Esame di Elettronica
Corso di Laurea in Ingegneria delle Telecomunicazioni
5 giugno 2008
Parte A

1. Sia dato un amplificatore con A_v = 1000, R_{in}=100 KΩ, R_{out}=200 Ω. Imporre una reazione in modo da ottenere una resistenza d'ingresso maggiore di 1 MΩ e una resistenza di uscita di 50 Ω (con un errore minore del 5%).
2. Disegnare e dimensionare un filtro biquadratico che abbia uno zero nell'origine e due poli complessi coniugati di valore sp1,sp2 = - 1000 ± 4000 rad/s. Giustificare in dettaglio il procedimento.
3. Disegnare e dimensionare un circuito generatore d'onda rettangolare, che abbia livello alto +5.4 V, livello basso -5.4 V, durata della semionda positiva 2 ms, durata della semionda negativa 1 ms. Giustificare in dettaglio il procedimento. Si consideri ideale l'amplificatore operazionale.
4. Disegnare e quotare la porta logica complessa CMOS che implementi la seguente funzione logica $Y+(A+B)\overline{CD}+AC\overline{D}+B\overline{C}D+ABCD$. Realizzare la stessa funzione logica anche con pass gate.

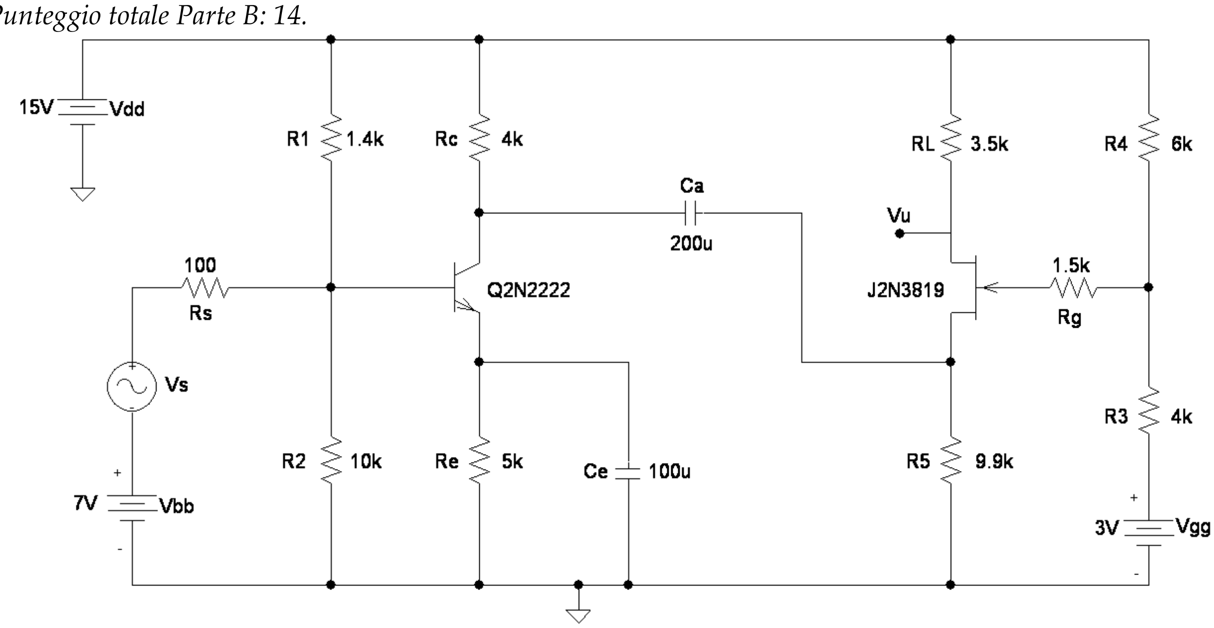
Punteggio totale Parte A: 14

Parte B

Dato l'amplificatore disegnato in figura, calcolare:
- il punto di riposo dei due transistori,
- l'amplificazione Vu/Vs a centrobanda,
- il limite superiore di banda e il limite inferiore di banda

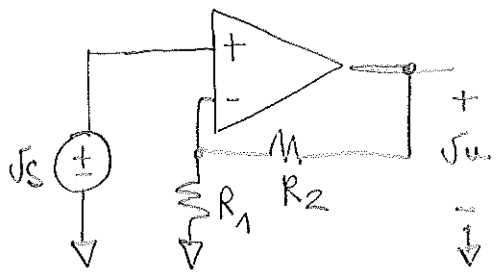
NOTE: Il JFET è un 2N3819 con rd → ∞, il BJT è un P2N2222A con hoe=hre=0.

Punteggio totale Parte B: 14.



Parte A

1)



$A_v = 1000$

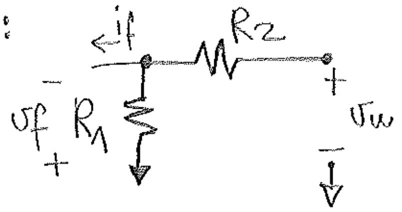
$R_{in} = 100\,k\Omega$

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

$R_{IF} > 1\,M\Omega$

$R_{OF} = 50\,\Omega$

Rete del β:



Reazione SP

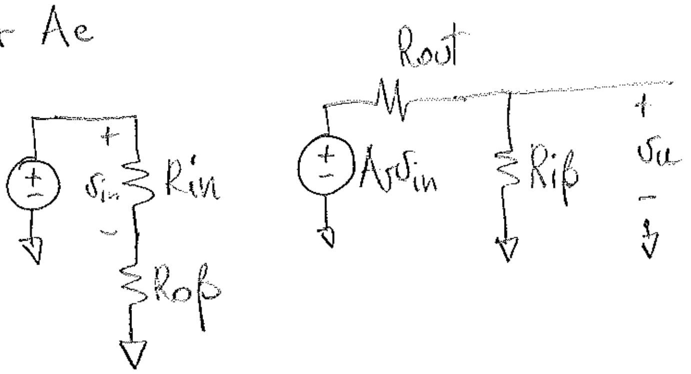
$v_f = \beta v_u + R_{o\beta} i_f$

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

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

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

Rete per Ae



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

$$R_{OF} = \frac{R_{i\beta} /\!/ \overset{200}{R_{out}}}{1-\beta A_e} \quad \frac{(R_1+R_2) /\!/ R_{out}}{1+\frac{R_1}{R_1+R_2} A_e} = 50\,\Omega$$

$$R_{IF} = (\underset{100k\Omega}{R_{in}} + \underset{R_1/\!/R_2}{R_{o\beta}})(1-\beta A_e) > 1\,M\Omega$$

scelgo $R_1 // R_2 \geq 150\,k\Omega$

$1-\beta A_e = 4 \rightarrow \beta A_e = -3$

così sono sicuramente soddisfatte entrambe le condizioni

$$-3 = \beta A_e = \frac{-R_1}{R_1+R_2} \cdot \frac{R_{in}}{R_{in}+\underbrace{R_{o\beta}}_{R_1//R_2}} \cdot A_V \cdot \frac{R_2}{R_2+R_{out}}$$

poiché sia R_1 sia R_2 sono $\geq 150\,k\Omega$

possiamo dire che $\frac{R_2}{R_2+R_{out}} \sim 1$

$$-3 = \frac{-R_1}{R_1+R_2} \cdot \frac{R_{in}}{R_{in}+R_{o\beta}} \underbrace{A_V}_{1000}$$

$$+3 = \frac{R_{o\beta}}{R_2} \frac{R_{in}}{R_{in}+R_{o\beta}} A_V$$

se scelgo $R_{o\beta} = 160\,K\Omega$

$$3 = \frac{160 \cdot 100}{260\,R_2} 1000 \quad \rightarrow R_2 = \frac{160 \cdot 100 \cdot 10^3}{260 \cdot 3} = 20.51\,M\Omega$$

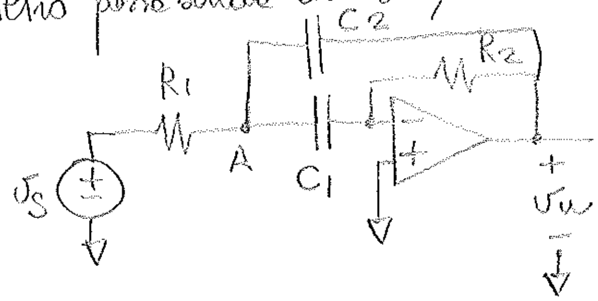
$$\frac{R_1 R_2}{R_1+R_2} = R_{o\beta} \rightarrow R_1 = \frac{R_2 R_{o\beta}}{R_2 - R_{o\beta}} = 161.25\,K\Omega$$

$$\beta A_e = -\frac{R_1}{R_1+R_2} \frac{R_{in}}{R_{in}+R_1//R_2} \cdot A_V \cdot \frac{R_2+R_1}{R_1+R_2+R_{out}} = -\frac{R_1//R_2//R_{in}}{R_2+R_{out}} A_V = -3$$

$$R_{oF} = \frac{(R_1+R_2)//R_{out}}{1-\beta A_e} = 50\,\Omega$$

$$R_{IF} = (R_{in}+R_{o\beta})(1-\beta A_e) = (100000+160000)4 = 1.04\,M\Omega$$

2) Filtro passabanda di Deliyannis



$$\begin{cases} v_A\left(\frac{1}{R_1}+C_1 s+C_2 s\right)-\frac{v_s}{R_1}-v_u C_2 s=0 \\ v_A C_1 s=-\frac{v_u}{R_2} \end{cases}$$

$$v_u=-v_A R_2 C_1 s$$

$$-\frac{v_u}{R_2 C_1 s}\left(1+R_1 C_1 s+R_1 C_2 s\right)-v_s-v_u R_1 C_2 s=0$$

$$\boxed{\frac{v_u}{v_s}=\frac{-R_2 C_1 s}{R_1 C_1 R_2 C_2 s^2+R_1(C_1+C_2)s+1}}$$

$$R_1 C_1 R_2 C_2=\frac{1}{\omega_0^2}=\frac{1}{10^6+4\cdot 10^6}=\frac{1}{5\cdot 10^6}=\underline{\underline{0.2\cdot 10^{-6}}}$$

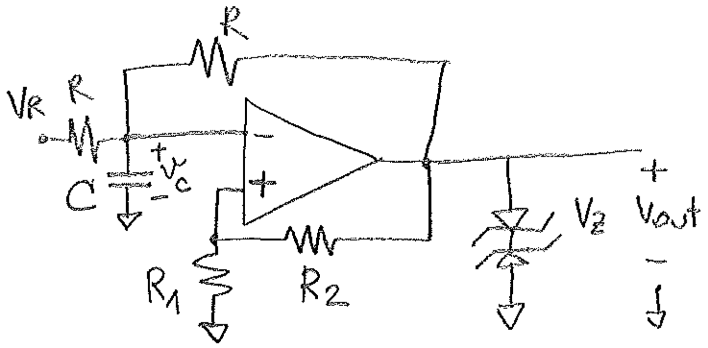
$$R_1(C_1+C_2)=2\,Re\left\{\frac{1}{sp_1}\right\}=\frac{-2}{\omega_0^2}Re\{sp_1\}=\frac{2}{5\cdot 10^6}\,10^3=\underline{\underline{0.4\cdot 10^{-3}}}$$

poniamo $C_1=C_2=C$

$R_1 C=0.2\cdot 10^{-3} \rightarrow C=1\mu F$, $R_1=200\ \Omega$

$$R_2=\frac{1}{R_1 C_1 C_2 \omega_0^2}=\frac{0.2\cdot 10^{-6}}{200\cdot 10^{-12}}=\underline{10^3\ \Omega}$$

Es. 3

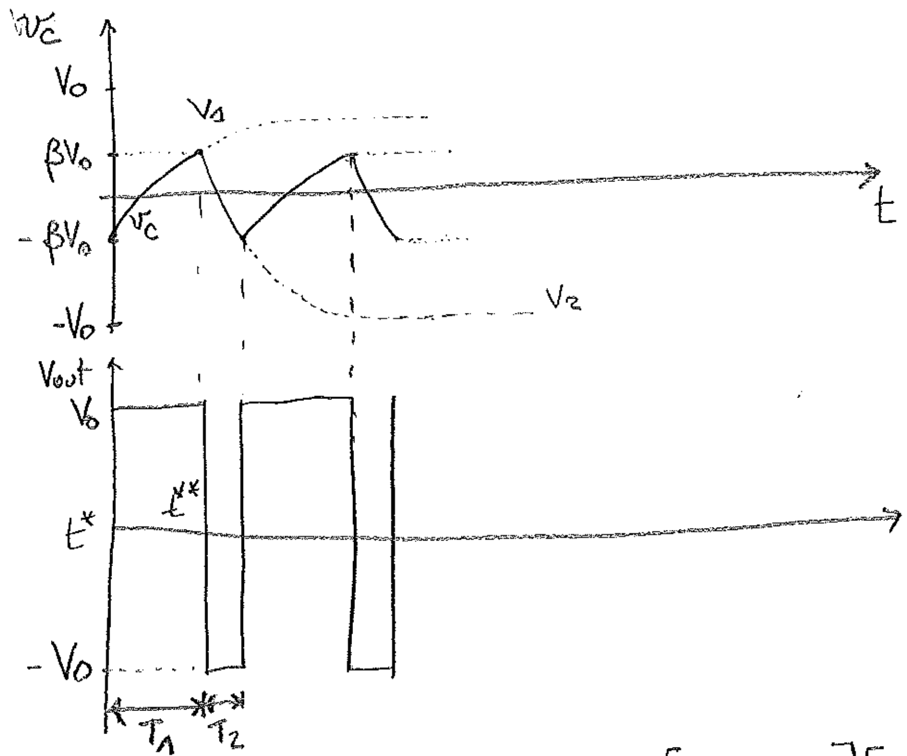


i livelli alto e basso dell'onda rettangolare sono simmetrici, quindi si possono ottenere con 2 diodi zener con $V_z = V_0 - V_\gamma = 5.4 - 0.7 = 4.7\,V$.

Per ottenere un duty cycle diverso da 1/2, usiamo una tensione costante V_R per rendere asimmetrici gli asintoti di carica e di scarico della capacità.

L'asintoto di carica è $V_1 = \frac{V_R + V_0}{2}$; l'asintoto di scarica è $V_2 = \frac{V_R - V_0}{2}$

la costante di tempo, in tutti e due i casi, è $\frac{RC}{2} = \tau$



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

semionda positiva $\quad v_c(t) = -\beta V_0 + \left[V_1 + \beta V_0\right]\left[1 - e^{-\frac{t-t^*}{\tau}}\right] \qquad t > t^*$

$$v_c(t^* + T_1) = +\beta V_0 = -\beta V_0 + \left[V_1 + \beta V_0\right]\left[1 - e^{-\frac{T_1}{\tau}}\right]$$

$$\beta V_0 - V_1 = -\left[V_1 + \beta V_0\right] e^{-\frac{T_1}{\tau}} \Rightarrow T_1 = \tau \ln\left[\frac{V_1 + \beta V_0}{V_1 - \beta V_0}\right]$$

analogamente per la semionda positiva abbiamo

$$v_c(t) = +\beta V_0 + \left[V_2 - \beta V_0\right]\left[1 - e^{-\frac{t-t^{**}}{\tau}}\right] \qquad t > t^{**}$$

$$v_c\left(t^{**} + T_2\right) = -\beta V_0 = +\beta V_0 + \left[V_2 - \beta V_0\right]\left[1 - e^{-\frac{T_2}{\tau}}\right]$$

$$+\beta V_0 + V_2 = +\left[V_2 - \beta V_0\right] e^{-\frac{T_2}{\tau}}$$

$$T_2 = \tau \ln \left[\frac{V_2 - \beta V_0}{V_2 + \beta V_0}\right]$$

abbiamo determinare V_R

$$V_1 = \frac{V_R + V_0}{2} = \frac{\beta V_0\left[1 + e^{-T_1/\tau}\right]}{1 - e^{-T_1/\tau}}$$

$$\frac{V_R}{2} = -\frac{V_0}{2} + \beta V_0 \frac{1 + e^{-T_1/\tau}}{1 - e^{-T_1/\tau}} \qquad (1)$$

$$V_2 = \frac{V_R - V_0}{2} = -\beta V_0 \frac{\left(1 + e^{-T_2/\tau}\right)}{\left(1 - e^{-T_2/\tau}\right)}$$

$$\frac{V_R}{2} = \frac{V_0}{2} - \beta V_0 \frac{\left(1 + e^{-T_2/\tau}\right)}{\left(1 - e^{-T_2/\tau}\right)} \qquad (2)$$

poniamo (1) = (2) per ottenere β

$$V_0 = \beta V_0 \left[\frac{\left(1 + e^{-T_1/\tau}\right)}{\left(1 - e^{-T_1/\tau}\right)} + \frac{\left(1 + e^{-T_2/\tau}\right)}{\left(1 - e^{-T_2/\tau}\right)}\right]$$

se scegliamo $\tau = 1 ms$ $\left[C = 1 \mu F \quad R = 2 k\Omega\right]$ abbiamo

$$1 + \beta\left[\frac{1+0,1353}{1-0,1353} + \frac{1+0,3679}{1-0,3679}\right] \to \underline{\beta = 0,2876}$$

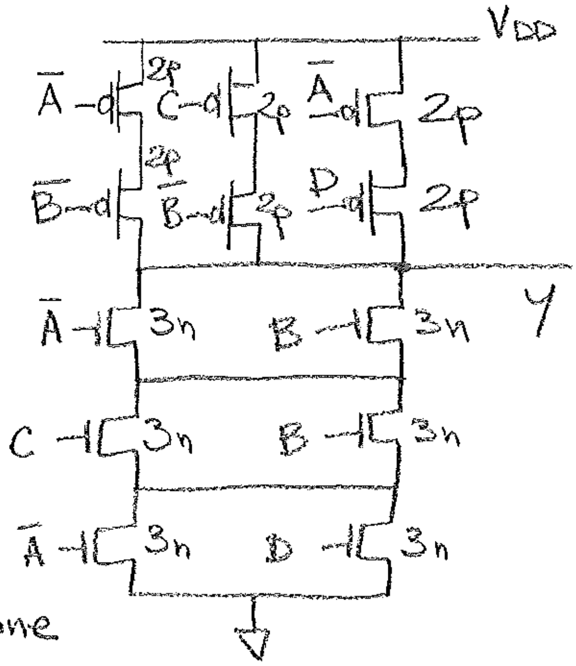
dello 1

$$V_R = -V_0 + 2\beta V_0\left[\frac{1+0,1353}{1-0,1353}\right] = \underline{-1,32\,V}$$

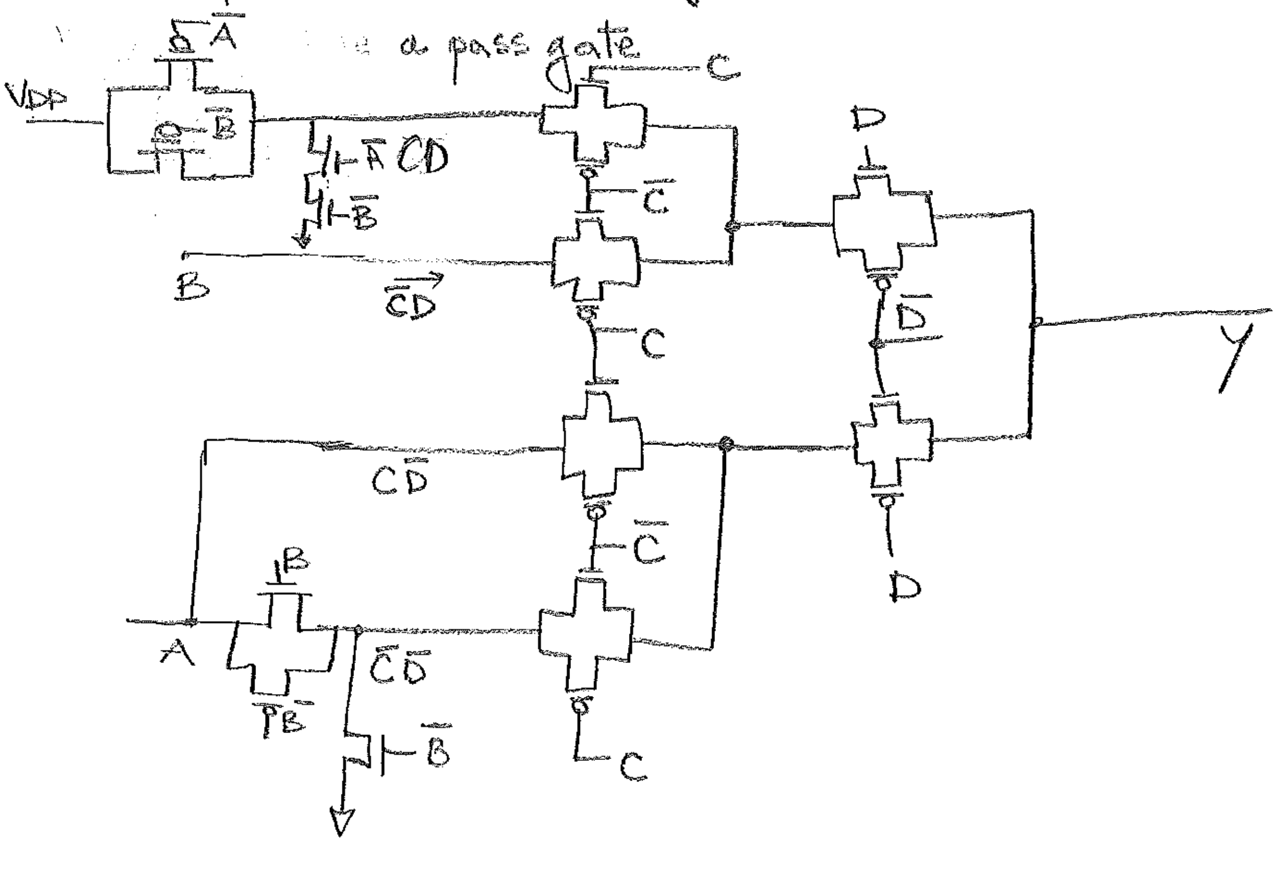
<u>Es. 4</u> $Y = (A+B)\bar{C}\bar{D} + AC\bar{D} + \bar{B}\bar{C}D + ABCD$

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

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

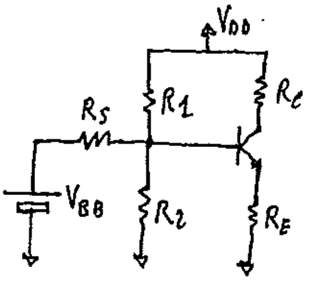


implementazione a pass gate



PARTE B

PUNTO DI RIPOSO BJT:



Applichiamo l'IPOTESI DI PARTITORE PESANTE e la SOVRAPPOSIZIONE DEGLI EFFETTI prodotti dai generatori V_{BB} e V_{DD} sulla base del BJT:

$$V_B = V_{DD}\frac{R_2 // R_S}{R_1 + R_2 // R_S} + V_{BB}\frac{R_1 // R_2}{R_S + R_1 // R_2} \simeq 7{,}5\,V$$

La tensione di emettitore si ottiene sottraendo la tensione $V_\gamma = 0{,}7\,V$:

$$V_E = V_B - V_\gamma = 6{,}8\,V$$

A questo punto, considerando la corrente di collettore circa uguale a quella di emettitore, si ricava:

$$I_C \simeq I_E = \frac{V_E}{R_E} = 1{,}4\,mA$$

Infine, si può calcolare la V_{CE}:

$$V_{CE} = V_C - V_E = V_{DD} - R_C I_C - R_E I_C = 2{,}4\,V$$

VERIFICA IPOTESI DI PARTITORE PESANTE:

E' necessario verificare che la minima corrente che scorre nel partitore resistivo di polarizzazione sia molto maggiore della corrente di base. Per far questo si controlla il valore di h_{FE} nel manuale delle caratteristiche:

$$h_{FE} = \frac{h_{FE\,MAX} + h_{FE\,MIN}}{2} \simeq \frac{300 + 75}{2} = 187{,}5$$

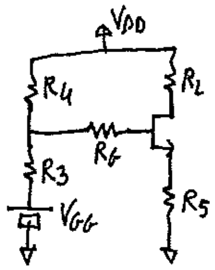
Calcoliamo la corrente nelle resistenze del partitore di corrente:

$$I_{R_S} = \frac{V_B - V_{BB}}{R_S} \simeq 5\,mA \quad , \quad I_{R_1} = \frac{V_{DD} - V_B}{R_1} = 5{,}4\,mA$$

$$I_{R_2} = \frac{V_B}{R_2} = 750\,\mu A$$

Allora la corrente di base $I_B = \frac{I_C}{h_{FE}} \simeq 7{,}5\,\mu A$ è molto minore anche di I_{R2} (sarebbe bastato 10 volte meno). L'ipotesi di partitore pesante è quindi verificata.

PUNTO DI RIPOSO JFET:



Anche stavolta applichiamo la SOVRAPPOSIZIONE DEGLI EFFETTI di V_{GG} e V_{DD} (ricordando che per la resistenza R_G non scorre corrente essendo $I_G \cong 0$):

$$V_G = V_{DD}\frac{R_3}{R_3+R_4} + V_{GG}\frac{R_4}{R_3+R_4} = 7{,}8V$$

A questo punto possiamo calcolare la relazione tra I_{DS} e V_{GS}:

$$V_{GS} = V_G - V_S = V_G - R_5 I_{DS} \Rightarrow I_{DS} = \frac{V_G - V_{GS}}{R_5}$$

Calcoliamo due punti di questa retta, in modo da poterla tracciare nel grafico $I_{DS}(V_{GS})$ presente nel manuale delle caratteristiche:

$$\begin{cases} V_{GS_1} = -1V \Rightarrow I_{DS1} \cong 890\mu A \\ V_{GS_2} = -2V \Rightarrow I_{DS2} \cong 990\mu A \end{cases}$$

Tracciando la retta nel manuale delle caratteristiche si trova la seguente intercetta:

$$V_{GS} = -2{,}1V \quad , \quad I_{DS} = 1mA$$

Infine calcoliamo V_{DS}:

$$V_{DS} = V_{DD} - (R_5 + R_L) I_{DS} = 1{,}6V$$

VERIFICA HP. JFET IN SATURAZIONE:

Deve essere $V_{GS} > V_{GSoff}$ e $V_{DS} > V_{GS} - V_{GSoff}$. Essendo $V_{GSoff} = -3V$, entrambe le relazioni sono verificate.

CALCOLO DEI PARAMETRI DI PICCOLO SEGNALE DEL BJT:

Dal manuale si ricava $h_{fe} = \frac{h_{feMAX} + h_{feMIN}}{2} = \frac{300+50}{2} = 175$. Per il calcolo di h_{ie}, si trova:

$$h_{ie}@1mA = \frac{2K\Omega + 8K\Omega}{2} = 5K\Omega$$

Visto che $r_{b'e}@1mA = \frac{V_T h_{fe}}{I_C@1mA} = 4{,}55K\Omega$, si ricava $r_{bb'}$ (che varia poco con il punto di riposo e può essere considerato valido anche per la nostra polarizzazione):

$$r_{bb'} = h_{ie} - r_{b'e} = 450\Omega$$

A questo punto possiamo calcolare il nostro h_{ie}:

$$h_{ie} = r_{b'e} + r_{bb'} = \frac{V_T h_{fe}}{I_C} + r_{bb'} = 3{,}25K\Omega + 450\Omega = 3{,}7K\Omega$$

Per il calcolo delle capacità parassite, ricaviamo dal manuale il valore di f_T e calcoliamo il g_m^{BJT}:

$$f_T \cong 110\,MHz \qquad g_m^{BJT} = \frac{I_C}{V_T} \cong 53{,}8\,mS$$

Una volta calcolato $V_{EB} = V_{CE} - V_{BE} = V_{CE} - V_\gamma = 1{,}7V$, si trova sul manuale il valore di $C_{b'c} \cong 10pF$ e quindi si calcola $C_{b'e}$:

$$C_{b'e} = \frac{g_m^{BJT}}{2\pi f_T} - C_{b'c} \cong 68\,pF$$

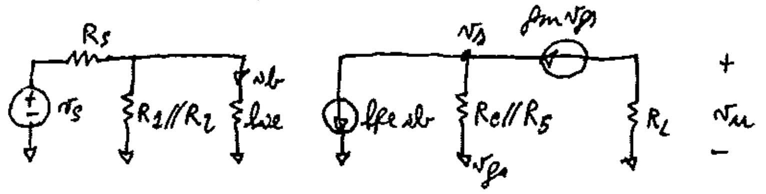
CALCOLO DEI PARAMETRI DI PICCOLO SEGNALE DEL JFET:

Dal manuale si ricava $g_m \cong 2{,}5\,mS$, $C_{iss} \cong 2{,}5pF$ e $C_{rss} \cong 1{,}3pF$. Calcoliamo le capacità parassite C_{GS} e C_{GD}:

$$C_{GD} = C_{rss} = 1{,}3pF \quad , \quad C_{GS} = C_{iss} - C_{rss} = 1{,}2pF$$

GUADAGNO A CENTRO BANDA

Come al solito, si disattivano i generatori in continua (V_{DD}, V_{BB} e V_{GG}), si cortocircuitano i condensatori e si sostituiscono ai transistori i loro circuiti equivalenti per piccolo segnale:



Partendo da destra verso sinistra:

$$v_u = -R_L\, g_m v_{gs}$$

Osservando che il GATE è a massa e quindi $v_{gs} = -v_s$, si può scrivere la legge al nodo di SOURCE:

$$h_{fe} v_b + g_m v_s + \frac{v_s}{R_e//R_5} = 0 \quad \Rightarrow \quad v_s = -\frac{(R_e//R_5)\,h_{fe} v_b}{1+g_m(R_e//R_5)}$$

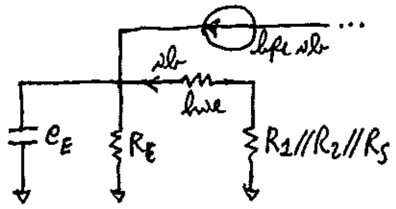
La corrente che scorre in R_S si trova a $v_S/(R_S+R_1//R_2//h_{ie})$, quindi la v_b si può calcolare sfruttando la formula del partitore di corrente a partire dalla v_{R_S}:

$$v_b = v_{R_S}\frac{R_1//R_2}{h_{ie}+R_1//R_2} = v_S \cdot \frac{1}{R_S+R_1//R_2//h_{ie}} \cdot \frac{R_1//R_2}{h_{ie}+R_1//R_2}$$

Mettendo insieme il tutto, si ricava:

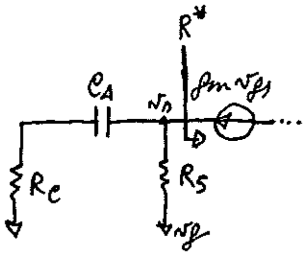
$$A_{CB} = \frac{v_u}{v_S} = \frac{-(R_e//R_5)\,h_{fe}}{R_S+R_1//R_2//h_{ie}}\;\frac{R_1//R_2}{h_{ie}+R_1//R_2}\;\frac{g_m R_L}{1+g_m(R_e//R_5)} \cong -131$$

LIMITE INFERIORE DI BANDA:



Una volta accoppiata la resistenza R_E, essa otteniamo vedendo $R_{V_{CE}} = R_E // R^*$, si ricava R^* ricordando che è pari alla resistenza sulla base (compresa h_{ie}) diviso per $(h_{fe}+1)$. Quindi:

$$R_{V_{CE}}\Big|_{C_A\ \text{corto}} = R_E // \frac{h_{ie} + R_1//R_2//R_S}{h_{fe}+1} \cong 21{,}5\,\Omega$$



Essendo la $v_g=0$, $v_{gs}=-v_s$ e quindi la resistenza vista R^* è pari a:

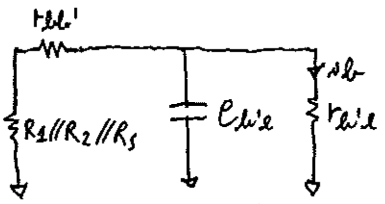
$$R^* = \frac{v_s}{g_m v_s} = \frac{1}{g_m}$$

Quindi risulta:

$$R_{V_{CA}}\Big|_{C_E\ \text{corto}} = R_C + R_S // \frac{1}{g_m} \cong 4{,}38\,K\Omega$$

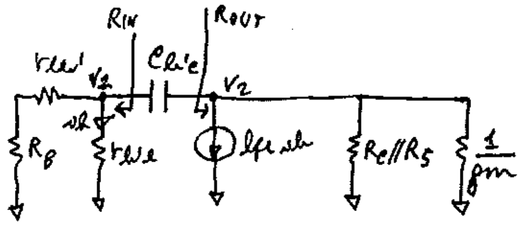
Quindi risulta: $$f_L = \frac{1}{2\pi}\left[\frac{1}{C_A R_{VCA}} + \frac{1}{C_E R_{VCE}}\right] \cong 74\,Hz$$

LIMITE SUPERIORE DI BANDA:



Per quanto riguarda la $R_{V_{b'e}}$, risulta semplicemente:

$$R_{V_{b'e}} = r_{b'e} // \left[r_{bb'} + R_1//R_2//R_S\right] \cong 465\,\Omega$$



Si è indicato nel circuito con R_B il parallelo $R_1//R_2//R_S$. La resistenza vista può essere in questo caso calcolata come segue:

$$R_{V_{b'c}} = R_{IN}\left(1+|A_V|\right) + R_{OUT}$$

dove $A_V = \frac{V_2}{V_1}$.

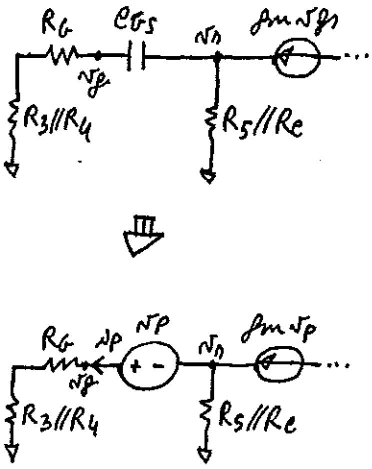
Si ricava dunque:

$$R_{IN} = r_{b'e} // (R_B + r_{bb'}) \cong 465\,\Omega$$

$$R_{OUT} = R_C // R_S // \frac{1}{g_m} \cong 351\,\Omega$$

$$A_V = \frac{V_2}{V_1} = \frac{-R_{OUT}\, h_{fe}\, v_b}{r_{b'e}\, v_b} = \frac{-R_{OUT}\, h_{fe}}{r_{b'e}} \cong -19$$

Da cui: $R_{V_{b'c}} \cong 9{,}65\,K\Omega$



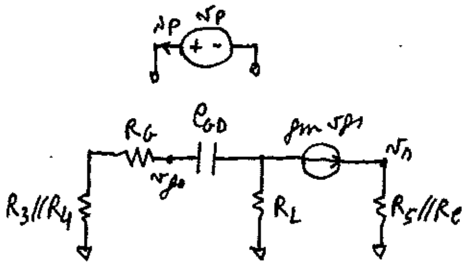
Sostituendo al condensatore un generatore di prova v_p, si ricava:

$$\begin{cases} v_p = v_{gs} = v_g - v_s = (R_G + R_3//R_4)\, i_p - v_s \\ v_s = (R_5//R_e)(g_m v_p - i_p) \end{cases}$$

Da cui:

$$v_p = (R_G + R_3//R_4)\, i_p - (R_5//R_e)(g_m v_p - i_p) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow R_{V_{GS}} = \frac{v_p}{i_p} = \frac{R_G + R_3//R_4 + R_5//R_e}{1 + g_m (R_5//R_e)} \cong 831\,\Omega$$



Sostituendo il generatore di prova al condensatore, si ricava:

$$v_g = (R_G + R_3//R_4)\, i_p \Rightarrow v_d = v_g - v_p = -R_L (g_m v_{gs} + i_p)$$

$$v_s = (R_5//R_e)\, g_m v_{gs}$$

$$v_{gs} = v_g - v_s = \frac{(R_G + R_3//R_4)\, i_p}{1 + g_m (R_5//R_e)}$$

$$v_p = v_g - v_d = (R_G + R_3//R_4)\, i_p + R_L \left[1 + \frac{(R_G + R_3//R_4)\, g_m}{1 + g_m (R_5//R_e)}\right] i_p$$

Da cui:

$$R_{V_{GD}} = \frac{v_p}{i_p} = R_G + R_3//R_4 + R_L \left[1 + \frac{g_m (R_G + R_3//R_4)}{1 + g_m (R_5//R_e)}\right] \cong 11,6\,K\Omega$$

Quindi il limite superiore di banda risulta:

$$f_H = \frac{1}{2\pi \left[C_{b'e} R_{Vb'e} + C_{b'c} R_{Vb'c} + C_{GS} R_{VGS} + C_{GD} R_{GD}\right]} \cong 86,7\,KHz$$