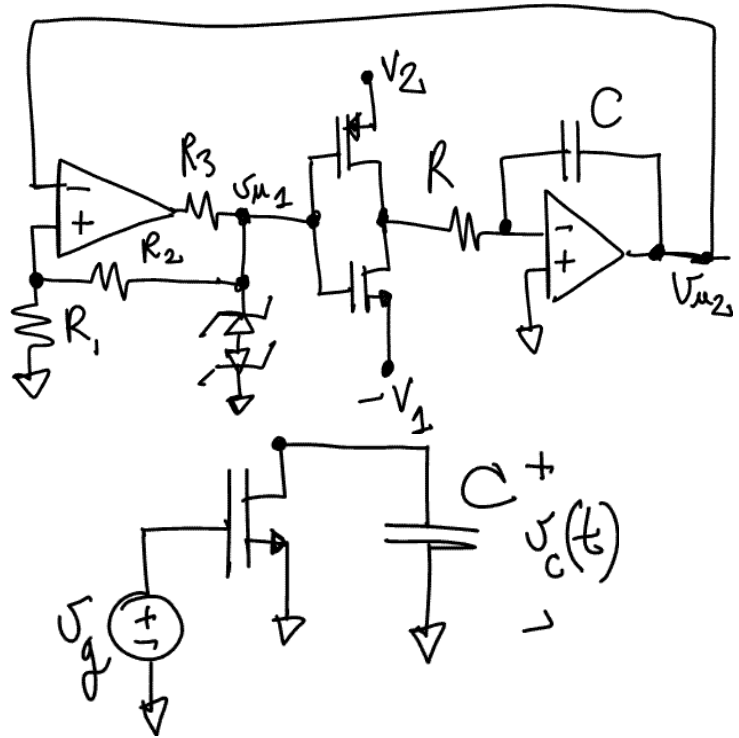


Parte A **FILA A**

1. Si consideri un amplificatore di tensione con $A_v=1000$, $R_{in} = 200 \text{ K}\Omega$, $R_{out} = 100 \Omega$. Si reazioni in modo da ottenere una resistenza di ingresso di 50Ω e una resistenza di uscita minore di 20Ω . Per semplicità considerare il generatore di ingresso ideale e il carico assente.

2. Descrivere il funzionamento del circuito a lato e disegnare e quotare correttamente l'andamento della tensione all'uscita dei due amplificatori operazionali. Supporre che all'istante iniziale il condensatore sia scarico. Si consideri $C = 47 \text{ nF}$, $R_1=R_2=R=10 \text{ K}\Omega$, $R_3 = 500 \Omega$, $V_Z= 4.7 \text{ V}$, $V_1=1 \text{ V}$, $V_2=2 \text{ V}$.

3. Si consideri il circuito a lato. Si supponga che la caratteristica del MOSFET in zona di saturazione sia $I_D = \frac{K_n}{2}(V_{GS} - V_T)^2$, con $V_T=2 \text{ V}$, $K_n=1 \text{ mA/V}^2$. All'istante $t=0$ la tensione sulla capacità vale 5 V e una tensione costante di 5 V viene applicata sul gate. Calcolare dopo quanto tempo il MOSFET va in zona triodo.



4. Disegnare e quotare una porta complessa CMOS e un circuito a pass gate che implementino un multiplexer da 2 a 1

Punteggio totale Parte A: 14

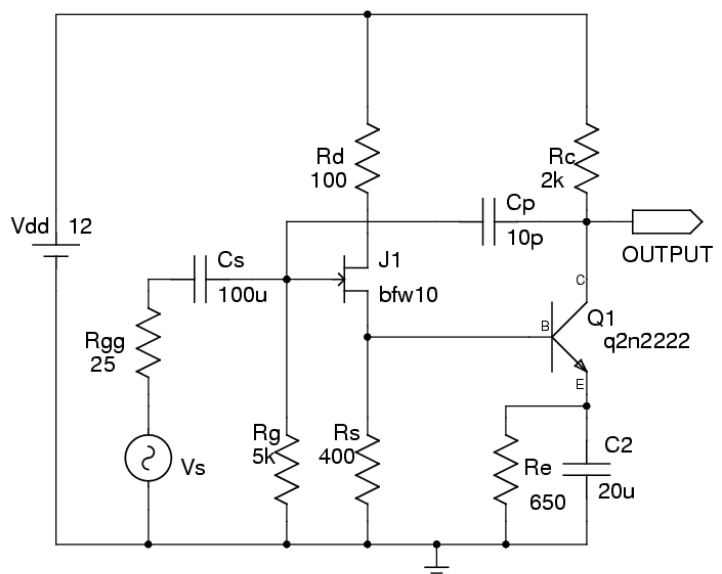
Parte B

Con riferimento al circuito in alto, calcolare:

- il punto di riposo dei due transistori J1 e Q1 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

Assunzioni semplificative:

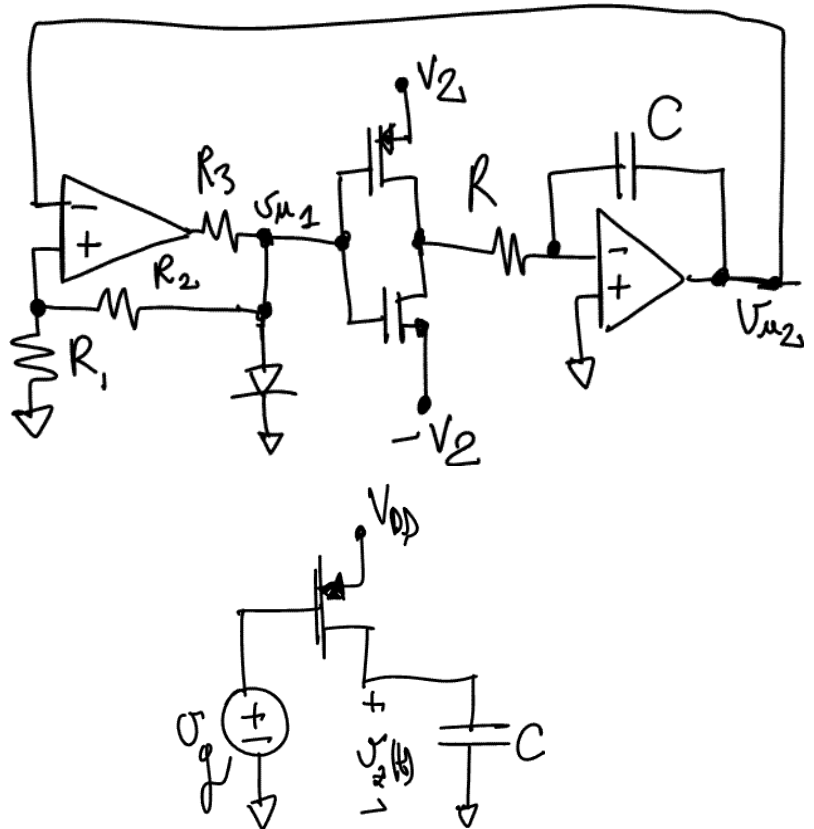
- il JFET è un BFW10 completamente resistivo
- il BJT è un 2N2222



Punteggio totale Parte B: 14/30

Parte A **FILA B**

- Si consideri un amplificatore di tensione con $A_v=2000$, $R_{in} = 300 \text{ K}\Omega$, $R_{out} = 500 \Omega$. Si reazioni in modo da ottenere una resistenza di ingresso maggiore di $2 \text{ M}\Omega$ e una resistenza di uscita di 50Ω . Per semplicità considerare il generatore di ingresso ideale e il carico assente.
- Descrivere il funzionamento del circuito a lato e disegnare e quotare correttamente l'andamento della tensione all'uscita dei due amplificatori operazionali. Supporre che all'istante iniziale il condensatore sia scarico. Si consideri $C = 100 \text{ nF}$, $R_1=5 \text{ K}\Omega$, $R_2=R=10 \text{ K}\Omega$, $R_3 = 500 \Omega$, $V_Z=4.7 \text{ V}$, $V_1=1 \text{ V}$, $V_2=2 \text{ V}$.
- Si consideri il circuito a lato. Si supponga che la caratteristica del pMOSFET in zona di saturazione sia $I_D = -\frac{K_p}{2}(V_{GS} - V_T)^2$, con $V_T=-2 \text{ V}$, $K_p=2 \text{ mA/V}^2$. All'istante $t=0$ la tensione sulla capacità vale 0 V e una tensione costante di 0 V viene applicata sul gate. Sia $V_c=6 \text{ V}$. Calcolare dopo quanto tempo il pMOSFET va in zona triodo.
- Disegnare e quotare una circuito CMOS (fino al livello dei singoli transistori) che implementino un decoder a 1 bit di ingresso, attivo alto.



Punteggio totale Parte A: 14

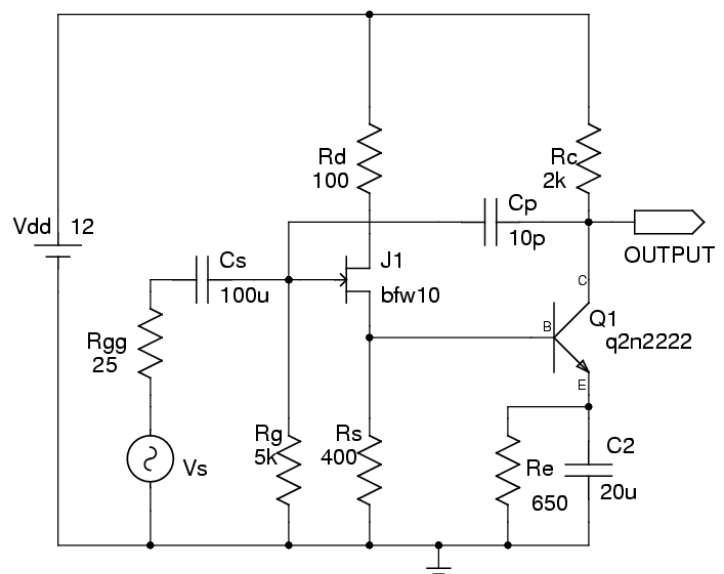
Parte B

Con riferimento al circuito in alto, calcolare:

- il punto di riposo dei due transistori J1 e Q1 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

Assunzioni semplificative:

- il JFET è un BFW10 completamente **resistivo**
- il BJT è un 2N2222



Punteggio totale Parte B: 14/30

Parte A

Esercizio 1

Fila A

$R_{in} = 200 \text{ k}\Omega$

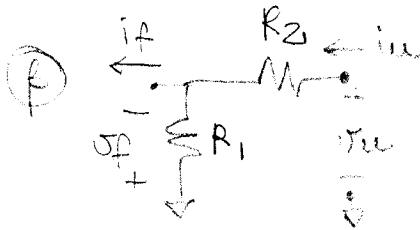
$R_{out} = 100 \text{ }\Omega$

$A_v = 1000$

$R_{if} = 50 \text{ }\Omega$

$R_{of} < 20 \text{ }\Omega$

Reazione con feedback di corrente e prelievo di tensione [9F]



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

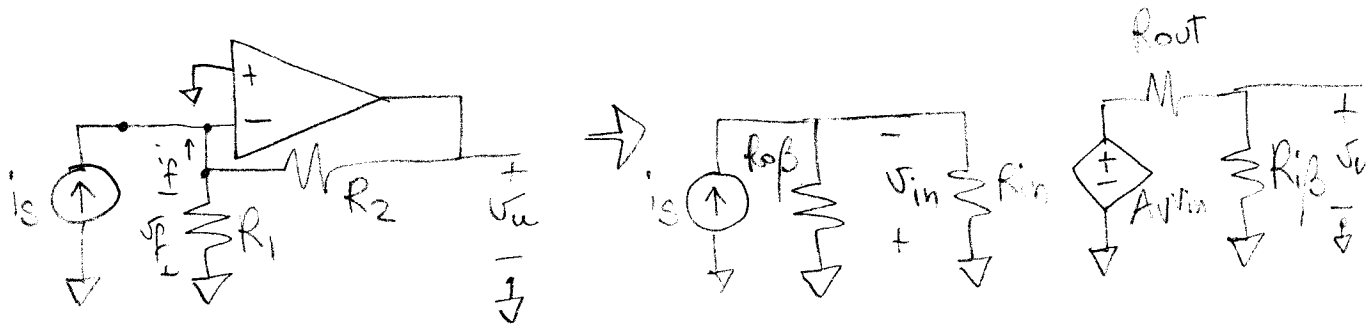
$i_u = \frac{v_u}{R_{if}} = \beta i_f$

$f = \left. \frac{i_f}{v_u} \right|_{v_u=0} = \frac{1}{R_2}$

$R_{of} = \left. \frac{v_f}{i_f} \right|_{i_u=0} = R_1 \parallel R_2$

$R_{if} = \left. \frac{v_u}{i_u} \right|_{v_f=0} = R_2$

A_e



$i_{in} = -i_s [R_{of} \parallel R_{in}]$

$v_u = A_v v_{in} \frac{R_{if}}{R_{if} + R_{out}}$

$A_e = \left. \frac{v_u}{i_s} \right|_{\beta=0} = -A_v \frac{R_{if}\beta}{R_{if} + R_{out}}$

$R_{of} \parallel R_{in} = -A_v \frac{R_2}{R_2 + R_{out}} (R_1 \parallel R_2 \parallel R_{in})$

$R_{if} = \frac{(R_{in} \parallel R_{of})}{(1 - \beta A_e)} = \frac{R_1 \parallel R_2 \parallel R_{in}}{1 + \frac{A_v}{R_2 + R_{out}} (R_1 \parallel R_2 \parallel R_{in})} = 50 \text{ }\Omega$

$$R_{oF} = \frac{R_1 \beta \parallel R_{out}}{(1 - \beta A_e)} = \frac{R_2 \parallel R_{out}}{(1 - \beta A_e)} \ll 20 \Omega \quad (2)$$

se supponiamo $\beta A_e \gg 1$ (da verificare), abbiamo soddisfatte entrambi

$$R_{IF} \approx \frac{R_2 + R_{out}}{A_v} = 50 \Omega \rightarrow R_2 + R_{out} = 50000 \Omega$$

$R_2 = 49900 \Omega$

$$\beta A_e = \frac{A_v}{\underbrace{R_2 + R_{out}}_{\frac{1}{50}}} \cdot (R_1 \parallel \underbrace{R_2}_{49900} \parallel \underbrace{R_{in}}_{200k\Omega})$$

Per avere $\beta A_e \gg 1$ basta scegliere R_1 molto grande. Per esempio $R_1 = 200k\Omega$

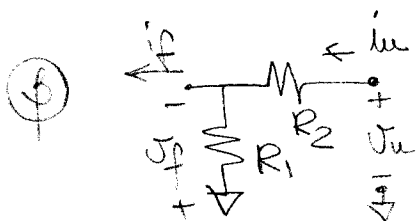
$$R_1 \parallel R_2 \parallel R_{in} = 33.3k\Omega \quad \beta A_e = \frac{33.3 \cdot 10^3}{50} \approx \underline{\underline{666}} \gg 1$$

per verificare $R_{oF} = \frac{R_2 \parallel R_{out}}{1 - \beta A_e} = \frac{100}{666} \approx \underline{\underline{0,15 \Omega}} \ll 20 \Omega$

Fila B

$$\begin{aligned} R_{in} &= 300k\Omega & R_{oF} &= 50 \Omega \\ R_{out} &= 500 \Omega & R_{IF} &> 2M\Omega \\ A_v &= 2000 \end{aligned}$$

Reazione con prelievo di tensione e inserzione di tensione [SP]

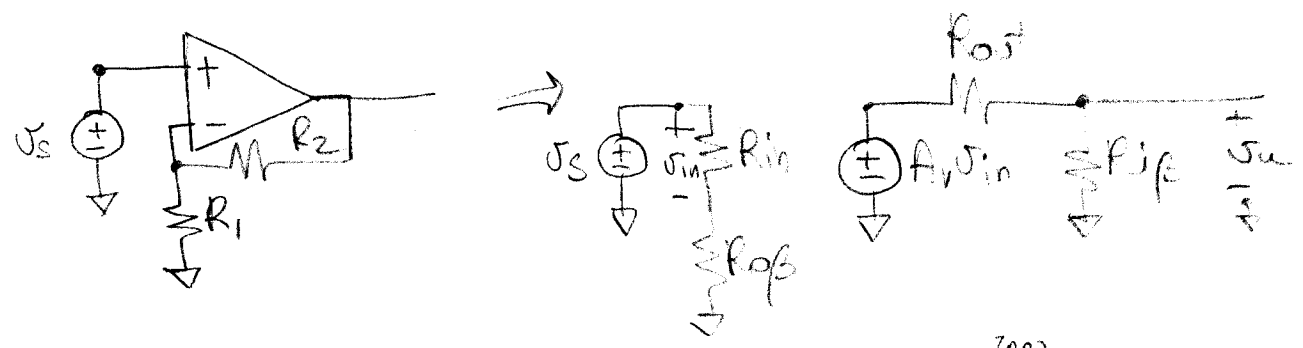


$$v_f = \beta v_u + R_2 \beta i_f$$

$$i_u = \frac{v_u}{R_1} + \beta i_f$$

$$\beta = \left. \frac{v_f}{v_u} \right|_{i_f=0} = \frac{R_1}{R_1 + R_2}; \quad R_{oF} = \left. \frac{v_f}{i_f} \right|_{v_u=0} = R_1 \parallel R_2; \quad R_{IF} = \left. \frac{v_u}{i_u} \right|_{v_f=0} = R_1 + R_2$$

A_e



$$A_e = \left. \frac{i_o}{i_s} \right|_{\beta=0} = \frac{R_{i\beta}}{R_{i\beta} + R_{out}} A_v \frac{R_{in}}{R_{in} + R_{o\beta}} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 + R_2 + R_{out}} \cdot A_v \frac{R_{in}}{R_{in} + R_1 // R_2}$$

$$R_{IF} = (R_{in} + R_{o\beta})(1 - \beta A_e) \approx 2 \text{ M}\Omega$$

$$R_{of} = \frac{R_{i\beta} // R_{out}}{(1 - \beta A_e)} = \frac{(R_1 + R_2) // R_{out}}{\left(1 + \frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_{out}} A_v \frac{R_{in}}{R_{in} + R_1 // R_2}\right)} = 50 \Omega$$

poniamo $R_1 // R_2 \ll R_{in}$ (da verificare)

$$R_{of} = \frac{(R_1 + R_2) // R_{out}}{1 + \frac{A_v R_1}{R_1 + R_2 + R_{out}}} = \frac{(R_1 + R_2) R_{out}}{R_1 R_2 + R_{out} + A_v R_1} = 50 \Omega$$

poniamo $R_1 + R_2 = 2000 \Omega \rightarrow (R_1 // R_2) // R_{out} = 400 \Omega$

$\rightarrow 1 - \beta A_e \approx 8$ così torna anche R_{IF}

sostituendo nella R_{of} otteniamo $\frac{2000 \cdot 500}{R_1 R_2 + 2500} = 50 \rightarrow R_1 R_2 + 2500 = 20000$

$$A_v R_1 + 2500 = 20000 \rightarrow A_v R_1 = 17500 \rightarrow R_1 = 8.75 \Omega$$

$$R_2 = 2000 - R_1 = 1991.25 \Omega$$

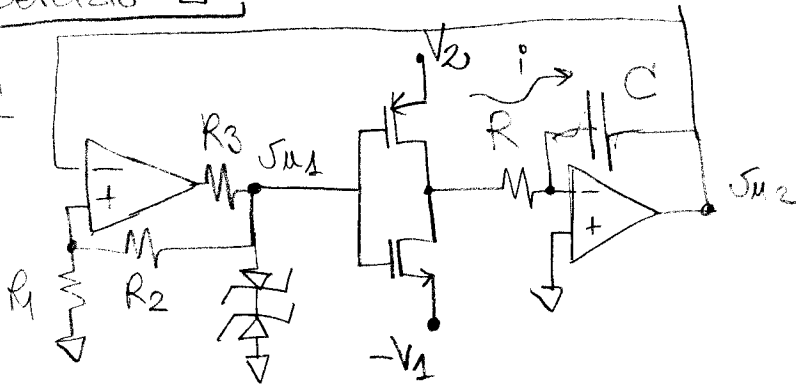
$R_1 // R_2 \approx R_1 \ll R_{in}$ (verificato)

$$R_{IF} = (R_{in} + R_{o\beta})(1 - \beta A_e) = (300000 + 8.75) 8 > 2 \text{ M}\Omega \quad \text{OK}$$

Esercizio 2

(4)

Fila A



- $V_1 = 1V$
- $V_2 = 2V$
- $R_1 = R_2 = 10k\Omega$
- $R_3 = 500\Omega$
- $V_0 = 4.7V$
- $R = 10k\Omega$
- $C = 47nF$
- $V_0 = V_2 + V_1 = 5.4V$

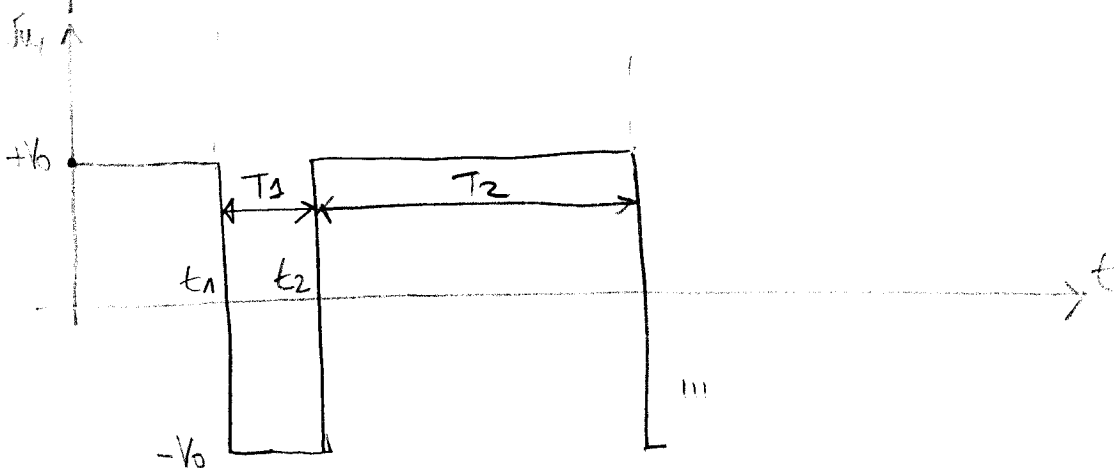
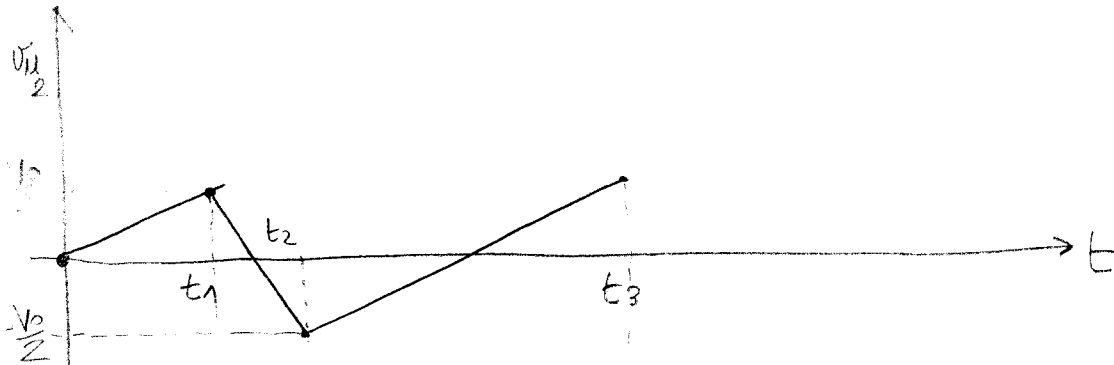
supponiamo che per $t=0$ $u_2 = 0$ e $u_{u1} = +V_0$

abbiamo dunque $i = \frac{-V_1}{R}$ $\frac{du_2}{dt} = \frac{i}{C} = \frac{-V_1}{RC}$

il trigger di Schmitt commuta quando

$$u_2 = V_T = \frac{u_{u1}}{2} = \frac{V_0}{2} = 2.7V$$

$$t_1 = \frac{V_0}{2} \frac{RC}{V_1} = \frac{2.7 \cdot 10^4 \cdot 47 \cdot 10^{-9}}{1} = 1.27 \cdot 10^{-3} s$$



$$i = \frac{V_2}{R} \Rightarrow \frac{du_2}{dt} = \frac{i}{C} = \frac{V_2}{RC}$$

il trigger di Schmitt commuta se $u_2 = V_T = \frac{u_{u1}}{2} = -\frac{V_0}{2} = -2.7V$

$$T_1 = \frac{V_0}{\left| \frac{dV_{u2}}{dt} \right|} = \frac{V_0}{V_2} RC = \frac{5,4}{2} \cdot 10^4 \cdot 47 \cdot 10^9 = 1.27 \text{ ms}$$

$$t_2 = t_1 + T_1 = 2.54 \text{ ms}$$

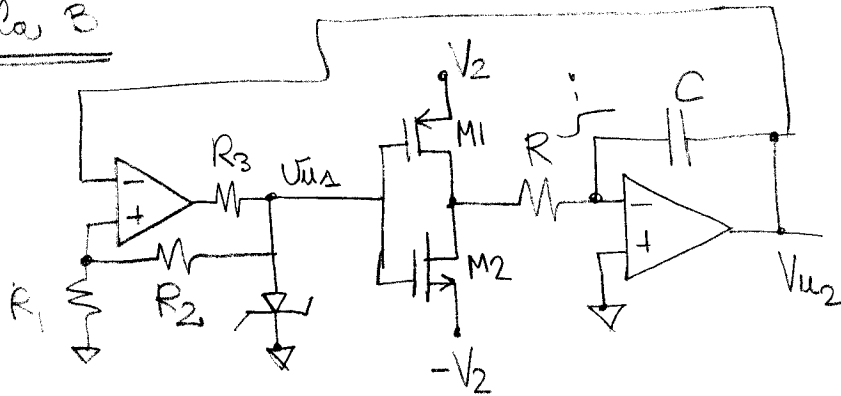
abbiamo di nuovo $V_{u1} = +V_0 \rightarrow i = \frac{-V_1}{R} \rightarrow \frac{dV_{u2}}{dt} = \frac{V_1}{RC}$

la nuova commutazione si ha quando $V_{u2} = V^+ = \frac{V_0}{2} = 2.7 \text{ V}$

$$T_2 = \frac{V_0}{\left| \frac{dV_{u2}}{dt} \right|} = \frac{V_0}{V_1} RC = 2.54 \text{ ms}$$

la forma d'onda si ripete in modo periodico $T = T_1 + T_2 = \underline{\underline{3.81 \text{ ms}}}$

Filva B



- $R_1 = 5 \text{ k}\Omega$
- $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$
- $R_3 = 500 \Omega$
- $R = 10 \text{ k}\Omega$
- $C = 100 \text{ nF}$
- $V_2 = 2 \text{ V}$
- $V_2 = 4 \text{ V}$
- $V_1 = 1 \text{ V}$

supponiamo che per $t=0$ sia $V_{u2} = 0$, $V_{u1} = \frac{V_0}{3}$

la $V_{GS2} = V_{M1} + V_2 = 0.7 + 2 = 2.7 > V_T$ M2 conduce

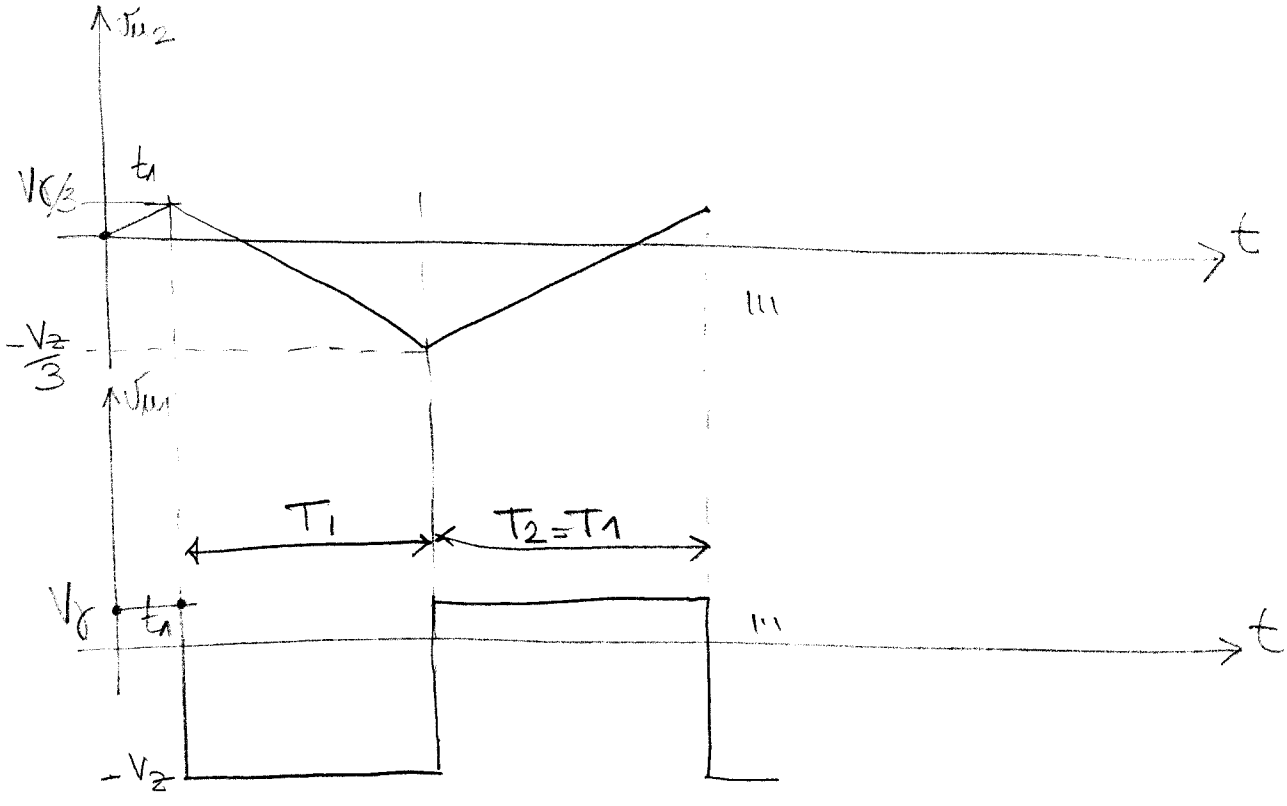
$$i = \frac{-V_2}{R} \rightarrow \frac{dV_{u2}}{dt} = \frac{-i}{C} = \frac{V_2}{RC}$$

si ha la commutazione quando $V_{u2} = V^+ = V_{u1} \frac{R_1}{R_1 + R_2} = \frac{V_0}{3} = 0.23 \text{ V}$

$$t_1 = \frac{V_0/3}{\left| \frac{dV_{u2}}{dt} \right|} = \frac{V_T}{3} \frac{RC}{V_2} = \frac{0.7}{3} \cdot \frac{10^4 \cdot 10^{-7}}{2} = 1.17 \cdot 10^{-4} \text{ s} = 0.117 \text{ ms}$$

abbiamo quindi $i = \frac{V_2}{R} \rightarrow \frac{dV_{u2}}{dt} = \frac{-V_2}{RC}$

la nuova commutazione si ha quando $V^- = V^+ = \frac{-R_1}{R_1 + R_2} V_2 = -1.57 \text{ V}$



$$T_1 = \frac{V_g + V_2}{\left| \frac{dv_{u2}}{dt} \right|} = \frac{V_g + V_2}{\frac{V_2}{RC}} = \frac{V_g + V_2}{V_2} \cdot RC = \frac{5.4}{3} \cdot \frac{10^{-4} \cdot 10^{-7}}{2} = 0.9 \cdot 10^{-3} = 0.9 \text{ ms}$$

successivamente $\frac{dv_{u2}}{dt} = \frac{V_2}{RC}$, commutazione a $v_{u2} = V_g/3$

abbiamo quindi $T_2 = T_1 = 0.9 \text{ ms}$

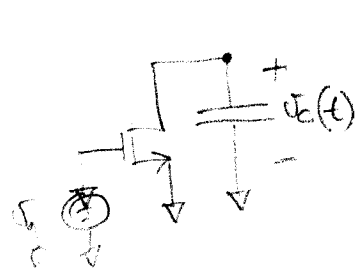
periodo $T = T_1 + T_2 = 1.8 \text{ ms}$

Esercizio 3

Fila A

$$I_D = \frac{K}{2} (V_{GS} - V_T)^2$$

$$K = 1 \text{ mA/V}^2 \quad V_T = 2 \text{ V}$$



$t=0 \quad v_g = 5 \text{ V} \quad v_c(0) = 5 \text{ V}$

$V_{GS} = 5 \text{ V} = V_{GS0}$ zona di saturazione

$$I_D = \frac{1 \cdot 10^{-3}}{2} (5 - 2)^2 = \frac{19 \cdot 10^{-3}}{2} = 4.5 \text{ mA}$$

$$\frac{dv_c}{dt} = \frac{I_D}{C} = \frac{4.5 \cdot 10^{-3}}{10^{-7}} = 4.5 \cdot 10^4 \text{ V/s}$$

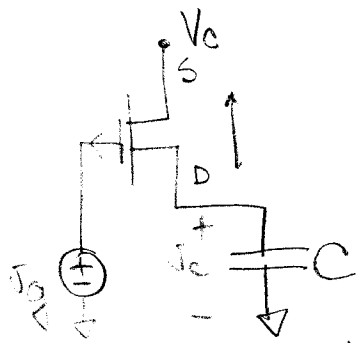
il transistoro entra in zona triodo quando

$$V_{DS} = V_{GS} - V_T$$

$$V_{GS} = 3V$$

$$\Delta t = \frac{V_C(0) - (V_{GS} - V_T)}{\left| \frac{dV_C}{dt} \right|} = \frac{2}{4,5 \cdot 10^4} = 4,4 \cdot 10^{-5} = 44 \mu s$$

File 3



$$V_C = 5V$$

$$V_{GS} = -5V$$

$$V_{DS} = -5V$$

$$V_{GS}(0) = 0V$$

$$V_G(0) = 0V$$

$$V_T = -2$$

$$V_{DS} < V_{GS} - V_T = -5 < -3 \quad \text{zona di saturazione}$$

$$i_{DS} = \frac{K_p}{2} (V_{GS} - V_T)^2 = - \frac{2 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot 16 = -16 \text{ mA}$$

$$\frac{dV_C}{dt} = - \frac{i_{DS}}{C} = \frac{16 \cdot 10^{-3}}{100 \cdot 10^{-9}} = 1,6 \cdot 10^4 \text{ V/s}$$

il transistoro entra in zona triodo quando

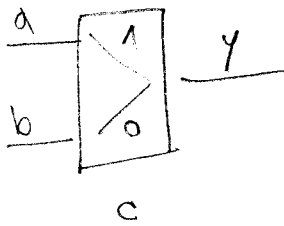
$$V_{DS} = V_{GS} - V_T = -4V \Rightarrow V_C = V_C + V_{DS} = 2V$$

$$\Delta t = \frac{V_C}{\left| \frac{dV_C}{dt} \right|} = \frac{2}{1,6 \cdot 10^4} = 1,25 \cdot 10^{-4} \text{ s}$$

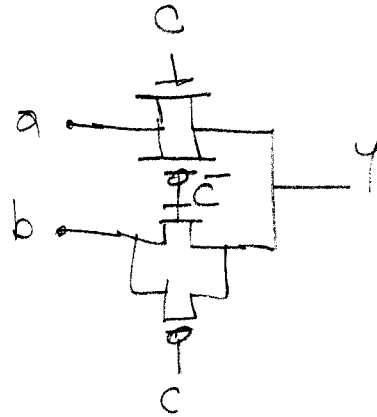
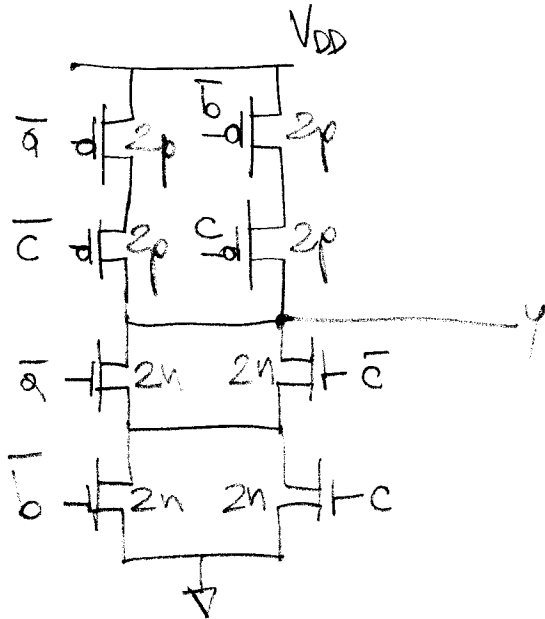
Esercizio 4

Flc A

rete combinatorie che si comporta da MUX 2:1

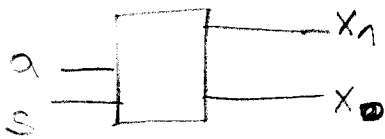


$$y = ac + b\bar{c}$$



Flc B

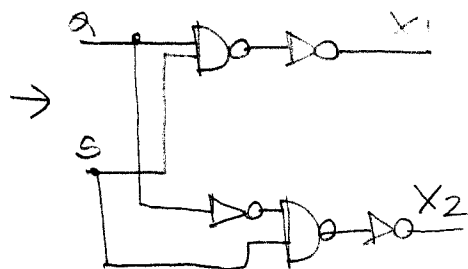
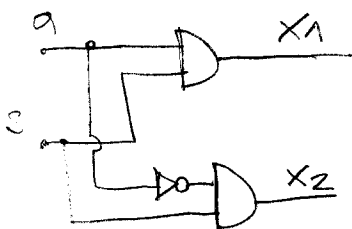
decoder a 2 bit attivo alto

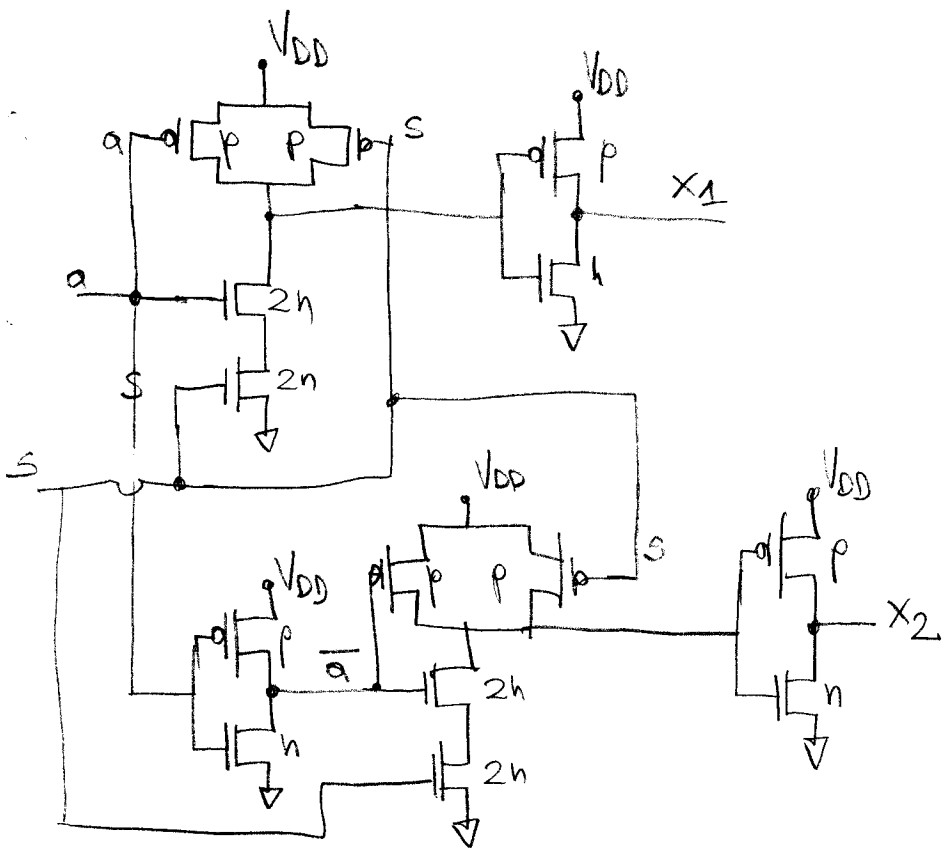


a	s	x1	x2
1	0	0	0
0	0	0	0
1	1	1	0
0	1	0	1

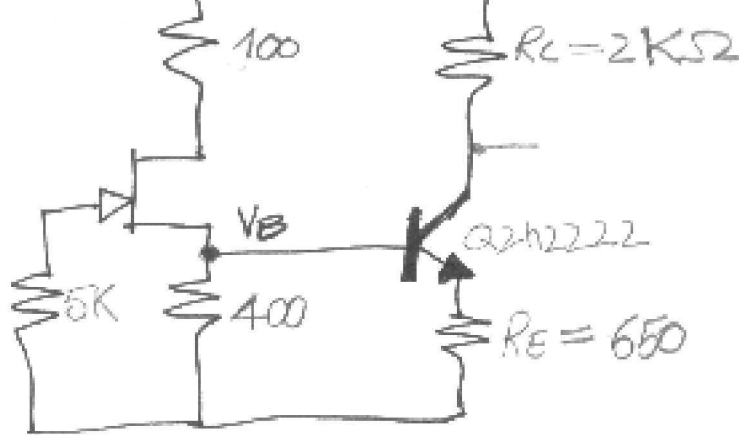
$$x_1 = a s$$

$$x_2 = \bar{a} s$$





—



$$V_B = V_S$$

$$V_{BS} = R_S I_{BS}$$

$$I_{BS} = 5 \text{ mA}$$

$$V_S = 2 \text{ V} =$$

$$V_E = V_B - V_{\gamma} = 1,3 \text{ V}$$

$$I_E = \frac{V_E}{R_E} = 2 \text{ mA}$$

$$V_C = V_{CC} - R_C I_C = 8 \text{ V}$$

$$V_{CE} = V_C - V_E = 6,7 \text{ V} \rightarrow V_{CB} = 6 \text{ V}$$

$$I_B @ (V_{CE} = 6,7 \text{ V}; I_C = 2 \text{ mA}) = 13,3 \mu\text{A} \ll I_{BS} \quad \text{ipotesi partitore passante verificata}$$

$$h_{FE} = \frac{I_C}{I_B} = 150$$

Parametri piccolo segnale

$$C_{\mu} + C_{\pi} = 4 \text{ pF}$$

$$C_{\mu} = 0,6 \text{ pF}$$

$$C_{\pi} = 3,4 \text{ pF}$$

$$r_{m} = 11,5 \text{ mA} / 3,6 \text{ V} = 3,2 \text{ ms}$$

$$r_{ie} @ 1 \text{ mA} = 5000 \Omega$$

$$r_{ie} @ 1 \text{ mA} = r_b + h_{fe}$$

$$\frac{r_{m} @ 2 \text{ mA}}{2 \text{ mA}} = 2716 \Omega$$

$$C_{\mu} @ V_{CB} = 8 \text{ V} = 4,5 \text{ pF}$$

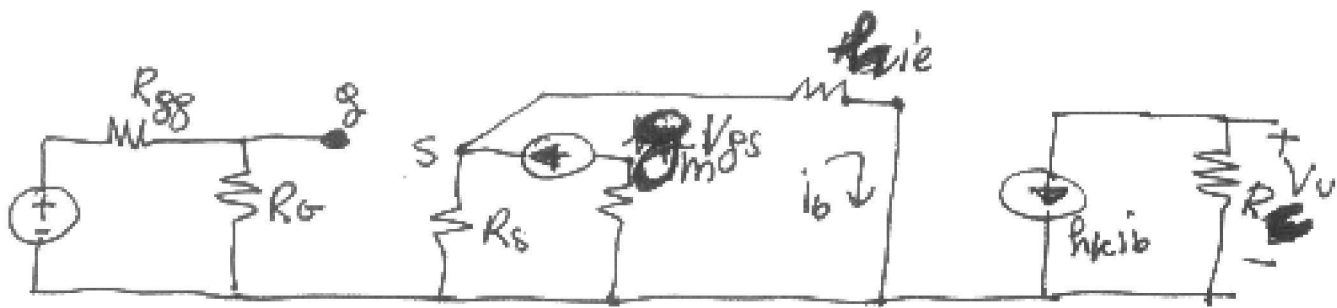
$$f_T = 140 \text{ MHz}$$

$$C_{\pi} = \frac{8 \text{ ms}}{2 \pi f_T} - C_{\mu} = 83,3 \text{ pF}$$

$$\Rightarrow r_b = 450 \Omega$$

$$r_{m} = 772 \text{ ms}; r_{\pi} = 2260 \Omega$$

$$V_A = 50 \text{ V} \Rightarrow V_B = 25 \text{ k}\Omega \gg R_C$$



$$V_{gs} = \frac{V_s R_g}{R_g + R_{gs}} \cdot \frac{1}{1 + \beta_{m1} R_s \parallel h_{ie}}$$

$$V_{gs} \downarrow = \frac{V_s R_g}{R_g + R_{gs}} \cdot \frac{1}{1 + \beta_{m1} R_s \parallel h_{ie}}$$

$$i_b = \frac{R_s}{h_{ie} + R_s} \beta_{m1} V_{gs}$$

$$V_u = -\beta_{m1} R_c i_b = -\beta_{m1} R_c \frac{R_s}{h_{ie} + R_s} \frac{\beta_{m1} R_g}{R_g + R_{gs}} \frac{1}{1 + \beta_{m1} R_s \parallel h_{ie}}$$

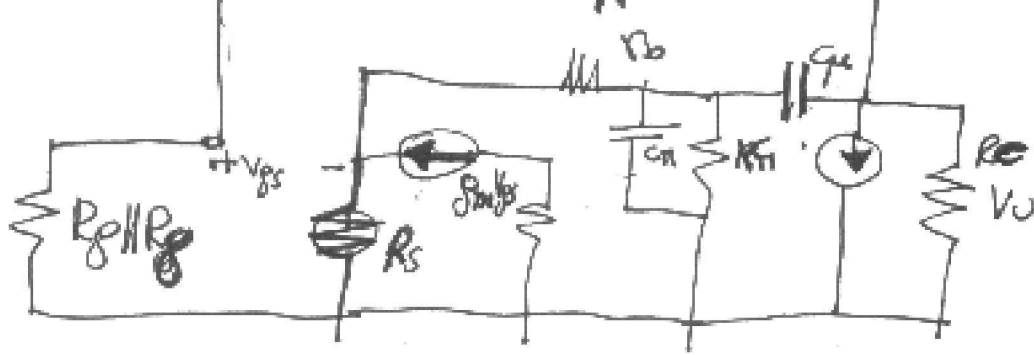
$$A_{u0} = -67,6$$

f_L

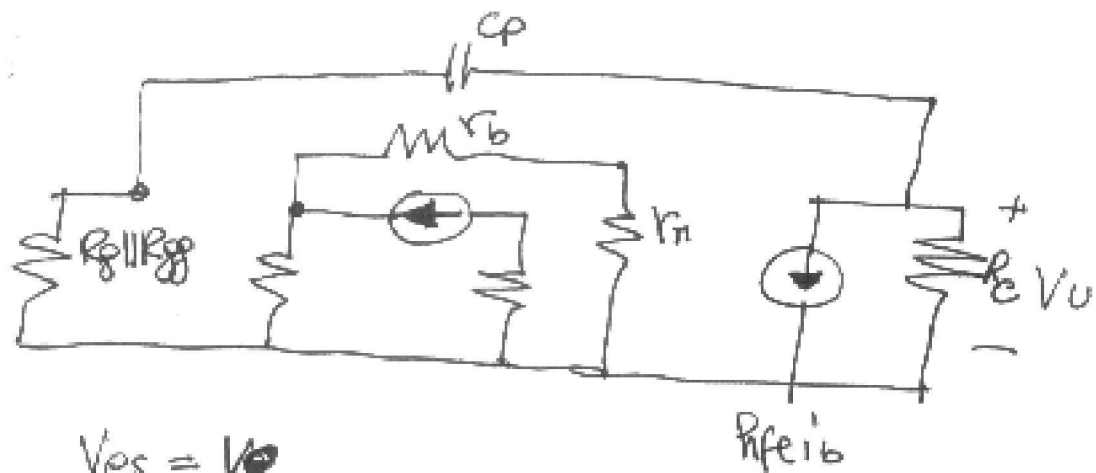
$$R_{vc1} = R_{gs} + R_g = 5025 \Omega$$

$$R_{vc2} = R_E \parallel \left(\frac{h_{ie} + R_s \parallel \frac{1}{\beta_{m1}}}{1 + \beta_{m1}} \right) = 16 \Omega$$

$$f_L = \frac{1}{2\pi} \left[(R_{vc1} C_s)^{-1} + (R_{vc2} C_L)^{-1} \right] = 496 \text{ Hz}$$



R_{ip}



$$v_{gs} = v_g$$

$$1 + \beta i_b (R_s \parallel h_{ie})$$

$$i_b = \frac{R_s}{R_s + h_{ie}} \cdot \frac{\beta i_b}{1 + \beta i_b (R_s \parallel h_{ie})} v_g$$

e' equivoleutea

$$\text{con } R_{in} = R_b \parallel R_b \parallel h_{ie}$$

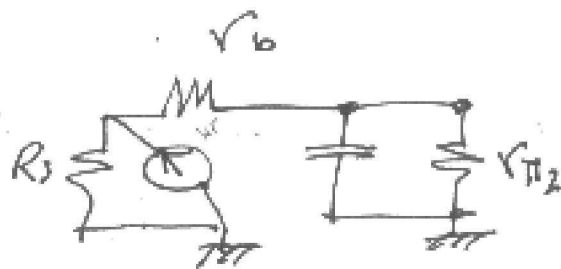
$$R_{out} = R_c \parallel R_e$$



$$\text{con } G_m v_g = \frac{\beta i_b R_s}{R_s + h_{ie}} \cdot \frac{\beta i_b}{1 + \beta i_b (R_s \parallel h_{ie})} v_g$$

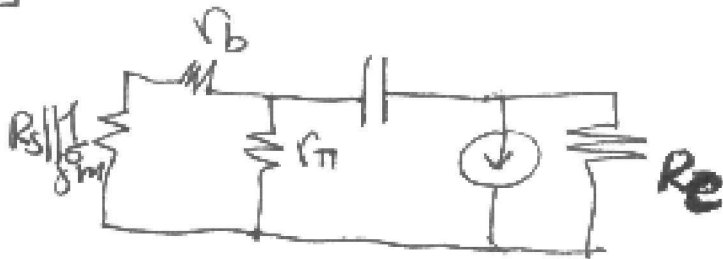
quindi:

$$R_{icp} = R_{in} + R_{out} + G_m \cdot R_{in} R_{out} = 3,74 \text{ K}\Omega$$



$$R_{in} = v_{\pi} \parallel \left(r_b + R_s \parallel \frac{1}{g_m} \right) = 490,16 \Omega$$

$R_{vc\mu}$



$$R_{in}^* = \left(R_s \parallel \frac{1}{g_m} + r_b \right) \parallel r_{\pi} = R_{vc\pi} = 490,16 \Omega$$

$$R_{out}^* = R_c$$

$$g_m^* = \frac{r_{te}}{r_{\pi}}$$

↓

$$R_{vc\mu} = R_{in}^* + R_{out}^* + g_m^* R_{in}^* R_{out}^* = 78,19 \text{ k}\Omega$$

$$f_H = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{R_{vc\pi} C_{\pi} + R_{vc\mu} C_{\mu}} \right) = 370 \text{ kHz}$$