

**Esame di Elettronica - Corso di Laurea in Ingegneria delle Telecomunicazioni**  
**15 giugno 2009**  
**Parte A**

1. Si consideri un amplificatore con amplificazione di tensione in continua  $A_{v0} = 2000$ ,  $R_{in} = 200 \text{ K}\Omega$ ,  $R_{out} = 50 \Omega$ , un polo a frequenza  $f_p = 1000 \text{ Hz}$ . Inoltre sia  $R_s = 1 \text{ K}\Omega$  la resistenza del generatore di segnale e  $R_L = 100 \Omega$  la resistenza del carico. Si reazioni il circuito in modo da ottenere una resistenza di ingresso maggiore di  $10 \text{ M}\Omega$  e una resistenza d'uscita compresa tra  $90 \Omega$  e  $110 \Omega$ . Ricavare poi le nuove impedenze di ingresso e di uscita, la nuova funzione di trasferimento il nuovo limite di banda.
2. Progettare e dimensionare completamente un filtro di Butterworth passa basso di terzo ordine, con limite superiore di banda pari a  $5 \text{ KHz}$ . Giustificare il procedimento.
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. Progettare e dimensionare un generatore d'onda rettangolare realizzato con LM555 con periodo  $1 \text{ ms}$  e duty cycle  $2/3$ . Giustificare il procedimento.

*Punteggio totale Parte A: 14*

**Parte B**

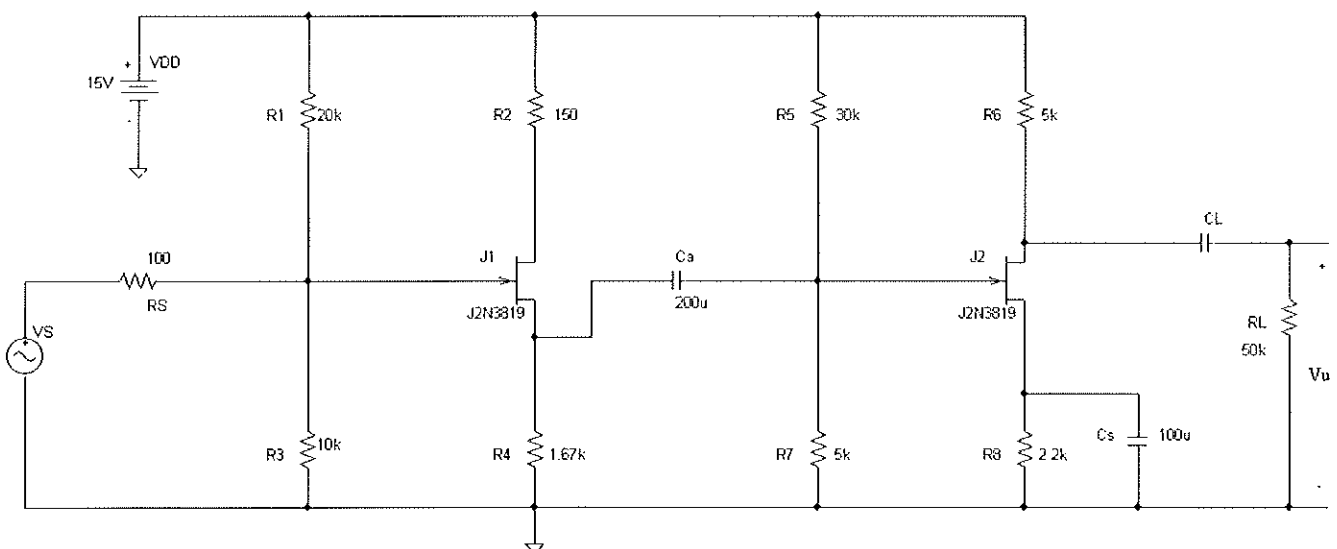
Dato l'amplificatore disegnato in figura, calcolare:

- il punto di riposo dei due transistori,
- l'amplificazione  $V_u/V_s$  a centrobanda,
- il limite superiore di banda e il limite inferiore di banda

NOTE:

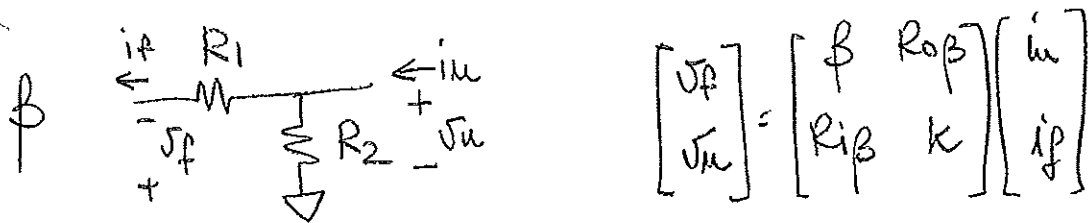
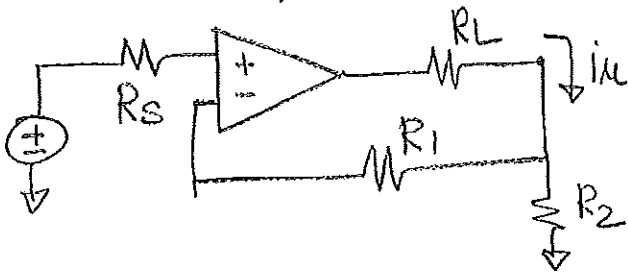
- I JFET sono 2N3819 con  $r_d \rightarrow \infty$ .
- $C_L$  ha valore praticamente infinito

*Punteggio totale Parte B: 14.*



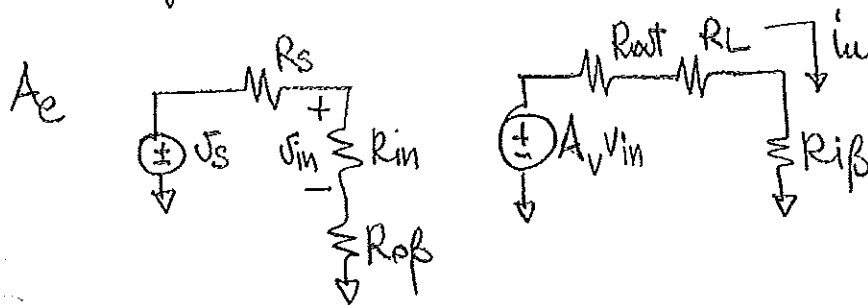
- 1)  $A_{v0} = 2000$   $R_S = 1\text{ k}\Omega$
- $R_{in} = 200\text{ k}\Omega$   $R_L = 100\ \Omega$
- $R_{out} = 50\ \Omega$   $R_{IF} > 10\text{ M}\Omega$
- $f_p = 1000\text{ Hz}$   $R_{OF} \in (90, 110)\ \Omega$

Reazione con prelievo di corrente e inserzione di tensione



$$\begin{bmatrix} v_p \\ v_u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta & R_{o\beta} \\ R_{i\beta} & k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_u \\ i_p \end{bmatrix}$$

$$\beta = \left. \frac{v_p}{i_u} \right|_{i_p=0} = -R_2 ; \quad R_{o\beta} = \left. \frac{v_p}{i_p} \right|_{i_u=0} = R_1 + R_2 ; \quad R_{i\beta} = \left. \frac{v_u}{i_u} \right|_{i_p=0} = R_2$$



$$A_e = \frac{i_u}{v_S} = \frac{A_v R_{in}}{R_{in} + R_S + R_{o\beta}} \cdot \frac{1}{R_{out} + R_L + R_{i\beta}}$$

$$R_{IF} = (R_{in} + R_{o\beta}) (1 - \beta A_e |_{R_S=0}) > 10\text{ M}\Omega$$

$$R_{OF} = (R_{out} + R_{i\beta}) (1 - \beta A_e |_{R_L=0}) \in (90, 110)\ \Omega$$

Scriviamo per esteso

$$R_{IF} = \left( R_{in} + R_1 + R_2 + \frac{R_2 A_V R_{in}}{R_{out} + R_L + R_2} \right) > 10 \text{ M}\Omega$$

$$R_{OF} = R_{out} + R_2 + \frac{R_2 A_V R_{in}}{R_{in} + R_S + R_2 + R_1} \in (90, 110) \Omega$$

Possiamo scegliere  $R_1 \Rightarrow 9,8 \text{ M}\Omega$  in modo da soddisfare senza altro la condizione per  $R_{IF}$ , e poi ricavare  $R_2$  in modo da avere  $R_{OF} \sim 100 \Omega$

$$\Rightarrow R_2 \left[ 1 + \frac{\overset{2000}{A_V} \overset{200k}{R_{in}}}{\underset{200k}{R_{in}} + \underset{1k}{R_S} + R_2 + R_1} \right] = 50 \Omega$$

$R_2$  è senz'altro trascurabile in questa frazione perché deve essere pochi  $\Omega$

quindi possiamo imporre  $R_1$  e calcolare  $R_2$

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

$$R_2 \left[ 1 + \frac{2000 \cdot 200k}{201k + 10000k} \right] = 50$$

$$R_2 = \frac{50}{1 + 30,21} = 1,24 \Omega$$

abbiamo

$$R_{OF} = 100 \Omega$$

$$R_{IF} = 200 \cdot 10^3 + 10^7 + \frac{1,24 \cdot 2000 \cdot 2 \cdot 10^5}{50 + 100 + 1,24} = 13,48 \text{ M}\Omega$$

$$A_e = \frac{2000 \cdot 200 \cdot 10^3}{200 \cdot 10^3 + 10^3 + 10 \cdot 10^6} \cdot \frac{1}{50 + 100 + 1,24} = 0,259 \Omega^{-1}$$

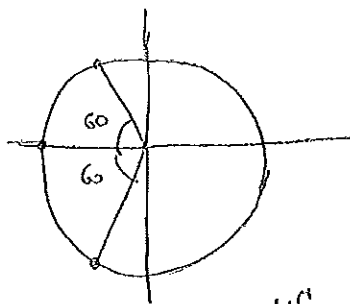
$$A_F = \frac{A_e}{1 - \beta A_e} = \frac{0,259}{1 + 1,24 \cdot 0,259} = 0,196 \Omega^{-1}$$

$$1 - \beta A_e = 1,32$$

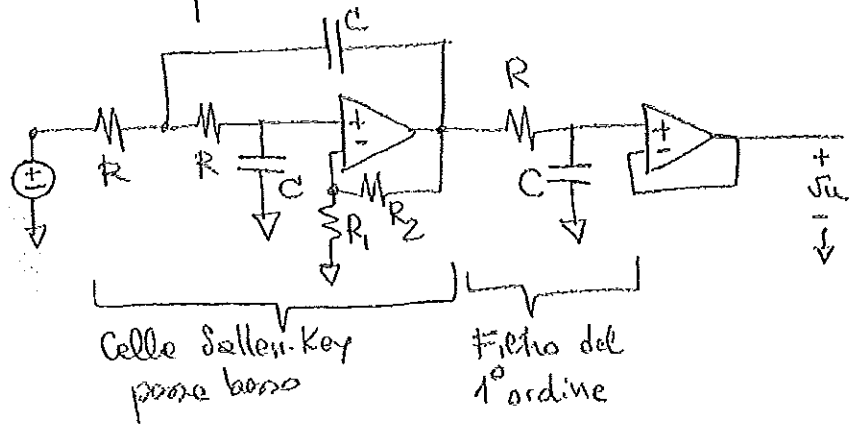
$$f_H = f_p (1 - \beta A_e) = 1320 \text{ Hz}$$

2) Filtro di Butterworth del 3° ordine  $f_p = 5 \text{ KHz}$

polinomio di Butterworth del 3° ordine



$$(s+1)(s^2+s+1)$$



Celle Sallen-Key  
passo basso

Filtro del  
1° ordine

dobbiamo avere  $RC = \frac{1}{2\pi \cdot 10^3}$

$$C = 33 \text{ nF}$$

$$R = \frac{1}{2\pi \cdot 10^3 \cdot 33 \cdot 10^{-9}} = 4,8 \text{ K}\Omega$$

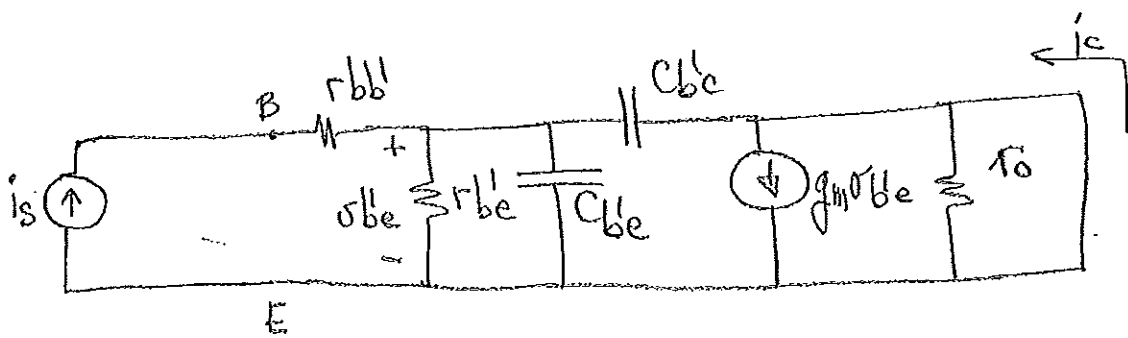
funzione di trasferimento Celle SK

$$\frac{A}{RCs^2 + (3-A)RCs + 1}$$

$$3-A = 1$$

$$A = 2 \rightarrow R_1 = R_2 = R$$

3)



$$v_{be} = \frac{i_s r_{be}}{r_{be}(C_{be} + C_{bc})s + 1}$$

$$i_c = g_m v_{be} - C_{bc} s v_{be}$$

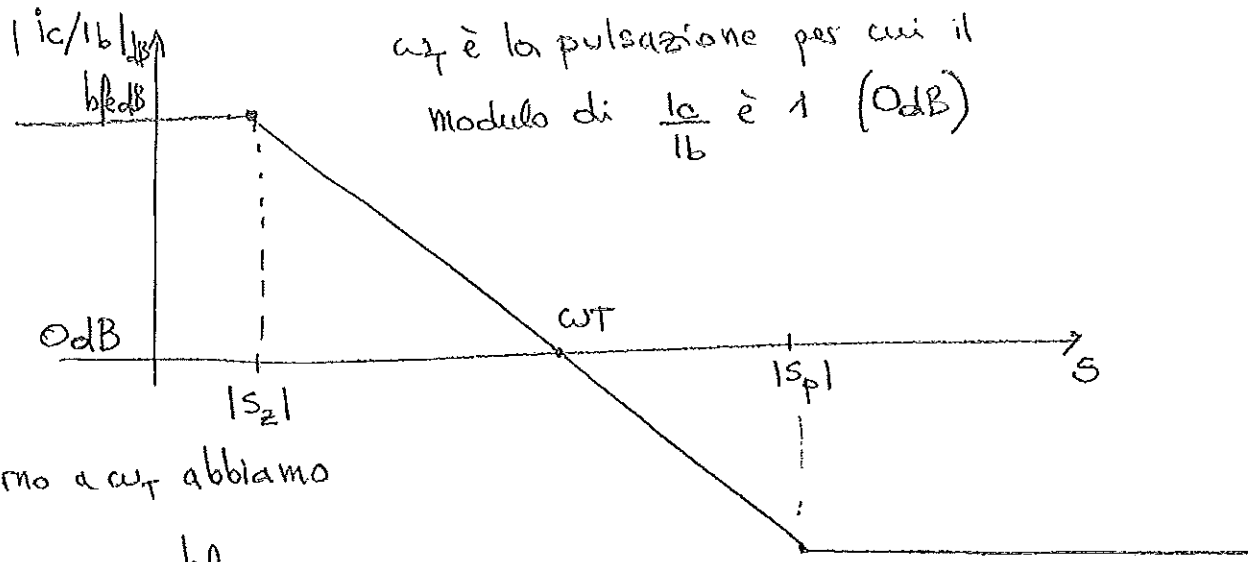
$$\frac{i_c}{i_s} = \frac{(g_m - C_{bc} s) r_{be}}{r_{be}(C_{be} + C_{bc})s + 1}$$

$$\frac{i_c}{i_s} \Big|_{s=0} = g_m r_{be} = h_{fe}$$

$$s_z = + g_m / C_{bc}$$

$$s_p = \frac{-1}{r_{be}(C_{be} + C_{bc})}$$

nota  $|s_z| \gg |s_p|$



$\omega_T$  è la pulsazione per cui il modulo di  $\frac{i_c}{i_b}$  è 1 (0dB)

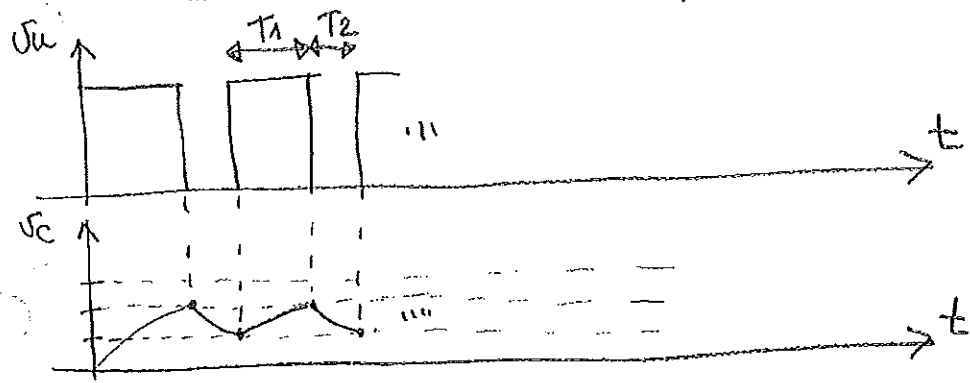
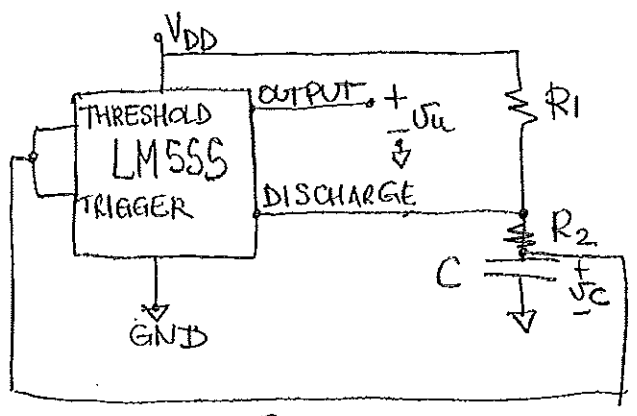
intorno a  $\omega_T$  abbiamo

$$\frac{i_c}{i_b} \sim \frac{h_{fe}}{r_{be} (C_{bc} + C_{be})s}$$

quindi

$$\omega_T = \frac{h_{fe}}{r_{be} (C_{be} + C_{bc})} \cdot \frac{g_m}{C_{be} + C_{bc}}$$

4



scarica  $\frac{2}{3} V_{DD} e^{-\frac{T_2}{RC}} = \frac{1}{3} V_{DD} \rightarrow T_2 = R_2 C \ln 2$

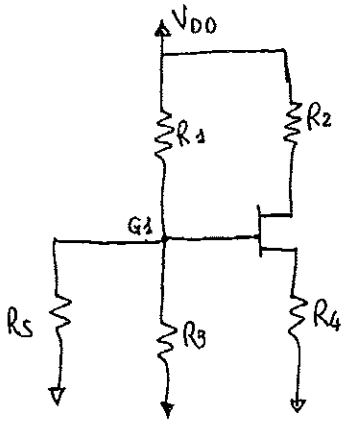
$V_{DD} - \frac{2}{3} V_{DD} e^{-\frac{T_1}{(R_1+R_2)C}} = \frac{2}{3} V_{DD} \rightarrow T_1 = (R_1 + R_2) C \ln 2$

$\frac{T_1}{T_1 + T_2} = \frac{2}{3} \rightarrow \frac{R_1 + R_2}{R_1 + 2R_2} = \frac{2}{3} \rightarrow 3R_1 + 3R_2 = 2R_1 + 4R_2 \rightarrow R_1 = R_2$

$T_1 + T_2 = (2R_2 + R_1) C \ln 2 = 1 \text{ ms} \rightarrow R_2 = 1000 \Omega, R_1 = 1000 \Omega, C = \frac{10^{-3}}{3000 \ln 2} = 0.118 \mu F$

PARTE B

## PUNTO DI RIPOSO JFET J1



$$V_{G1} = V_{DD} \cdot \frac{R_2 // R_3}{R_1 + R_2 // R_3} \approx 0.0739 \text{ V}$$

$$V_{GS1} = V_{G1} - R_4 \cdot I_{DS1}$$

$$I_{DS1} = \frac{V_{G1} - V_{GS1}}{R_4}$$

$$\begin{cases} V_{GS1} = 0 \Rightarrow I_{DS} = 0.044 \mu\text{A} \\ V_{GS1} = -3 \text{ V} \Rightarrow I_{DS} = 1.84 \text{ mA} \end{cases}$$

$$\Rightarrow V_{GS1} \approx -2 \text{ V} \Rightarrow I_{DS1} \approx 1.26 \text{ mA}$$

$$V_{DS1} = V_{DD} - (R_2 + R_4) \cdot I_{DS1} \approx 12.71 \text{ V}$$

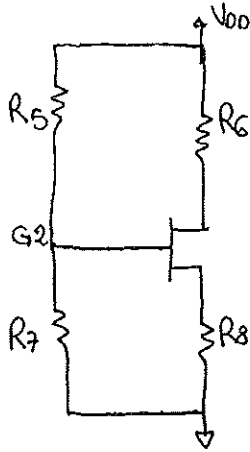
VERIFICA MP, JFET

IN SATURAZIONE:

$$V_{GS1} > V_{GS\text{off}} = -3 \text{ V} \Rightarrow \text{OK}$$

$$V_{DS1} > V_{GS1} - V_{GS\text{off}} = 1 \text{ V} \Rightarrow \text{OK}$$

## PUNTO DI RIPOSO JFET J2



$$V_{G2} = V_{DD} \cdot \frac{R_7}{R_5 + R_7} = 2.143 \text{ V}$$

$$V_{GS2} = V_{G2} - R_8 \cdot I_{DS2}$$

$$I_{DS2} = \frac{V_{G2} - V_{GS2}}{R_8}$$

$$\begin{cases} V_{GS2} = 0 \Rightarrow I_{DS2} = 0.97 \mu\text{A} \\ V_{GS2} = -3 \text{ V} \Rightarrow I_{DS2} = 2.338 \text{ mA} \end{cases}$$

$$\Rightarrow V_{GS2} \approx -1.825 \text{ V} \Rightarrow I_{DS2} \approx 1.804 \text{ mA}$$

$$V_{DS2} = V_{DD} - (R_6 + R_8) I_{DS2} \approx 2 \text{ V}$$

VERIFICA KP JFET

IN SATURAZIONE:  $V_{GS2} > V_{GS\text{off}} = -3 \text{ V} \Rightarrow \text{OK}$  $V_{DS2} > V_{GS2} - V_{GS\text{off}} = 1.175 \text{ V} \Rightarrow \text{OK}$ 

PARAMETRI DI PICCOLO SEGNALE J1:

$$g_{m1} \approx 2.7 \text{ mS} \quad C_{iss} \approx 2 \text{ pF} \quad C_{rss} \approx 0.9 \text{ pF}$$

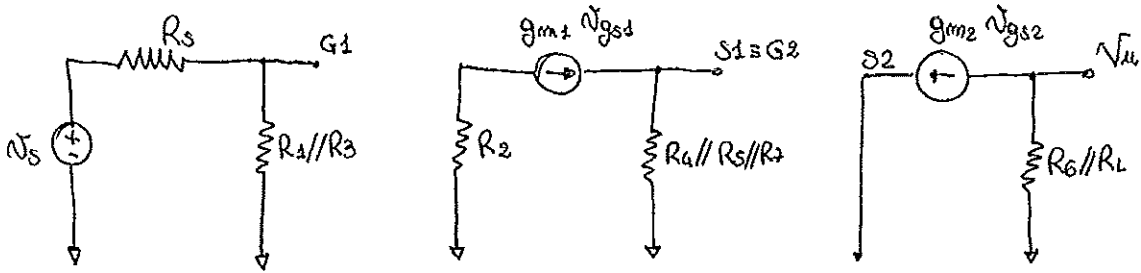
$$C_{GD1} = C_{rss} = 1.5 \text{ pF} \quad C_{GS1} = C_{iss} - C_{rss} = 1.1 \text{ pF}$$

PARAMETRI DI PICCOLO SEGNALE J2:

$$g_{m2} \approx 3.3 \text{ mS} \quad C_{iss} \approx 2.6 \text{ pF} \quad C_{rss} \approx 1.3 \text{ pF}$$

$$C_{GD2} = C_{rss} = 1.3 \text{ pF} \quad C_{GS2} = C_{iss} - C_{rss} = 1.3 \text{ pF}$$

## GUADAGNO A CENTRO BANDA



$$\left\{ \begin{array}{l} v_u = -R_6 // R_L \cdot g_{m2} \cdot v_{gs2} \\ v_{s2} = 0 \\ v_{g2} = R_4 // R_5 // R_7 \cdot g_{m1} \cdot v_{gs1} = R_4 // R_5 // R_7 \cdot g_{m1} (v_{g2} - v_{s2}) \\ v_{s1} = v_{g2} \\ v_{g2} = \frac{(R_4 // R_5 // R_7) \cdot g_{m1}}{1 + (R_4 // R_5 // R_7) g_{m1}} \cdot v_{g1} \\ v_{g1} = v_s \cdot \frac{R_1 // R_3}{R_s + R_1 // R_3} \end{array} \right.$$

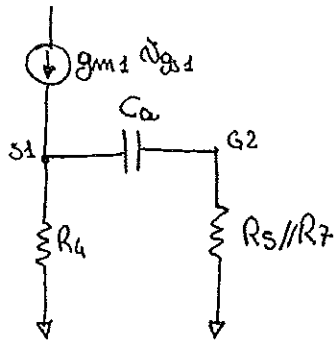
$$v_u = -R_6 // R_L \cdot g_{m2} \cdot \frac{[(R_4 // R_5 // R_7) g_{m1}]}{1 + [(R_4 // R_5 // R_7) g_{m1}]} \cdot \frac{R_1 // R_3}{R_s + R_1 // R_3} \cdot v_s$$

$$A_{CB} = \frac{v_u}{v_s} = -R_6 // R_L \cdot g_{m2} \cdot \frac{[(R_4 // R_5 // R_7) g_{m1}]}{1 + [(R_4 // R_5 // R_7) g_{m1}]} \cdot \frac{R_1 // R_3}{R_s + R_1 // R_3} \approx -41.3$$

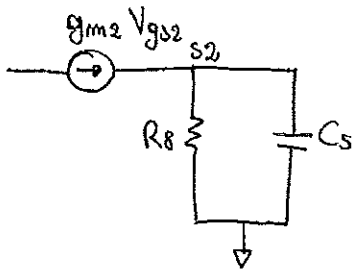


LIMITE INFERIORE DI BANDA

8)



$$R_{V_{Ca}} \Big|_{\text{c.a. zero}} = R_5 // R_7 + R_4 // \frac{1}{g_{m1}} \approx 4.6 \text{ k}\Omega$$

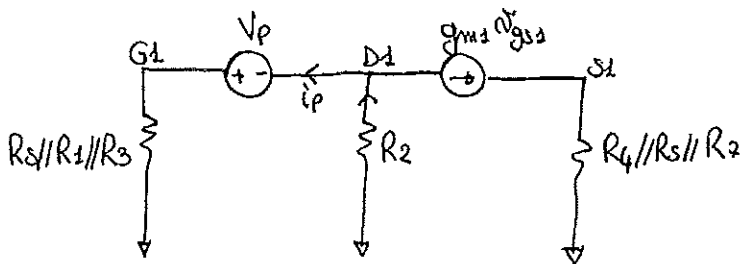
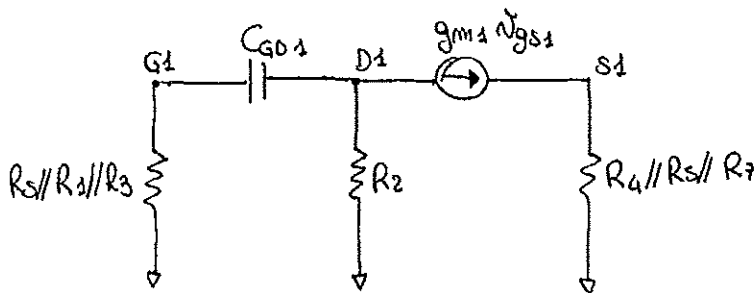


$$R_{V_{Cs}} \Big|_{\text{c.a. zero}} = R_8 // \frac{1}{g_{m2}} \approx 0.27 \text{ k}\Omega$$

3)

$$f_L = \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{1}{C_a \cdot R_{V_{Ca}}} + \frac{1}{C_s \cdot R_{V_{Cs}}} \right] \approx 6 \text{ Hz}$$

LIMITE SUPERIORE DI BANDA



$$V_{g1} = R_s // R_1 // R_3 \cdot i_p$$

$$V_{d1} = -V_p + V_{g1} = -R_2 (g_{m1} V_{g_{s1}} + i_p)$$

$$V_{s1} = R_4 // R_5 // R_7 \cdot g_{m1} (V_{g1} - V_{s1})$$

$$V_{s1} = \frac{R_4 // R_5 // R_7 g_{m1}}{1 + R_4 // R_5 // R_7 g_{m1}} V_{g1}$$

$$V_{g_{s1}} = V_{g1} - V_{s1} = R_s // R_1 // R_3 \cdot i_p + R_4 // R_5 // R_7 g_{m1} V_{g_{s1}}$$

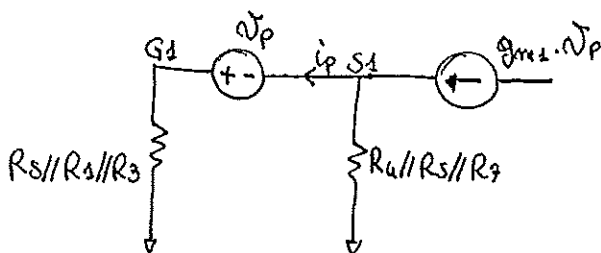
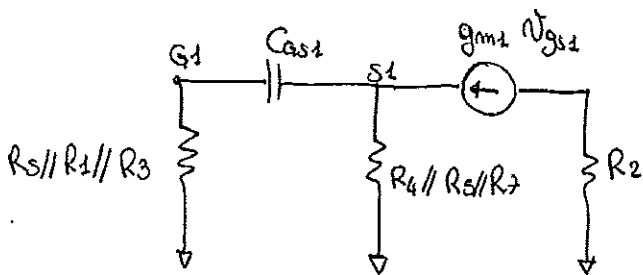
$$V_{g_{s1}} = \frac{R_s // R_1 // R_3}{1 + [(R_4 // R_5 // R_7) g_{m1}]} \cdot i_p$$

$$V_p = V_{g1} - V_{d1} =$$

$$= R_s // R_1 // R_3 \cdot i_p + R_2 \left[ 1 + g_{m1} \cdot \frac{R_s // R_1 // R_3}{1 + [(R_4 // R_5 // R_7) g_{m1}]} \right] i_p$$

$$R_{V_{CGD1}} = \frac{V_p}{i_p} = R_s // R_1 // R_3 + R_2 \left[ 1 + g_{m1} \frac{R_s // R_1 // R_3}{1 + [(R_4 // R_5 // R_7) g_{m1}]} \right] \approx$$

$$\approx 258 \Omega$$



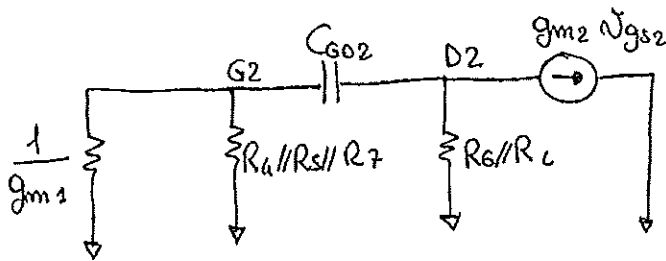
$$V_{gs1} = R_3 // R_4 // R_5 \cdot i_p$$

$$V_{ds1} = R_6 // R_7 // R_8 (-i_p + g_{m1} \cdot V_p)$$

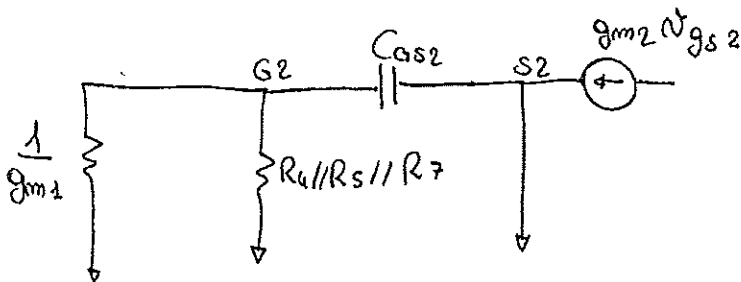
$$V_p = V_{gs1} = V_{gs1} - V_{ds1} = R_3 // R_4 // R_5 \cdot i_p - R_6 // R_7 // R_8 (-i_p + g_{m1} \cdot V_p)$$

$$V_p (1 + g_{m1} \cdot R_6 // R_7 // R_8) = (R_3 // R_4 // R_5 + R_6 // R_7 // R_8) \cdot i_p$$

$$R_{V_{GS1}} = \frac{V_p}{i_p} = \frac{R_3 // R_4 // R_5 + R_6 // R_7 // R_8}{1 + g_{m1} R_6 // R_7 // R_8} \approx 306 \Omega$$



$$R_{V_{GD2}} = \frac{1}{g_{m1}} // R_4 // R_5 // R_7 + (R_6 // R_L) \left[ 1 + R_4 // R_5 // R_7 // \frac{1}{g_{m1}} g_{m2} \right] \approx 9 \text{ k}\Omega$$



$$R_{V_{GS2}} = \frac{1}{g_{m1}} // R_4 // R_5 // R_7 = 283 \Omega$$

$$f_H = \frac{1}{2\pi [C_{GS1} \cdot R_{V_{GS1}} + C_{GD1} \cdot R_{V_{GD1}} + C_{GS2} \cdot R_{V_{GS2}} + C_{GD2} \cdot R_{V_{GD2}}]} \approx 12.64 \text{ MHz}$$