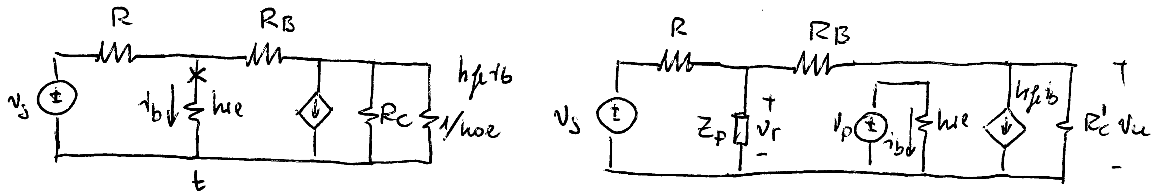
ESERCIZIO 1 - Guadagno a c. banda

Circuito equivalente e scomposizione



$$p = 0 \qquad Z_p = Z_i = h_{ie} \qquad R_C' = R_C /\!/ \frac{1}{h_{oe}} = 3{,}96\ k\Omega$$

$$\alpha = \left.\frac{v_r}{v_s}\right|_{v_p=0} = \frac{Z_p /\!/ (R_B + R_C')}{R + [Z_p /\!/ (R_B + R_C')]} = 0{,}710$$

$$\gamma = \left.\frac{v_u}{v_s}\right|_{v_p=0} = \alpha \cdot \frac{R_C'}{R_C' + R_B} = 22{,}67 \times 10^{-3}$$

$$\beta = \left.\frac{v_r}{v_u}\right|_{v_s=0} = \frac{R /\!/ Z_p}{R_B + (R /\!/ Z_p)} = 5{,}92 \times 10^{-3}$$

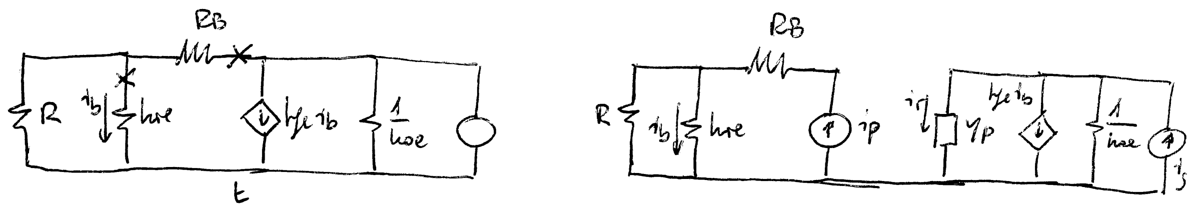
$$A = \left.\frac{v_u}{v_p}\right|_{v_s=0} = -\frac{h_{fe}}{h_{ie}} \left\{ R_C' /\!/ [R_B + (R /\!/ Z_p)] \right\} = -329{,}4$$

reazione negativa

Infine

$$A_f = \frac{v_u}{v_s} = \frac{\alpha A}{1 - \beta A} + \gamma = -79{,}30$$

Resistenza d'uscita (vista da Rc)



$\rho = 0 \qquad Y_P = Y_i = \left[R_B + (R // h_{re})\right]^{-1} = 8{,}284\,\mu S$

$Y_b = h_{oe} = 40\,\mu S$

$$\beta A = \left.\frac{i_r}{v_p}\right|_{v_s=0} = -\frac{1/h_{oe}}{1/h_{oe} + 1/Y_P}\, h_{fe}\, \frac{R}{R + h_{re}} = -\frac{Y_P}{Y_P + h_{oe}}\, h_{fe}\, \frac{R}{R+h_{re}} =$$

$$= -10.54$$

reazione negativa di tensione

$$Y_o = (Y_p + Y_b)(1 - \beta A) = 557{,}2\,\mu S$$

$$R_o = Y_o^{-1} = 1{,}795\,k\Omega$$

<u>Nota</u>: ovviamente è anche possibile "togliere" $1/h_{oe}$, operare con la stessa scomposizione,

(Y_P non cambia, $Y_b = 0$, $\beta A = -h_{fe}\dfrac{R}{R + h_{re}}$

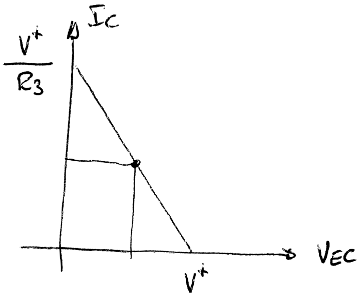
$Y_o = (Y_P + Y_b)(1 - \beta A) = Y_P(1 - \beta A)$

$\longrightarrow \quad R_o = \dfrac{1}{h_{oe}} // \dfrac{1}{Y_o} = 1{,}795\,k\Omega$)

ottenendo ovviamente lo stesso risultato finale.

ESERCIZIO 2

Punto di riposo



Essendo $I_D = I_B \ll I_C$

$V^+ = V_{EC} + R_3(I_C + I_D) = V_{EC} + R_3(I_C + I_B)$

$V^+ = V_{EC} + R_3 I_C$ è l'equazione della retta di carico statica. Le sue intercette sugli assi si hanno per $I_C = \frac{V^+}{R_3}$ e $V_{EC} = V^+$ e dunque il punto di riposo che soddisfa le condizioni richieste è $I_{CQ} = \frac{V^+}{2R_3} = 25.5\,mA$ $\quad V_{ECQ} = \frac{V^+}{2} = 12\,V$

nel pr. si ha $I_B = \sim 80\,\mu A \ll I_C$

$I_D = I_B = 80\,\mu A \Rightarrow \quad V_{GS} = \sqrt{\frac{2I_D}{k_n}} + V_T = 2.26\,V$

$V_G = V^+ \frac{R_2}{R_1 + R_2} = R_3(I_C + I_B) + V_{GS} = 14.29\,V$

segue $R_2 = 298\,k\Omega$ ed $R_1 = 202\,k\Omega$ $\quad R_G = R_1 /\!/ R_2 = 120.5\,k\Omega$

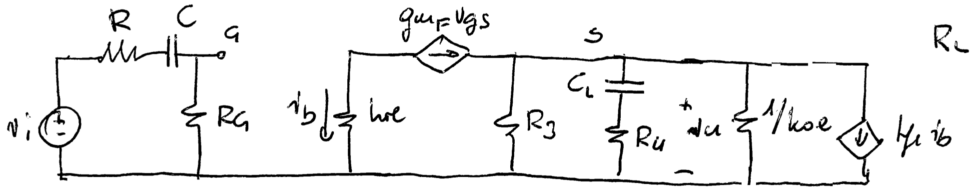
nel pr. $h_{fe} = 290$ $\quad h_{ie} = r_{bb'} + \frac{V_T}{I_C} h_{fe} \simeq 900\,\Omega$ $\quad h_{oe} = (1.75\,k\Omega)^{-1}$

$r_{b'e} = \frac{V_T}{I_C} h_{fe} \simeq 300\,\Omega$

alta frequenza: $g_{mQ} = \frac{I_C}{V_T} = 981\,mS$ $\quad \left(f_T = \frac{g_m}{2\pi(C_c + C_e)} = 1.56\,GHz \right)$

Per il MOSFET $g_{mF} = k_n(V_{GS} - V_T) = 126.5\,\mu S$

Circuito per le variazioni



$R_L = R_3 // R_4 // 1/h_{oe}$
$= 297\ \Omega$

a centro banda entrambi i condensatori sono chiusi;
inoltre $i_b = -g_{mF}v_{gs}$ - ciascuno di essi produce uno zero nell'origine e un polo finito.

$$v_u = R_L\left(g_{mF}v_{gs} - h_{fe}i_b\right) = R_L\left(h_{fe}+1\right)g_{mF}v_{gs}$$

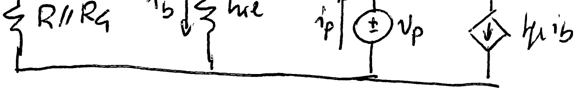
$$v_{gs} = \frac{R_G}{R+R_G}v_i - v_u \Rightarrow v_{gs} = \frac{R_G}{R+R_G}v_i - R_L\left(h_{fe}+1\right)g_{mF}v_{gs}$$

così $$v_{gs} = \frac{R_G}{R+R_G}v_i\,\frac{1}{1+g_{mF}R_L\left(h_{fe}+1\right)}$$

e infine $$A_{vcb} = \frac{R_G}{R+R_G}\,\frac{R_L\left(h_{fe}+1\right)g_{mF}}{1+g_{mF}R_L\left(h_{fe}+1\right)} = 0{,}912$$

$$f_{p_C} = \frac{1}{2\pi C\left(R+R_G\right)} = 131.5\ Hz$$

Resistenza vista da C_L: $R_{vC_L} = R_4 + \left(R_3 // \frac{1}{h_{oe}} // \dots\right)$



$v_p = -v_{gs}$
$i_p = -g_{mF}v_{gs} + h_{fe}i_b$
$= -\left(h_{fe}+1\right)g_{mF}v_{gs}$

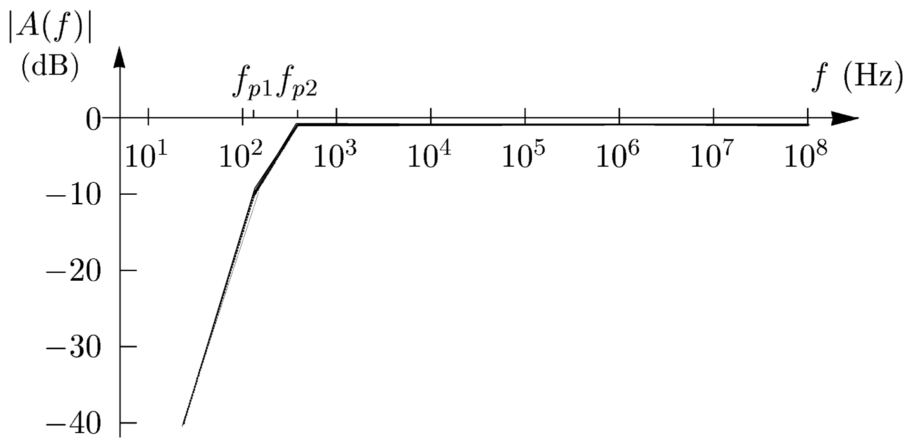
così $$\frac{v_p}{i_p} = \frac{1}{\left(h_{fe}+1\right)g_{mF}} = 27.16\ \Omega$$

$R_{vC_L} = 1{,}525\ k\Omega$

$$f_{pC_L} = \frac{1}{2\pi C_L R_{vC_L}} = 386.4\ Hz$$

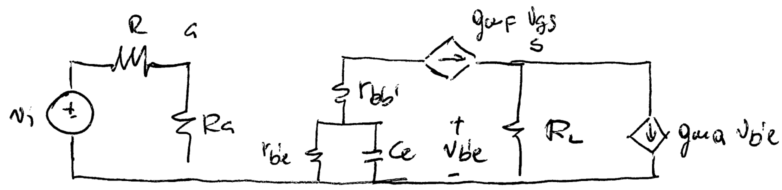
$$A(f) = A_{CB} \frac{j\frac{f}{f_{PCS}} \, j\frac{f}{f_{PCL}}}{\left(1+j\frac{f}{f_{PCS}}\right)\left(1+j\frac{f}{f_{PCL}}\right)}$$

Diagramma di Bode:



Studio alle aa.ff.:

Circuito equivalente $(C_c = 0)$



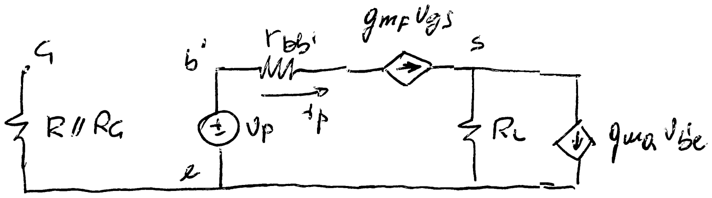
Calcolo di A_∞: (C_e chiuso $\Rightarrow$ $v_{b'e} = 0$)

$$v_u = \underbrace{(R_3 \parallel R_u)}_{R_L} g_{mF} v_{gs} \qquad v_{gs} = \frac{R_G}{R_G + R} v_i - v_u$$

$$\frac{v_u}{v_i} = \frac{R_G}{R + R_G} \frac{g_{mF} R_L}{1 + g_{mF} R_L} = 36{,}07 \times 10^{-3} \neq 0$$

dunque C_e produce uno zero e un polo finiti

Calcolo della res. vista da C_e : $R_{V_{ce}} = r_{b'e} // \ldots$



$$v_p = v_{b'e} \qquad i_p = g_{mF} v_{gs} = g_{mF} R_L (g_{ma} v_{b'e} - i_p)$$

da quest'ultima (con la precedente) segue

$$i_p \left[1 + g_{mF} R_L \right] = g_{mF} g_{ma} R_L v_p$$

e dunque $$\frac{v_p}{i_p} = \frac{1 + g_{mF} R_L}{g_{mF} g_{ma} R_L} = 28.14\,\Omega$$

Così $R_{V_{ce}} = 25.73\,\Omega$ ed $f_{P_{ce}} = \dfrac{1}{2\pi C_e R_{ce}} = 61.8\text{ MHz}$

$$f_{Z_{ce}} = f_{P_{ce}} \frac{A_{CB}}{A_{\infty}} = 1.56\text{ GHz} > \frac{f_T}{3} \qquad f_{P_{ce}} < \frac{f_T}{3}$$

2.4 - ⚠ Posizionamento del p.r. "al centro" della retta di carico dinamica

La retta di carico dinamica ha pendenza $p = -1/(R_3 \| R_4)$. Il punto di riposo, le cui coordinate (al momento incognite) sono I_{CQ} e V_{CEQ}, deve essere il punto centrale del segmento staccato dagli assi coordinati (primo quadrante) sulla retta di carico dinamica. Il punto di riposo si trova anche sulla retta di carico statica r (che ha equazione $V^+ = V_{EC} + R_3 I_C$).

Si tratta dunque di risolvere il seguente problema di geometria analitica:
"Scrivere l'equazione di una retta (r_x) con pendenza p (data sopra) che intersechi la retta di carico statica r nel punto medio del segmento individuato su r_x dalle sue intersezioni con gli assi coordinati".

- La retta r_x avrà equazione $I_C = pV_{EC} + q \quad (p = -\dfrac{1}{R_3 \| R_4}$ noto, q da determinare).
- Essa interseca gli assi coordinati nei punti $(I_C = 0, V_{EC} = -q/p)$ e $(V_{EC} = 0, I_C = q)$.
- L'intersezione tra r ed r_x si determina (per esempio) ricavando I_C dalle equazioni delle rette ed equagliando:
$$pV_{EC} + q = \frac{V^+ - V_{EC}}{R_3}$$
da cui segue $V_{EC} = (qR_3 - V^+)\dfrac{R_3 \| R_4}{R_3 - (R_3 \| R_4)}$ e $I_C = \dfrac{V^+}{R_3 + (R_3 \| R_4)}$
- Imponendo $V_{EC} = -\dfrac{q}{2p}$ (o $I_C = \dfrac{q}{2}$) segue $q = \dfrac{2V^+}{R_3 + (R_3 \| R_4)}$
e quindi $V_{EC} = V^+ \dfrac{R_3 \| R_4}{R_3 + (R_3 \| R_4)} = 10.37$ V, $I_C = \dfrac{V^+}{R_3 + (R_3 \| R_4)} \simeq 29\,\text{mA}$.

- Molto più sinteticamente il problema può essere risolto nel modo seguente:

Individuato con $V_{ECQ}; I_{CQ}$ il punto di riposo (da determinare), la retta di carico dinamica, che passa per il p.r. e ha pendenza $p = -\dfrac{1}{R_3 \| R_4}$ avrà equazione:

$$I_C - I_{CQ} = -\frac{1}{R_3 \| R_4}(V_{EC} - V_{ECQ}) \qquad (I_C, V_{EC} \text{ sono le variabili})$$

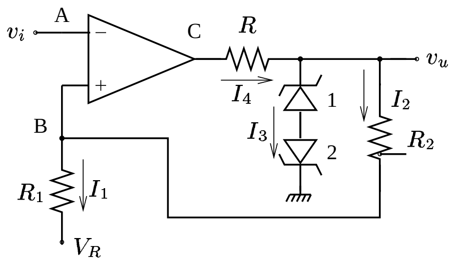
Questa retta interseca l'asse delle ascisse ($I_C = 0$) per $V_{EC} = (R_3 \| R_4) I_{CQ} + V_{ECQ}$. L'intersezione deve aversi per $V_{EC} = 2V_{ECQ}$, per cui eguagliando:

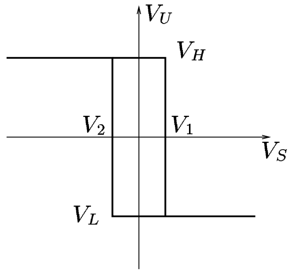
$$(R_3 \| R_4) I_{CQ} + V_{ECQ} = 2V_{ECQ} \qquad \text{segue} \qquad V_{ECQ} = (R_3 \| R_4) I_{CQ} \quad (*)$$

Quest'ultima condizione afferma che il punto di riposo che soddisfa la condizione richiesta deve trovarsi (oltre che sulla retta di carico statica (che è nota) e su quella dinamica (che va determinata)) anche sulla retta passante per l'origine di pendenza $R_3 \| R_4$. Dunque mettendo a sistema l'equazione della retta di carico statica (nota fin dal principio) con l'ultima condizione ($*$), si ottiene il risultato cercato.

ESERCIZIO 3

Comparatore invertente:





$$V_H = V_{Z,H} + V_{\gamma,H} = 5.9 \text{ V} \qquad V_L = -(V_{Z,L} + V_{\gamma,L}) = -5.9 \text{ V}$$

$$\beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2} = 0.4545 \qquad V_1 = V_R(1-\beta) + V_H\beta = 3.5 \text{ V} \qquad V_2 = V_R(1-\beta) + V_L\beta - 1.86 \text{ V}$$

$$V_A = V_S \qquad V_B = V_R(1-\beta) + V_U\beta \qquad I_1 = I_2 = \frac{V_U - V_R}{R_1 + R_2} \qquad I_4 = \frac{V_C - V_U}{R} \qquad I_3 = I_4 - I_2$$

$$P_1 = \begin{cases} V_Z I_2 & \text{per} \quad I_2 > 0 \\ -V_\gamma I_2 & \text{per} \quad I_2 < 0 \end{cases} \qquad P_2 = \begin{cases} V_\gamma I_2 & \text{per} \quad I_2 > 0 \\ -V_Z I_2 & \text{per} \quad I_2 < 0 \end{cases} \qquad P_R = R I_4^2$$

	V_A(V) (V)	V_U(V) (V)	V_B(V) (V)	V_C (V)	$I_1 = I_2$ μA	I_4 (mA) (mA)	I_3 (mA) (mA)	P_1 (mW)	P_2 (mW)	P_R (mW)
$T/2$	1.4	5.9	3.5	12 V	200	18.48	18.28	95.08	12.80	113
T	4	-5.9	-1.86	-12 V	-336.4	-18.48	-18.15	12.70	94.37	113
t_1^-	-1.86	-5.9	-1.86	-12 V	-336.4	-18.48	-18.15	12.70	94.37	113
t_1^+	-1.86	5.9	3.5	12 V	200	18.48	18.28	95.08	12.80	113