ESERCIZIO 1

1.1,1.2 - Ampl. differenziale

$$v_u = -v_1 \frac{R_4}{R_3}\left(1+\frac{R_2}{R_1}\right) + v_2\left(1+\frac{R_4}{R_3}\right) = A_1 v_1 + A_2 v_2.$$

Imponendo

$$\frac{R_4}{R_3}\left(1+\frac{R_2}{R_1}\right) = \left(1+\frac{R_4}{R_3}\right) \qquad (\text{cioè} \quad A_2 = -A_1) \qquad \text{segue} \qquad R_2 R_4 = R_1 R_3.$$

Con i valori dati $R_{4,id} = 8.311$ kΩ.

1.3 - C.M.R.R.

$R_{4,eff} = 1.1 R_{4,id} = 9.142$ kΩ.

Dette $v_c = \dfrac{v_1+v_2}{2}$, $v_d = v_1 - v_2$, si ha $\quad v_1 = v_c + \dfrac{v_1}{2}, \quad v_2 = v_c - \dfrac{v_d}{2}$ e dunque
$v_1 = A_1 v_1 + A_2 v_2 = A_1\left(v_c + \dfrac{v_1}{2}\right) + A_2\left(v_c - \dfrac{v_d}{2}\right) = (A_1 + A_2)\, v_c + \dfrac{A_1 - A_2}{2} v_d$

Pertanto $A_c = A_1 + A_2 = -\dfrac{R_{4,eff}}{R_3}\left(1+\dfrac{R_2}{R_1}\right) + \left(1+\dfrac{R_{4,eff}}{R_3}\right) = -0.1$

e $A_d = \dfrac{A_1 - A_2}{2} = -\dfrac{1}{2}\left[\dfrac{R_{4,eff}}{R_3}\left(1+\dfrac{R_2}{R_1}\right) + \left(1+\dfrac{R_{4,eff}}{R_3}\right)\right] = -3.82.$

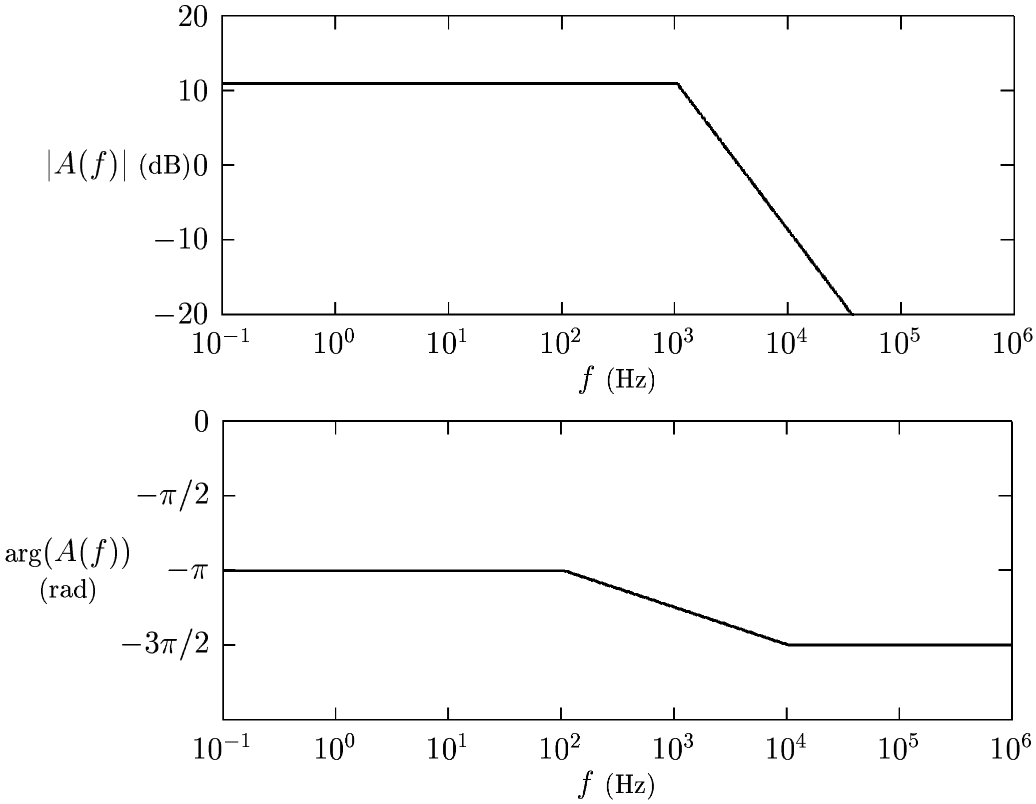
Dunque $\rho = \left|\dfrac{A_d}{A_c}\right| = 38.2 \quad (31.64$ dB).

1.4 - Risposta in frequenza

$$A(s) = -\frac{R_{4,id}}{R_3}\left(1+\frac{R_2}{R_1}\right)\frac{1}{1+R_{4,id} C s}.$$

$$A(f) = A_0 \frac{1}{1+j\frac{f}{f_p}}, \quad A_0 = -\frac{R_{4,id}}{R_3}\left(1+\frac{R_2}{R_1}\right) = -3.52 \quad (10.93\ \text{dB}), \quad f_p = \frac{1}{2\pi C R_{4,id}} = 1.06\ \text{kHz}.$$

Diagrammi di Bode:



ESERCIZIO 2

2.1 - Limiti di banda

Per le basse e medie frequenze ($f \ll f_{p2}$)

$$A(f) = A_0 \frac{1 + j\dfrac{f}{f_0}}{\left(1 + j\dfrac{f}{f_{p1}}\right)\left(1 + j\dfrac{f}{f_{p2}}\right)} = \simeq A_0 \frac{1 + j\dfrac{f}{f_0}}{1 + j\dfrac{f}{f_{p1}}}.$$

essendo $A_{CB} = A_0 \dfrac{f_{p1}}{f_0}$, la condizione da imporre per determinare il limite inferiore di banda f_L è:

$$|A(f_L)| \simeq |A_0| \sqrt{\frac{1 + \left(\dfrac{f_L}{f_0}\right)^2}{1 + \left(\dfrac{f_L}{f_{p1}}\right)^2}} = \frac{|A_0|}{\sqrt{2}} \frac{f_{p1}}{f_0}.$$

risolvendo si ottiene $f_L^2 = f_{p1}^2 - 2f_0^2 \qquad \rightarrow \qquad f_L = \sqrt{f_{p1}^2 - 2f_0^2} = 191.8$ Hz.

Per le medie e alte frequenze $A(f) \simeq A_{CB} \dfrac{1}{1 + j\dfrac{f}{f_{p2}}}$ e dunque $f_H = f_{p2} = 600$ kHz.

2.2

Deve essere $|A(f)|_{f=f_x} = A_x$.

Alle medie e basse frequenze si ottiene $|A_0|^2 \left(1 + \frac{f^2}{f_0^2}\right) = A_x^2 \left(1 + \frac{f^2}{f_{p1}^2}\right)$

Dunque $f^2 \left(\frac{|A_0|^2}{f_0^2} - \frac{A_x^2}{f_{p1}^2}\right) = A_x^2 - |A_0|^2$, da cui $f^2 = 11200\ \text{Hz}^2$ ed $f = 105.83\ \text{Hz} = f_{x,1}$

Alle alte frequenze $|A_{CB}|^2 = A_x^2 \left(1 + \frac{f^2}{f_{p2}^2}\right)$;

dunque $f^2 \frac{A_x^2}{f_{p2}^2} = |A_{CB}|^2 - A_x^2$, da cui $f^2 = 1.08 \times 10^{12}\ \text{Hz}^2$ ed $f = 1.04\ \text{MHz} = f_{x,2}$.

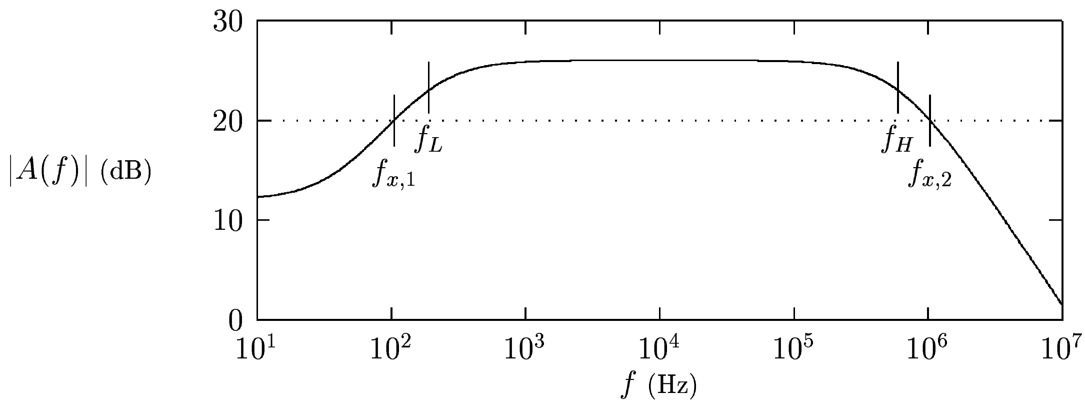
2.3 - Sfasamento

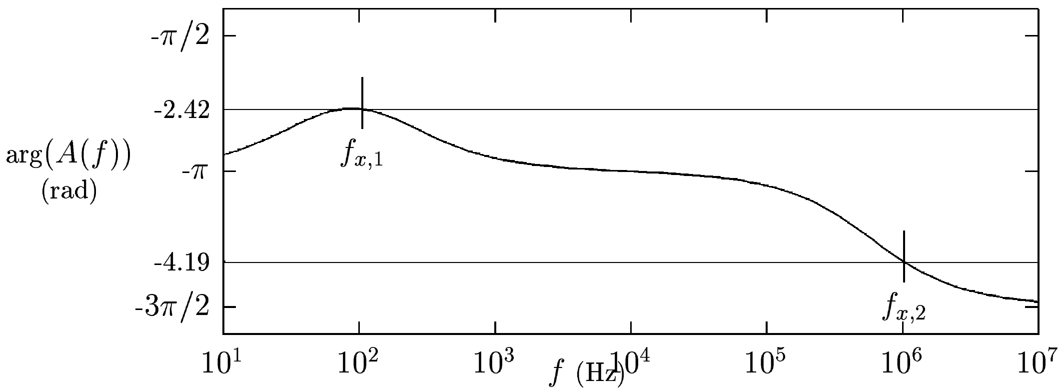
Considerando pari a $-\pi$ lo sfasamento tra uscita e ingresso a frequenza nulla, si ha

$$\begin{aligned}
\varphi(f_{x,1}) &= -\pi + \arctan\frac{f_{x,1}}{f_0} - \arctan\frac{f_{x,1}}{f_{p1}} - \arctan\frac{f_{x,1}}{f_{p2}} \\
&\simeq -\pi + \arctan\frac{f_{x,1}}{f_0} - \arctan\frac{f_{x,1}}{f_{p1}} \quad (\text{essendo} f_{x,1} \ll f_{p2}) \\
&= -2.42\ \text{rad} \quad (\simeq -139°).
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\varphi(f_{x,2}) &= -\pi + \arctan\frac{f_{x,2}}{f_0} - \arctan\frac{f_{x,2}}{f_{p1}} - \arctan\frac{f_{x,2}}{f_{p2}} \\
&\simeq -\pi - \arctan\frac{f_{x,2}}{f_{p2}} \quad (\text{essendo} f_{x,2} \gg f_0, f_{p1}) \\
&= -4.19\ \text{rad} \quad (\simeq -240°).
\end{aligned}$$

Si riportano di seguito i diagrammi con l'andamento **effettivo** *della risposta in ampiezza e di quella in fase* **(non richiesti nel testo del compito)**, *e con l'indicazione delle frequenze f_L, f_H, $f_{x,1}$ ed $f_{x,2}$.*





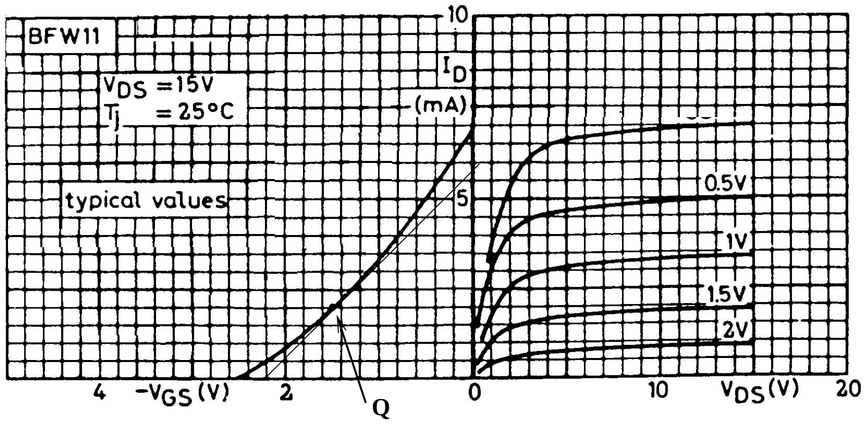
ESERCIZIO 3

3.1 - Punto di riposo, resistenza

$I_{D1} = I_{D2} = I_D = 2$ mA $\rightarrow V_{GS1} = V_{GS2} = -1.5$ V. Per entrambi i transistor si ha $V_{GS} = -R_S I_D$; dunque $R_S = -\dfrac{V_{GS}}{I_D} = 750\ \Omega = R_{S1} = R_{S2}$.

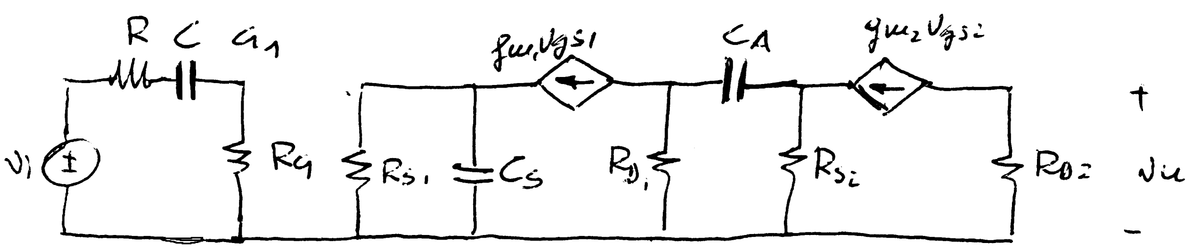
$V_{DS1} = V^+ - (R_{D1} + R_{S1})I_D = 6.1$ V; $V_{DS2} = V^+ - (R_{D2} + R_{S2})I_D = 5.1$ V; i transistor lavorano entrambi in zona di saturazione.

Il valore del parametro g_m può essere ricavato graficamente come pendenza della tangente alla caratteristica mutua nel punto di riposo. Per entrambi i transistor si ha $g_m = \dfrac{\Delta I_D}{\Delta V_{GS}} = 2.4$ mA/V (v. caratteristiche).



3.2 - Risposta in frequenza

Circuito per le variazioni (ampl. Cascode):



Condensatori non intergenti (metodo della res. vista)

C: zero nell'origine + polo: $R_{vC} = R + R_G = 101\ \mathrm{k\Omega}$

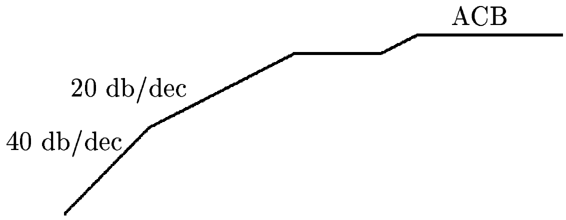
C_A: zero nell'origine + polo: $R_{vCA} = R_{D1} + (R_{S2} /\!/ 1/g_{m2}) = 2.47\ \mathrm{k\Omega}$

C_S: zero (finito) + polo: $R_{vCS} = R_{S1} /\!/ 1/g_{m1} = 270\ \Omega$

$f_{pC} = \dfrac{1}{2\pi C R_{vC}} = 1.05$ Hz, $\qquad f_{pCA} = \dfrac{1}{2\pi C_A R_{vCA}} = 58.6$ Hz,

$f_{pCS} = \dfrac{1}{2\pi C_S R_{vCS}} = 1.78$ kHz, $\qquad f_{zCS} = \dfrac{1}{2\pi C_S R_{S1}} = 643.1$ Hz

Andamento qualitativo della risposta (modulo):



A centro banda i condensatori si comportano tutti come cortocircuiti:

$v_u = -R_{D2} g_{m2} v_{gs2}$,

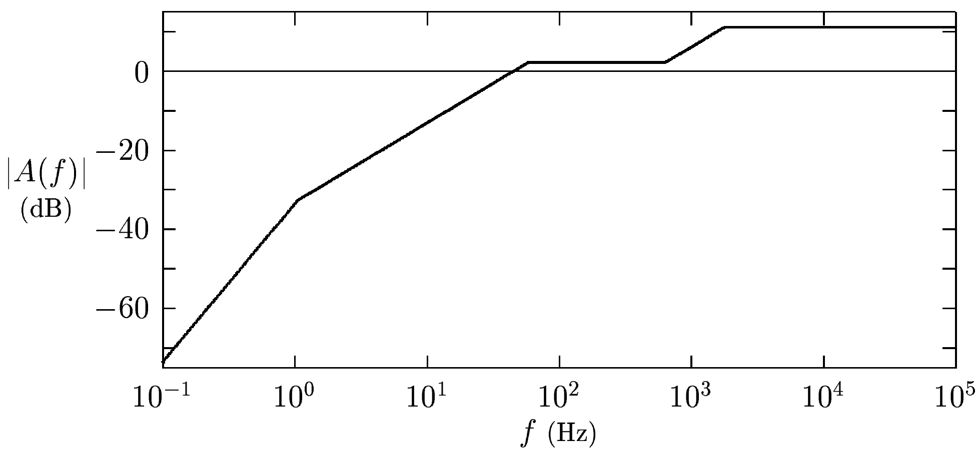
$v_{gs2} = (R_{D1} /\!/ R_{S2} /\!/ 1/g_{m2}) g_{m1} v_{gs1}$,

$v_{gs1} = \dfrac{R_G}{R_G + R}$, da cui

$A_{CB} = R_{D2} g_{m2} (R_{D1} /\!/ R_{S2} /\!/ 1/g_{m2}) g_{m1} \dfrac{R_G}{R_G + R} = -3.6 \quad (11.13\ \mathrm{dB})$.

$$A(f) = A_1 \frac{\left(j\dfrac{f}{f_{pC}}\right)\left(j\dfrac{f}{f_{pCA}}\right)\left(1 + j\dfrac{f}{f_{zCS}}\right)}{\left(1 + j\dfrac{f}{f_{pC}}\right)\left(1 + j\dfrac{f}{f_{pCA}}\right)\left(1 + j\dfrac{f}{f_{pCS}}\right)}, \qquad A_1 = A_{CB}\frac{f_{zCS}}{f_{pCS}} = -1.298$$

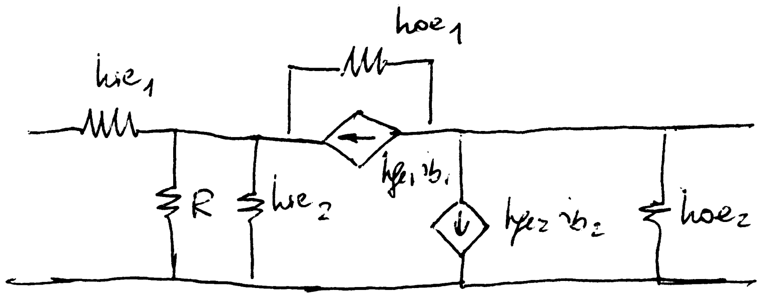
Diagramma di Bode:



ESERCIZIO 4

4.1, 4.2 - Parametri h

Circuito equivalente: (Darlington modificato)



con l'uscita cortocircuitata la resistenza $1/h_{ie1}$ si trova in parallelo ad R ed h_{ie2}.

$h_{id} = h_{ie1} + (R /\!\!/ h_{ie2} /\!\!/ 1/h_{oe1})(h_{fe1} + 1)$

h_{fd} :

$$i_2 = h_{fe1} i_{b1} + h_{fe2} i_{b2} - h_{oe1} h_{ie2} i_{b2}$$

$$(h_{fe1} + 1) i_{b1} = i_{b2} \left(1 + \frac{h_{ie2}}{R} + h_{oe1} h_{ie2} \right) \text{ (nodo } e_1\text{)}$$

$$i_2 = h_{fe1} i_{b1} + (h_{fe2} - h_{oe1} h_{ie2}) \frac{(h_{fe1} + 1)}{\left(1 + \frac{h_{ie2}}{R} + h_{oe1} h_{ie2} \right)} i_{b1}$$

$$h_{fd} = \frac{i_2}{i_{b1}} = h_{fe1} + \frac{(h_{fe2} - h_{oe1} h_{ie2})(h_{fe1} + 1)}{1 + \frac{h_{ie2}}{R} + h_{oe1} h_{ie2}}.$$

Con l'ingresso aperto e un generatore di prova (v_p) sull'uscita i_{b1} è nulla, il generatore $h_{fe1} i_{b1}$ è aperto e la resistenza $1/hoe_1$ è percorsa dalla corrente $i_{b2}(1 + h_{ie2}/R)$ (somma delle correnti in R e in h_{ie2}):

$$v_p = h_{ie2} i_{b2} + \frac{1 + h_{ie2}/R}{h_{oe1}} i_{b2} \qquad i_p = i_{b2} \left(1 + \frac{h_{ie2}}{R} + h_{fe2} \right) \text{ (tolta } h_{oe2}\text{)}$$

$$h_{od} = \frac{i_p}{v_p} = h_{oe2} + \frac{1 + \frac{h_{ie2}}{R} + h_{fe2}}{h_{ie2} + \frac{1 + h_{ie2}/R}{h_{oe1}}}$$

h_{rd}:

$$v_1 = h_{ie2} i_{b2} \rightarrow h_{rd} = \frac{v_1}{v_p} = \frac{h_{ie2}}{h_{ie2} + \frac{1 + h_{ie2}/R}{h_{oe1}}}$$

con $h_{oe1} = 0$				con $h_{oe1} = (20\ \mathrm{k}\Omega)^{-1}$			
h_{id}	h_{fd}	h_{od}	h_{rd}	h_{id}	h_{fd}	h_{od}	h_{rd}
23.3 kΩ	5225	$33.3 \times 10^{-6}\ \Omega^{-1} (= h_{oe2})$	0	23.2 kΩ	5199	$1.327 \times 10^{-3}\ \Omega^{-1}$	4.975×10^{-3}