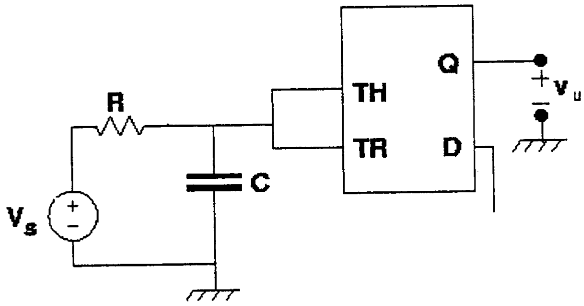
Esame di Elettronica - Corso di Laurea in Ingegneria delle Telecomunicazioni
24 settembre 2004

Parte A FILA A

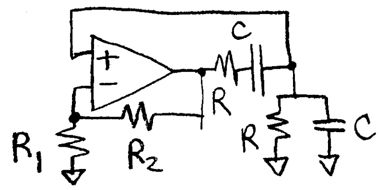
1. Reazionare un amplificatore operazionale con A_v=100, R_{in}=10 MΩ, R_{out}=200 Ω in modo da ottenere una resistenza di ingresso maggiore di 100 MΩ e una resistenza di uscita maggiore di 50 KΩ. Supporre che il carico sia una resistenza di 1 KΩ.
2. Rappresentare (sulla stessa scala temporale) l'andamento nel tempo della tensione sulla capacità e della tensione di uscita del circuito indicato a lato, supponendo che Vs(t) abbia il seguente andamento temporale:

t<0:	Vs(t) = 0
0<t<10 ms:	Vs(t) = Vcc
t>10 ms:	Vs(t) = 0.



Giustificare il procedimento, supponendo che per t<0 la capacità sia scarica, che R=88 KΩ, C=10 nF, Vcc=8 V.

3. Sia dato il circuito mostrato a lato. Dimensionare tutti i componenti in modo che si inneschi un'oscillazione a 1 KHz. Giustificare il procedimento



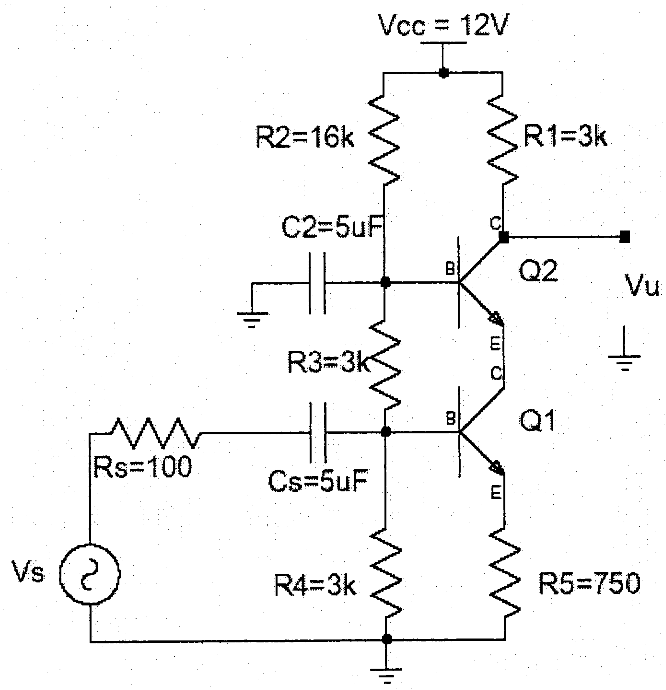
4. Disegnare e quotare la porta complessa CMOS che svolga la funzione logica $Y = \left(A\overline{B}C + AB\overline{C} + \overline{A}B\overline{C}\right)$.

Punteggio totale Parte A: 14

Parte B FILA A

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 Q1 completamente resistivo.

Punteggio totale Parte B: 14/30

Esame di Elettronica - Corso di Laurea in Ingegneria delle Telecomunicazioni
24 settembre 2004

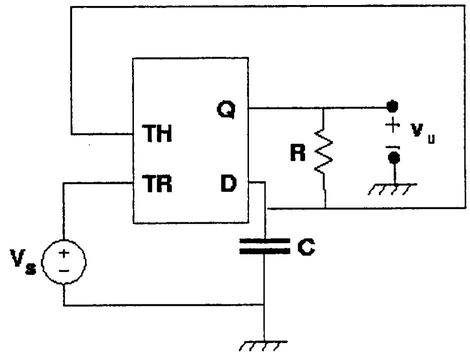
Parte A FILA B

1. Reazionare un amplificatore operazionale con A_{VO}=250, fp = 1 KHz, R_{in}=2 MΩ, R_{out}=100 Ω in modo da ottenere una resistenza di ingresso maggiore di 100 MΩ, una resistenza di uscita minore di 10 Ω, e una banda pari a 100 KHz. Supporre che il carico sia una resistenza di 1 KΩ.

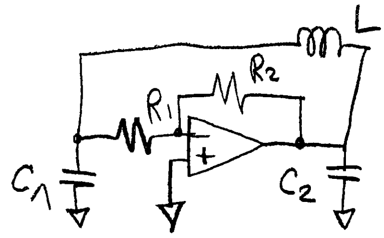
2. Rappresentare (sulla stessa scala temporale) l'andamento nel tempo della tensione sulla capacità e della tensione di uscita del circuito indicato a lato, supponendo che Vs(t) abbia il seguente andamento:

   t<0: Vs(t) = Vcc
   0<t<5 ms: Vs(t) = 0
   t>5 ms: Vs(t) = Vcc

   Giustificare il procedimento, ponendo R=.2 KΩ, C= 100 nF, Vcc = 5 V.



3. Sia dato il circuito mostrato a lato. Dimensionare tutti i componenti in modo che si inneschi un'oscillazione a 1 KHz. Giustificare il procedimento



4. Disegnare e quotare la porta complessa CMOS che svolga la funzione logica $Y = \overline{(A+B)(C+D)}$.

Punteggio totale Parte A: 14

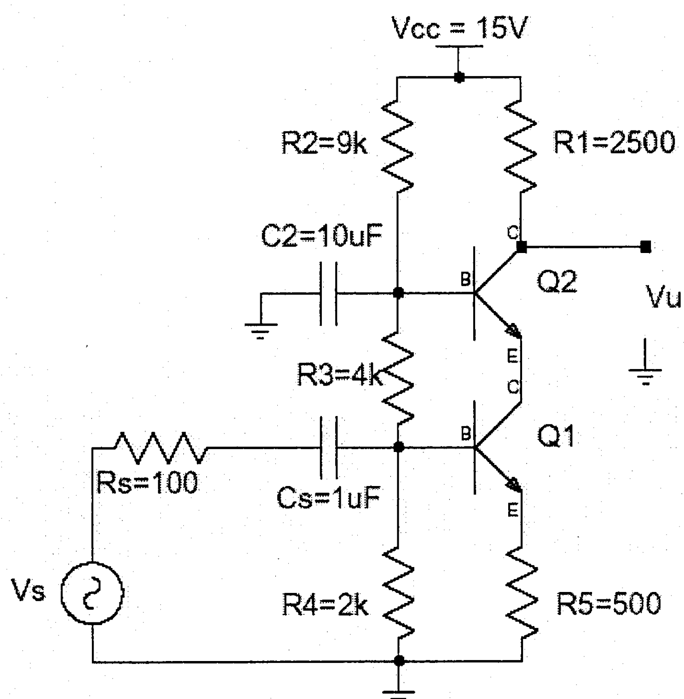
Parte B FILA B

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 Q1 completamente resistivo.

Punteggio totale Parte B: 14/30



Parte A

1) Fila A

Poiché vogliamo avere

$R_{IF} > R_{in}$

$R_{OF} > R_{out}$

dobbiamo avere una

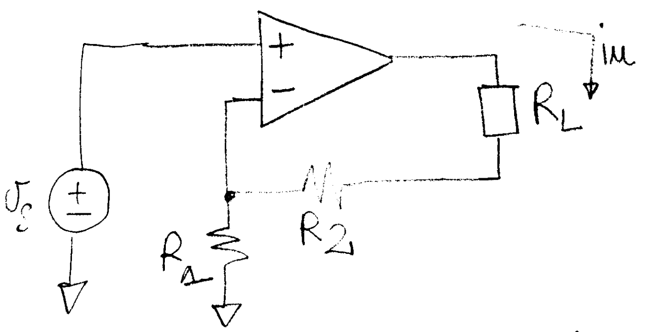
reazione con inserzione di tensione e prelievo di corrente.

$R_L = 1\,k\Omega$

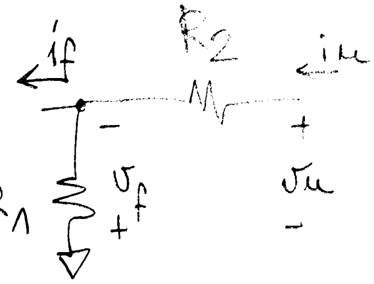
$A_V = 100$

$R_{in} = 10\,M\Omega$

$R_{out} = 200\,\Omega$



rete per il β

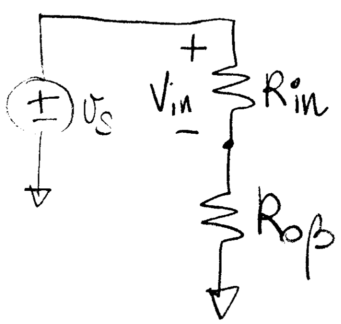


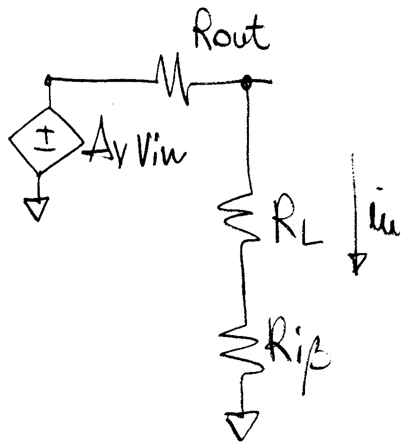
$v_f = \beta i_u + R_{o\beta} i_f$

$v_u = R_{i\beta} i_u + \cancel{K} i_f$

$$\beta = \left.\frac{v_f}{i_u}\right|_{i_f=0} = -R_1 \; ; \; R_{o\beta} = \left.\frac{v_f}{i_f}\right|_{i_u=0} = R_1 , \; R_{i\beta} = \left.\frac{v_u}{i_u}\right|_{i_f=0} = R_1 + R_2$$

rete per Ae





$$A_e \equiv \left.\frac{i_u}{v_s}\right|_{\beta=0} =$$

$$A_e = \frac{R_{in}}{R_{in}+R_{o\beta}} \; \frac{A_V}{R_{out}+R_L+R_{i\beta}}$$

$$R_{IF} = (R_{in} + R_{o\beta})(1 - \beta A_e) > 100\,M\Omega$$

$$R_{OF} = (R_{out} + R_{i\beta})(1 - \beta A_{e\emptyset}) > 50\,K\Omega$$

$$\hookrightarrow A_{e\emptyset} = A_e \big|_{R_L = 0}$$

la condizione su R_{IF} è certamente soddisfatta se $(1 - \beta A_e) > 10$

la condizione su R_{OF}, se scegliamo $R_{i\beta} \geq 5K\Omega$, è soddisfatta se

$1 - \beta A_{e\emptyset} > 10$

Poiché $A_{e\emptyset} > A_0$ basta soddisfare contemporaneamente:

$$\begin{cases} (1 - \beta A_e) > 10 \\ R_{i\beta} \geq 5K\Omega \rightarrow R_1 + R_2 \geq 5K\Omega \end{cases}$$

$1 - \beta A_e > 10 \rightarrow -\beta A_e > 9$

$\downarrow$

$$\frac{R_1 R_{in}}{R_{in} + R_{o\beta}} \cdot \frac{A_V}{R_{out} + R_L + R_{i\beta}} > 9$$

$$\frac{R_1 R_{in}}{R_{in} + R_1} \cdot \frac{A_V}{R_{out} + R_L + R_1 + R_2} > 9$$

se $R_1 + R_2 = 5K\Omega$

$$\frac{R_1 R_{in}}{R_{in} + R_1} \cdot \frac{\overset{10\alpha}{\cancel{A_V}}}{R_{out} + R_L + R_1 + R_2} > 9$$

5000

$R_1 // R_{in} > 558$

ad esempio scegliamo $R_1 = 1000\,\Omega \rightarrow R_2 = 4\,K\Omega$

VERIFICA

$$\beta A_{e\emptyset} = \frac{A_v}{R_{out}+R_1+R_2} \cdot R_1 // R_{in} \simeq -19.2$$

$$\beta A_e = \frac{A_v}{R_{out}+R_L+R_1+R_2} R_1 // R_{in} \simeq -16.1$$

$$1-\beta A_e = 17.1$$

$$1-\beta A_{e\emptyset} = 20.2$$

$R_{IF} = 171\,M\Omega$ $\qquad$ $R_{OF} = 105\,K\Omega$

Fila B

$A_v = 250$

$f_p = 1\,KHz$

$R_{in} = 2\,M\Omega$

$R_{out} = 100\,\Omega$ $\quad R_L = 1\,K\Omega$

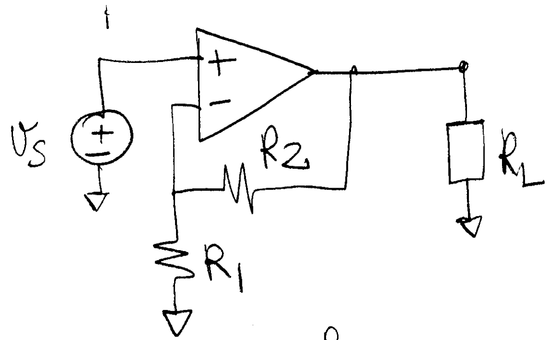
Poiché vogliamo

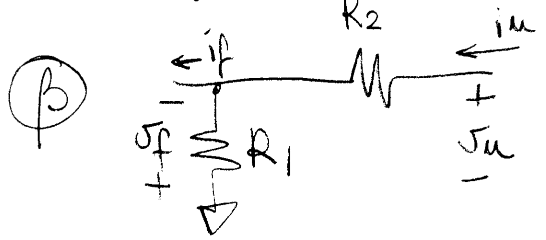
$R_{IF} > R_{in}$

$R_{OF} < R_{out}$

dobbiamo avere una reazione con inserzione di tensione e prelievo di corrente.

È richiesto $f_H = 100\,KHz \longrightarrow 1-\beta A_e = 100$



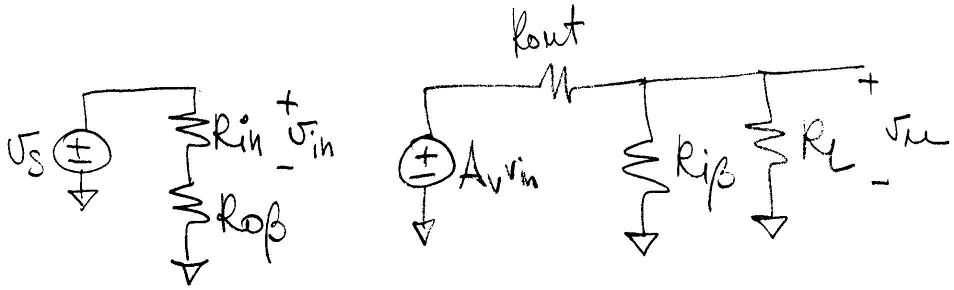


$$v_f = \beta v_u + R_{o\beta} i_f$$

$$i_u = \frac{v_u}{R_{i\beta}} + \cancel{K} i_f$$

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

$$R_{o\beta} = \left.\frac{v_f}{i_f}\right|_{v_u=0} = R_1 /\!/ R_2$$



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

$$R_{IF} = \underset{\substack{\uparrow \\ 2M\Omega}}{(R_{in}+R_{o\beta})}\underbrace{(1-\beta A_e)}_{100} > \underline{100\ M\Omega} \qquad \text{sempre verificato}$$

$$R_{OF} = \frac{R_{i\beta} /\!/ \overset{1000}{R_{out}}}{1-\beta A_{e0}} < 10\Omega \qquad \text{sempre verificato, perché } 1-\beta A_{e0} > 1-\beta A_e$$

$$A_{e0} \to \left.A_e\right|_{R_L=0}$$

quindi è sufficiente che sia $1-\beta A_e = 100$

$$1+\frac{R_1}{R_1+R_2}\frac{R_{in}}{R_{in}+R_{o\beta}} A_v \frac{R_{i\beta}/\!/R_L}{R_{out}+R_{i\beta}/\!/R_L} = 100$$

$$1+\frac{R_1}{R_1+R_2}\cdot\frac{R_{in}}{R_{in}+R_1/\!/R_2}\cdot A_v \frac{(R_1+R_2)/\!/R_L}{R_{out}+(R_1+R_2)/\!/R_L} = 100$$

poniamo $R_1+R_2 = 10K\Omega$

$$1+\frac{R_1}{R_{in}+\frac{R_1(10^4-R_1)}{10^4}}\cdot\frac{2\cdot 10^6}{10^4}\cdot 250\cdot\frac{10^4/\!/10^3}{100+10^4/\!/10^3} = 100$$

$$\frac{R_1}{R_{in}+\frac{R_1(10^4-R_1)}{10^4}}\cdot 4.5\cdot 10^4 = 99$$

$$R_1\cdot 4{,}5\cdot 10^4 = 99\,R_1 + 99\,R_{in} - R_1^2/10^4\cdot 99$$

$$R_1 = 4349\,\Omega$$

$$\underline{R_2 = 5651\,\Omega}$$

verifica

$$1-\beta A_e = 1+\frac{4349}{10000}\cdot\frac{2\cdot 10^6}{2\cdot 10^6+2458}\cdot 250\cdot\frac{10000//1000}{100+10000//1000} = 1000$$

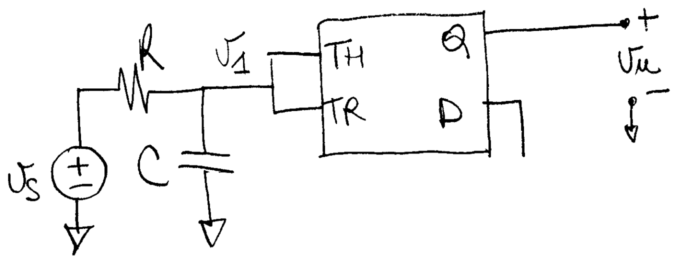
$$R_{IF} = (2\cdot 10^6 + 4{,}35\cdot 10^3)(100) \cong \underline{200\,M\Omega}$$

$$R_{OF} = \frac{10^4//100}{110} = \underline{0.9\,\Omega}$$

ok

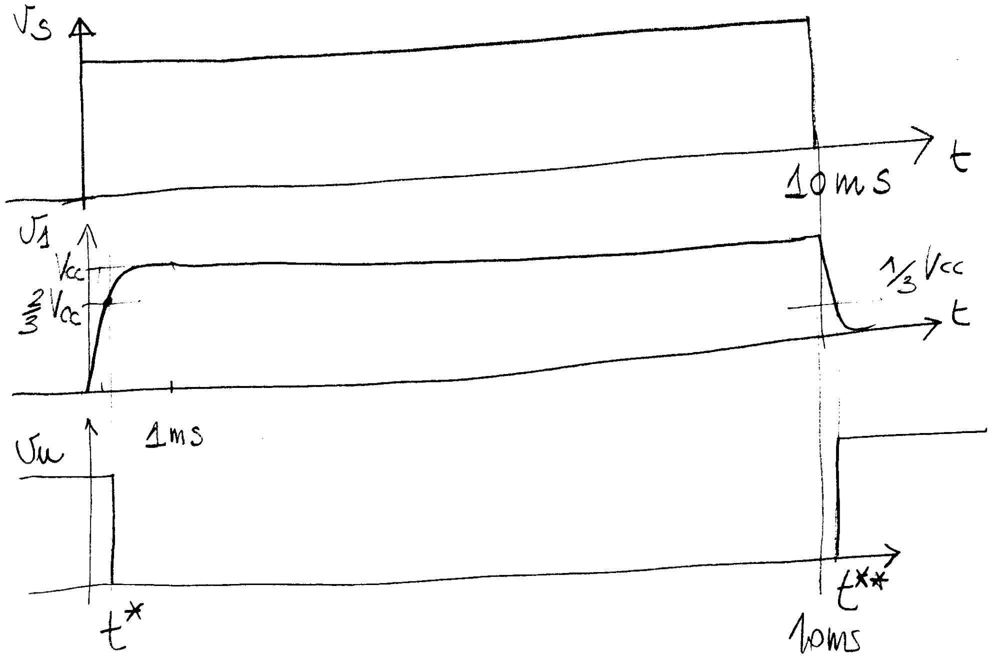
2

FILA A



costante di tempo

$\tau = RC = 280\ \mu s$



per $t=0$ abbiamo $v_1=0$

quindi $Q = 1$

v_1 aumenta con costante di tempo τ e asintoto Vcc.

Quando $v_1 = \frac{2}{3}V_{cc}$ abbiamo $Q=0$

calcoliamo $v_1(t^*) = \frac{2}{3}V_{cc}$

$\downarrow$

$$v_1(t^*) = V_{cc}\left[1 - e^{-t^*/\tau}\right] = \frac{2}{3}V_{cc}$$

$$\frac{1}{3} = e^{-t^*/\tau} \rightarrow \ln 3 = \frac{t^*}{\tau} \rightarrow t^* = \tau \ln 3$$

$$\boxed{t^* = 0{,}97\ ms}$$

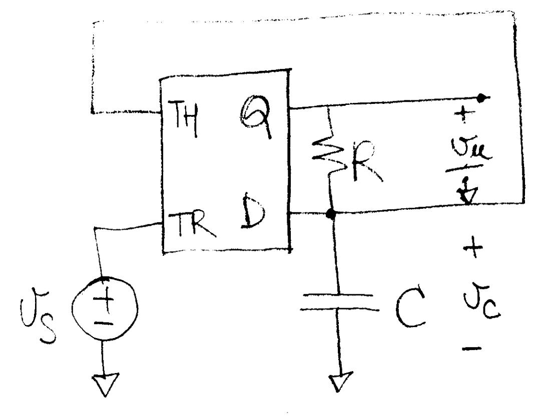
per $t = 10\,ms$ abbiamo $v_C = 0\,V$. La tensione v_1 cresce esponenzialmente con costante di tempo τ e asintoto 0. Q torna a 1 quando v_1 arriva a $\frac{1}{3}V_{cc}$ [per $t = t^{**}$

$$v_1(t^{**}) = \frac{1}{3}V_{cc}$$

$$v_1(t^{**}) = V_{cc}\, e^{-\frac{t^{**} - 10\,ms}{\tau}} = \frac{1}{3}V_{cc}$$

$$t^{**} = 10\,ms + \tau \ln 3 \rightarrow \underline{10.97\ ms}$$

FILA B



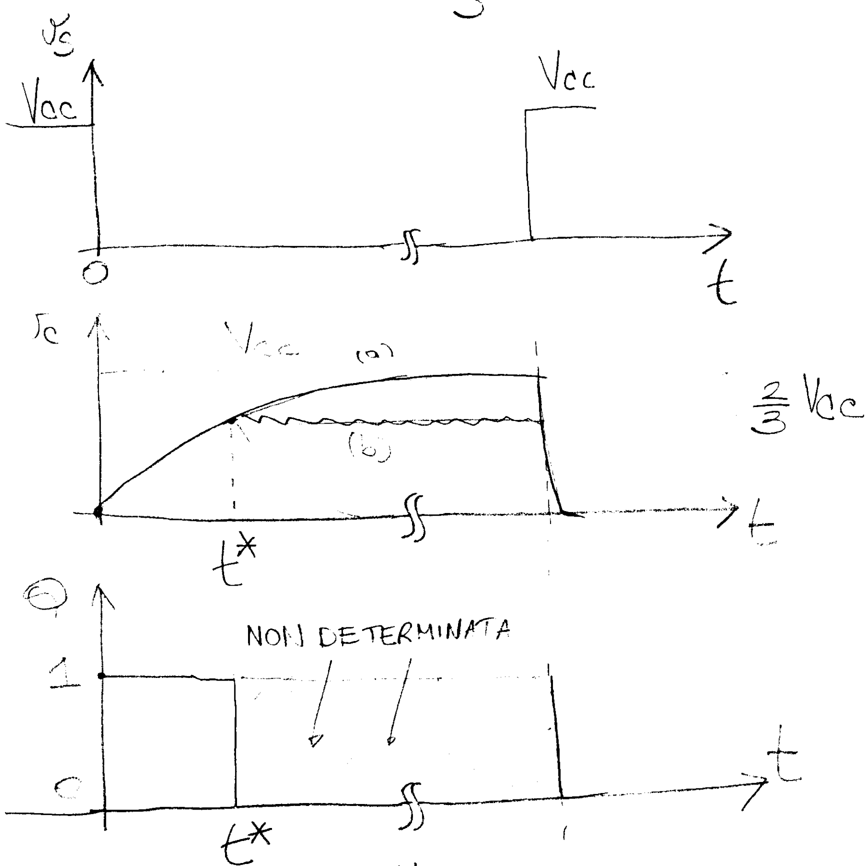
per $t < 0$ abbiamo $v_S = V_{cc}$, quindi $Q = 0$, Discharge in conduzione e quindi $v_C = 0$.

Appena $v_C = 0$ abbiamo $Q = 1$ e la capacità comincia a caricarsi verso V_{cc} con costante di tempo $\tau = RC = 20\,\mu s$

quando v_C raggiunge $\frac{2}{3}V_{CC}$ abbiamo un comportamento diverso

$$V_C(t^*) = V_{CC}\left[1 - e^{-t^*/\tau}\right] = \frac{2}{3}V_{CC}$$

$$\frac{1}{3} = e^{-t^*/\tau} \rightarrow t^* = \tau \ln 3 = 22\,\mu s$$



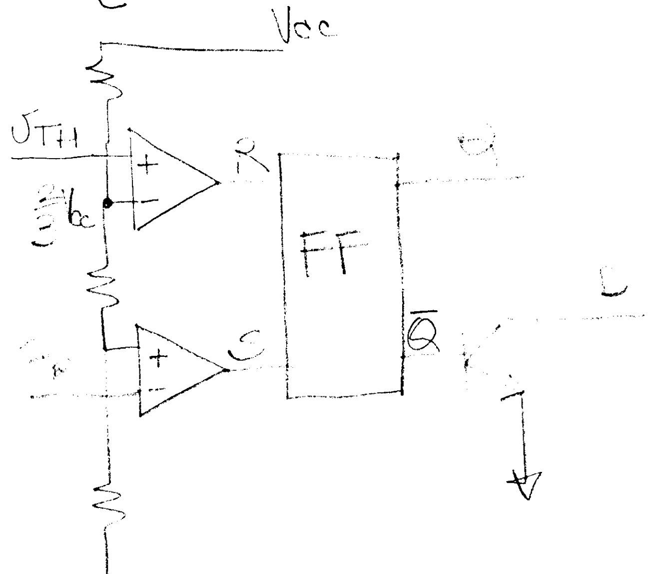
per $t = t^*$ abbiamo $v_{TR} = 0$ e $v_{TH} \geq \frac{2}{3}V_{CC}$

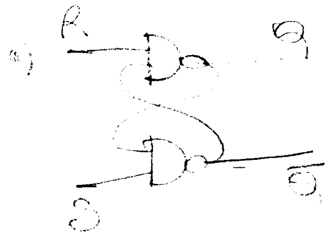
per capire cosa succede vediamo come è fatto l'LM555.

se RS = 01 abbiamo $Q_1 = 1$
se RS = 10 abbiamo $Q_1 = 0$

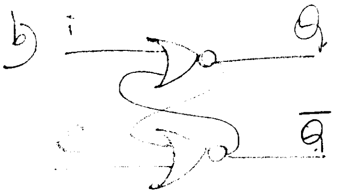
per $t > t^*$ abbiamo $S = 1$ e $R = 1$

per come è fatto il FF:





se RS = 11 il FF conserva



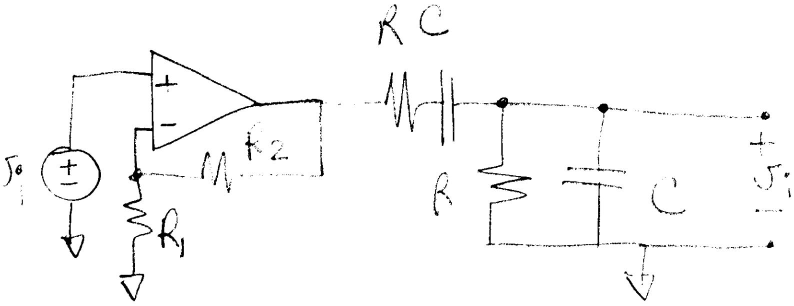
se RS = 11 abbiamo $Q = 0$, $\bar{Q} = 0$

nel caso a) la tensione V_C continua a salire, nel caso b) la tensione v_U è indeterminata.

in questo senso, l'evoluzione della v_u è indeterminata fino a $t = 5ms$, (8)
quando $v_S = V_{CC}$ e quindi $S = 0$ e la tensione v_u va a 0.

3

FILA a



$$\beta A = \frac{v_i'}{v_i} = \left(1+\frac{R_2}{R_1}\right)\frac{\frac{R}{j\omega RC+1}}{\frac{R}{j\omega RC+1}+R+\frac{1}{j\omega C}} =$$

$$= \left(1+\frac{R_2}{R_1}\right)\frac{j\omega CR}{Rj\omega C + j\omega RC(1+j\omega RC) + 1 + j\omega RC} =$$

$$\beta A = \left(1+\frac{R_2}{R_1}\right)\frac{j\omega RC}{1+3j\omega RC-\omega^2R^2C^2}$$

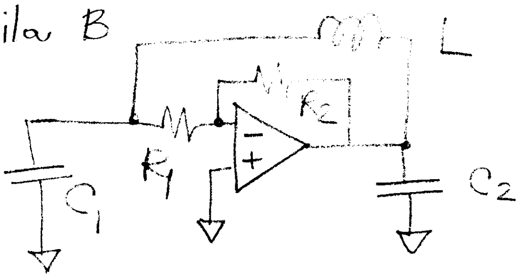
$$\angle \beta A = 0 \rightarrow 1-\omega^2R^2C^2=0 \rightarrow \omega_0 = \frac{1}{RC}$$

$$\beta A(\omega_0) = \frac{1}{3}\left(1+\frac{R_2}{R_1}\right)$$

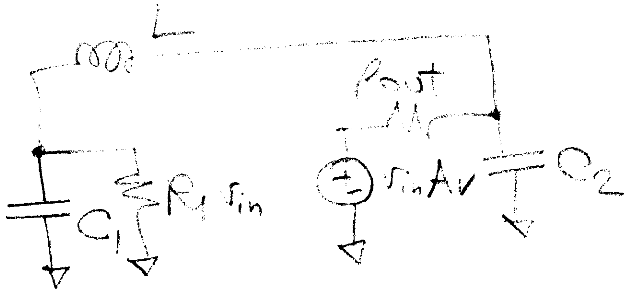
scegliamo $C = 100nF \rightarrow R = \frac{1}{\omega_0 C} = 1592\,\Omega$

$R_1 = 3300 \quad R_2 > 2R_1 = 6600$ poniamo $\underline{R_2 = 8.8\,k\Omega}$ ←

Fila B

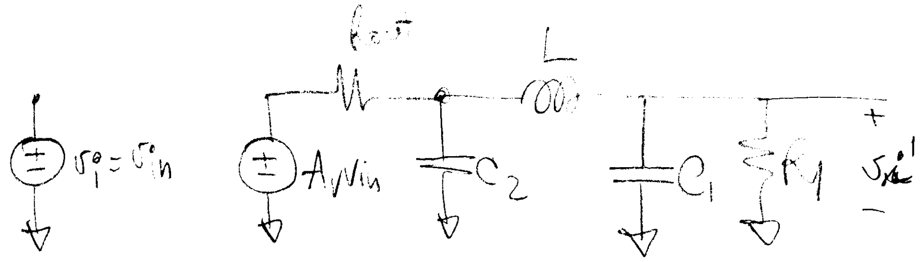


$\rightarrow$



$A_v = -\dfrac{R_2}{R_1}$, abbiamo un oscillatore di Colpitts.

βA:



sappiamo che se $R_1 \gg \dfrac{1}{j\omega C_1}$ possiamo ottenere una espressione molto semplice. Poniamo quindi R_1 trascurabile nel parallelo rispetto a C_1, e poi facciamo in modo che questa condizione sia garantita.

$$\frac{v_i'}{v_i} = \beta A = \frac{A_v\left[\frac{1}{j\omega C_2} \,//\, \left(j\omega L + \frac{1}{j\omega C_1}\right)\right]}{R_{out} + \frac{1}{j\omega C_2} \,//\, \left[j\omega L + \frac{1}{j\omega C_1}\right]} \cdot \frac{\frac{1}{j\omega C_1}}{j\omega L + \frac{1}{j\omega C_1}} =$$

$$= \frac{A_v \frac{1}{j\omega C_2} \cdot \cancel{\left(j\omega L + \frac{1}{j\omega C_1}\right)}}{R_{out}\left[\frac{1}{j\omega C_2} + j\omega L + \frac{1}{j\omega C_1}\right] + \frac{1}{j\omega C_2}\left(j\omega L + \frac{1}{j\omega C_1}\right)} \cdot \frac{\frac{1}{j\omega C_1}}{\cancel{j\omega L + \frac{1}{j\omega C_1}}} =$$

$$\beta A = \frac{A_v \frac{-1}{\omega^2 C_1 C_2}}{R_{out} \cdot j\left[\omega L - \frac{1}{\omega C_2} - \frac{1}{\omega C_2}\right] + \frac{L}{C_2} - \frac{1}{\omega^2 C_1 C_2}}$$

$$\angle \beta A = 0 \rightarrow \quad \omega L - \frac{1}{\omega}\left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}\right) = 0$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{L}\left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}\right)} \qquad \frac{1}{\omega^2} = \frac{L C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$

$$\beta A(\omega_0) = \frac{A_v\left(-\frac{1}{\omega^2 C_1}\right)}{L - \frac{1}{\omega^2 C_1}} = A_v \frac{-\frac{L C_2}{C_1 + C_2}}{L - \frac{L C_2}{C_1 + C_2}} = -A_v \frac{C_2}{C_1}$$

poniamo $C_1 = C_2 = 1 \mu F$

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = 6.28 \text{ Krad/s} \qquad L = \frac{2}{\omega^2 C} = \frac{2}{6280^2 \cdot 10^{-6}} = 50.7 \text{ mH}$$

$$\frac{1}{j\omega C_1} = -j\,159.2 \qquad R_1 \gg \left|\frac{1}{j\omega C_1}\right| \quad \text{scelgo } R_1 = 10 K\Omega$$

per avere $|\beta A(\omega_0)| > 1$ deve essere $|A_v| > 1 \rightarrow R_2 > R_1$

scelgo $R_2 = \underline{12 K\Omega}$

4 $\quad Y = A\bar{B}C + AB\bar{C} + \bar{A}B\bar{C}$

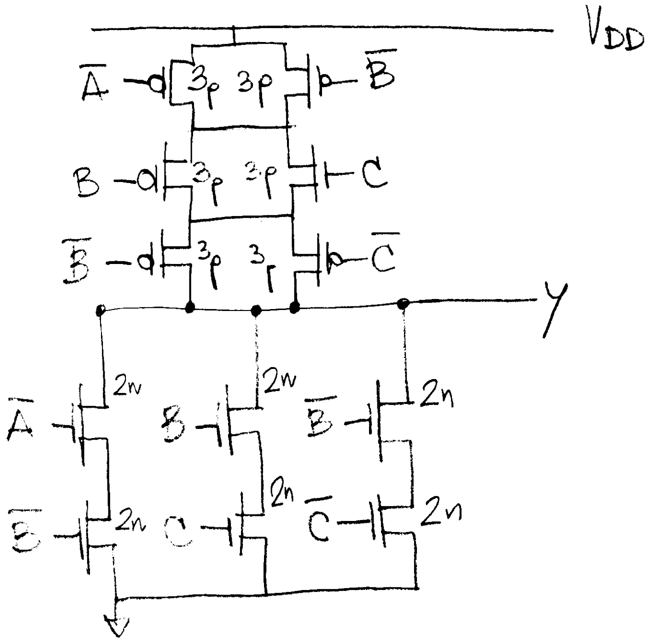
FILA A

C \ AB	00	01	11	10
0	0	1	1	0
1	0	0	0	1

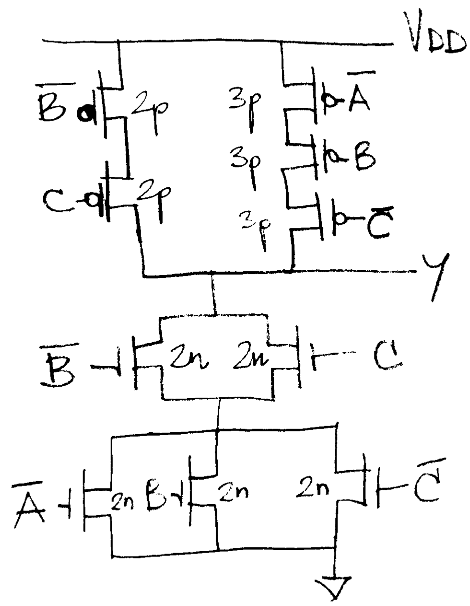
$$\rightarrow Y = B\bar{C} + A\bar{B}C$$

oppure

$$\boxed{\bar{Y} = \bar{A}\bar{B} + BC + \bar{B}\bar{C}}$$



oppure

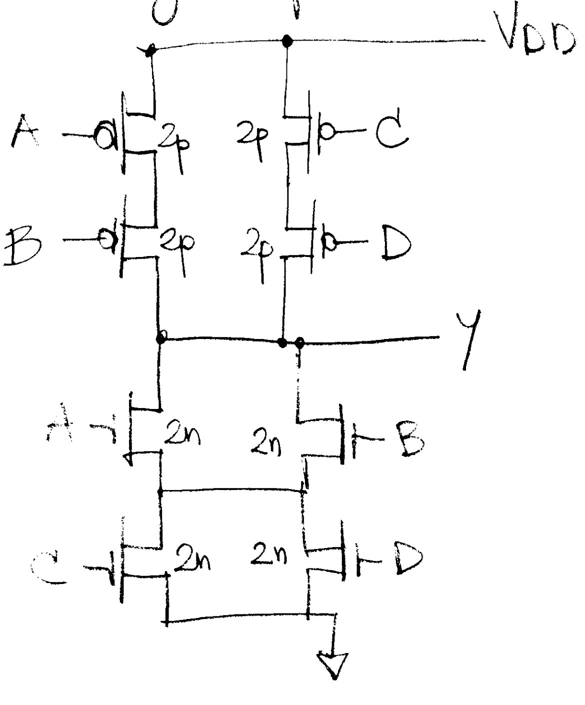


FILA B

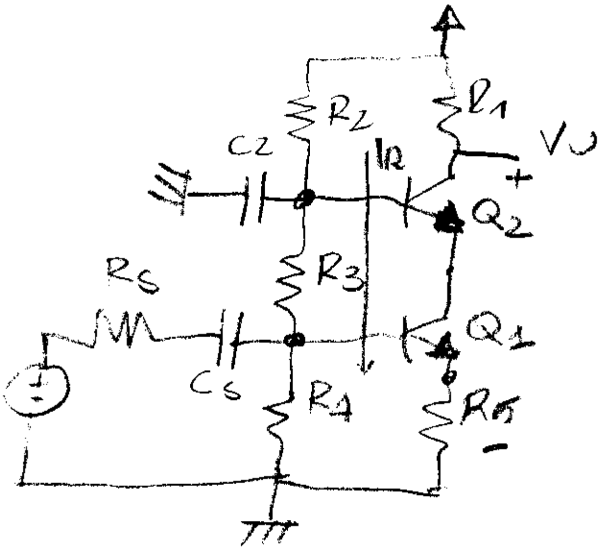
$$Y = \overline{(A+B)(C+D)}$$

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

già espressione minima



(1)



	A	B
R_1	16 kΩ	9 kΩ
R_3	3 kΩ	4 kΩ
R_4	3 kΩ	2 kΩ
R_2	3 kΩ	2,5 kΩ
R_5	750 Ω	500 Ω
C_S	5 μF	1 μF
C_2	5 μF	10 μF
R_S	100 Ω	100 Ω
V_{CC}	12 V	15 V

Fila A

$$I_R = \frac{V_{CC}}{R_2+R_3+R_4} = 0,545 \text{ mA}$$

$$V_{B1} = \frac{R_4}{R_2+R_3+R_4} \cdot V_{CC} = 1.63 V$$

$$V_{E1} = V_{B1} - V_\gamma = 1.63-0.7 = 0.93 V$$

$$I_{E1} = \frac{V_{E1}}{R_5} = 1,248 \text{ mA}$$

$$V_{C2} = V_{CC} - R_1 I_{C1} \cong 8,256 V$$

$$V_{B2} = \frac{R_4+R_3}{R_2+R_3+R_4} = 3.26 V$$

$$V_{E2} = V_{C1} = V_{B2} - V_\gamma = 2,56 V$$

verifica ipotesi:
ipotesi partitore pesante:
$h_{FE1} = h_{FE2} = 150$

$$I_{B1} \cong I_{B2} = I_C/h_{FE} = 8,32 \mu A \ll I_R$$

Fila B

$$I_R = 1 \text{ mA}$$

$$V_{B1} = 2 V$$

$$V_{E1} = 1.3 V$$

$$I_{E1} = 2.6 \text{ mA}$$

$$V_{C2} = 8,5 V$$

$$V_{B2} = 6 V$$

$$V_{E2} = V_{C1} = 5.3 V$$

$$I_{B1} = 14.8 \mu A \ll I_R$$

Parametri Piccolo Segnale

(2)

Fila A | Fila B

$h_{fe1} = h_{fe2} = 175$

$g_{m1} \approx g_{m2} = \frac{I_{C1}}{V_T} = 48 m\Omega^{-1}$

$r_{\pi 1} = r_{\pi 2} = \frac{h_{fe1}}{g_m} = 3646\Omega$

h_{ie} @1mA $= 5000\Omega$

↓

g_m @1mA $= 36.6 m\Omega^{-1}$

↓

$r_b \cong 480\Omega$ (≈ indipendente da I_C)

$h_{ie1} = h_{ie2} = r_b + \frac{h_{fe1}}{g_{m1}} = 4095\Omega$

$V_A = \frac{1 mA}{h_{oe}@1mA} = 80V$ (≈ indipendente da I_C)

$r_o = \frac{V_A}{I_C} = 40K\Omega$

$r_o \gg R_5 + R_1 \rightarrow$ si trascura

$C_{\mu 2} \approx 4.8pF$ $f_T = 100MHz$

$C_{\pi 2} = \frac{g_m}{2\pi f_T} - C_{\mu 2} = 72pF$

... è ininfluente

Fila B

$g_{m1} \cong g_{m2} = 100 m\Omega^{-1}$

$r_{\pi 1} \cong r_{\pi 2} = 1743\Omega$

$h_{ie1} \cong h_{ie2} = 2193\Omega$

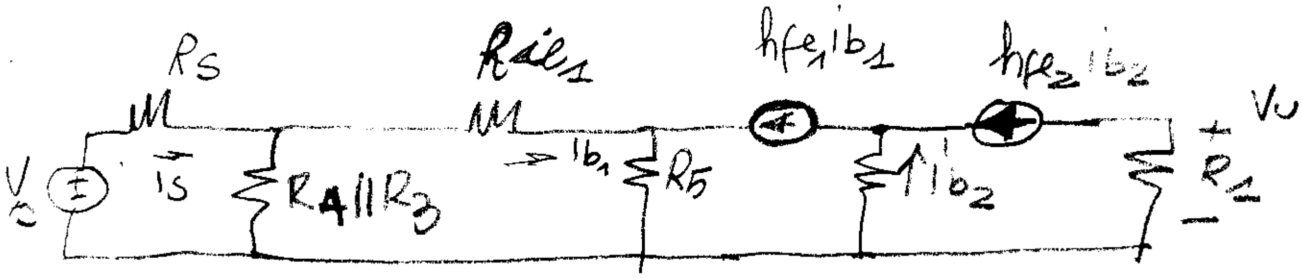
$r_o \cong 20K\Omega$

Si è deciso di accontentarsi di un fattore 7 per la trascura-bilità di r_o nei confronti di R_5 e R_1

$C_{\mu 2} \cong 5,3pF$ $f_T = 160MHz$

$C_{\pi 2} \cong 94pF$

$\boxed{A_{CB}}$ Circuito ai piccoli segnali ③



Si ha:

$$i_s = \frac{V_s}{R_s + R_4 \| R_3 \| \left[h_{ie_1} + (h_{fe_1}+1)R_5\right]}$$

$$i_{b_1} = i_s \frac{R_4 \| R_3}{R_4 \| R_3 + h_{ie_1} + (h_{fe_1}+1) R_5}$$

$$i_{b_2}(1 + h_{fe_2}) = i_{b_1} h_{fe_1}$$

$$V_u = -R_L \, i_{b_2}$$

In definitiva si ha:

$$A_{CB} = \frac{V_u}{V_s} =$$

$$= \left(\frac{1}{R_s + R_4 \| R_3 \| \left[h_{ie_1} + (h_{fe_1}+1)R_5\right]}\right) \cdot \left(\frac{R_4 \| R_3}{R_4 \| R_3 + h_{ie_1} + R_5(h_{fe_1}+1)}\right) \cdot \left(\frac{-R_L h_{fe_2} h_{fe_1}}{1 + h_{fe_2}}\right)$$

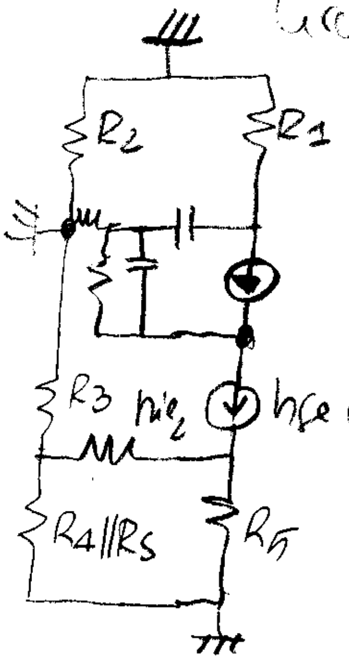
A_{CB} $\simeq -3,59 \, V$ fila A

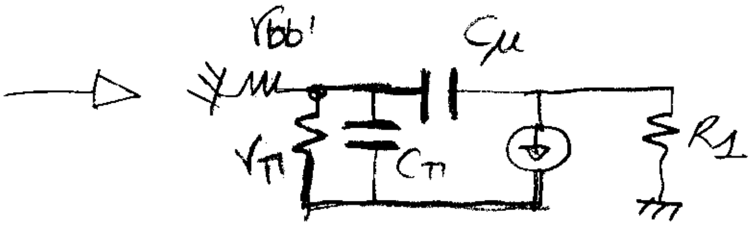
$\simeq -4,47$ fila B

Limite superiore di banda $\boxed{f_H}$ (4)

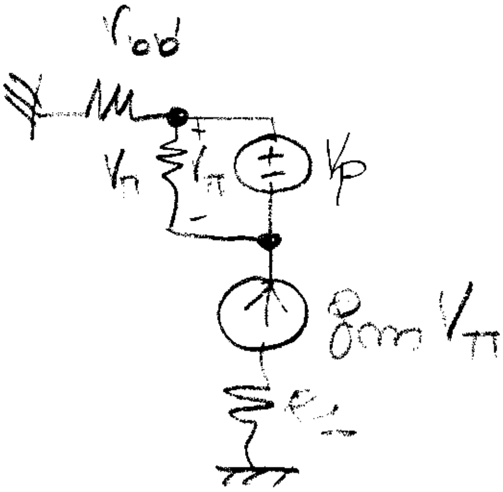
$\boxed{\text{Ipotesi}}$: Q_1 è resistivo

Circuito valido alle alte frequenze



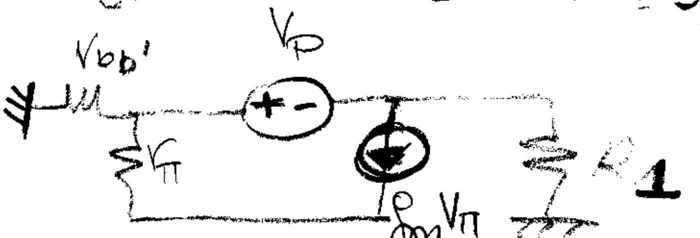


$\boxed{R_{vC\pi}}$:



$R_{vC\pi} = r_\pi \| \frac{1}{g_m} = \frac{r_\pi}{1+h_{fe2}}$ → ≅20 Ω (Fila A)
→ ≅ 9,8 Ω (Fila B)

$\boxed{R_{vC\mu}}$

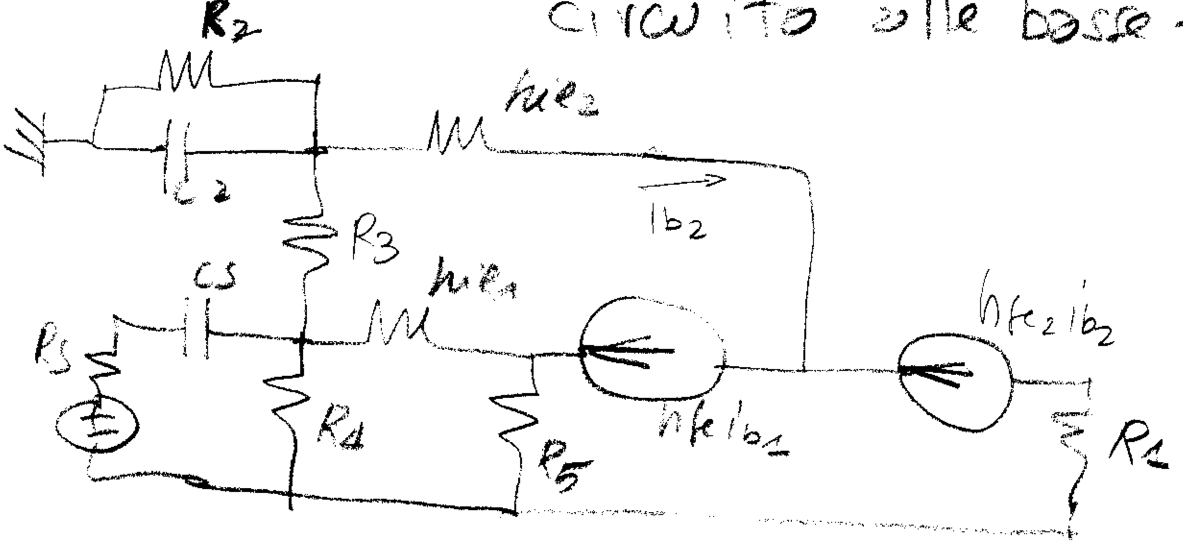


$R_{vC\mu} = r_{bb'} + R_1$ → 3450 (Fila A)
→ 2950 (Fila B)

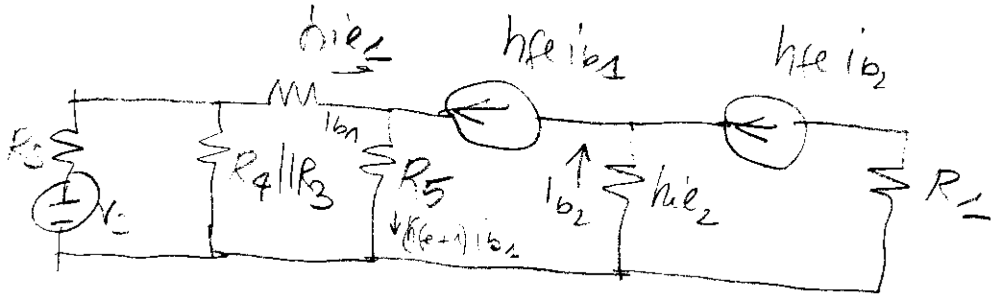
Limite inferiore

5

circuito alle basse frequenze



$\boxed{R_{VCS}}$: resistenza vista da C_S quando C_2 è chiuso

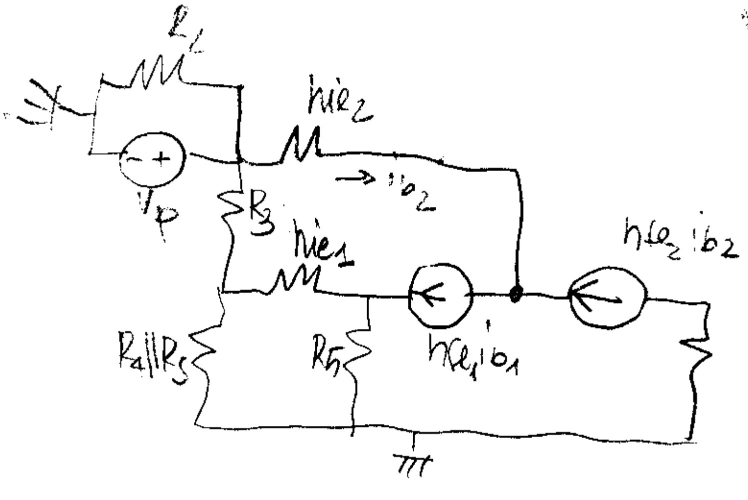


$$R_{VCS} = R_S + R_4 \| R_3 \| \left[h_{ie_1} + (h_{fe_1}+1) R_5\right]$$

R_{VCS} $\nearrow \cong 1583\ \Omega$ $\boxed{\text{Fila A}}$

R_{VCS} $\searrow 1413\ \Omega$ $\boxed{\text{Fila B}}$

$\boxed{R_{VC2}}$ resistenza vista da C_2 quando C_S è chiuso

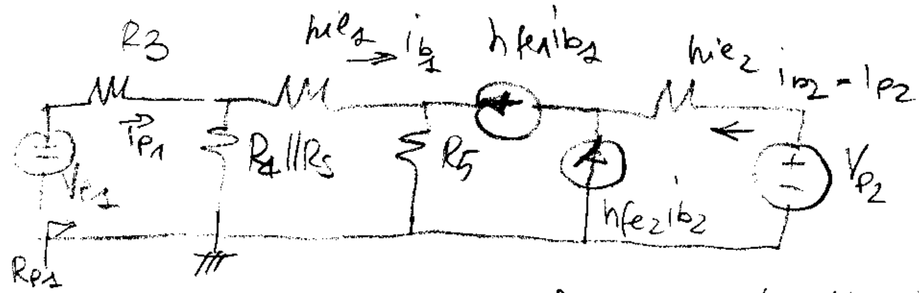


nota: R_2 si "toglie" e rimette in parallelo alla fine.

RVC2 } continua.

Ci sono vari modi per calcolare RVC2.
Si può pensare di "sdoppiare" il circuitino nella maniera seguente.

[Vp è "sdoppiabile" perché è un generatore ideale]



La corrente totale che esce da V_p è $I_p = I_{p1} + I_{p2}$

Quello che non si può fare è di calcolare I_{p2} spegnendo V_{p1}, poiché si vede bene che quella sezione di circuito dipende dall'altra tramite $h_{fe}\, i_{b1}$

Quindi si trova I_{p1}, o, che è lo stesso: $R_{p1} = V_{p1} / I_{p1}$:

$$R_{p1} = R_3 + R_4 \| R_s \| \left[h_{ie1} + R_5 (h_{fe1} + 1) \right]$$

→ 3096.7Ω $\boxed{\text{Fila A}}$
→ 4095.1Ω $\boxed{\text{Fila B}}$

A questo punto si ha che (partitore di corrente):

$$i_{b1} = I_{p1} \cdot \frac{R_4 \| R_s}{R_4 \| R_s + h_{ie1} + R_5 (h_{fe1} + 1)}$$

mentre si vede chiaramente che $i_{b2} = \dfrac{h_{fe1}}{1 + h_{fe2}}\, i_{b1}$

e: $I_{p2} = i_{b2}$. In definitiva:

$$I_{TOT} = \frac{V_p}{R_{p1}} + \frac{V_p}{R_{p1}} \cdot \underbrace{\left(\frac{h_{fe1}}{1 + h_{fe2}} \cdot \frac{R_4 \| R_s}{R_4 \| R_s + h_{ie1} + R_5 (h_{fe1} + 1)} \right)}_{\text{lo chiamiamo } K} = \frac{V_p (1 + K)}{R_{p1}}$$

Pertanto $R_{VC2} = R_2 \left\| \dfrac{R_{p1}}{1 + K} \right. =$

→ 2583Ω $\boxed{\text{Fila A}}$
→ 2812Ω $\boxed{\text{Fila B}}$

Il limite inferiore di banda è:

$$f_L = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{1}{R_{VC2} \cdot C_2} + \frac{1}{R_{VCs} \cdot C_s} \right]$$

→ 32 Hz $\boxed{\text{Fila A}}$
→ 118 Hz $\boxed{\text{Fila B}}$