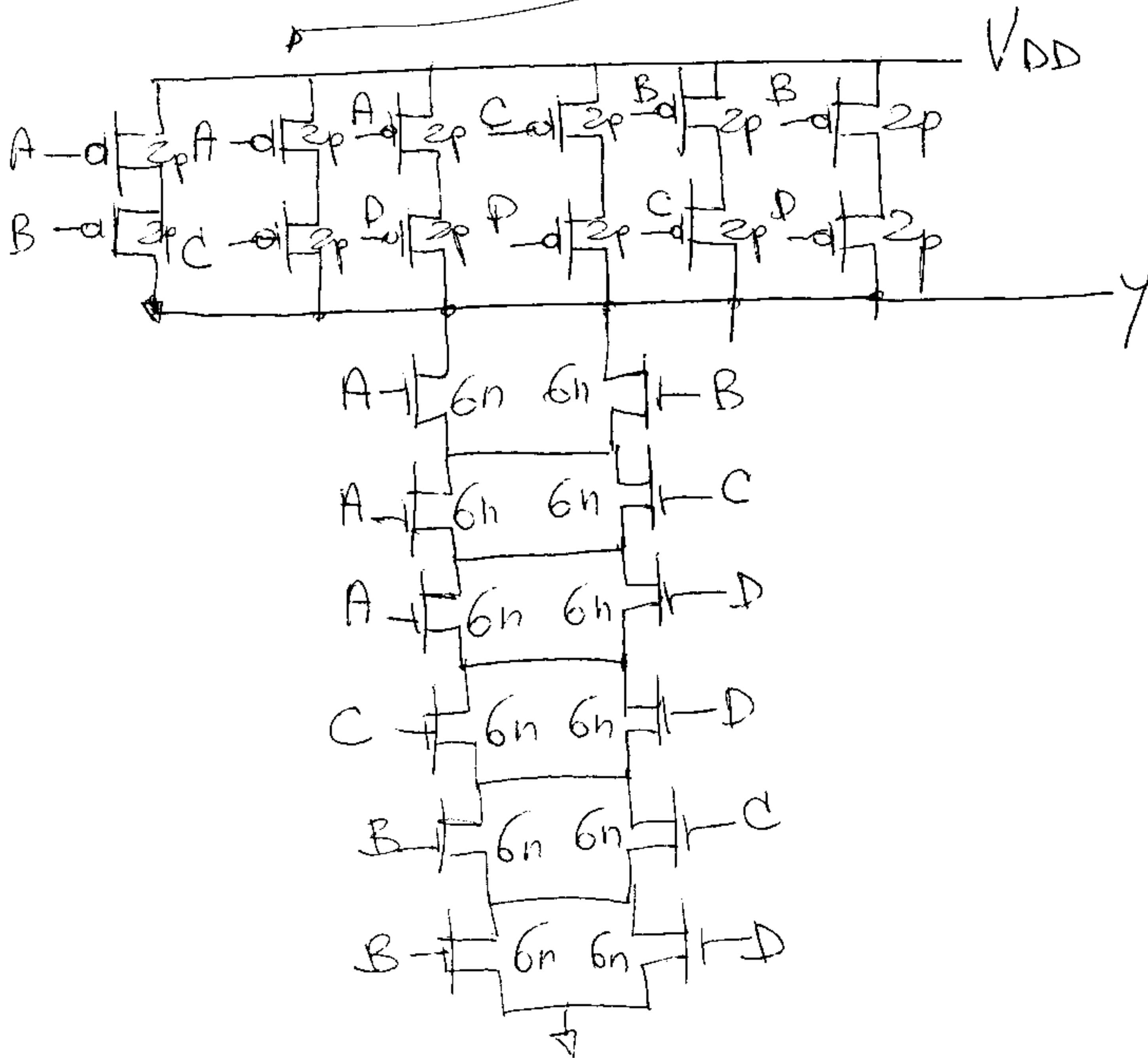
3 e 4 consultare gli appunti delle lezioni

4)

	AB			
CD	00	01	11	10
	00	1	1	1
	01	1	1	0
	11	1	0	0
	10	1	1	0

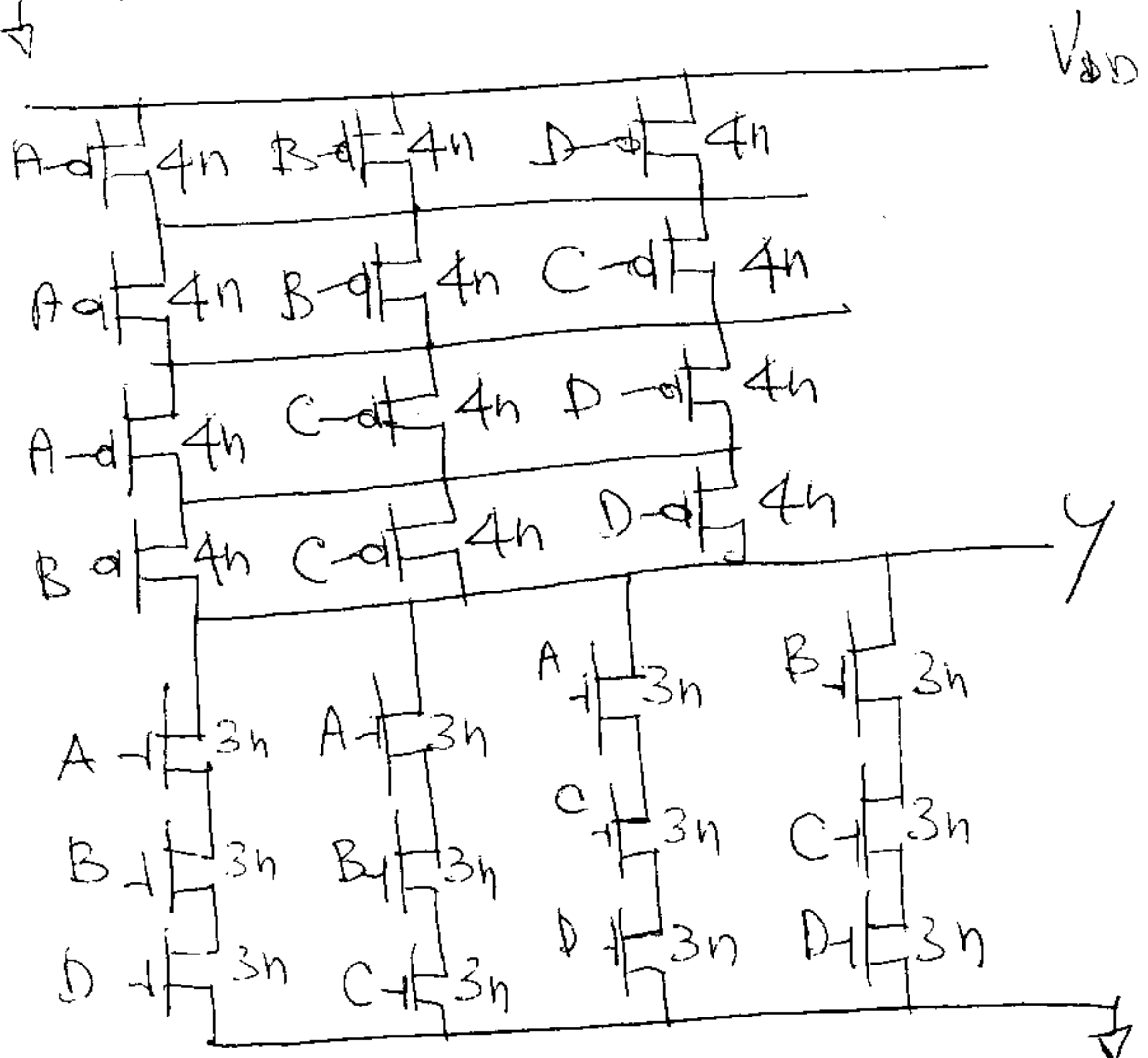
$$Y = \bar{A}\bar{B} + \bar{A}\bar{C} + \bar{A}\bar{D} + \bar{C}\bar{D} + \bar{B}\bar{C} + \bar{B}\bar{D}$$

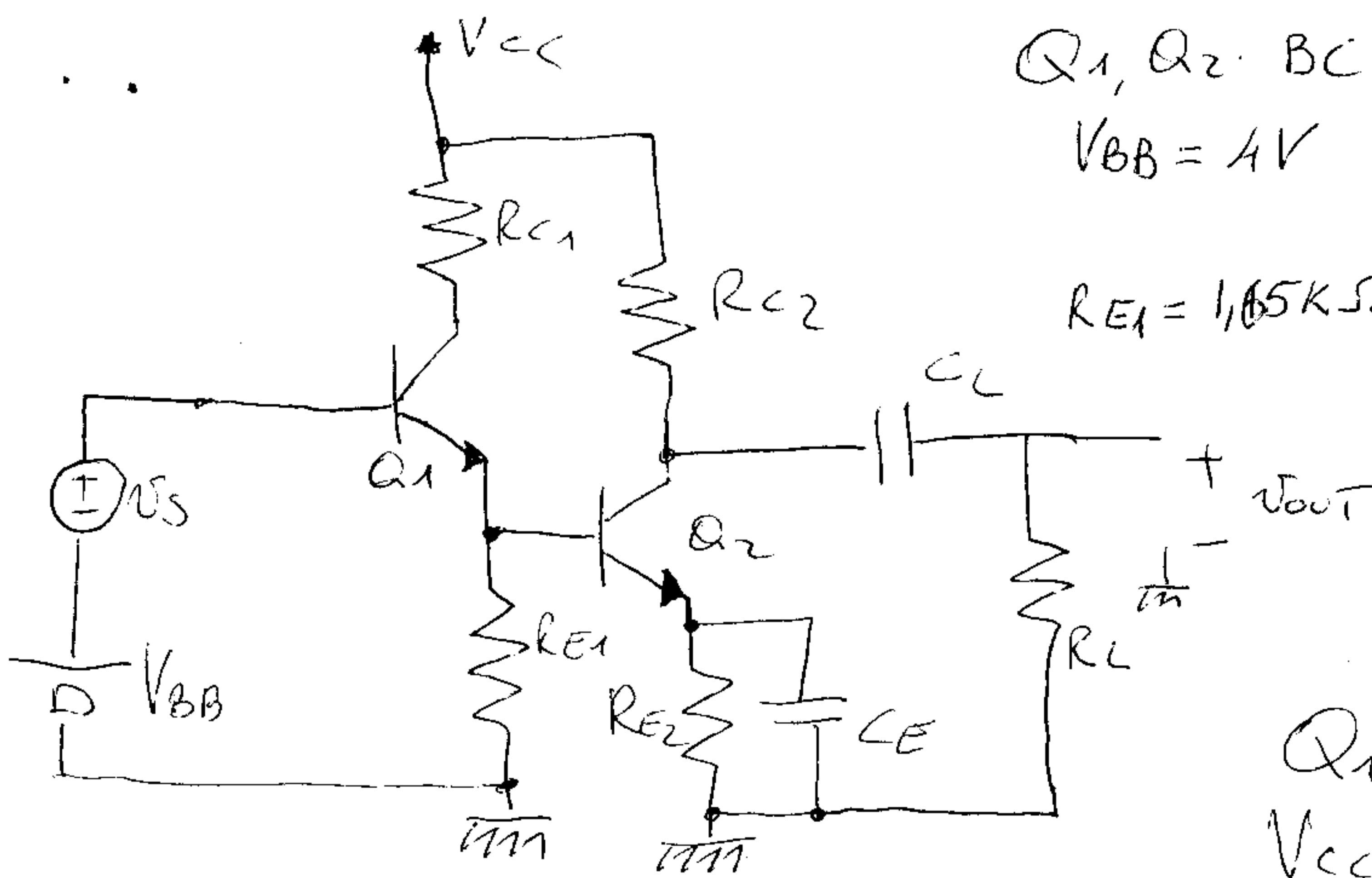
$$\bar{Y} = (A+B)(A+C)(A+D)(C+D)(B+C)(B+D)$$



altra opzione

$$\bar{Y} = ABD + ABC + ACD + BCD$$





$Q_1, Q_2: BC109B$

$$V_{BB} = 4V$$

$$R_{C1} = 3k\Omega$$

$$R_{C2} = 4k\Omega$$

$$R_{E1} = 1,05k\Omega$$

$$R_{E2} = 1,3k\Omega$$

$$C_L = 10\mu F$$

$$C_E = 50\mu F$$

$$R_L = 1k\Omega$$

Q_1 : resistivo

$$V_{CC} = 15V$$

$$h_{oe} = h_{re} = 0 \text{ per } Q_1 \text{ e } Q_2$$

PUNTO DI RIPOSO

Facciamo l'ipotesi di partitore pesante su Q_2 e supponiamo che entrambi i transistori lavorino in zone attive diritte (Z.A.D.), ipotesi che andremo successivamente verificate

$$V_{B1} = V_{BB} = 4V$$

$$V_{E1} = V_{B2} = V_{B1} - V_{BE} = 3,3V$$

$$I_{E1} = \frac{V_{E1}}{R_{E1}} = 2mA$$

$$h_{FE1} = 290 \Rightarrow I_{B1} = \frac{I_{C1}}{h_{FE1}} = 6,9\mu A$$

$$V_{CE1} = V_{CC} - (R_{C1} + R_{E1}) I_{C1} = 5,7V (> V_{CE_{SAT}} = 0,2V)$$

$$V_{E2} = V_{B2} - V_{BE} = 2,6V$$

$$I_{E2} = \frac{V_{E2}}{R_{E2}} = 2mA$$

$$h_{FE2} = 290 \Rightarrow I_{B2} = \frac{I_{C2}}{h_{FE2}} = 6,9\mu A$$

Verifica: $I_{B2} \ll I_{C1}$, valida il partitore pesante

$$V_{CE2} = V_{CC} - (R_{C2} + R_{E2}) I_{C2} = 4,4V (> V_{CE_{SAT}} = 0,2V)$$

Calcoliamo adesso i parametri di piccolo segnale.

Q₁

$$h_{fe1} = 300$$

$$V_{b1} = h_{fe1} @ 2mA - r_{\pi1} @ 2mA = 912 \Omega$$

$$h_{ie1} = 4,8 K\Omega \quad r_{\pi1} = 3,88 K\Omega$$

$$V_{CB1} = V_{CC} - R_{C1} I_{C1} - V_{B1} = 5V$$

$$C_{\mu1} = 4,7 pF \quad f_{T1} = 145 MHz$$

$$C_{\pi1} = \frac{g_{m1}}{2\pi f_{T1}} - C_{\mu1}$$

$$g_{m1} = \frac{I_{C1}}{V_T} = 77,2 mS$$

Quindi $C_{\pi} = 80,1 pF$

Q₂

$$h_{fe2} = 300$$

$$V_{b2} = h_{fe2} @ 2mA - r_{\pi2} @ 2mA = 912 \Omega$$

$$h_{ie2} = h_{ie1} = 4,8 K\Omega \quad r_{\pi2} = r_{\pi1} = 3,88 K\Omega$$

$$V_{CB2} = V_{CC} - R_{C2} I_{C2} - V_{B2} = 3,7V$$

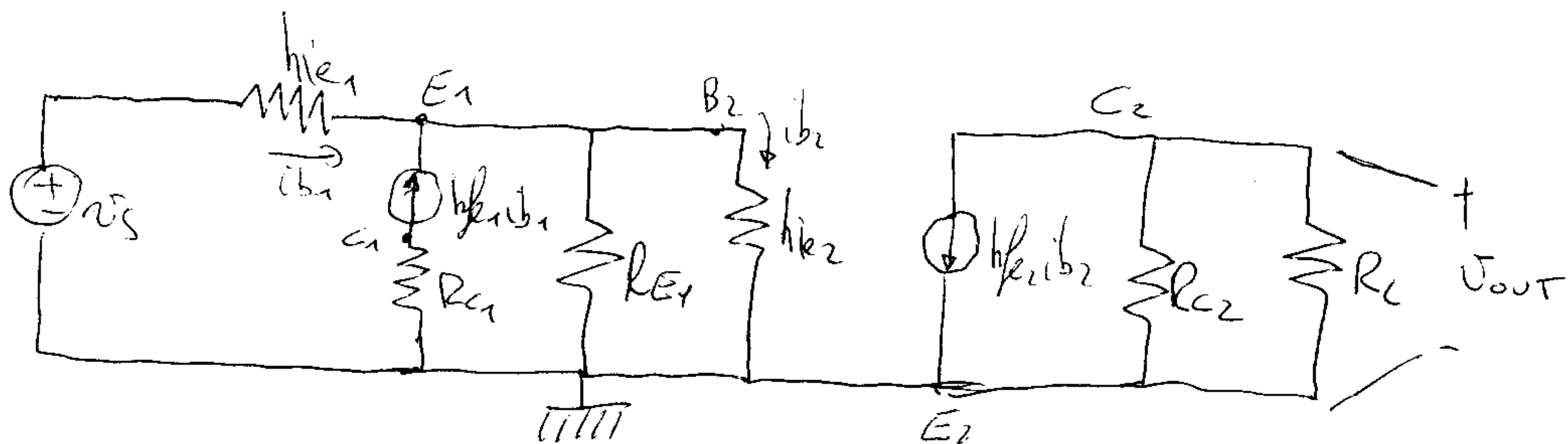
$$g_{m2} = \frac{I_{C2}}{V_T} = g_{m1} = 77,2 mS$$

$$C_{\mu2} \approx 5,2 pF \quad f_{T2} = f_{T1} = 145 MHz$$

$$C_{\pi2} = \frac{g_{m2}}{2\pi f_{T2}} - C_{\mu2} = 79,58 pF$$

A.C.B.

Calcoliamo adesso l'amplificazione a centro banda, ipotizzando C_1 e C_2 .



$$V_{out} = -R_L // R_{C2} \cdot h_{fe2} \cdot i_{b2}$$

$$i_{b2} = (h_{fe1} + 1) i_{b1} \cdot \frac{R_{E1}}{R_{E1} + h_{ie2}} \quad [\text{Partenza di corrente}]$$

i_{b1} si calcola facendo v_S diviso la resistenza vista dallo stesso v_S

$$v_S = [h_{ie1} + (R_{E1} // h_{ie2})(h_{fe1} + 1)] i_b$$

Scriviamo l'espressione finale del guadagno a centro banda

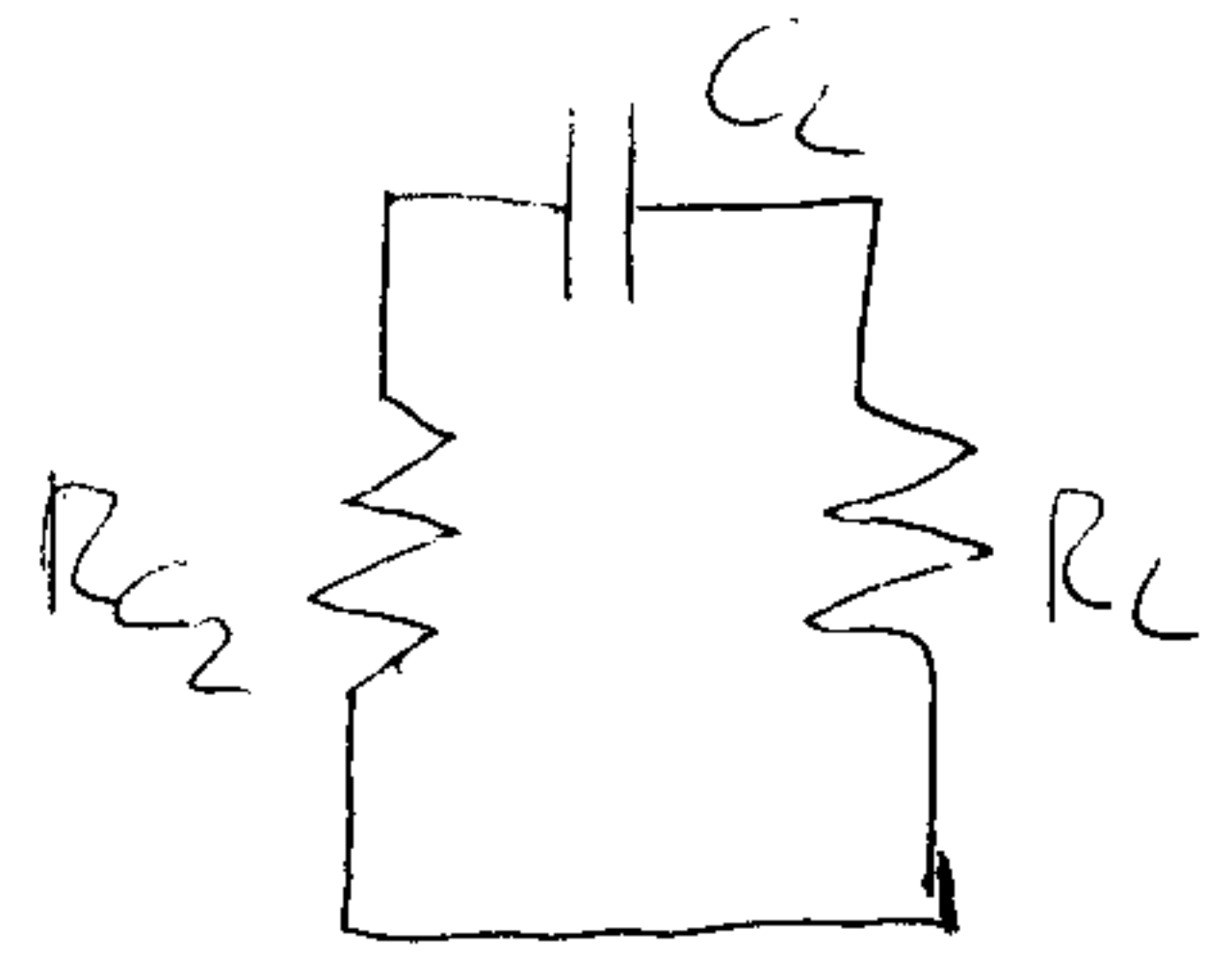
$$A_{CB} = \frac{V_{out}}{v_S} = - \frac{R_L // R_{C2} \cdot h_{fe2} (h_{fe1} + 1) \cdot R_{E1}}{R_{E1} + h_{ie2}} \cdot \frac{1}{h_{ie1} + (R_{E1} // h_{ie2})(h_{fe1} + 1)}$$

$$A_{CB} \approx -49,2$$

LC

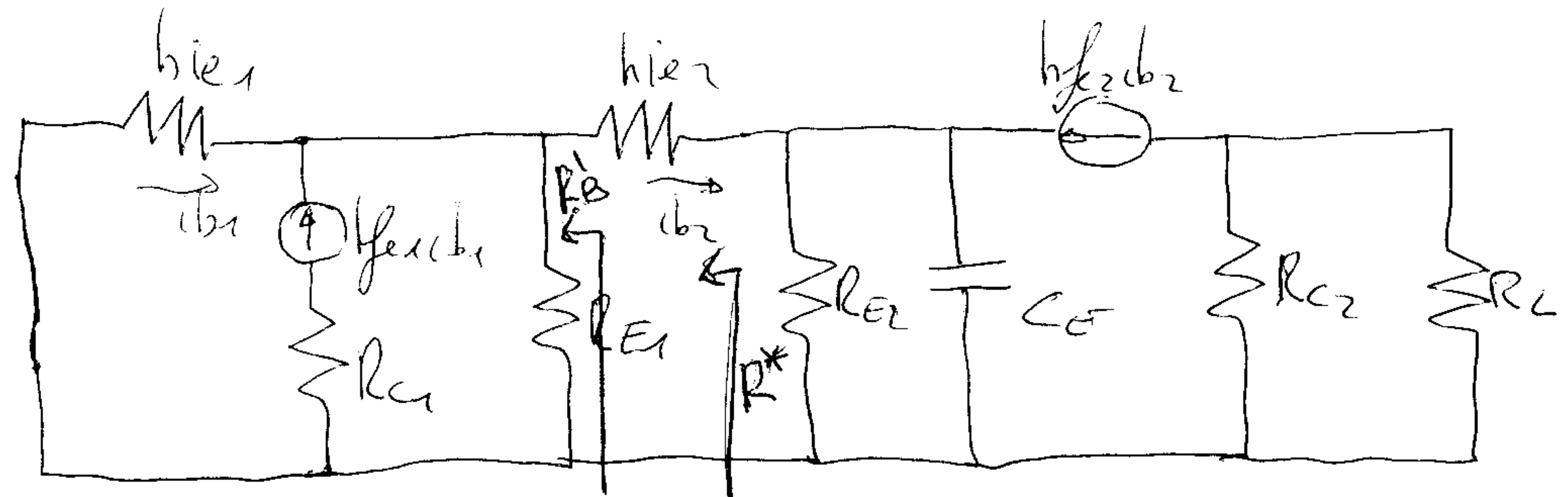
Come abbiamo detto i condensatori che agiscono alle basse frequenze sono C_L e C_E .

Cominciamo con le $R_{V_{CC}}$, più semplice



$$R_{V_{CC}} = R_{C1} + R_{C2} = 5K\Omega$$

Vediamo adesso $R_{V_{CE}}$



Togliamo R_{E2} e la mettiamo in parallelo alla h_{fe} .

$$R_{V_{CE}} = R_{E2} \parallel R^*$$

R^* è la resistenza vista dalla C_E verso l'emettitore di Q_2 , la formula standard è

$$R_V = \frac{R_B' + h_{ie2}}{h_{fe2} + 1} \text{ dove } R_B' \text{ è quello che si vede dalla base}$$

$$R^* = \frac{h_{ie2} + R_{E1} \parallel [(h_{ie1} / (h_{fe} + 1))]}{h_{fe2} + 1}$$

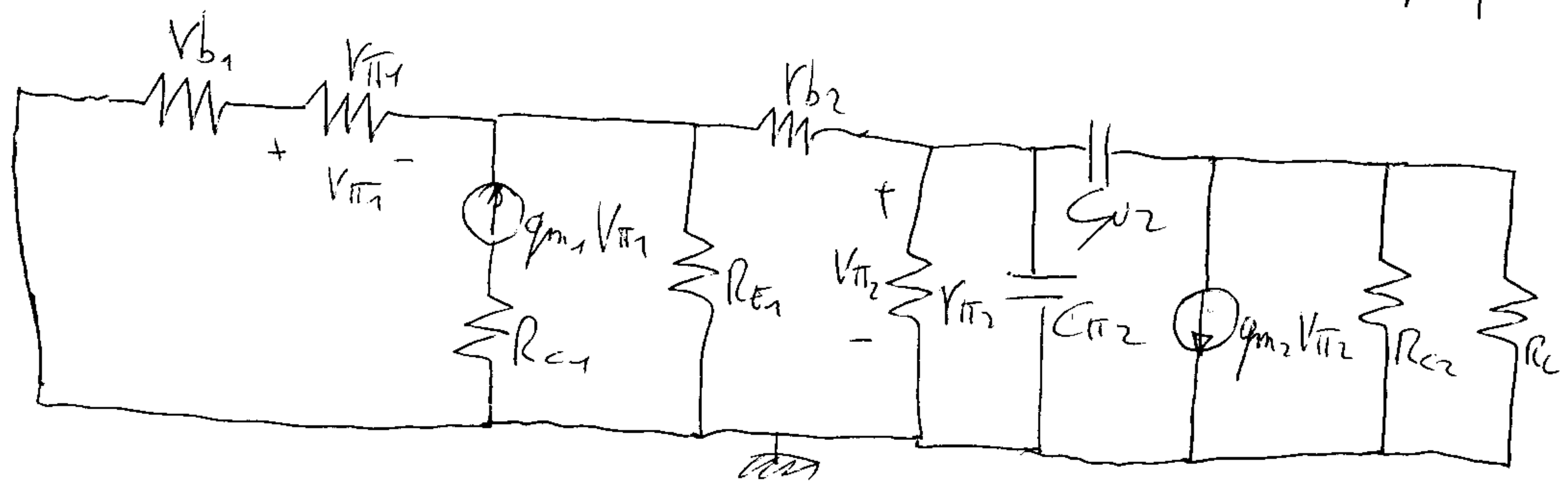
Infine

$$R_{VCE} = R_{E2} \parallel \left[\frac{h_{ie2} + R_{E1} \parallel \left[\frac{h_{ie1}}{h_{fe1} + 1} \right]}{h_{fe2} + 1} \right] = 15,7 \Omega$$

Da cui ricaviamo f_c

$$f_c = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{1}{R_{VCE} C_C} + \frac{1}{R_{VCE} \cdot C_E} \right] = 206 \text{ Hz}$$

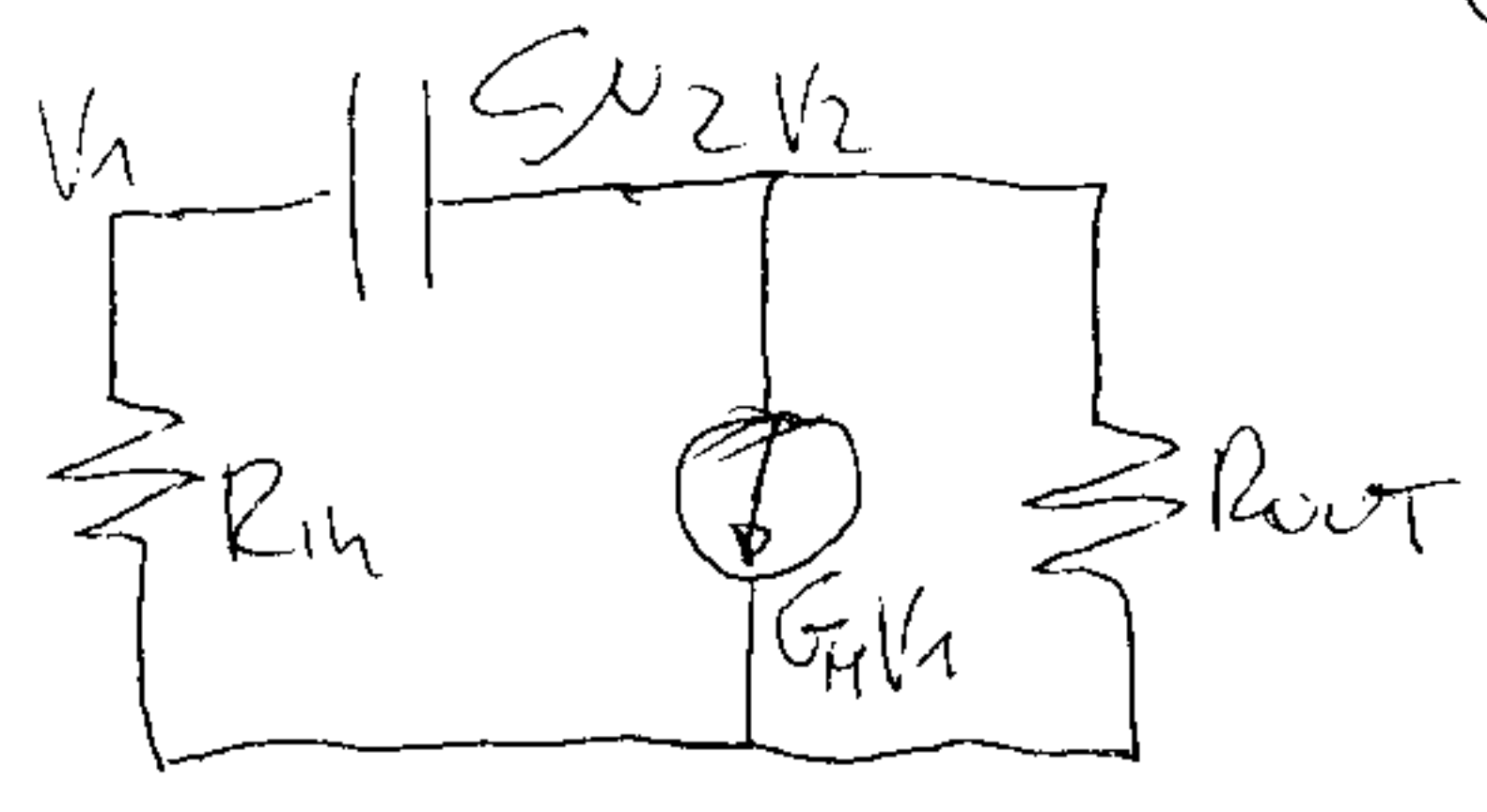
fH Disegniamo il circuito per lo studio alle alte freq.



Iniziamo da $R_{VCE\pi 2}$

$$R_{VCE\pi} = R_{\pi 2} \parallel \left[V_{b2} + R_{E1} \parallel \left[\frac{V_{b1} + R_{\pi 1}}{1 + g_{m1} V_{th1}} \right] \right] = 750 \Omega$$

Adesso calcoliamo le $R_{VCE\pi 2}$, con il metodo usale



Dove

$$R_{in} = R_{VCE\pi 2}$$

$$G_M = g_{m2}$$

$$R_{out} = R_{C2} \parallel R_L$$

Di conseguenza

$$R_{V_{gr2}} = R_{V_{c\pi}} (1 + g_m R_{out}) + R_{out} = 47,8 \text{ k}\Omega$$

Infine

$$f_H = \frac{1}{2\pi} [R_{V_{c\pi2}} \cdot C_{\pi2} + R_{V_{gr2}} \cdot C_{gr2}]^{-1} \approx 637 \text{ kHz}$$