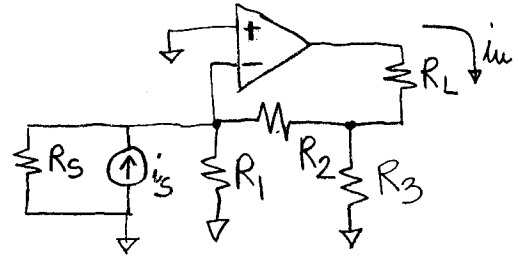
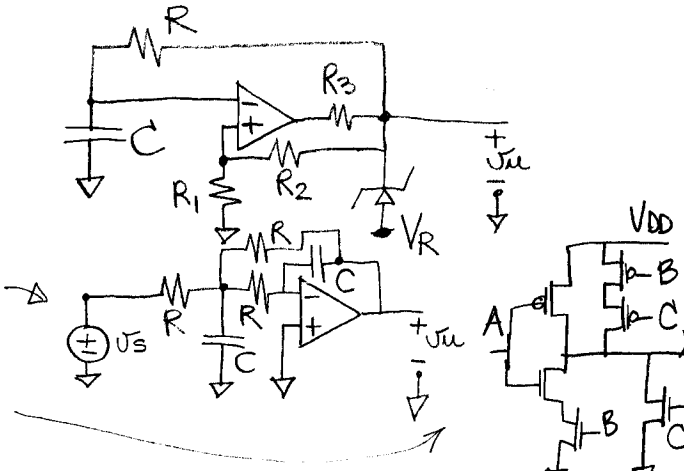


Parte A **FILA A**

1. Si consideri il circuito a lato. $R_s = 1\text{ K}\Omega$ è la resistenza del generatore di segnale, $R_L = 100\ \Omega$ è il carico. Si calcoli la resistenza di ingresso, la resistenza di uscita, la funzione del trasferimento i_o/i_s e il limite superiore di banda del circuito completo. L'amplificatore nello schema ha amplificazione di tensione $A_{vO}=10^4$, $R_{in} = 200\text{ K}\Omega$, $R_{out} = 300\ \Omega$, un polo a frequenza $f_p = 100\text{ Hz}$. Inoltre si consideri $R_1 = 10\text{ K}\Omega$, $R_2 = 20\text{ K}\Omega$, $R_3 = 30\text{ K}\Omega$.



2. Sia dato il circuito mostrato a lato. Ricavare la forma d'onda ottenuta in uscita, giustificando il procedimento. Disegnare e quotare correttamente l'andamento della tensione sul condensatore e all'uscita del circuito nel tempo, sullo stesso asse dei tempi ($R = 10\text{ K}\Omega$, $C = 47\text{ nF}$, $R_1 = R_2 = 10\text{ K}\Omega$, $R_3 = 3\text{ K}\Omega$, $V_Z = 4.7\text{ V}$, $V_R = -3\text{ V}$).



3. Calcolare la funzione di trasferimento del filtro a lato e disegnarne il diagramma di Bode [$R=10\text{ K}\Omega$, $C=10\text{ nF}$]

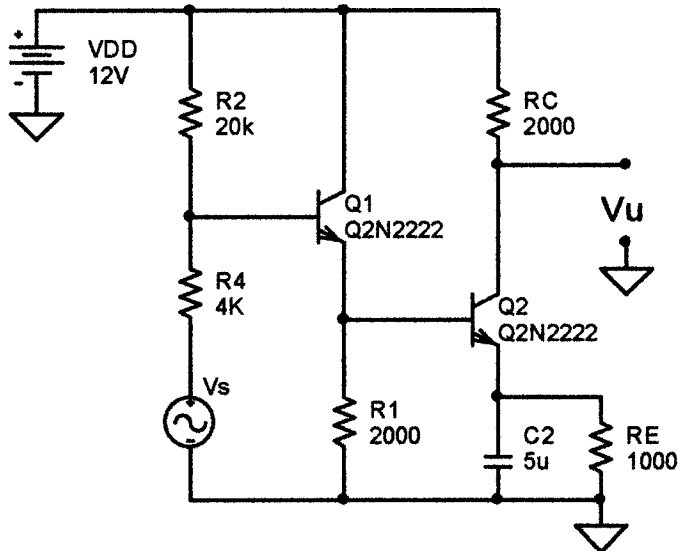
4. Realizzare la porta logica complessa CMOS che svolga la stessa funzione logica del circuito a lato. Utilizzare il minimo numero di transistori.

Punteggio totale Parte A: 14

Parte B **FILA A**

Con riferimento al circuito mostrato a lato, calcolare:

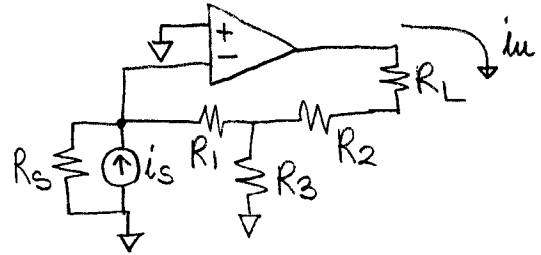
- il punto di riposo dei due transistori Q1 e Q2 e i parametri del circuito di piccolo segnale
- la funzione di trasferimento a centro banda
- il limite superiore di banda
- l'impedenza d'ingresso a centrobanda.



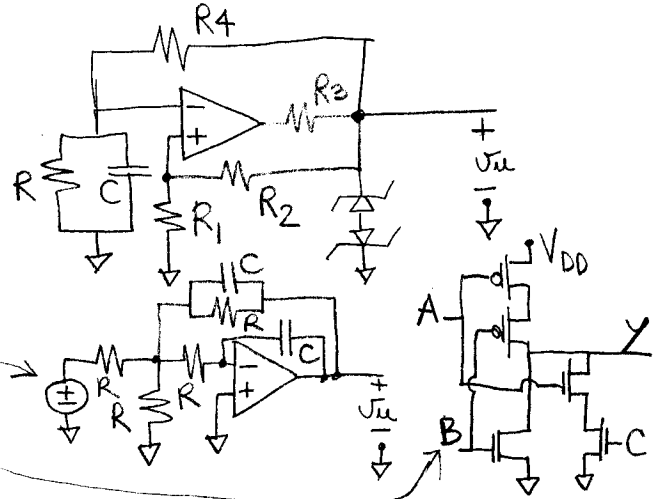
Punteggio totale Parte B: 14/30

Parte A **FILA B**

1. Si consideri il circuito a lato. $R_s = 1 \text{ K}\Omega$ è la resistenza del generatore di segnale, $R_L = 100 \Omega$ è il carico. Si calcoli la resistenza di ingresso, la resistenza di uscita, la funzione del trasferimento i_o/i_s e il limite superiore di banda del circuito completo. L'amplificatore nello schema ha amplificazione di tensione $A_{vO} = 10^4$, $R_{in} = 200 \text{ K}\Omega$, $R_{out} = 300 \Omega$, un polo a frequenza $f_p = 100 \text{ Hz}$. Inoltre si consideri $R_1 = 10 \text{ K}\Omega$, $R_2 = 20 \text{ K}\Omega$, $R_3 = 30 \text{ K}\Omega$.



2. Sia dato il circuito mostrato a lato. Ricavare la forma d'onda ottenuta in uscita, giustificando il procedimento. Disegnare e quotare correttamente l'andamento della tensione sul condensatore e all'uscita del circuito nel tempo, sullo stesso asse dei tempi ($R = 10 \text{ K}\Omega$, $C = 47 \text{ nF}$, $R_1 = R_2 = 10 \text{ K}\Omega$, $R_3 = 3 \text{ K}\Omega$, $R_4 = 3 \text{ K}\Omega$, $V_Z = 4.7 \text{ V}$).



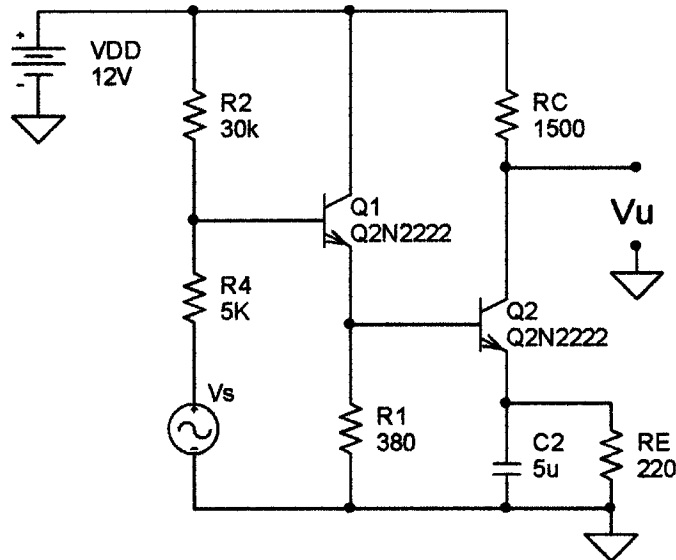
3. Calcolare la funzione di trasferimento del filtro a lato e disegnarne il diagramma di Bode [$R = 10 \text{ K}\Omega$, $C = 10 \text{ nF}$].
4. Realizzare la porta logica complessa CMOS che svolga la stessa funzione logica del circuito a lato. Utilizzare il minimo numero di transistori.

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
- l'impedenza d'ingresso a centrobanda.



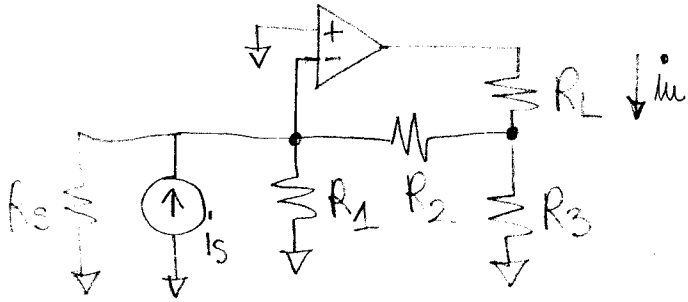
Punteggio totale Parte B: 14/30

Parte A

1

1

Fila A

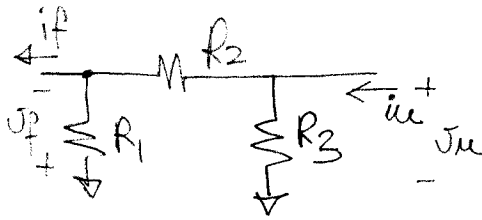


$$R_1 = 10\text{K}\Omega$$

$$R_2 = 20\text{K}\Omega$$

$$R_3 = 30\text{K}\Omega$$

rete $\times \beta$



$$i_f = \beta i_u + \frac{v_p}{R_{of}}$$

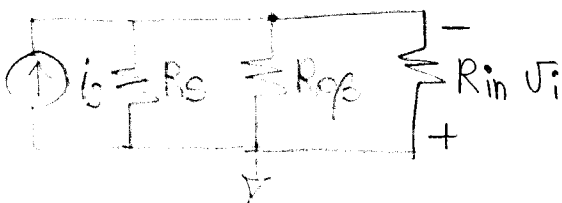
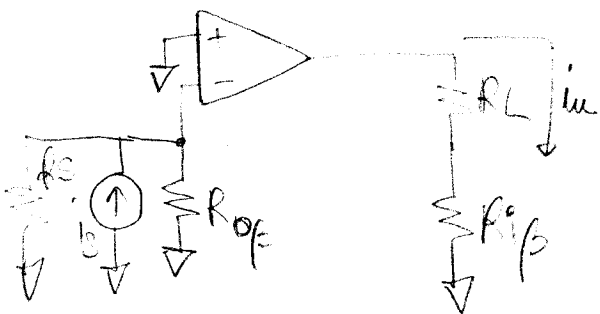
$$v_u = R_{ip} i_u + v_p$$

$$f = \frac{i_f}{i_u} \Big|_{v_p=0} = \frac{R_3}{R_2 + R_3} = 0,6$$

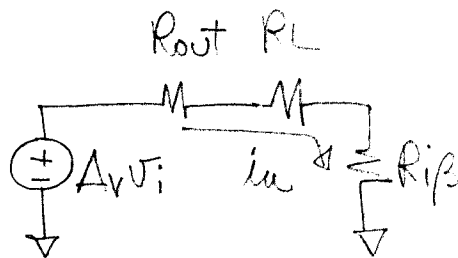
$$R_{of} = \frac{v_p}{i_f} \Big|_{i_u=0} = R_1(R_2 + R_3) = 83\text{K}\Omega$$

$$R_{ip} = \frac{v_u}{i_u} \Big|_{v_p=0} = R_2 \parallel R_3 = 12\text{K}\Omega$$

Ae



$$i_i = -i_s (R_s \parallel R_{of} \parallel R_{in})$$



$$i_u = \frac{A_v v_i}{R_{out} + R_L + R_{ip}}$$

(2)

$$A_e = \left. \frac{i_u}{i_s} \right|_{\beta=0} = \frac{-A_v(R_s \parallel R_{o\beta} \parallel R_{in})}{R_{out} + R_L + R_{i\beta}} = -716.9$$

$$A_e \Big|_{R_s \rightarrow \infty} = -645.1$$

$$A_e \Big|_{R_L=0} = -722.7$$

$$R_{IF} = \frac{(R_{o\beta} \parallel R_{in})}{1 - \beta A_e \Big|_{R_s \rightarrow \infty}} = 2.07 \Omega$$

$$R_{OF} = (R_{i\beta} + R_{out}) (1 - \beta A_e \Big|_{R_L=0}) = 5.35 \text{ M}\Omega$$

$$A_F = \frac{i_u}{i_s} = \frac{A_e}{1 - \beta A_e} = -1.66$$

$$f_H = f_p (1 - \beta A_e) = 43.1 \text{ KHz}$$

Fila B

la rete del β è diversa.



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

$$v_u = R_{i\beta} i_u + R_2 v_f$$

$$\beta = \left. \frac{i_f}{i_u} \right|_{v_f=0} = \frac{R_3}{R_1 + R_3} = 0.75$$

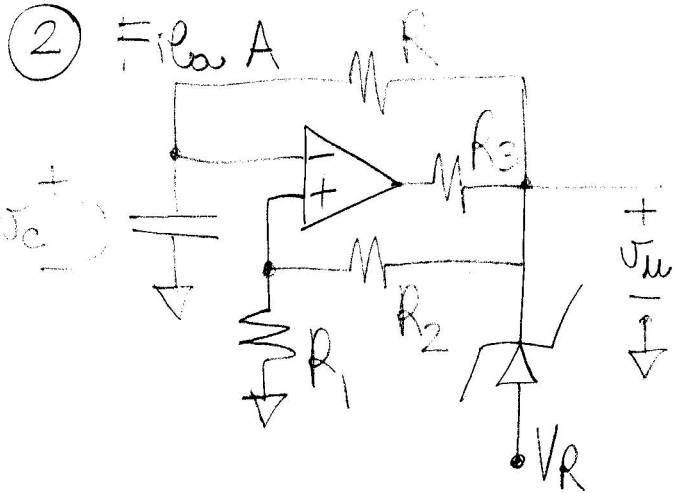
$$R_{o\beta} = \left. \frac{v_f}{i_f} \right|_{i_u=0} = R_1 + R_3 = 40 \text{ K}\Omega, \quad R_{i\beta} = \left. \frac{v_u}{i_u} \right|_{v_f=0} = R_2 + R_1 \parallel R_3 = 27.5 \text{ K}\Omega$$

poi lo svolgimento è lo stesso della fila A

abbiamo $R_{IF} = 3,72 \Omega$
 $R_{OF} = 7,31 M\Omega$

$A_F = -1,33$
 $f_H = 26,2 KHz$

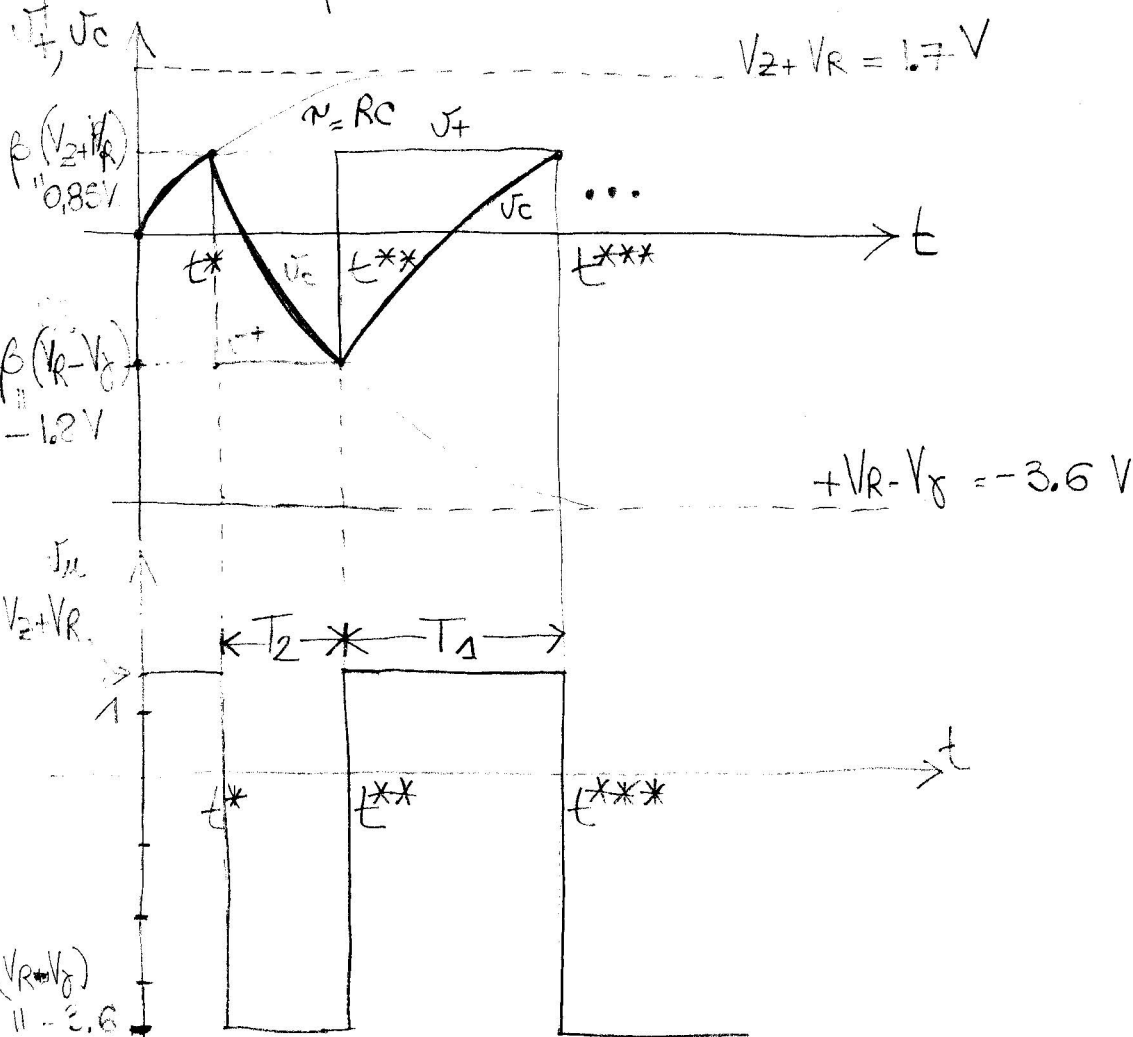
$A_e = -348$ $A_{e|_{R_{S \rightarrow \infty}}} = 11947$ $A_{e|_{R_e = 0}} = -349,2$



$V_R = -3V$
 $V_Z = 4,7V$

scrivere: ALTA $V_u = V_R + V_Z$, $I_F = \frac{R_1}{R_1 + R_2} (V_R + V_Z) = \beta (V_R + V_Z)$
 BASSA $V_u = V_R - V_D$, $I_F = \frac{R_1}{R_1 + R_2} (V_R - V_D) = \beta (V_R - V_D)$

poniamo che per $t=0$ $V_c = 0 = V^-$



calcolo di T_1

(4)

$$\beta(V_z + V_R) = v_c(t^{***}) = \beta(V_R - V_\gamma) + \left[\left(\frac{1}{2} + V_R \right) - \beta(V_R - V_\gamma) \right] \left[1 - e^{-\frac{T_1}{RC}} \right]$$

$$\beta(V_z + V_R) = (V_z + V_R) - \left[V_z + (1-\beta)V_R + \beta V_\gamma \right] e^{-T_1/RC}$$

$$(V_z + V_R)(1-\beta) = \left[V_z + (1-\beta)V_R + \beta V_\gamma \right] e^{-T_1/RC}$$

$$T_1 = RC \ln \left[\frac{V_z + (1-\beta)V_R + \beta V_\gamma}{(V_z + V_R)(1-\beta)} \right] = 6,652 \times 10^{-4} \text{ s}$$

calcolo di T_2

$$\beta(V_R - V_\gamma) = v_c(t^{**}) = \beta(V_z + V_R) + \left[V_R - V_\gamma - \beta(V_z + V_R) \right] \left[1 - e^{-\frac{T_2}{RC}} \right]$$

$$\beta(V_R - V_\gamma) = V_R - V_\gamma - \left[V_R(1-\beta) - V_\gamma - \beta V_z \right] e^{-T_2/RC}$$

$$(1-\beta)(V_R - V_\gamma) = \left(V_R(1-\beta) - V_\gamma - \beta V_z \right) e^{-T_2/RC}$$

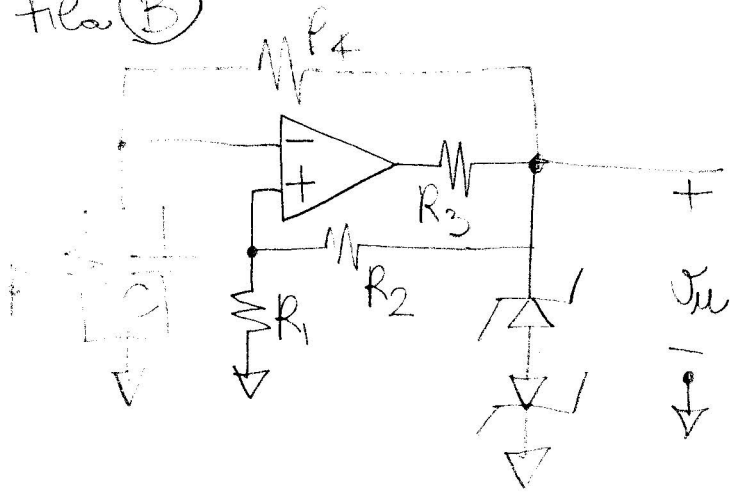
$$T_2 = RC \ln \left[\frac{V_R(1-\beta) - V_\gamma - \beta V_z}{(1-\beta)(V_R - V_\gamma)} \right] = 4,254 \times 10^{-4} \text{ s}$$

$T_1 + T_2$

$$\delta = \frac{T_1}{T} = 0,61$$

$$T = 1,09 \text{ ms}$$

Fila (B)



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

uscite del comparatore: ALTA $V_u = V_0 = V_2 + V_d, V^+ = \beta V_0$

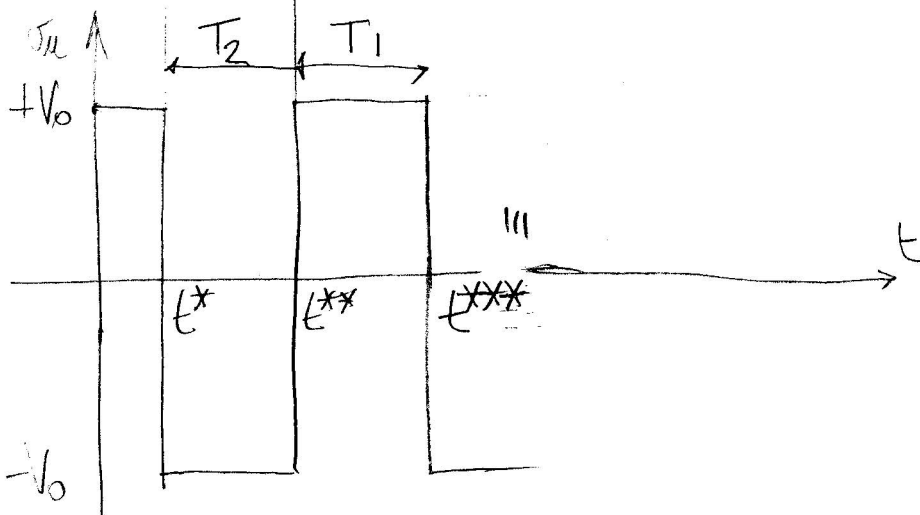
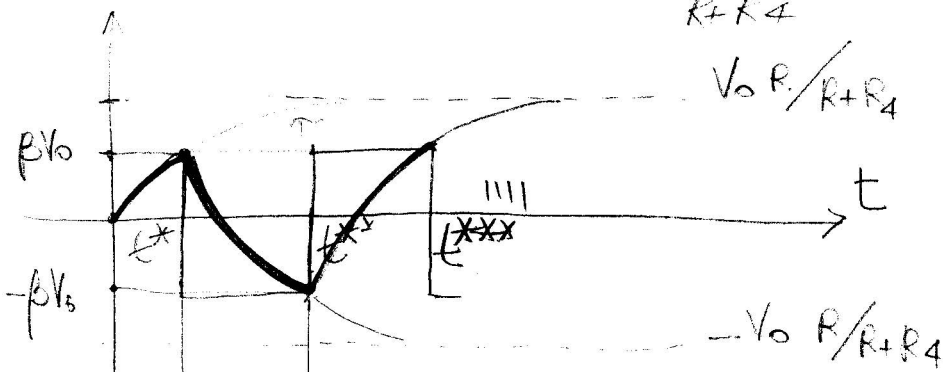
BASSA $V_u = -V_0 = -(V_2 + V_d), V^+ = -\beta V_0$

quando $V_u = +V_0$ la capacità si carica con costante di tempo $\tau = (R // R_4)C$ verso l'asintoto $\frac{V_0 R}{R + R_4}$

quando $V_u = -V_0$: $\tau = (R // R_4)C$

asintoto $-\frac{V_0 R}{R + R_4}$

poniamo che per $t=0$
 $V_u = V_0$



l'onda è quadra ($\delta = 0,5$)

6

$$T_1 = T_2 :$$

$$v_c(t^{***}) = \beta V_0 = -\beta V_0 + \left(\frac{V_0 R}{R+R_4} + \beta V_0 \right) \left(1 - e^{-\frac{T_1}{RC}} \right)$$

$$\beta V_0 = \frac{V_0 R}{R+R_4} - \left(\frac{R}{R+R_4} + \beta \right) V_0 e^{-T_1/RC}$$

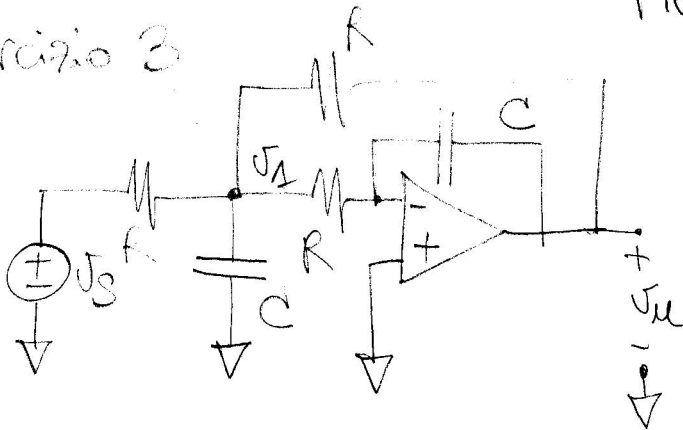
$$\beta - \frac{R}{R+R_4} = - \left(\frac{R}{R+R_4} + \beta \right) e^{-T_1/RC}$$

$$T_1 = RC \ln \left[\frac{\frac{R}{R+R_4} + \beta}{\frac{R}{R+R_4} - \beta} \right] = 0,73 \text{ ms}$$

$$T = 2T_1 = 1,458 \text{ ms}$$

Esercizio 3

Fila A



Nodo v_1 :
$$v_1 \left(\frac{3}{R} + Cs \right) - \frac{V_s}{R} - \frac{V_u}{R} = 0$$

$$V_u = \frac{-v_1}{RCs}$$

$$-RCs V_u (3 + RCs) - \frac{V_s}{R} - \frac{V_u}{R} = 0$$

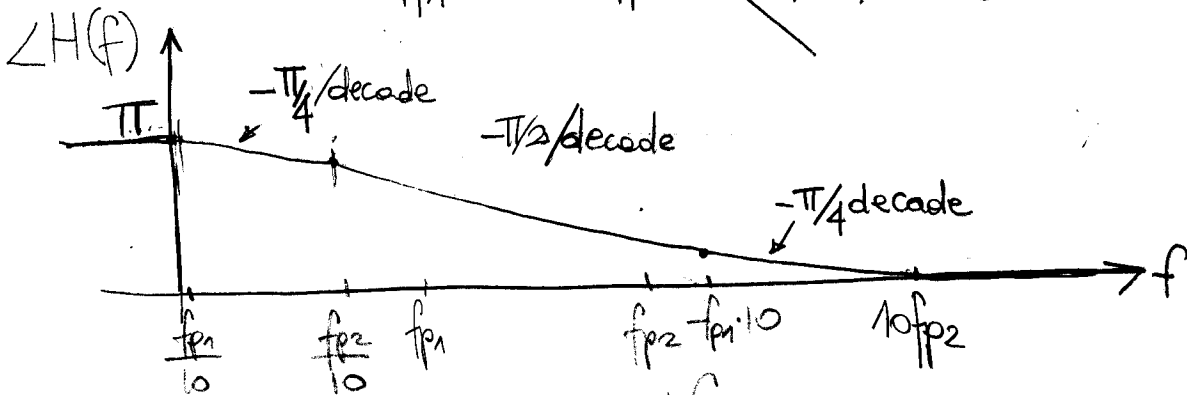
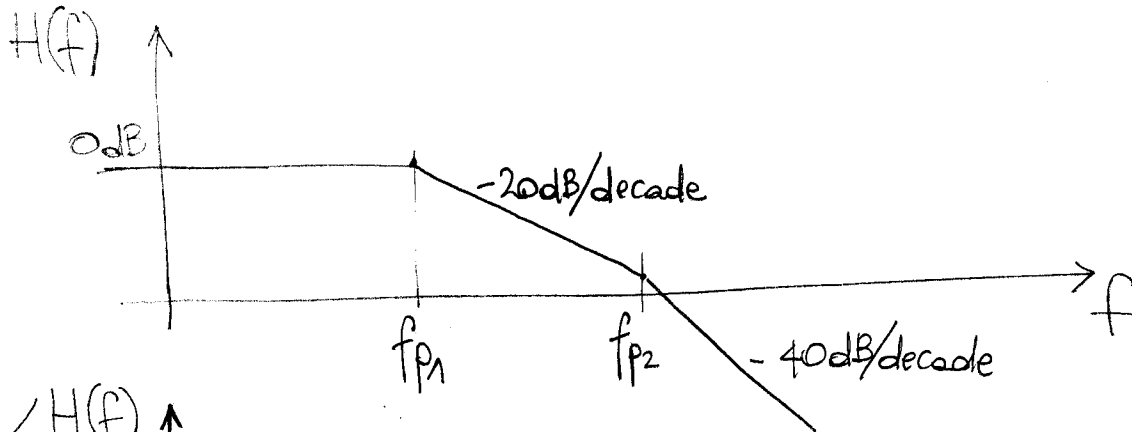
$$H(s) = \frac{V_u}{V_s} = \frac{-1}{RCs^2 + 3RCs + 1}$$

si tratta di un filtro passabasso

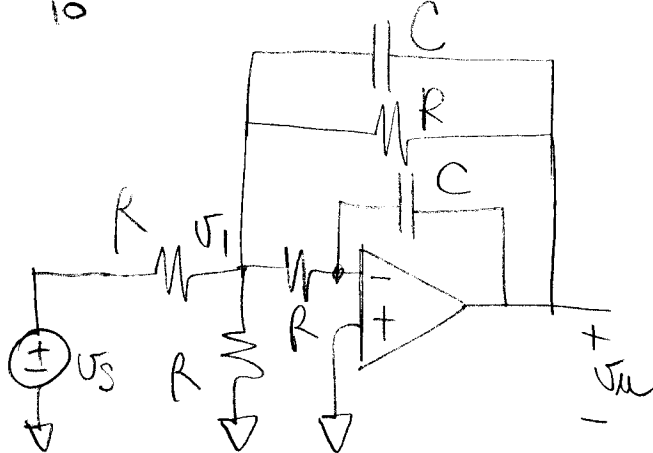
$$s_{p1}, s_{p2} = \frac{-3RC \pm \sqrt{9R^2C^2 - 4R^2C^2}}{2R^2C^2} = \frac{1}{RC} \frac{-3 \pm \sqrt{5}}{2}$$

→ -3,82 Krad/s
→ -26,2 Krad/s

$f_{p1} = 608 \text{ Hz}$
 $f_{p2} = 4,17 \text{ KHz}$



Fila B



NODO V_1
$$V_1 \left(\frac{4}{R} + Cs \right) - \frac{V_s}{R} - V_u \left(\frac{1}{R} + Cs \right) = 0$$

$$V_u = \frac{-V_1}{RCs}$$

$$-RCs V_u (4 + RCs) - \frac{V_s}{R} - V_u (1 + RCs) = 0$$

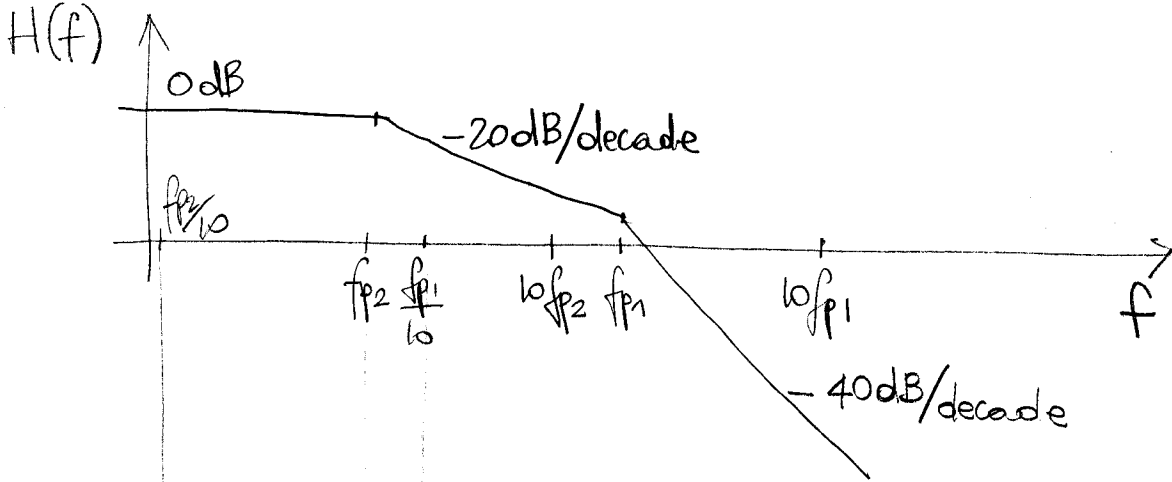
$$-V_u [RCs^2 + 5RCs + 1] = \frac{V_s}{R}$$

$$H(s) = \frac{V_u}{V_s} = \frac{-1}{RCs^2 + 5RCs + 1}$$

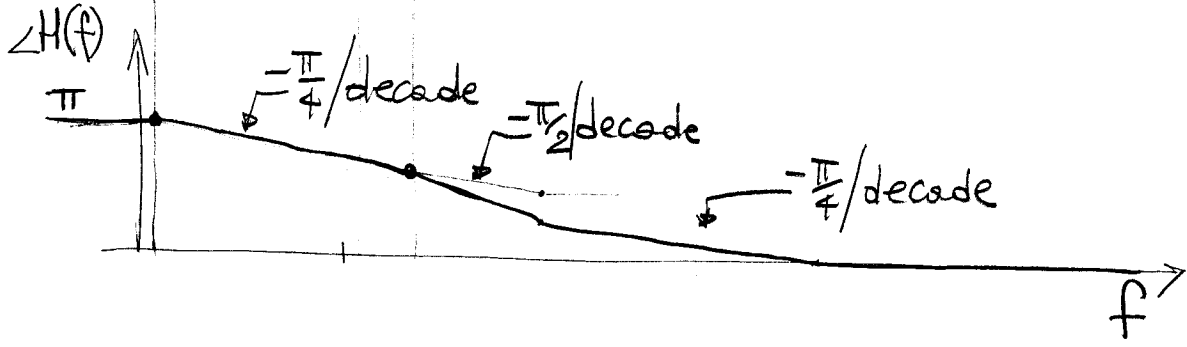
filtro passabasso

poli $s_{p1}, s_{p2} = \frac{-5RC \pm \sqrt{25R^2C^2 - 4RC^2}}{2RC^2} = \frac{-5 \pm \sqrt{21}}{2RC}$

$\rightarrow -47,9 \text{ Krad/s}$
 $\rightarrow -2,09 \text{ Krad/s}$



$f_{p1} = 7,6 \text{ KHz}$
 $f_{p2} = 332,8 \text{ Hz}$



Esercizio ④

Fila A

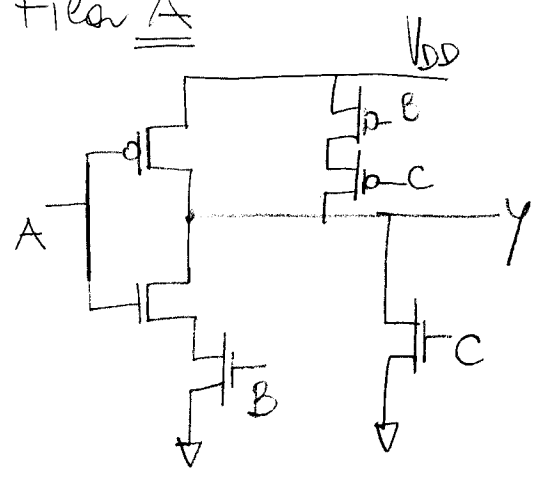


tabella di verità

ABC	Y
000	1
001	X
011	X
010	1
100	1
101	0
111	0
110	0

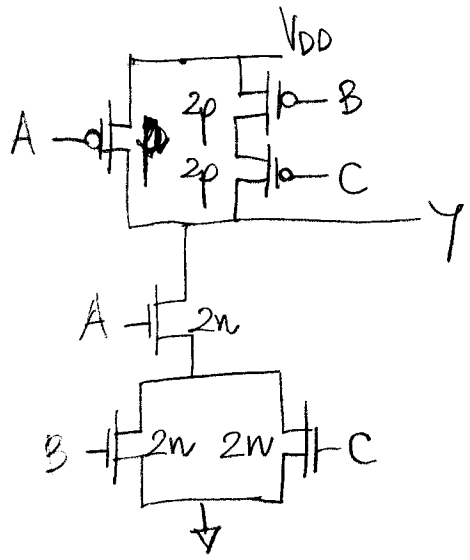
AB	00	01	11	10
0	1	1	0	1
1	X	X	0	0

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

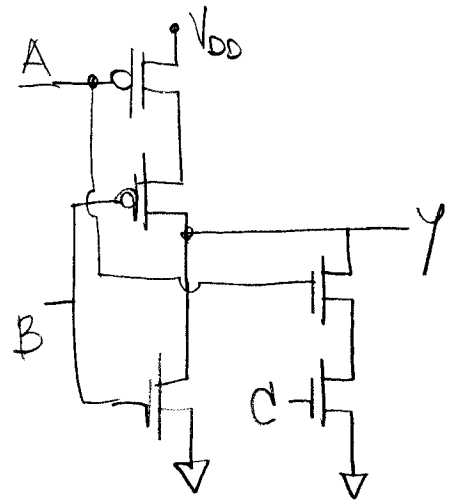
$$\bar{Y} = \overline{\bar{A} + \bar{B}\bar{C}} =$$

$$= A \cdot (\overline{\bar{B}\bar{C}}) =$$

$$= A \cdot (B+C)$$



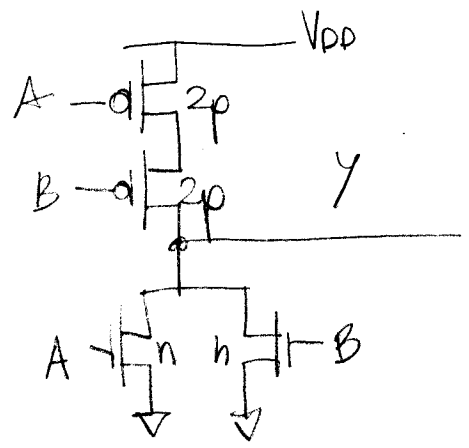
File B



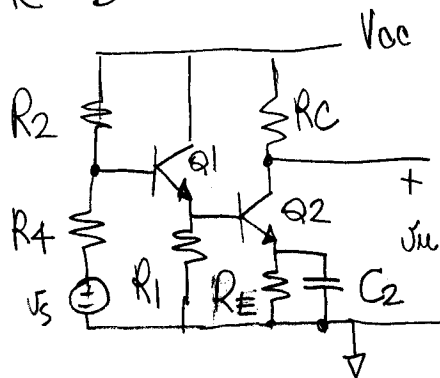
	AB		
C	00	01	11
0	1	0	X
1	1	0	0

$$y = \overline{A \cdot B} = \overline{A+B} \quad \text{NOR}$$

$$\overline{y} = A+B$$



Parte B



$$V_{B1} = \frac{R_4}{R_4 + R_2} V_{cc} = \frac{4}{24} \times 12 = 2V \quad (\text{approssimazione di partitore pesante})$$

$$V_{E1} = V_{B1} - V_{BEON} = 1,3V$$

$$I_{C1} = \frac{V_{E1}}{R_E} = \frac{1,3}{2000} = 0,65 \text{ mA} \quad (\text{approssimazione } I_{B2} \ll I_{C1})$$

$$V_{CE1} = V_{cc} - V_{E1} = 10,7V$$

$$V_{E2} = V_{E1} - V_{BEON} = 0,6V$$

$$I_{E2} = \frac{V_{E2}}{R_E} = 0,6 \text{ mA} \approx I_{C2}$$

$$V_{CE2} = V_{cc} - I_{C2} R_C - V_{E2} = 12 - 0,6 \cdot 2 - 0,6 = 10,2V$$

$$h_{FE1} \approx h_{FE2} = 140$$

$$I_{B1} = \frac{I_{C1}}{h_{FE1}} \ll \frac{V_{cc}}{R_2 + R_4} = \frac{12}{24 \cdot 10^3} = 0,5 \text{ mA}$$

\uparrow 4,3 μA

$$I_{B2} = \frac{I_{C2}}{h_{FE2}} \ll I_{C1} = 0,65 \text{ mA}$$

\uparrow 4,3 μA

$$r_{bb} = 450 \Omega \quad (\text{valore a } 1 \text{ mA})$$

$$h_{fe1} = h_{fe2} \approx h_{fe@1 \text{ mA}} = 175$$

$$r_{\pi 1} = \frac{h_{fe1} V_T}{I_{C1}} = \frac{175 \cdot 25,9}{0,65} = 6973 \Omega$$

$$g_{m1} = \frac{I_{C1}}{V_T} = 25 \cdot 10^{-3} \Omega^{-1}$$

$$h_{ie1} = r_{bb} + r_{\pi 1} = 7423 \Omega$$

$$r_{\pi 2} = \frac{h_{fe2} V_{T2}}{I_{c2}} = \frac{175 \cdot 25,9}{0,6} = 7554 \quad h_{ie2} = r_{\pi 2} + r_{bb'} = 8004 \Omega$$

$$g_{m2} = \frac{I_{c2}}{V_T} = 23 \cdot 10^{-3} \Omega^{-1}$$

V_A dalle caratteristiche a 1mA

$$V_A = \frac{I_c}{h_{oe}} = \frac{1 \text{ mA}}{20 \cdot 10^{-6} \Omega} = 50 \text{ V}$$

$$\frac{1}{h_{oe1}} = \frac{V_A}{I_{c1}} = \frac{50}{0,65 \cdot 10^{-3}} = 76,9 \text{ K}\Omega$$

$$\frac{1}{h_{oe2}} = \frac{V_A}{I_{c2}} = \frac{50}{0,6 \cdot 10^{-3}} = 83,3 \text{ K}\Omega$$

possiamo trascurare $\frac{1}{h_{oe1}} \gg R_1$, $\frac{1}{h_{oe2}} \gg R_E, R_C$

$$V_{CB1} = 10 \text{ V} \quad C_{\mu 1} = 4 \text{ pF} \quad f_{T1} = 70 \text{ MHz}$$

$$f_{T1} = \frac{g_{m1}}{2\pi (C_{\mu 1} + C_{\pi 1})} \rightarrow C_{\pi 1} = \frac{g_{m1}}{2\pi f_{T1}} - C_{\mu 1} = \frac{I_{c1}}{V_T 2\pi f_{T1}} - C_{\mu 1}$$

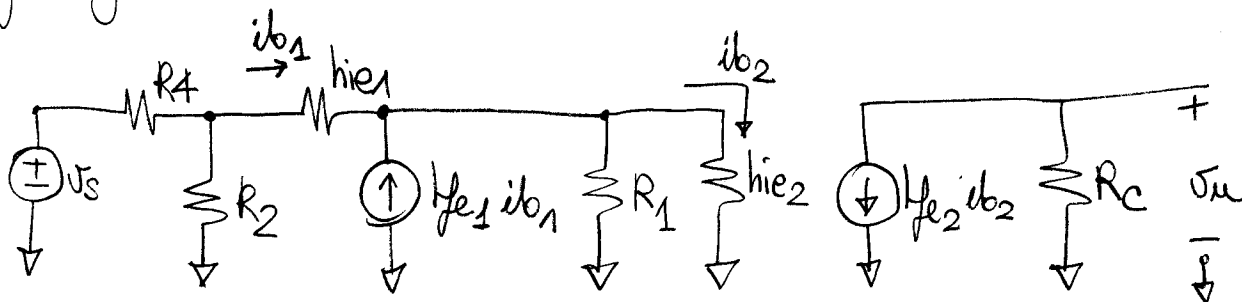
$$= \frac{0,65 \cdot 10^{-3}}{25,9 \cdot 10^{-3} \cdot 628,70 \cdot 10^6} - 4 \cdot 10^{-12}$$

$$= (57,1 - 4) 10^{-12} = \underline{\underline{53,1 \text{ pF}}}$$

$$V_{CB2} = 9,5 \text{ V} \quad C_{\mu 2} = 4 \text{ pF} \quad f_{T2} = 70 \text{ MHz}$$

$$C_{\pi 2} = \frac{g_{m2}}{2\pi f_{T2}} - C_{\mu 2} = \frac{0,7 \cdot 10^{-3}}{25,9 \cdot 10^{-3} \cdot 628,70 \cdot 10^6} - 4 \cdot 10^{-12} = 48,7 \text{ pF}$$

guadagno a centobanda



$$i_{b1} = \frac{V_s \cdot R_2}{R_2 + R_4} \cdot \frac{1}{R_2 \parallel R_4 + h_{ie1} + (R_1 \parallel h_{ie2})(h_{\beta 1} + 1)} =$$

$$i_{b2} = i_{b1} (h_{\beta 1} + 1) \frac{R_1}{R_1 + h_{ie2}}$$

$$V_u = -h_{\beta 2} R_c i_{b2}$$

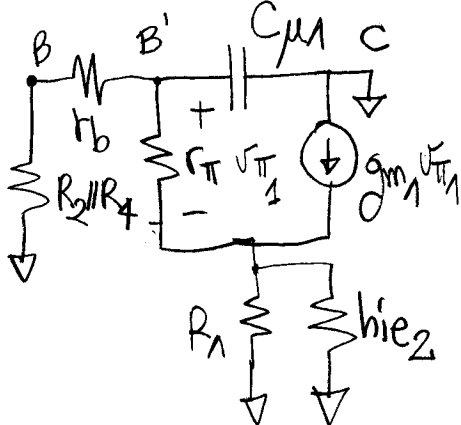
$$A_f = \frac{V_u}{V_s} = \frac{-h_{\beta 2} R_c (h_{\beta 1} + 1) R_1}{R_1 + h_{ie2}} \cdot \frac{R_2}{R_2 + R_4} \cdot \frac{1}{R_2 \parallel R_4 + h_{ie1} + (R_1 \parallel h_{ie2})(h_{\beta 1} + 1)}$$

$$= -175 \cdot 2000 \cdot 176 \cdot \frac{2000}{2000 + 8004} \cdot \frac{20}{20 + 4} \cdot \frac{1}{\frac{80000}{24} + 7423 + 1600 \cdot 176}$$

$$= -35.1$$

limite superiore di banda

$R_{V_{\mu 1}}$

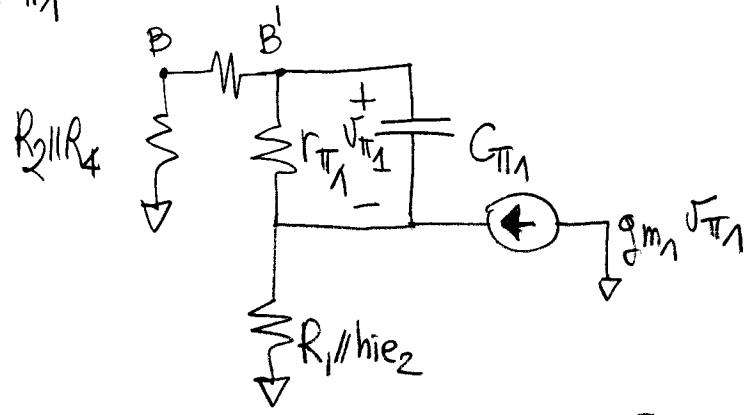


$$R_{V_{\mu 1}} = [r_{\pi 1} + (1 + g_{m1} r_{\pi 1})(R_1 \parallel h_{ie2})] \parallel (r_b + R_2 \parallel R_4)$$

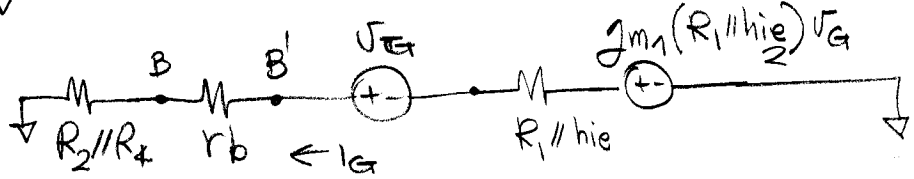
$$= [6973 + 176 \cdot 1600] \parallel [450 + 3333] =$$

$$= 288573 \parallel 3783 = 3734 \Omega$$

$R_{V\pi_1}$



rimuovo r_{π_1}

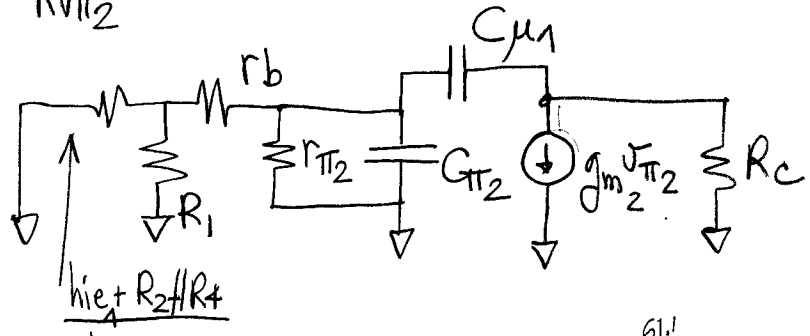


$$i_G = \frac{v_G (1 + g_{m1} (R_1 // h_{ie2}))}{R_2 // R_4 + r_b + R_1 // h_{ie2}}$$

$$R_{V\pi_1} = r_{\pi_1} // \left[\frac{R_2 // R_4 + r_b + R_1 // h_{ie2}}{1 + g_{m1} (R_1 // h_{ie2})} \right] = r_{\pi_1} // \left[\frac{5383}{1 + 40} \right] = 6973 // 131,3 = 128,9 \Omega$$

3333 450 1600
 $25 \cdot 10^{-3}$ 1600

$R_{V\pi_2}$



$$R_{V\pi_2} = r_{\pi_2} // \left[r_b + R_1 // \left(\frac{h_{ie1} + R_2 // R_4}{h_{\beta e1} + 1} \right) \right] = 476,9 \Omega$$

7554 450 611
 500

$$R_{V\mu_2} = R_{V\pi_2} (1 + g_{m2} R_c) + R_c = 476,9 (1 + 46) + 2000 = 24,4 K\Omega$$

$$f_H = \frac{1}{2\pi [R_{V\pi_1} C_{\pi_1} + R_{V\mu_1} C_{\mu_1} + R_{V\pi_2} C_{\pi_2} + R_{V\mu_2} C_{\mu_2}]} = 1,08 \text{ MHz}$$

Resistenza d'ingresso a centrobanda

$$R_{in} = R_4 + R_2 \parallel \left[h_{ie1} + (R_1 \parallel h_{ie2}) (1 + h_{fe1}) \right] = 18.7 K\Omega$$

$\begin{matrix} 4K & 20K & 7423 & 1600 & 176 \end{matrix}$

Parte B : il PROCEDIMENTO È IL MEDESIMO, ABBIAMO :

$V_{B1} = 1.714 V$

$V_{E1} = 1.014 V$

$I_{E1} = 2.668 mA$

$V_{CE1} = 10.986 V$

$h_{FE1} = 150$

$V_{E2} = 0.314 V$

$I_{E2} = 1.43 mA$

$V_{CE2} = 9.54 V$

$h_{FE2} = 150$

$r_{bb} = 450 \Omega$

$g_{m1} = \frac{I_{c1}}{V_T} = 0.103 \Omega^{-1}$

$h_{fe1} = 175$

$r_{\pi1} = 1.7 K\Omega$

$h_{ie1} = 2.15 K\Omega$

$h_{fe2} = 175 \quad g_{m2} = \frac{I_{c2}}{V_T} = 0.055 \Omega^{-1}$

$r_{\pi2} = 3.17 K\Omega$

$h_{ie2} = 3.62 K\Omega$

$\frac{1}{h_{oe1}} = \frac{50}{2.67 \cdot 10^{-3}} = 18.7 K\Omega \gg R_1$

$\frac{1}{h_{oe2}} = \frac{50}{1.43 \cdot 10^{-3}} = 34.96 K\Omega \gg R_E, R_C$

} trascurabili

$V_{CB1} = 10.3V \quad C_{\mu1} = 4pF, f_{T1} = 160 MHz, C_{\pi1} = 98.5 pF$

$V_{CE2} = 8.84V \quad C_{\mu1} = 4pF, f_{T2} = 125 MHz, C_{\pi2} = 66 pF$

$A_f = -56.18$

$R_{v\mu1} = 4.4 K\Omega$

$R_{v\pi1} = 128.9 \Omega$

$R_{v\mu2} = 38.44 K\Omega$

$R_{v\pi2} = 442 K\Omega$

$f_H = 787 KHz$

$R_{in} = 25.3 K\Omega$