

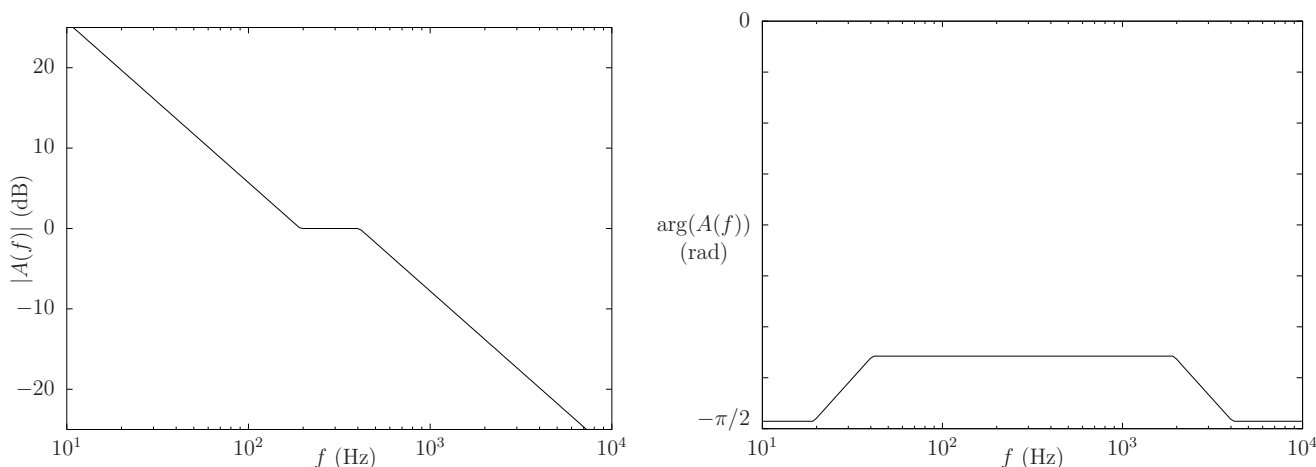
## ESERCIZIO 1 (4)

### 1.1 - Risposta in frequenza

$$A(s) = \frac{1/(C_1s)}{R_1 + 1/(C_1s)} \left[ 1 + \frac{1}{R_2C_2s} \right] = \frac{1 + R_2C_2s}{R_2C_2s(1 + R_1C_1s)}$$

$$A(f) = \frac{\left(1 + j\frac{f}{f_z}\right)}{j\frac{f}{f_z} \left(1 + j\frac{f}{f_p}\right)} \quad f_z = \frac{1}{2\pi R_2C_2} = 192.9 \text{ Hz}, \quad f_p = \frac{1}{2\pi R_1C_1} = 408.1 \text{ Hz}$$

### 1.2 - Diagrammi di Bode



### 1.3 - Guadagno (modulo) alla frequenza $f_0$

$$|A(f_0)| = \left| \frac{\left(1 + j\frac{f_0}{f_z}\right)}{j\frac{f_0}{f_z} \left(1 + j\frac{f_0}{f_p}\right)} \right| = \frac{f_z \sqrt{1 + \frac{f_0^2}{f_z^2}}}{f_0 \sqrt{1 + \frac{f_0^2}{f_p^2}}} = 0.201 \quad (= -13.94 \text{ dB})$$

Osservando che si ha  $f_0 \gg f_p, f_z$  vale, approssimativamente  $|A(f)|_{f \simeq f_0} \simeq \frac{f_p}{f_0} = 0.204 \quad (= -13.81 \text{ dB})$

### 1.4 - Relazione ingresso-uscita per $f = 1 \text{ Hz}$

Alla frequenza di 1 Hz (che risulta essere  $\ll f_p, f_z$ ), si ha

$$A(f)|_{f=1 \text{ Hz}} \simeq \frac{1}{j\frac{f}{f_z}} \Bigg|_{f \simeq 1 \text{ Hz}}$$

che è la risposta di un integratore (**non** invertente). Pertanto, a quella frequenza, con buona approssimazione si ha

$$v_u(t) = -\frac{1}{R_2C_2} \int_0^t v_s(\tau) d\tau + v_u(0)$$

## ESERCIZIO 2 (3)

### 2.1 - Punto di riposo

La coppia  $M_3$ - $M_4$  costituisce uno specchio di corrente: i due transistor - uguali - lavorano con la stessa  $V_{GS}$  e dunque, avendo caratteristiche d'uscita orizzontali in zona di saturazione, anche con la stessa  $I_D$ .

La relazione  $V^+ - RI_{D4} - V_{GS4} - V^- = 0$  descrive, sul piano  $I_D$ - $V_{GS}$ , una retta (r), la cui intersezione con la caratteristica mutua individua il punto di riposo:  $V_{GS4} = 5.6 \text{ V} = V_{GS3}$ ,  $I_{D4} = 8 \text{ mA} = I_{D3}$ .

Anche i transistor  $M_1$  ed  $M_2$  lavorano con la stessa  $V_{GS}$  ma, avendo stessa tensione di soglia e parametri di transconduttanza  $k_{n1} = 3k_{n2}$  si avrà  $I_{D1} = 3I_{D2}$ ; essendo inoltre  $I_{D1} + I_{D2} = I_{D3}$ , sarà  $I_{D1} = 6 \text{ mA}$  e  $I_{D2} = 2 \text{ mA}$ . In corrispondenza si avrà (v. caratteristiche)  $V_{GS1} = V_{GS2} = 4.42 \text{ V}$ .

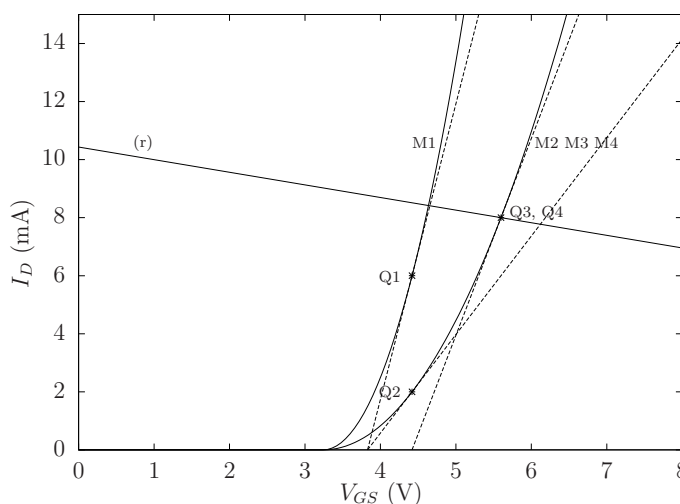
Inoltre

$$V_{DS4} = V_{GS4} = 5.6 \text{ V},$$

$$V_{DS3} = -V^- - V_{GS2} = 7.58 \text{ V},$$

$$V_{DS2} = V^+ - R_D I_{D2} - V_{DS3} - V^- = 12.42 \text{ V}$$

$$V_{DS1} = V^+ - V_{DS3} - V^- = 16.42 \text{ V}.$$

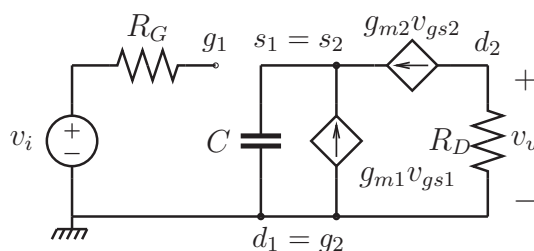


Per tutti i transistor risulta verificata l'ipotesi di funzionamento in zona di saturazione  $V_{DS} > V_{GS} - V_T$  (stimando, dalle caratteristiche mutue, una tensione di soglia non superiore a 3.5 V).

Nel punto di riposo si ha  $g_{m1} = 10.2 \text{ mS}$ ,  $g_{m2} = g_{m1}/3 = 3.4 \text{ mS}$ ,  $g_{m3} = g_{m4} = 6.8 \text{ mS}$ . (Si ricorda che il valore di  $g_m$  è dato dalla pendenza della retta tangente (tratteggiata in figura) alla caratteristica mutua nel punto di riposo e che esso risulta proporzionale al valore del parametro di transconduttanza  $k_n$ , da cui segue la relazione tra  $g_{m1}$  e  $g_{m2}$ ).

### 2.2 - Risposta in frequenza, diagramma di Bode

Circuito equivalente per le variazioni:



Lo specchio di corrente viene sostituito dalla sua resistenza differenziale, che è infinita date le caratteristiche dei transistor. L'amplificatore è costituito dalla cascata di un inseguitore di *source*, seguito da uno stadio a *gate* comune. Il condensatore  $C$  produce un polo, che riduce la risposta alle alte frequenze, determinando il limite superiore di banda. Con  $C$  aperto si ha:

$$v_u = -R_D g_{m2} v_{gs2}, \quad g_{m1} v_{gs1} = -g_{m2} v_{gs2}, \quad v_{gs1} = v_i + v_{gs2}$$

Dalle ultime due segue:

$$v_{gs1} \left( 1 + \frac{g_{m1}}{g_{m2}} \right) = v_i$$

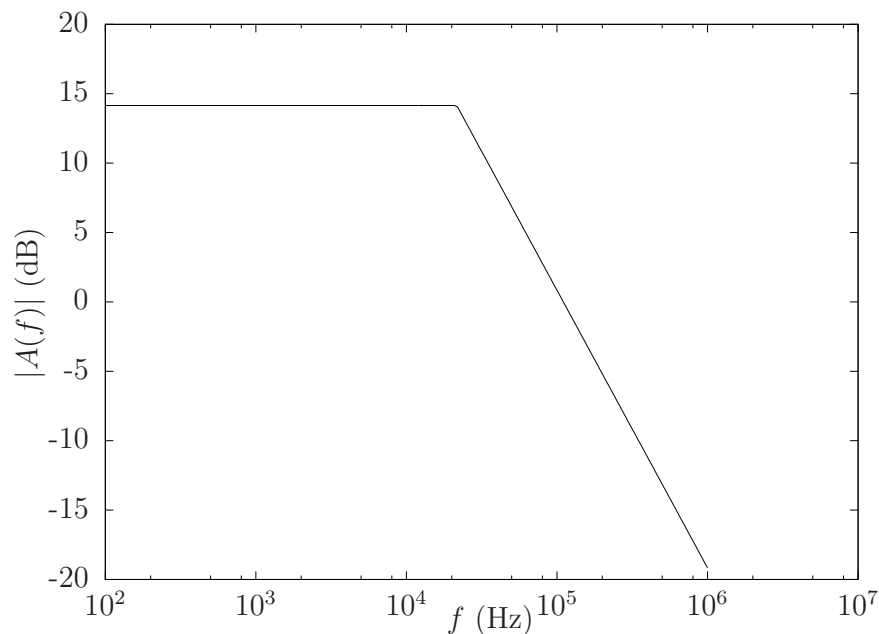
e dunque

$$A_{CB} = \frac{v_u}{v_i} = \frac{R_D g_{m1}}{\left( 1 + \frac{g_{m1}}{g_{m2}} \right)} = \frac{R_D g_{m1} g_{m2}}{g_{m1} + g_{m2}} = 5.1 \quad (= 14.15 \text{ dB}).$$

La resistenza vista dal condensatore  $C$  è

$$R_{vC} = \frac{1}{g_{m1}} \parallel \frac{1}{g_{m2}} = 73.5 \, \Omega, \quad \text{da cui segue} \quad f_{pC} = \frac{1}{2\pi C R_{vC}} = 21.6 \text{ kHz}.$$

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



### ESERCIZIO 3 (2)

#### 3.1 - Punto di riposo

$V_{CE} = V^+ - R_C I_C - (R_{E1} + R_{E2})(I_C + I_B) \simeq V^+ - (R_C + R_{E1} + R_{E2})I_C = 6.04 \text{ V}$ . Dalle caratteristiche d'uscita si ottiene  $I_B \simeq 11 \mu\text{A} \ll I_C$ .

$$\begin{cases} V^+ \frac{R_2}{R_1 + R_2} - (R_1 \parallel R_2) I_B - V_\gamma - (R_{E1} + R_{E2})(I_C + I_B) = 0 \\ R_1 + R_2 = 200 \text{ k}\Omega \end{cases}$$

Risolvendo si ottiene  $R_1 = 125.6 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 74.4 \text{ k}\Omega$ .

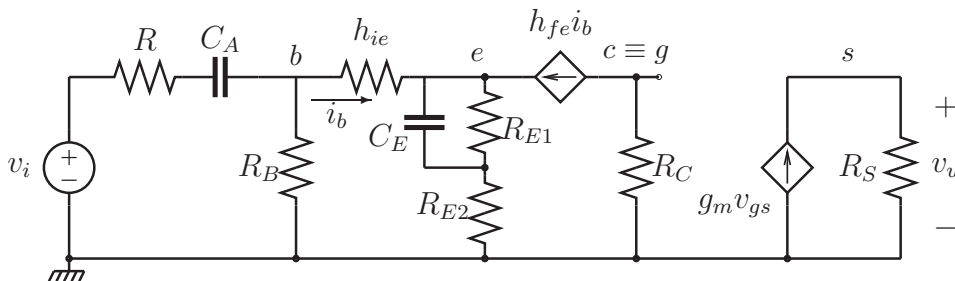
Inoltre  $V_{GS} = V^+ - R_C I_C - R_S I_D$ ; mettendo questa equazione a sistema con  $I_D = \frac{k_n}{2} (V_{GS} - V_T)^2$ , si ottiene  $V_{GS} = 3 \text{ V}$ ,  $I_D = 2 \text{ mA}$ ,  $V_{DS} = V^+ - R_S I_D = 9.5 \text{ V}$ ; quest'ultimo risultato ( $V_{DS} > V_{GS} - V_T$ ) conferma l'ipotesi di funzionamento in zona di saturazione.

#### 3.2 - Risposta in frequenza

Nel p.r. si ha, per il BJT:  $h_{fe} = 280$ ,  $h_{ie} = r_{bb'} + r_{b'e} = r_{bb'} + \frac{V_T}{I_C} h_{fe} = 2.79 \text{ k}\Omega$

e per il MOSFET:  $g_m = k_n (V_{GS} - V_T) = 2 \text{ mS}$ .

Circuito equivalente per le variazioni ( $R_B = R_1 \parallel R_2 = 46.73 \text{ k}\Omega$ ):



Il condensatore  $C_A$  produce uno zero nell'origine e un polo, mentre a  $C_E$  saranno dovuti un polo e uno zero finiti; i due condensatori sono interagenti.

La frequenza di zero è data da

$$f_z = \frac{1}{2\pi C_E R_{E1}} = 490 \text{ Hz.}$$

$$R_A^0 = R + \{R_B \parallel [h_{ie} + (R_{E1} + R_{E2})(h_{fe} + 1)]\} = 43.0 \text{ k}\Omega$$

$$R_A^E = R + \{R_B \parallel [h_{ie} + R_{E2}(h_{fe} + 1)]\} = 38.1 \text{ k}\Omega$$

$$R_E^0 = R_{E1} \parallel \left( R_{E2} + \frac{h_{ie} + R_B}{h_{fe} + 1} \right) = 461 \Omega$$

$$R_E^A = R_{E1} \parallel \left[ R_{E2} + \frac{h_{ie} + (R_B \parallel R)}{h_{fe} + 1} \right] = 409 \Omega$$

(Di queste quattro resistenze, solo le prime due e una delle rimanenti sono necessarie per i calcoli che seguono).

$$a_1 = C_E R_E^0 + C_A R_A^0 = 1.66 \times 10^{-3} \text{ s} \quad a_2 = C_E C_A R_E^0 R_A^E (= C_E C_A R_E^A R_A^0) = 200.2 \times 10^{-9} \text{ s}^2$$

Le radici del polinomio  $P(s) = 1 + a_1 s + a_2 s^2$  sono

$$s_{p1} = -655.7 \text{ rad/s} \quad \text{e} \quad s_{p2} = -7.618 \text{ krad/s}$$

da cui seguono le frequenze di polo:

$$f_{p1} = 104 \text{ Hz} \quad \text{e} \quad f_{p2} = 1213 \text{ Hz}$$

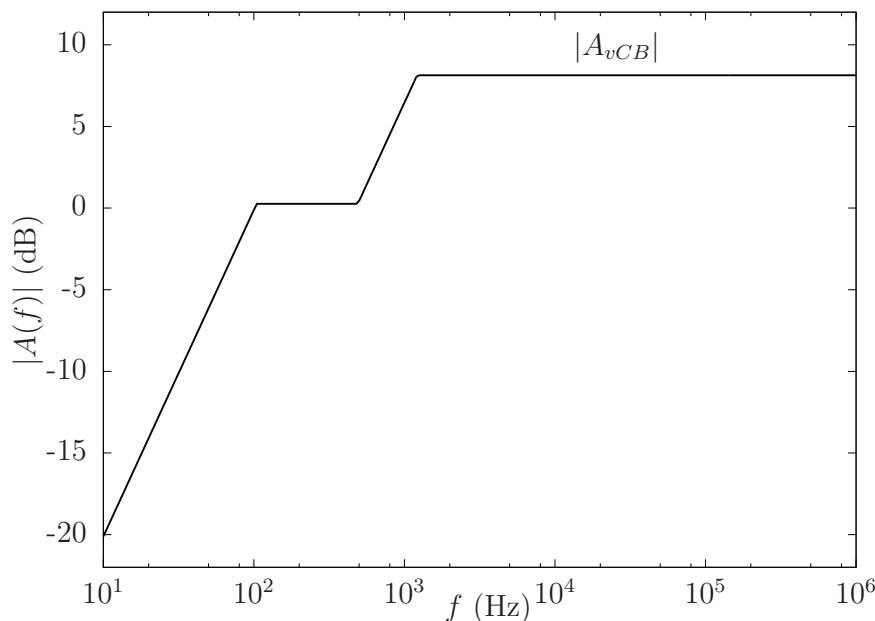
Con entrambi i condensatori chiusi (cioè a centro banda) si ha (em.comune + inseguitore di source):

$$A_{vCB} = -\frac{R_B}{R + R_B} \cdot \frac{g_m R_S}{1 + g_m R_S} \cdot \frac{h_{fe} R_C}{(R \parallel R_B) + h_{ie} + R_{E2}(h_{fe} + 1)} = -2.55 \quad (= 8.13 \text{ dB})$$

Così

$$A(f) = A_{vCB} \frac{f_z}{f_{p2}} \cdot \frac{j \frac{f}{f_{p1}} \left(1 + j \frac{f}{f_z}\right)}{\left(1 + j \frac{f}{f_{p1}}\right) \left(1 + j \frac{f}{f_{p2}}\right)}$$

### 3.3 - Diagramma di Bode



### 3.4 - Resistenza d'ingresso a c.b.

Con  $C_A$  e  $C_E$  chiusi:

$$R_{in} = R + \{R_B \parallel [h_{ie} + R_{E2}(h_{fe} + 1)]\} = R_A^E = 38.1 \text{ k}\Omega \quad (\text{comprensiva di } R).$$

**ESERCIZIO 4 (1)**

$$h_i = \left. \frac{v_1}{i_1} \right|_{v_2=0} = R_i = 2 \text{ k}\Omega$$

$$h_o = \left. \frac{i_2}{v_2} \right|_{i_1=0} = \frac{1}{R_o} = 50 \mu\text{S}$$

$$h_f = \left. \frac{i_2}{i_1} \right|_{v_2=0} = -\frac{h}{R_o} = -200$$

$$h_r = \left. \frac{v_1}{v_2} \right|_{i_1=0} = kR_i = 10^{-4}.$$

**ESERCIZIO 5 (4)**

$$\begin{cases} V^+ = R I_{D1} + V_{GS1} \\ I_{DS1} = \frac{k_n}{2} (V_{GS1} - V_T)^2 \end{cases}$$

Risolvendo segue

$$I_{DS1} = 1.87 \text{ mA e } V_{GS1} = 3.08 \text{ V.}$$

Quindi

$$\begin{cases} V_{GS1} = R_S I_{D2} + V_{GS2} \\ I_{DS2} = \frac{k_n}{2} (V_{GS2} - V_T)^2 \end{cases}$$

Da cui segue

$$I_{DS2} = 0.61 \text{ mA e } V_{GS2} = 2.4 \text{ V.}$$