

Comportamento in frequenza degli amplificatori

- Il guadagno e tutte le grandezze che caratterizzano un amplificatore sono **funzione della frequenza** (cioè $\mathbf{A=A(f)}$, $\mathbf{R_{in}=R_{in}(f)}$, $\mathbf{R_{out}=R_{out}(f)}$, etc.). Questo perché con il crescere della frequenza i componenti reattivi presenti nel circuito (ad es. capacità di *bypass* e di disaccoppiamento) o i componenti parassiti (ad es. le capacità tra le varie giunzioni di un BJT) presentano un valore di impedenza diverso rispetto al centro banda.
- Pertanto, al variare di f , ogni grandezza caratteristica dell'amplificatore è destinata a variare.
- La funzione di trasferimento di un amplificatore presenta quindi una certa banda, **B** , data dalla differenza tra le frequenze a -3dB . Nell'analisi degli amplificatori a bassa frequenza, si calcolano i valori della funzione di trasferimento e delle altre grandezze caratteristiche **a centro banda**.

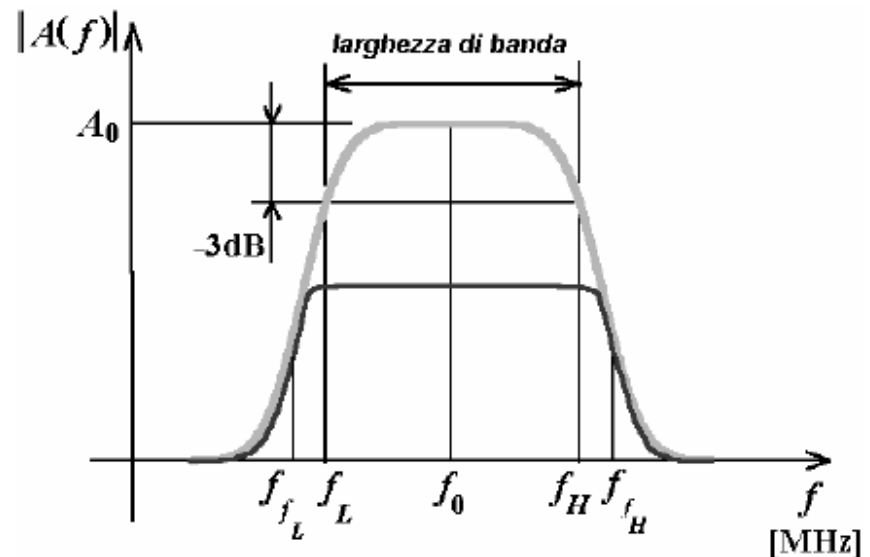
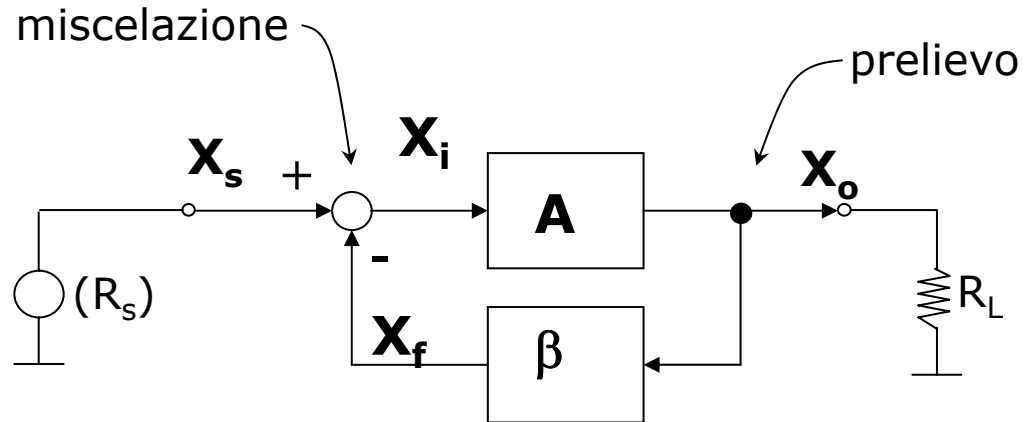
Comportamento in frequenza degli amplificatori reazionati

$$A_f(f) = \frac{A(f)}{1 + \beta \cdot A(f)}$$

$$\text{Se } |\beta A| \gg 1, \quad A_f(f) \approx \frac{1}{\beta}$$

- In generale, al crescere di f rispetto al centro banda, $A(f)$ decresce. Analogamente, al diminuire di f rispetto al centro banda, $A(f)$ decresce.

- Pertanto la precedente formula per il guadagno in reazione, al crescere di f non sarà più valida e dovrà essere presa in considerazione la forma completa (formula in alto).



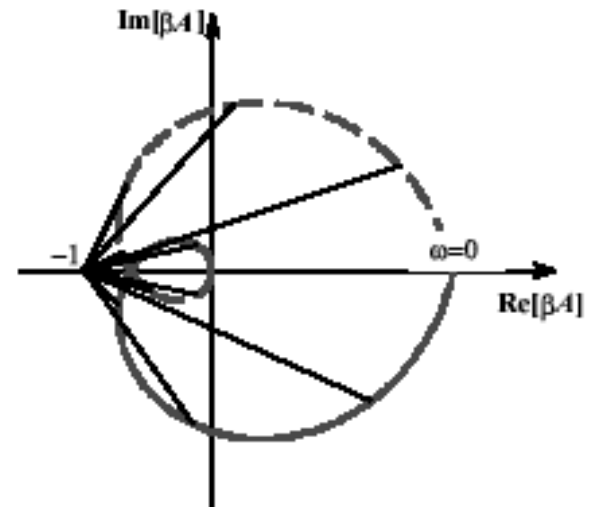
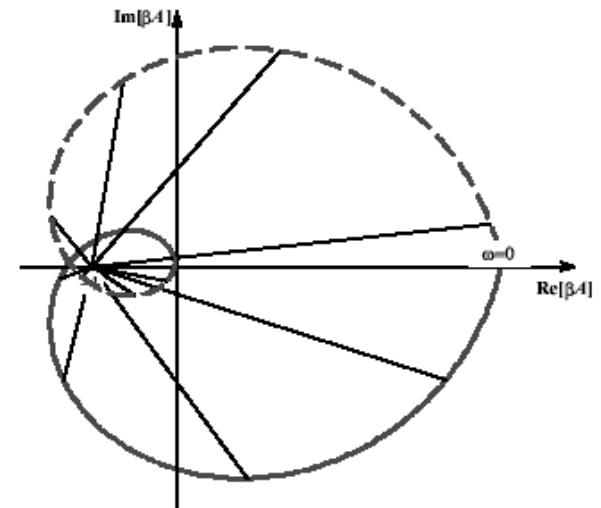
Stabilità degli amplificatori reazionati

- In generale, se anche l'amplificatore diretto (blocco A) è stabile, non è detto che l'amplificatore reazionato sia stabile ad ogni frequenza. La stabilità dell'amplificatore in reazione dipende anche dalla rete di reazione (blocco β).
- Un amplificatore stabile eccitato con un segnale limitato fornisce in uscita un segnale limitato. Questo accade se la funzione di trasferimento $A_f(f)$ dell'amplificatore reazionato **non presenta poli nel semipiano destro né poli sull'asse immaginario**.
- Se $A(f)$ è stabile, lo sarà anche $A_f(f)$ a patto che $1+\beta A$ presenti zeri solo nel **semipiano sinistro aperto**.
- Esistono vari criteri per verificare se l'amplificatore con reazione sia stabile:
 1. Criterio di **Nyquist**
 2. Criterio del **marginale di fase** e del **marginale di guadagno**
 3. Studio del **luogo delle radici**
- Tali criteri si basano tutti sull'andamento del cosiddetto **guadagno di anello**, $L(s) = \beta A(s)$ e sul fatto che $\beta A(s) \neq -1$.

Criterio di Nyquist per la stabilità

L'amplificatore reazionato è **INSTABILE** se la curva data dal diagramma di Nyquist del guadagno di anello $L(j\omega) = \beta A(j\omega)$ per $\omega = -\infty..+\infty$ include il punto $-1+j0$.

Viceversa, l'amplificatore è **STABILE** se il diagramma di Nyquist di $L(j\omega) = \beta A(j\omega)$ per $\omega = -\infty..+\infty$ non include $-1+j0$.



Margine di fase e margine di guadagno

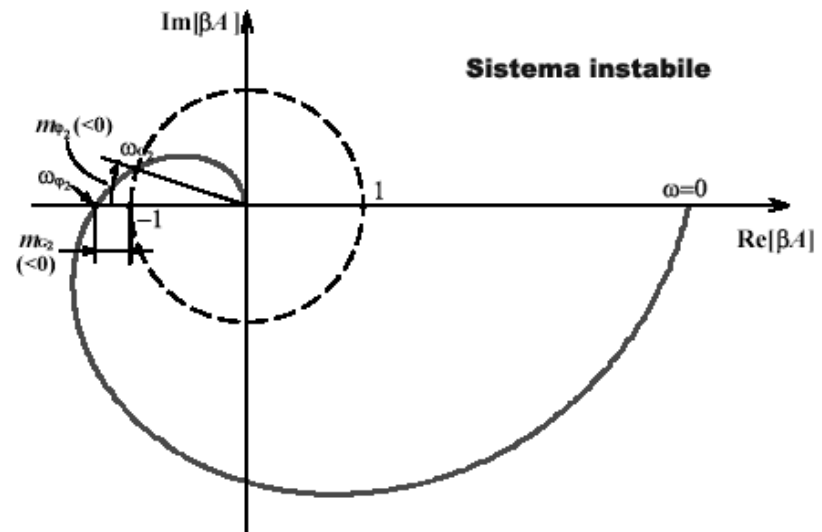
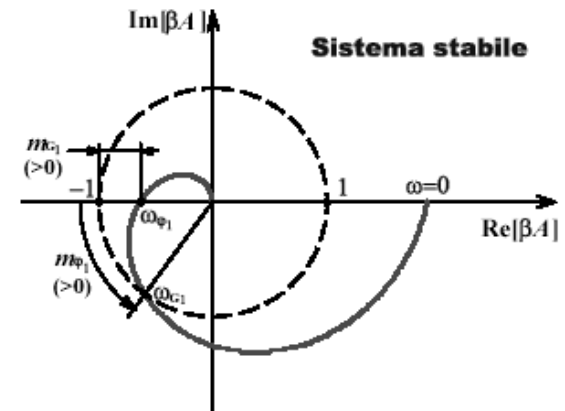
Margine di guadagno, $m_g = -|L(j\omega_\varphi)|_{dB}$

$$\omega_\varphi \mid \angle L(j\omega_\varphi) = -180^\circ$$

Margine di fase, $m_\phi = 180 + \angle L(j\omega_g)$

$$\omega_g \mid |L(j\omega_g)| = 1$$

Stabilità	Instabilità
$\omega_\varphi > \omega_g$	$\omega_\varphi < \omega_g$
$m_g > 0$	$m_g < 0$
$m_\phi > 0$	$m_\phi < 0$

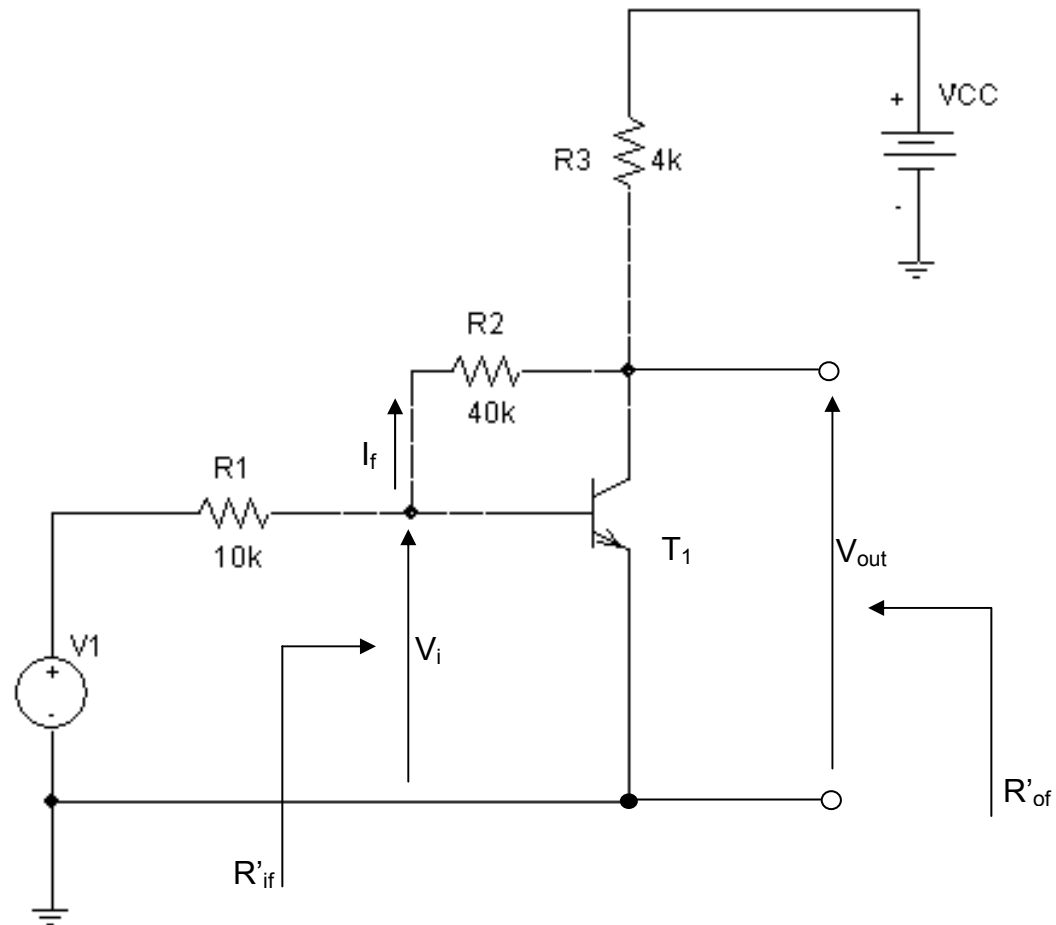


Parallelo di tensione

$$I_f = \frac{V_i - V_o}{R_2} \cong -\frac{V_o}{R_2}$$

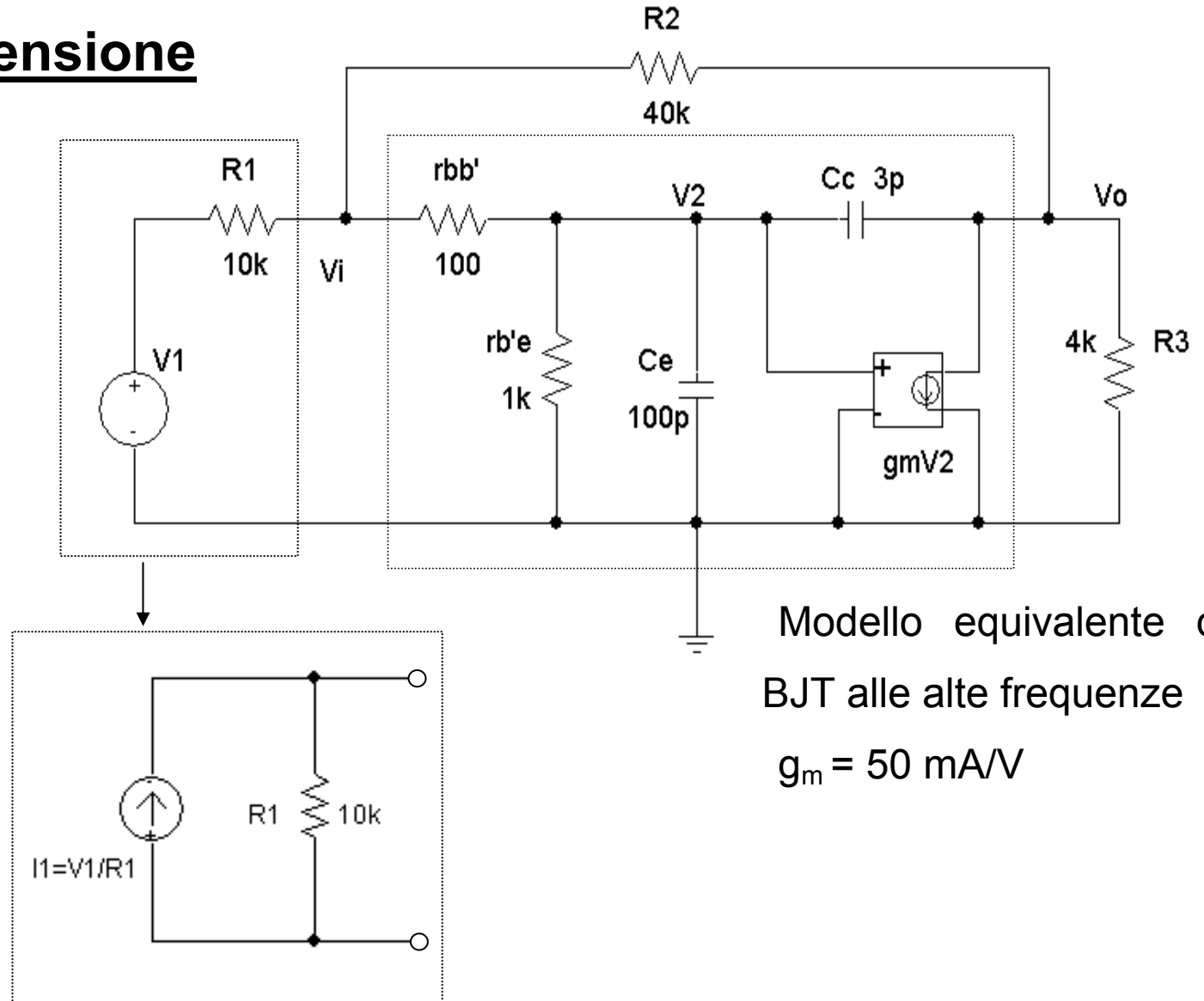
visto che $V_i \ll V_o$.

$$\text{Quindi } \beta = -\frac{1}{R_2}$$



Parallelo di tensione

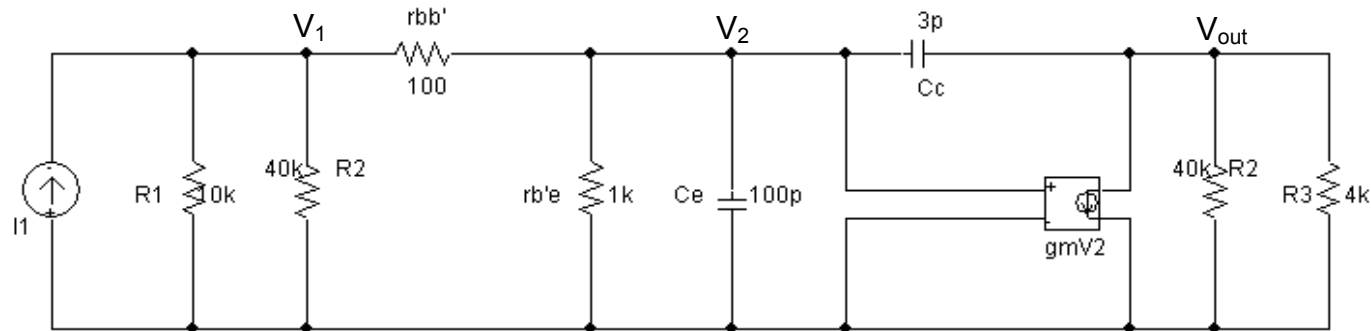
Equivalente di Norton del generatore di segnale



Modello equivalente del BJT alle alte frequenze
 $g_m = 50 \text{ mA/V}$

Parallelo di tensione

Schema senza reazione



$$\left\{ \begin{array}{l} I_1 = \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_1}{R_2} + \frac{V_1 - V_2}{r_{b'b}} \\ \frac{V_1 - V_2}{r_{b'b}} = \frac{V_2}{r_{b'e}} + sC_e V_2 + sC_c \cdot (V_2 - V_{out}) \\ sC_c \cdot (V_2 - V_{out}) = g_m V_2 + \frac{V_{out}}{R_2} + \frac{V_{out}}{R_3} \end{array} \right.$$

Parallelo di tensione

Funzione di trasferimento senza reazione

$$R_M = \frac{V_{out}}{I_1} = \frac{-R'_c R G_s (g_m - s C_c)}{s^2 C_e C_c R'_c + s [C_e + C_c + C_c R'_c (g_m + g_{b'e} + G_s)] + G_s + g_{b'e}}$$

dove

$$R'_c = R_3 \parallel R_2 = (4 \parallel 40) k\Omega = 3.64 k\Omega$$

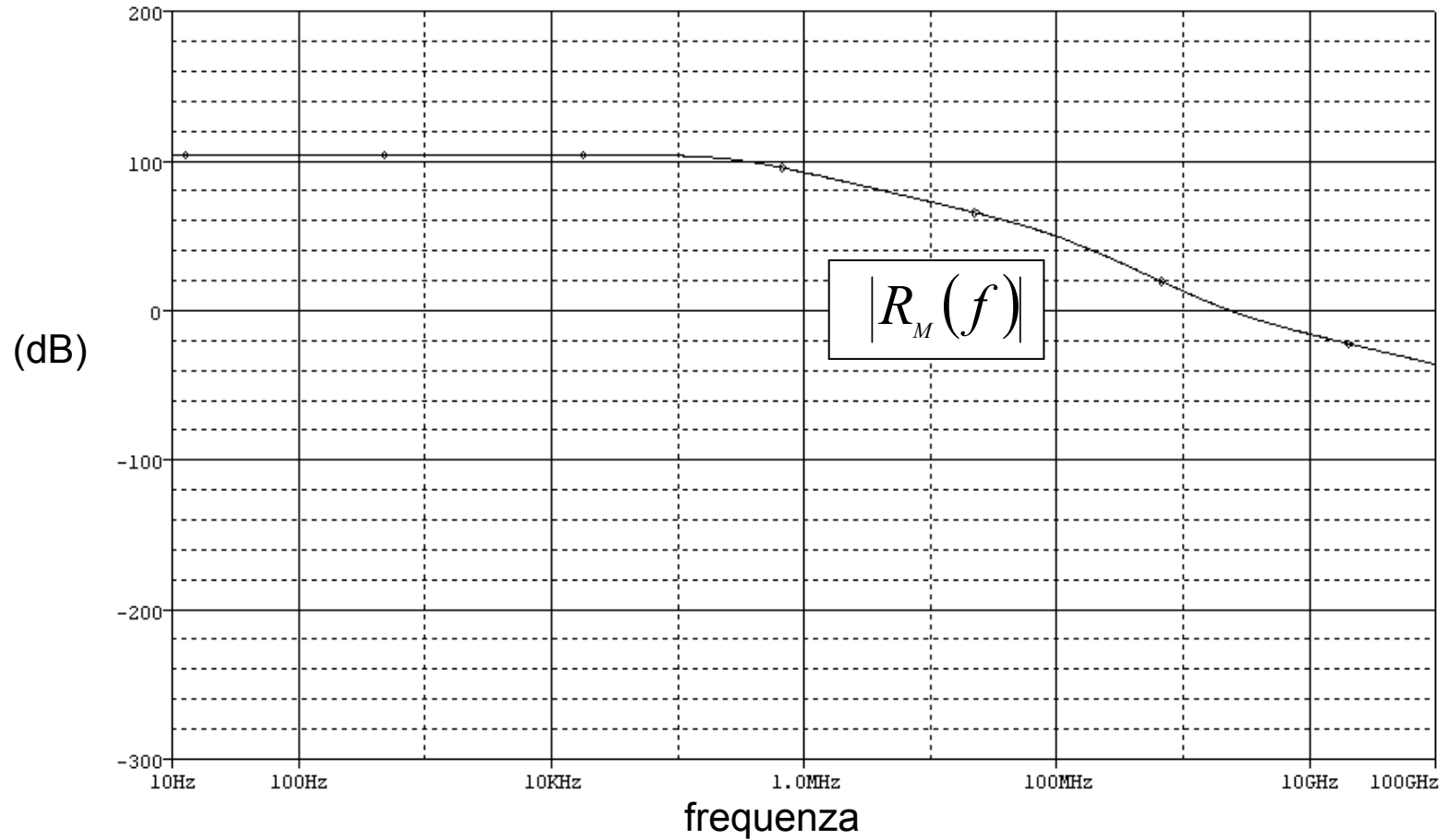
$$R = R_1 \parallel R_2 = (10 \parallel 40) k\Omega = 8 k\Omega$$

$$R_s = R + r_{bb'} = 8.10 k\Omega = \frac{1}{G_{s1}}$$

$$R_M = 0.985 \times 10^{10} \cdot \frac{s - 16.6 \times 10^9}{(s + 600 \times 10^6) \cdot (s + 1.70 \times 10^6)}$$

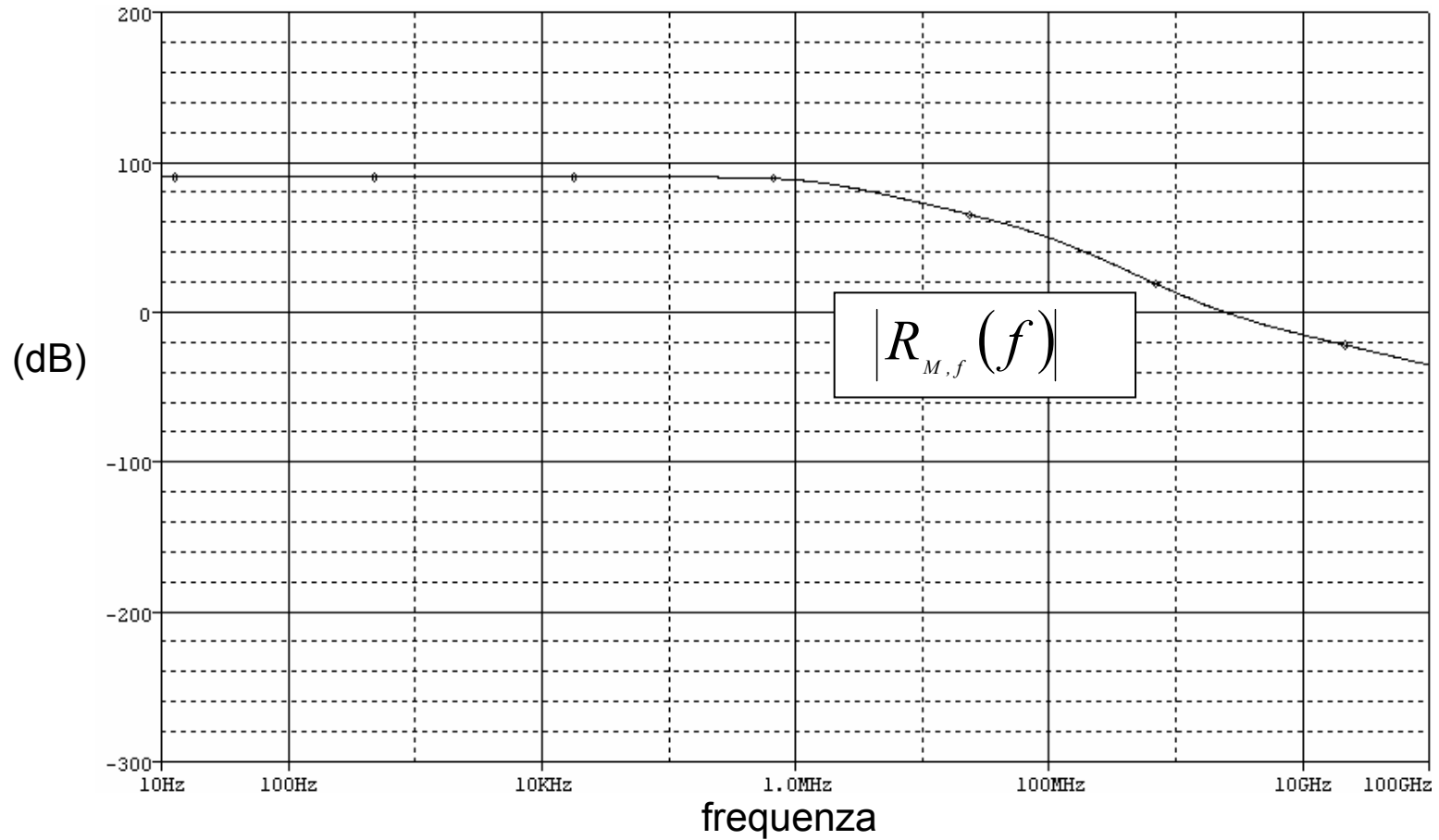
Parallelo di tensione

Funzione di trasferimento senza reazione



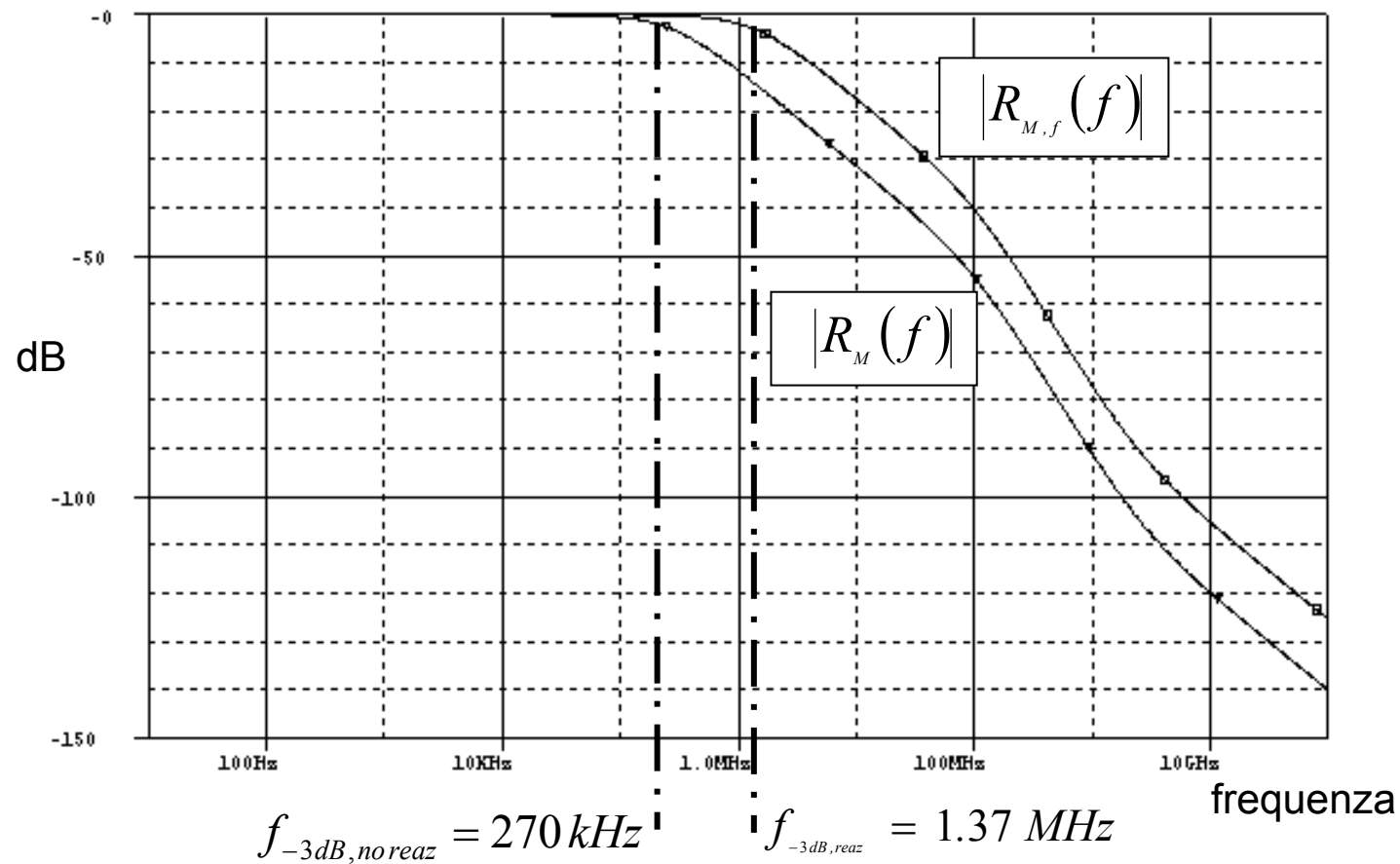
Parallelo di tensione

Funzione di trasferimento con reazione



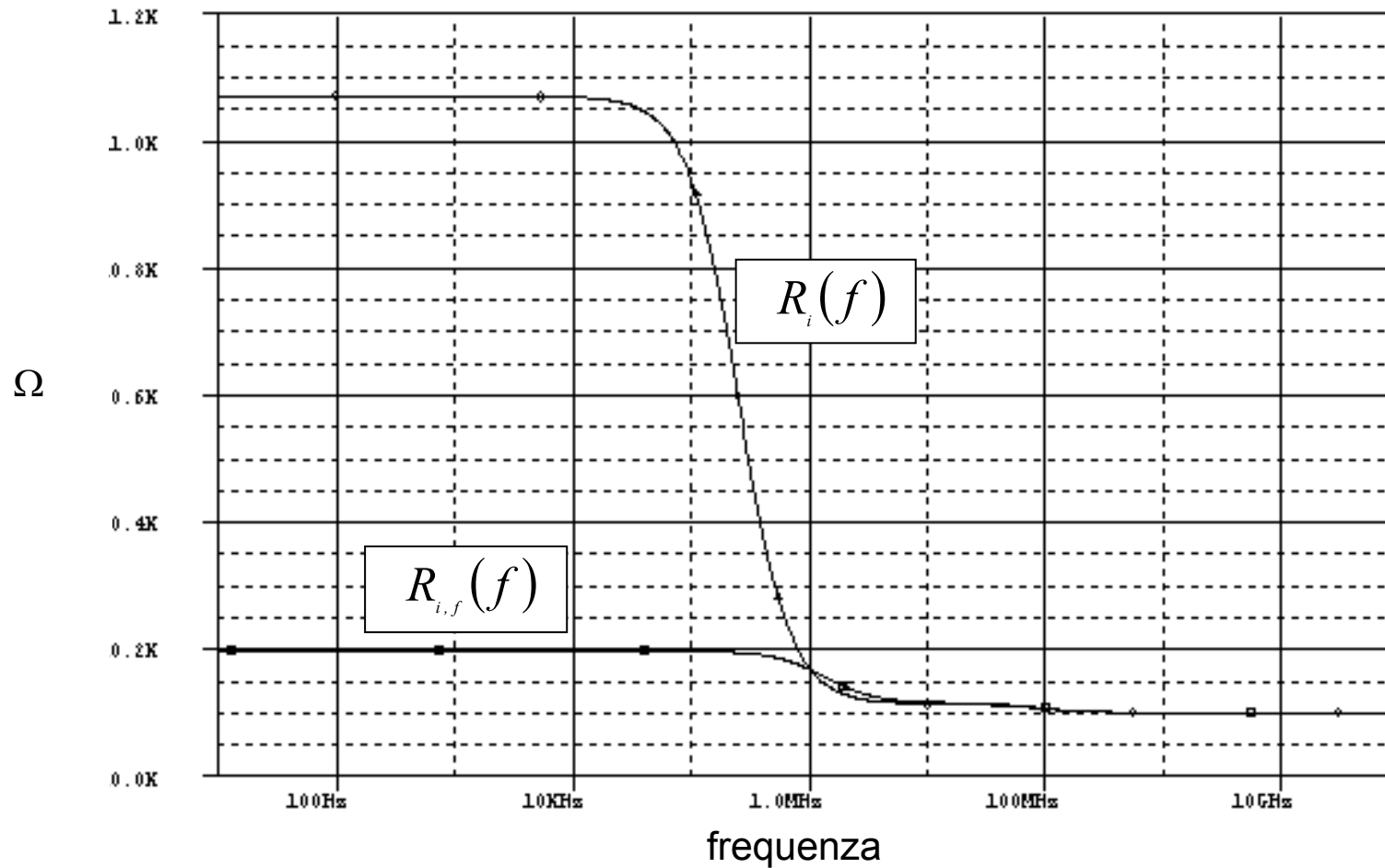
Parallelo di tensione

Confronto andamento funzione di trasferimento senza reazione e con reazione



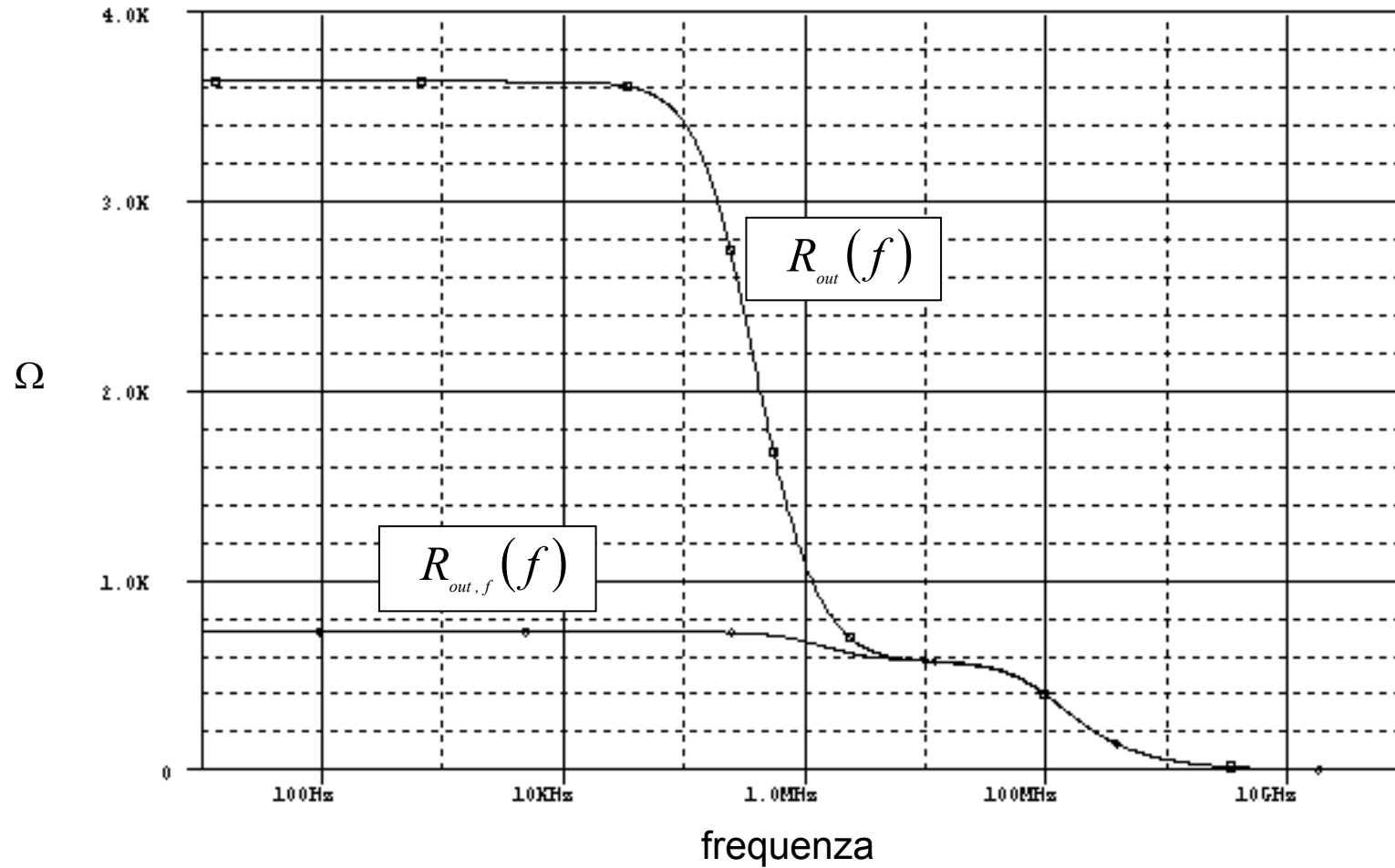
Parallelo di tensione

Confronto andamento resistenza di ingresso senza reazione e con reazione



Parallelo di tensione

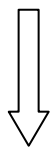
Confronto andamento resistenza di uscita senza reazione e con reazione



Serie di corrente

$$V_f = R_e \cdot (I_i - I_{out}) \cong -R_e \cdot I_{out}$$

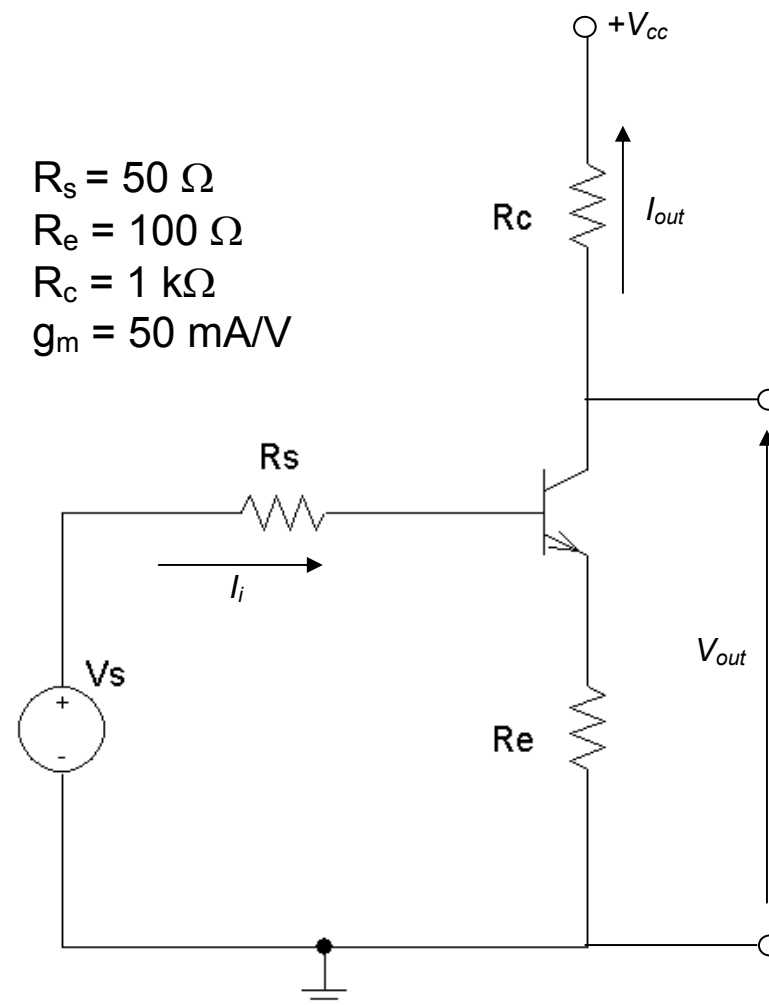
poiché $I_i \ll I_{out}$.



$$\beta = -R_e$$

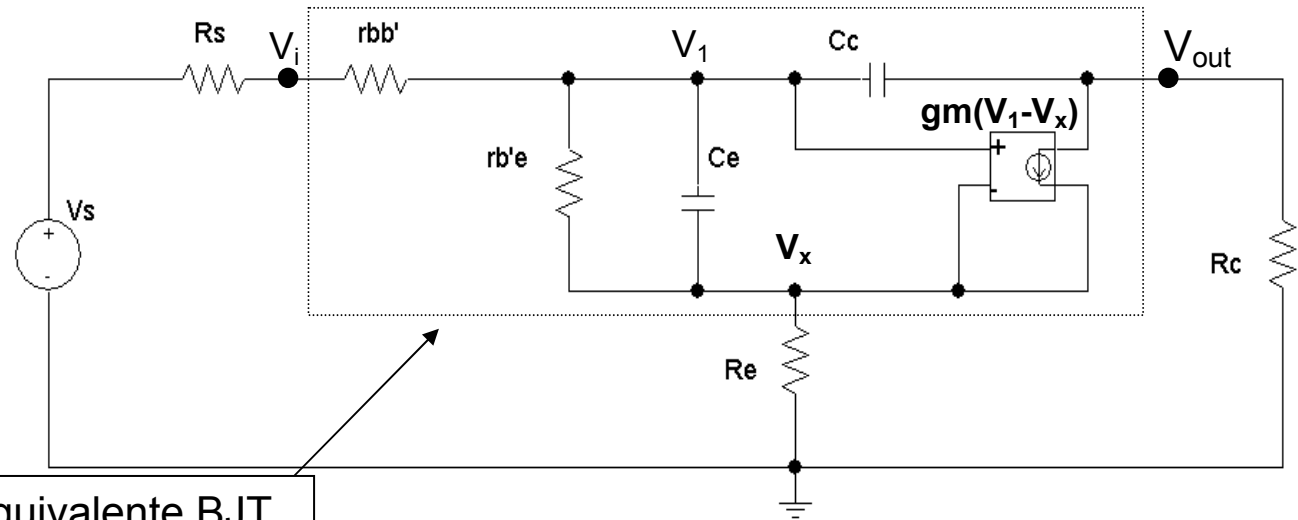
N.B.

Non è reazione di tensione perché altrimenti β sarebbe funzione di R_L . Pertanto verrebbe violata una delle condizioni fondamentali della reazione.



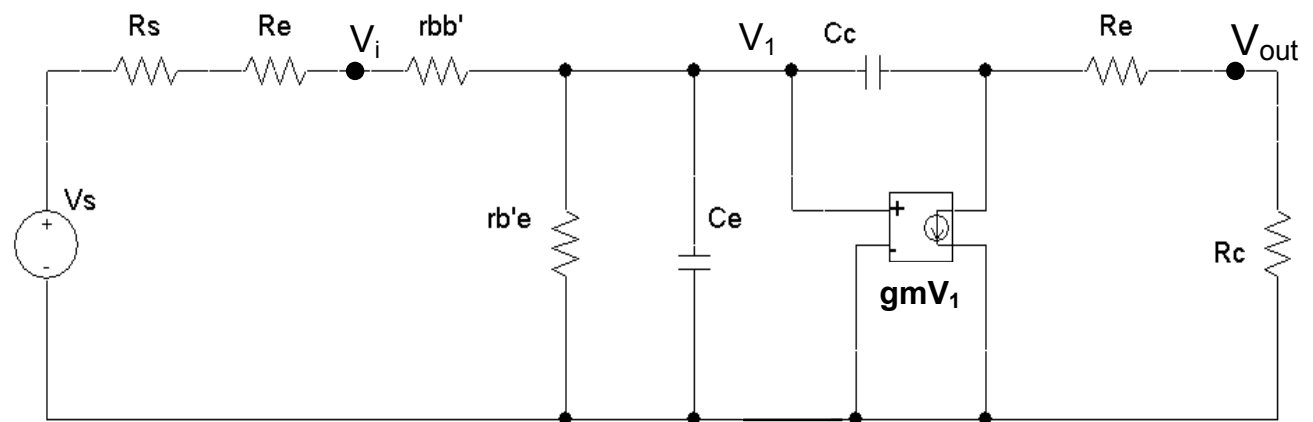
Serie di corrente

Schema con reazione



Modello equivalente BJT
alle alte frequenze

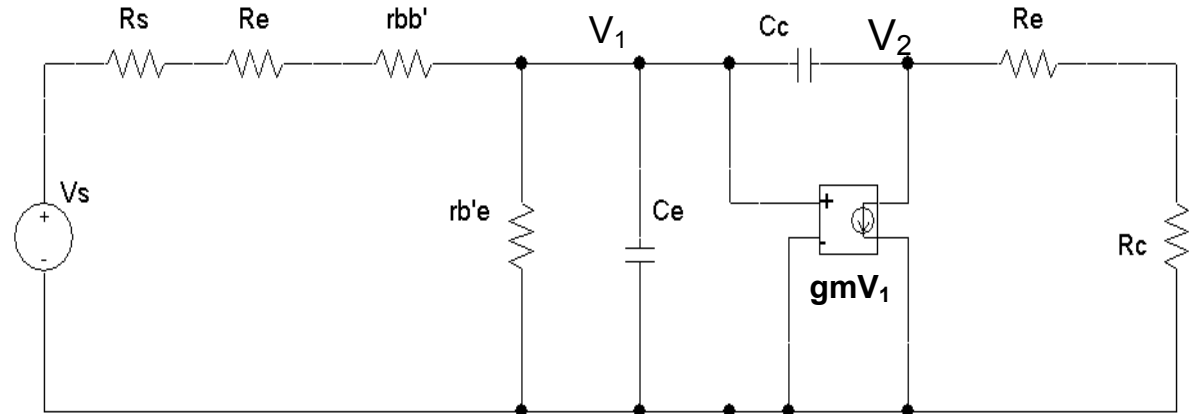
Schema senza reazione



Serie di corrente

Calcolo funzione di trasferimento senza reazione $G_M(f)$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{V_s - V_1}{R_s + R_e + r_{bb'}} &= \frac{V_1}{r_{b'e}} + sC_e \cdot V_1 + sC_c \cdot (V_1 - V_2) \\ sC_c \cdot (V_1 - V_2) &= g_m V_2 + \frac{V_2}{R_e + R_c} \end{aligned} \right.$$



$$I_o(s) = \frac{V_2}{R_e + R_c}$$

$$G_M(s) = \frac{I_o(s)}{V_s(s)} = \frac{-G_s'(g_m - sC_c)}{s^2 C_e C_c R_L + s \cdot [C_e + C_c + C_c R_L \cdot (g_m + g_{b'e} + G_s')] + G_s' + g_{b'e}}$$

dove

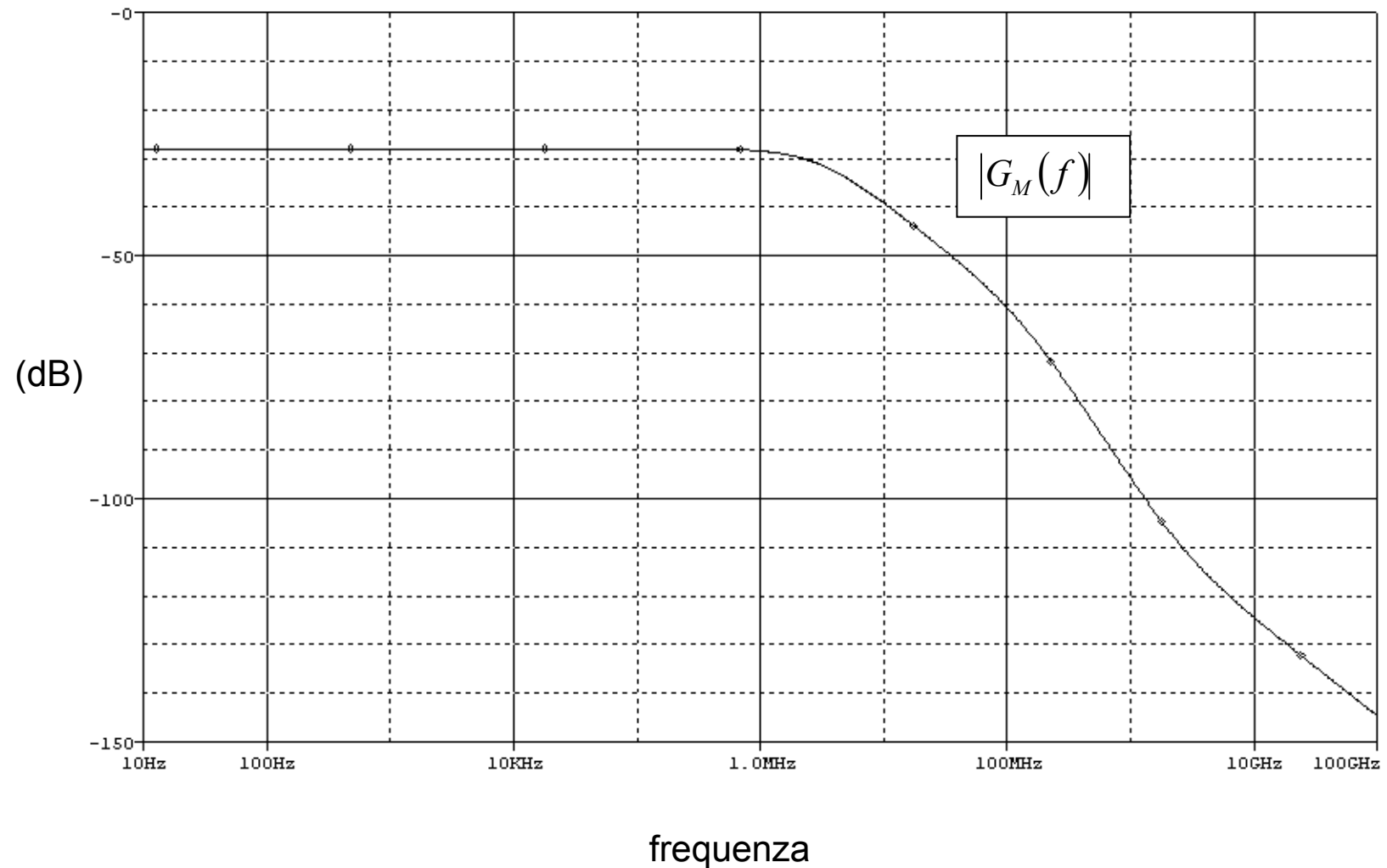
$$R_L = R_e + R_c$$

$$G_s' = \frac{1}{R_s + r_{bb'} + R_e}$$

$$G_M(s) = -3.67 \times 10^4 \frac{167 \times 10^8 - s}{(s + 0.182 \times 10^8) \cdot (s + 8.45 \times 10^8)}$$

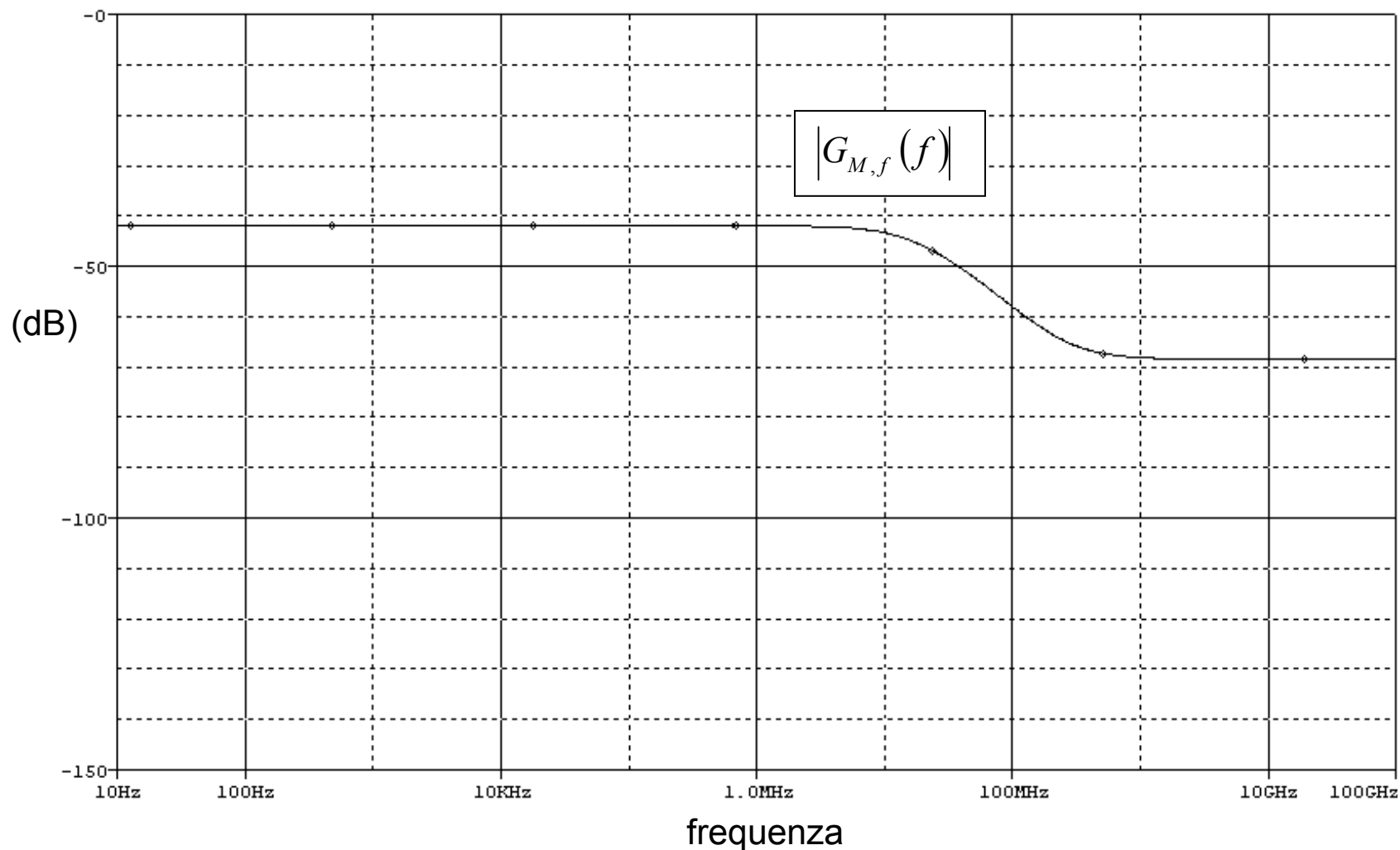
Serie di corrente

Andamento funzione di trasferimento senza reazione $G_M(f)$



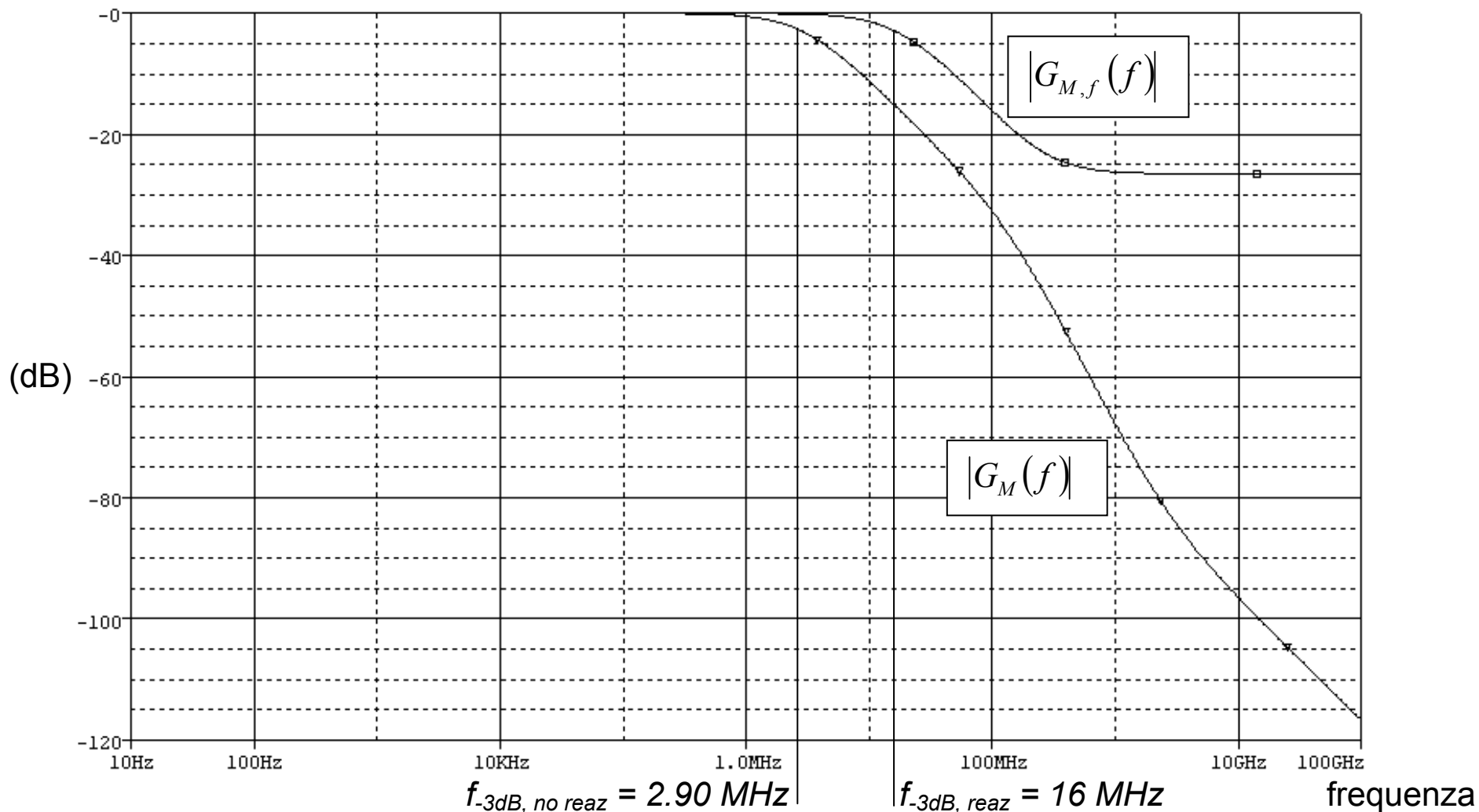
Serie di corrente

Andamento funzione di trasferimento con reazione $G_{M,f}(f)$



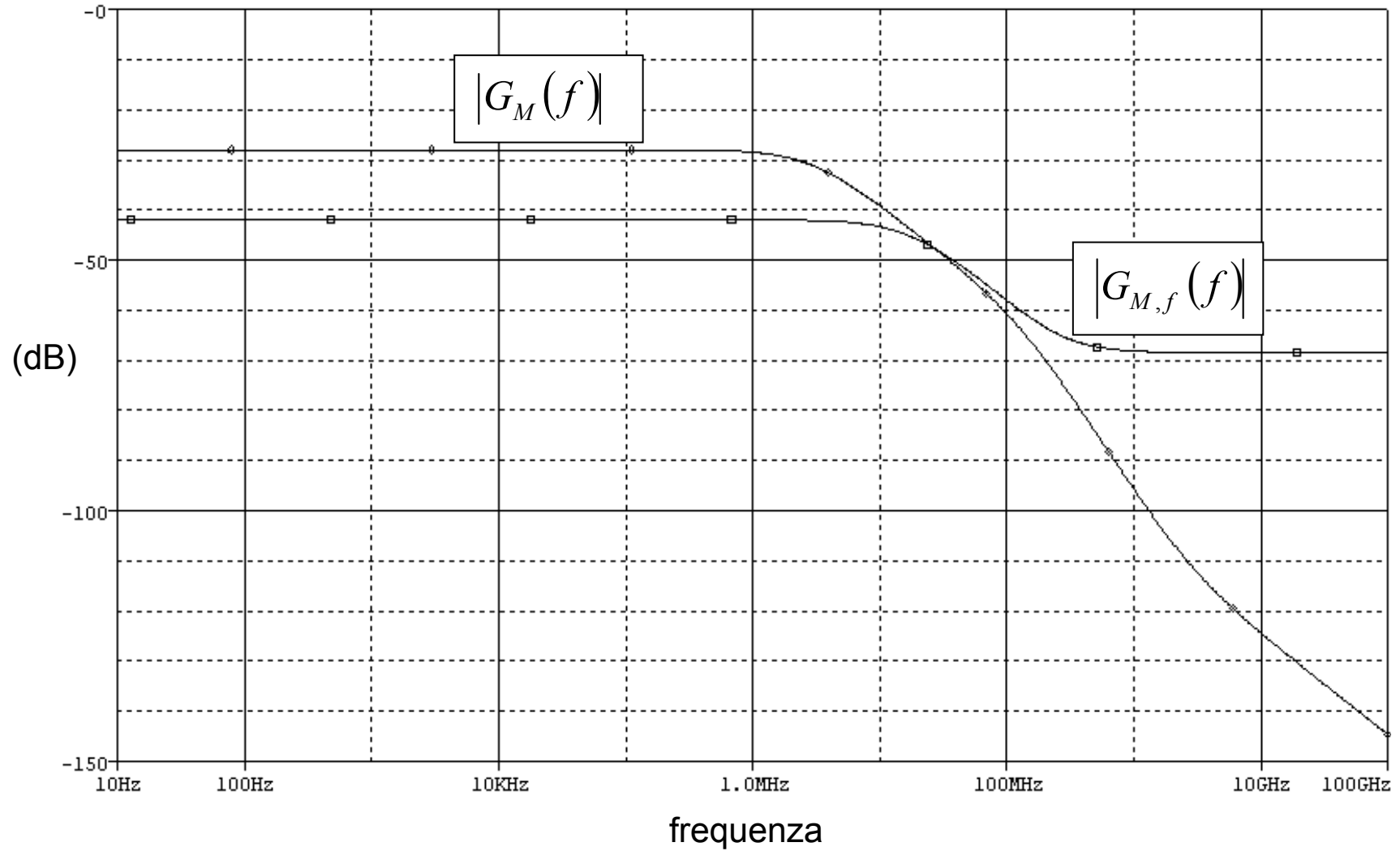
Serie di corrente

Confronto andamento funzione di trasferimento senza e con reazione



Serie di corrente

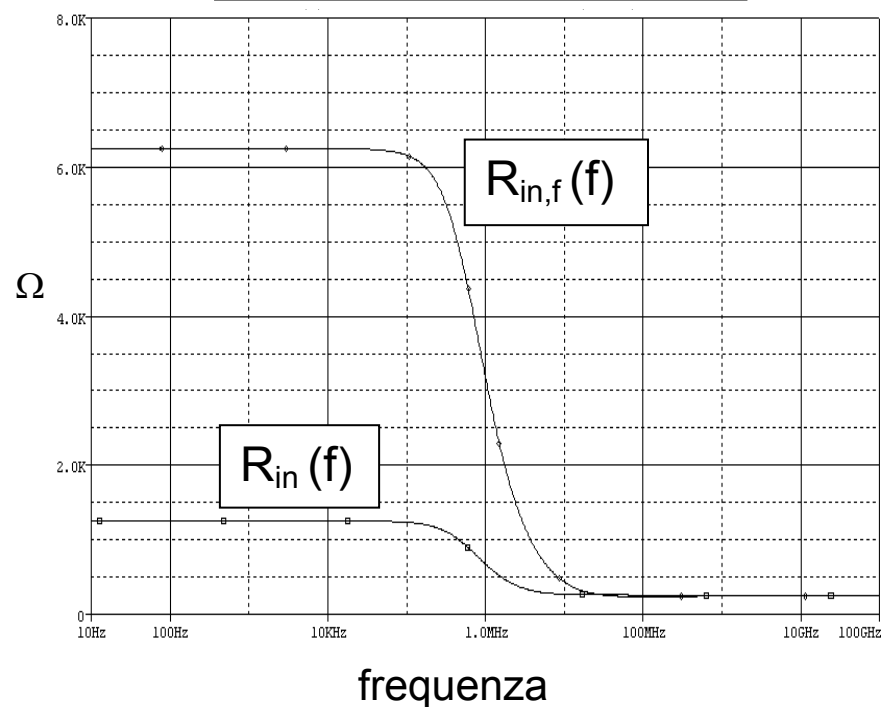
Confronto andamento funzione di trasferimento senza e con reazione



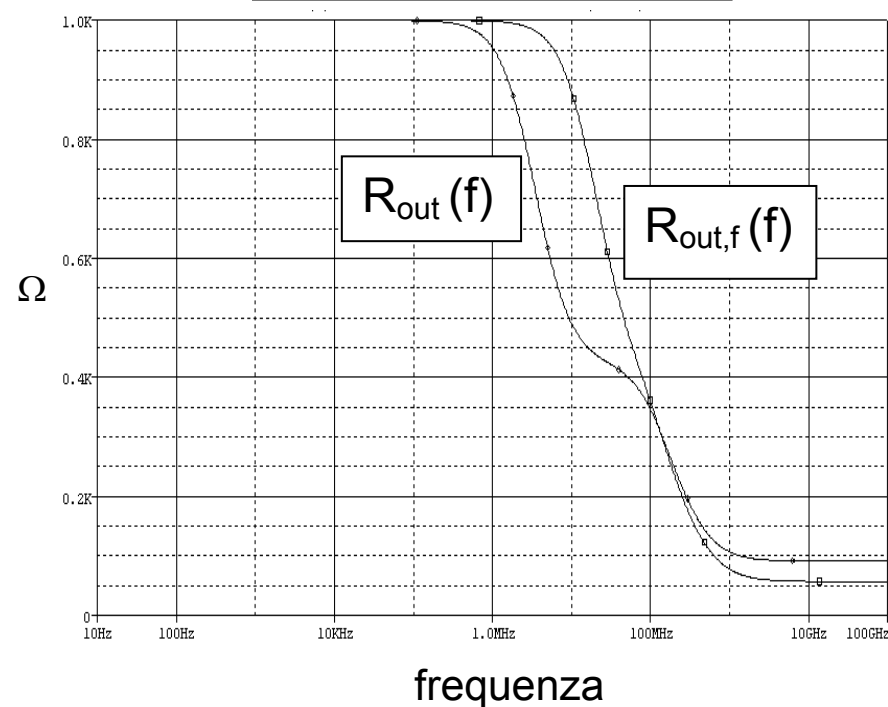
Serie di corrente

Confronto andamento resistenze di ingresso e di uscita

Resistenze di ingresso



Resistenze di uscita



Parallelo di corrente

$$|V_{i2}| \gg |V_{i1}|$$

V_{i2} è in opposizione di fase rispetto a V_{i1} .

Poiché il secondo BJT funziona da inseguitore di emettitore, V_e è circa uguale a V_{i2} ed in fase con esso.

Se I_s' cresce anche I_f cresce e quindi si ha che I_i diminuisce.

Pertanto si ha reazione negativa.

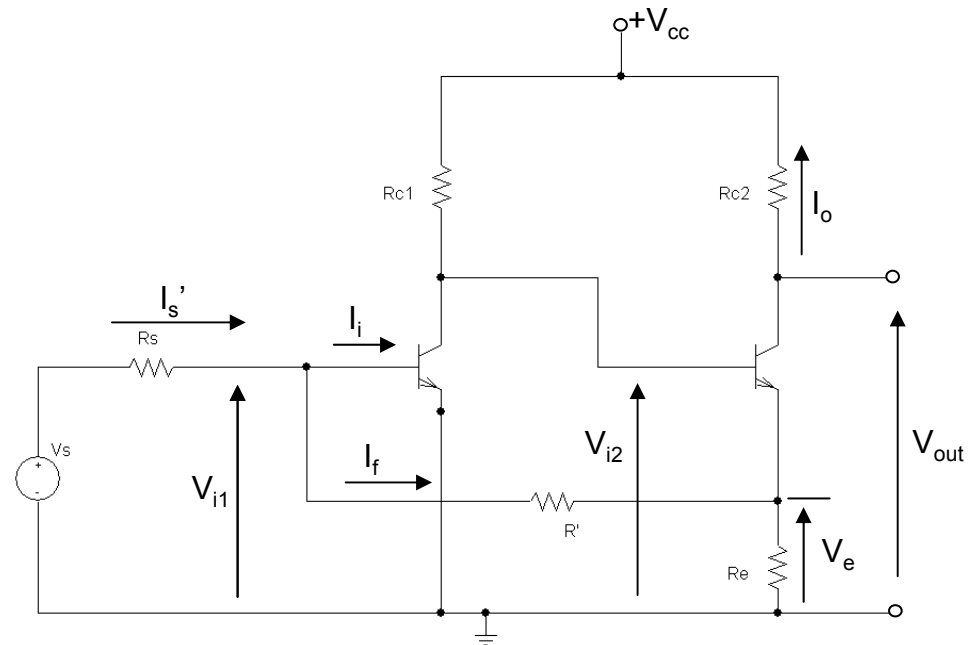
Essendo $V_e \gg V_{i1}$ e trascurando la corrente di base nel secondo BJT, si può scrivere

$$I_f = \frac{V_{i1} - V_e}{R'} \cong -\frac{V_e}{R'} = \frac{(I_o - I_f) \cdot R_e}{R'} \quad \Rightarrow$$

$$I_f = \frac{R_e \cdot I_o}{R' + R_e} = \beta \cdot I_o$$

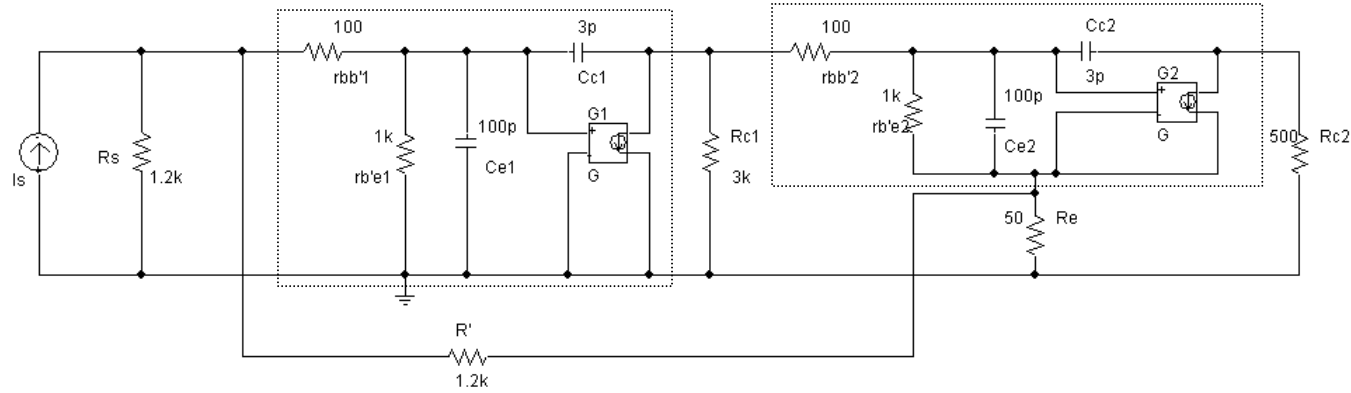
$$\beta = \frac{R_e}{R' + R_e}$$

Quindi si stabilizza il guadagno in corrente, A_i .

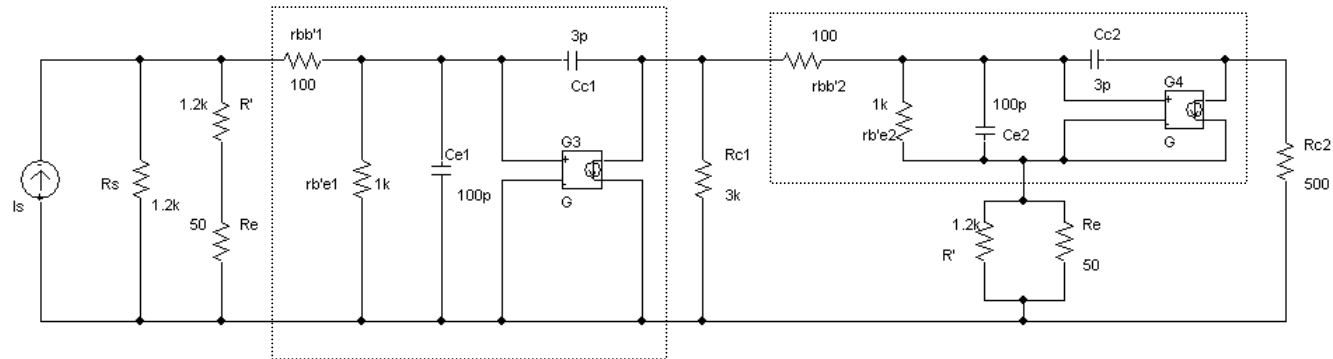


Parallelo di corrente

Schema con reazione



Schema senza reazione



Parallelo di corrente

Funzione di trasferimento $\mathbf{A_I(f)}$

$$A_I = K \frac{(s - z_1) \cdot (s - z_2) \cdot (s - z_3)}{(s - p_1) \cdot (s - p_2) \cdot (s - p_3) \cdot (s - p_4)}$$

dove gli zeri sono:

$$z_1 = 16.65 \times 10^9 \text{ rad/s}, \quad z_2 = 15.4 \times 10^8 \text{ rad/s}$$

$$z_3 = -22.55 \times 10^8 \text{ rad/s}$$

ed i poli sono:

$$p_1 = -46.2 \times 10^5 \text{ rad/s}, \quad p_2 = -45.9 \times 10^6 \text{ rad/s}$$

$$p_3 = -11.4 \times 10^8 \text{ rad/s}, \quad p_4 = -30.4 \times 10^8 \text{ rad/s}$$

Funzione di trasferimento con reazione, $\mathbf{A_{I,f}(f)}$

$$A_{I,f}(f) = K' \frac{(s - z_{1f}) \cdot (s - z_{2f}) \cdot (s - z_{3f}) \cdot (s - z_{4f})}{(s - p_{1f}) \cdot (s - p_{2f}) \cdot (s - p_{3f}) \cdot (s - p_{4f})}$$

dove gli zeri sono:

$$z_{1f} = 18.35 \times 10^8 - j9.75 \times 10^8 \text{ rad/s}$$

$$z_{2f} = 18.35 \times 10^8 + j9.75 \times 10^8 \text{ rad/s}$$

$$z_{3f} = -21.5 \times 10^8 \text{ rad/s}$$

$$z_{4f} = -7.40 \times 10^9 \text{ rad/s}$$

ed i poli sono:

$$p_{1f} = -29.2 \times 10^6 + j5.40 \times 10^7 \text{ rad/s}$$

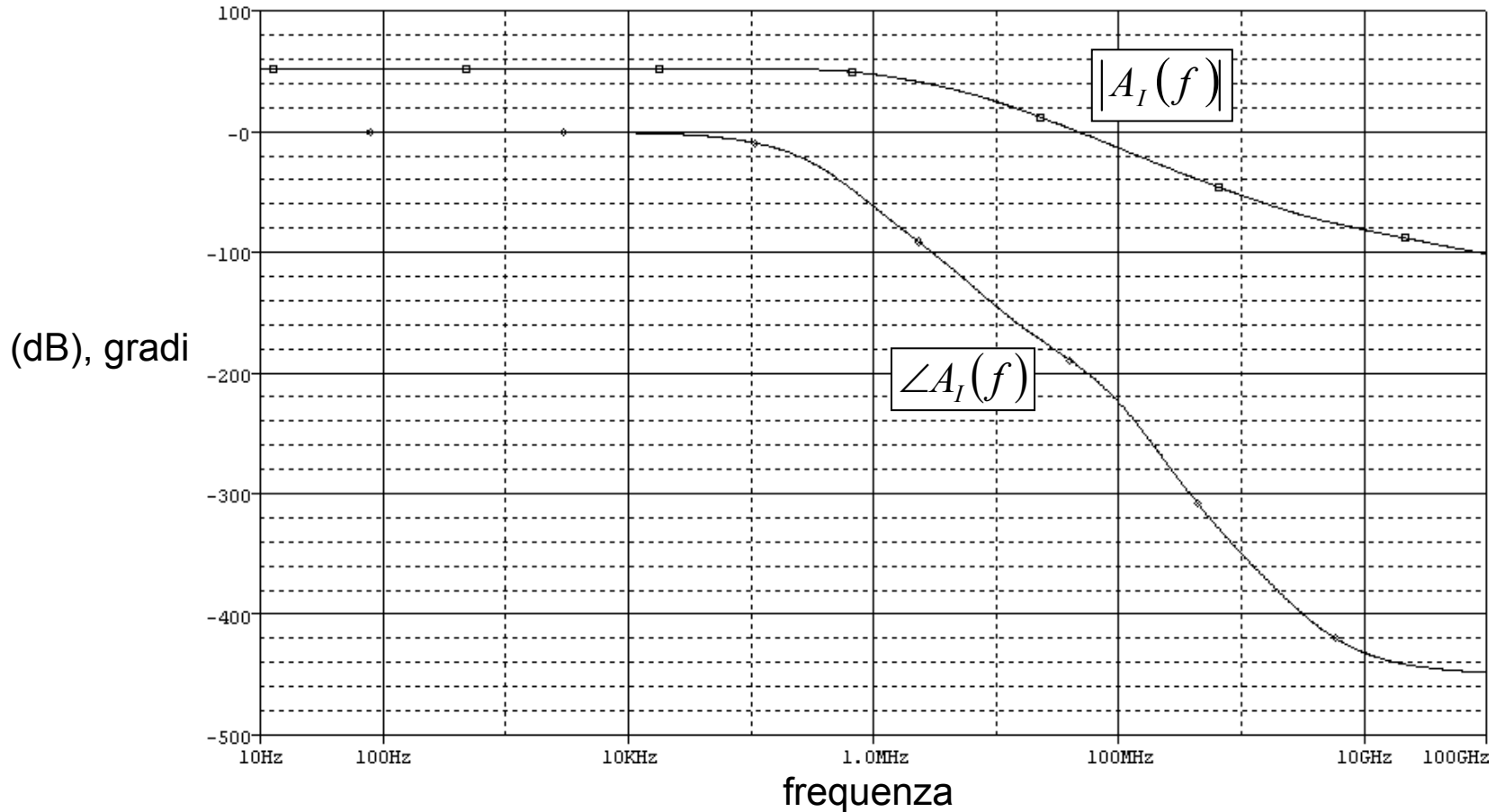
$$p_{2f} = -29.2 \times 10^6 - j5.40 \times 10^7 \text{ rad/s}$$

$$p_{3f} = -11.5 \times 10^8 \text{ rad/s}$$

$$p_{4f} = -30.2 \times 10^8 \text{ rad/s}$$

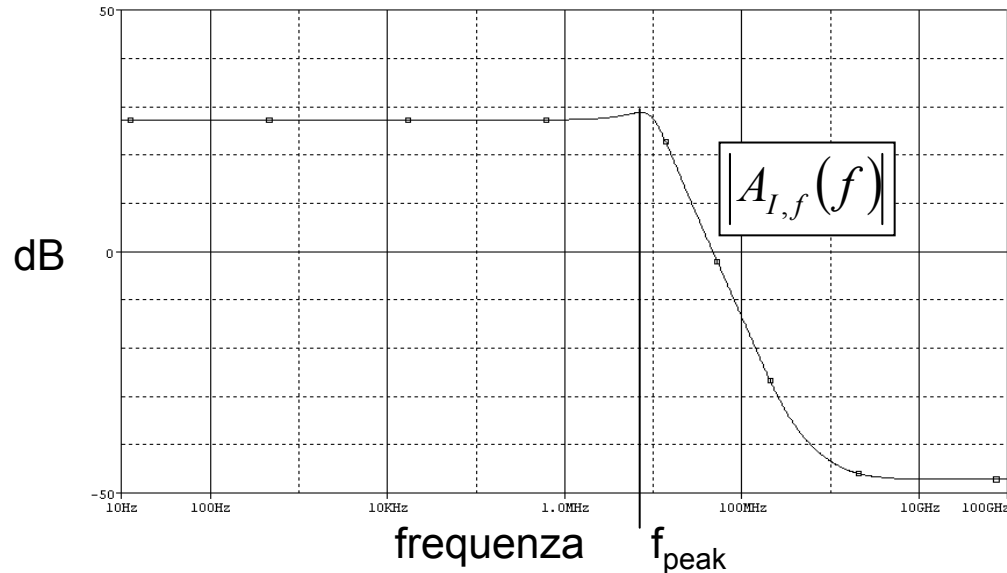
Parallelo di corrente

Andamento funzione di trasferimento senza reazione, $A_I(f)$



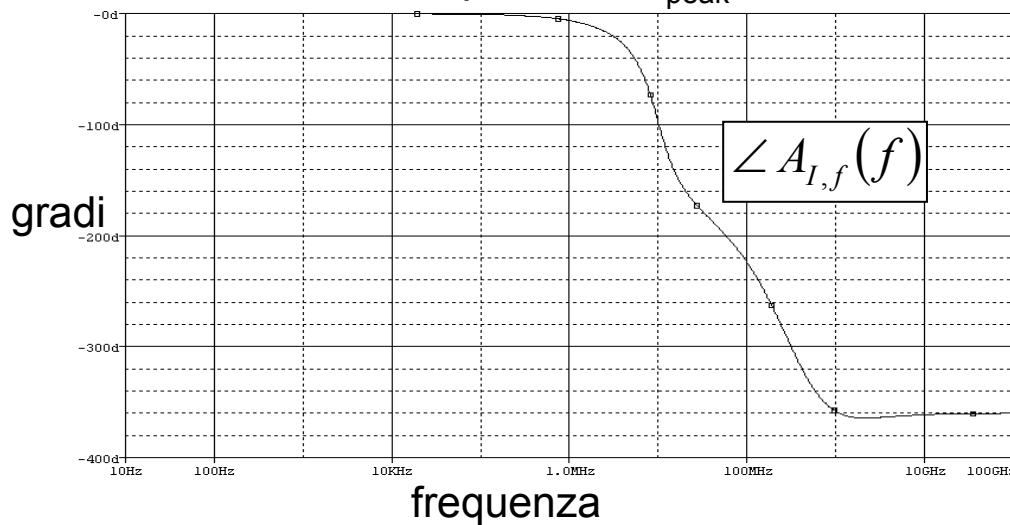
Parallelo di corrente

Andamento funzione di trasferimento con reazione, $A_{I,f}(f)$



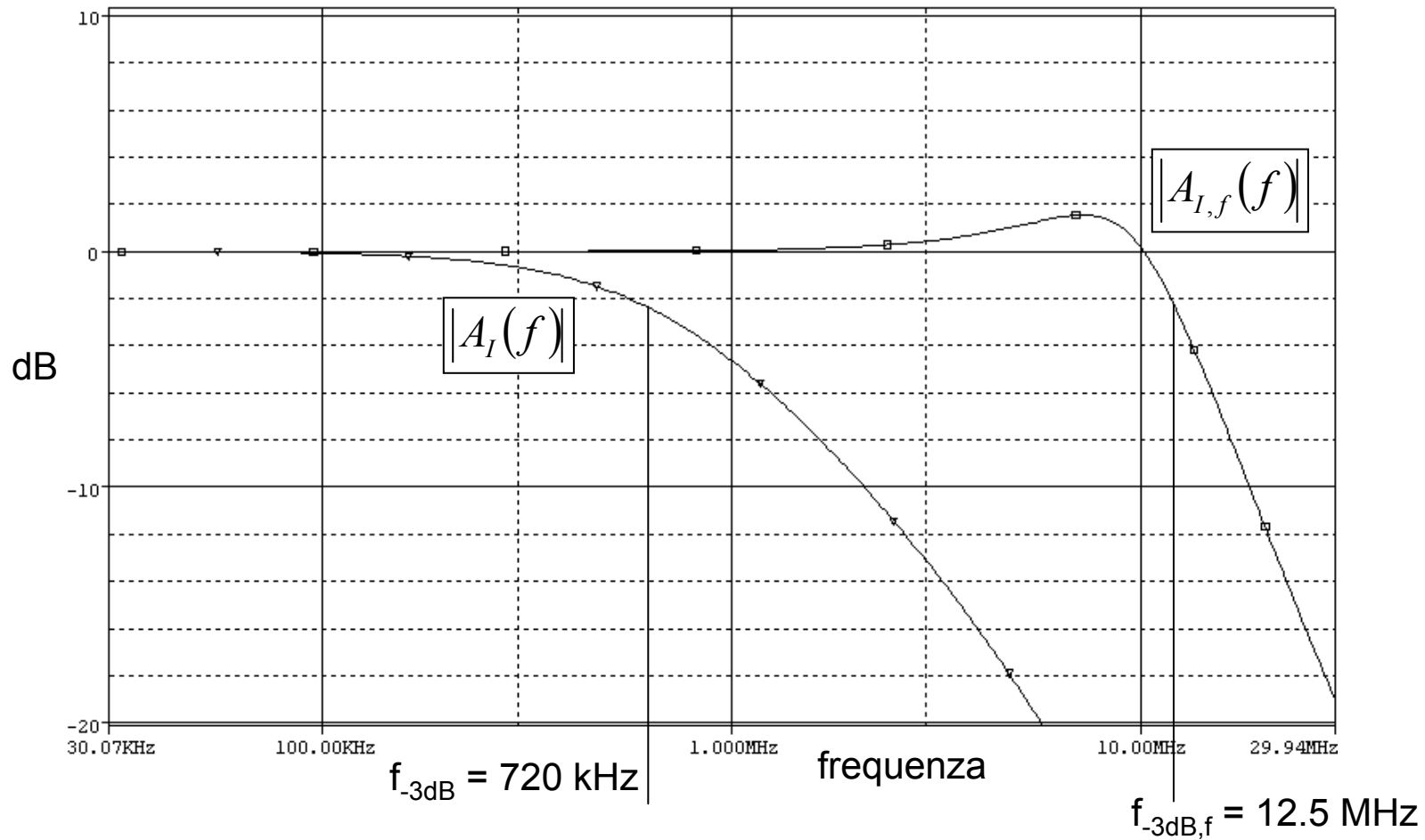
$$f_{\text{peak}} = 7.27 \text{ MHz}$$

overshoot 1.5dB



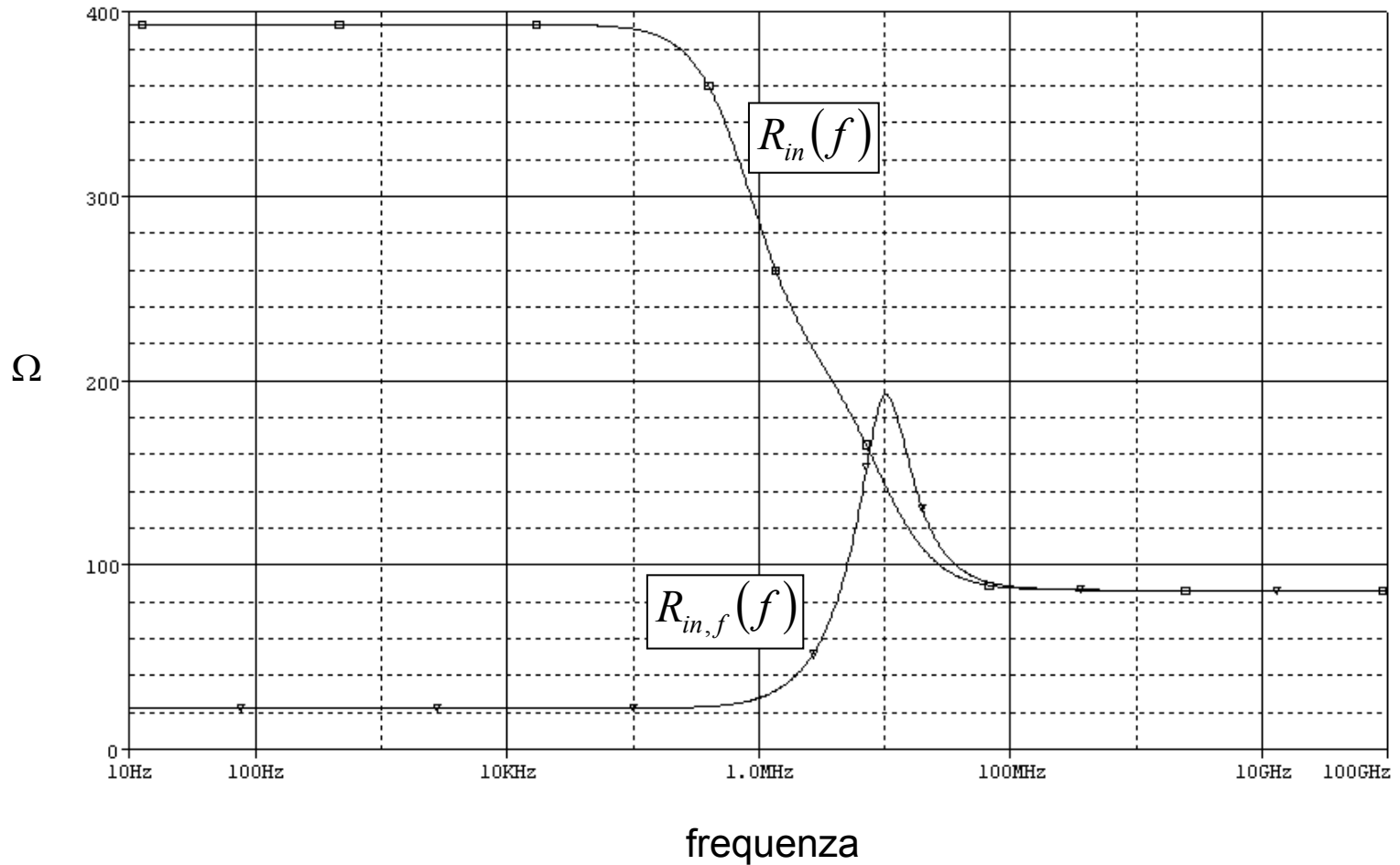
Parallelo di corrente

Confronto andamento $|A_I(f)|_{dB}$ e $|A_{I,f}(f)|_{dB}$ normalizzati rispetto a centro banda



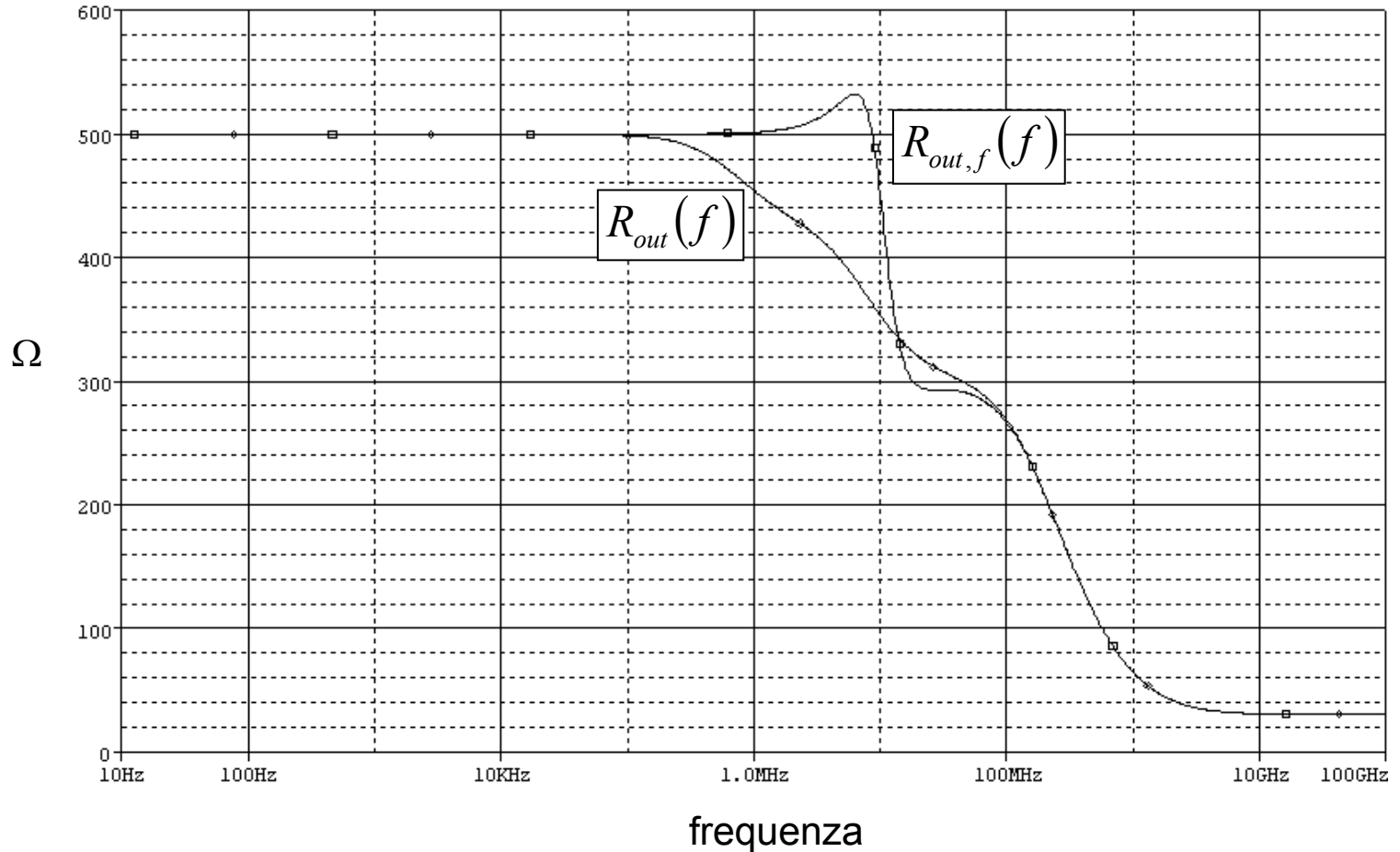
Parallelo di corrente

Resistenza di ingresso senza e con reazione

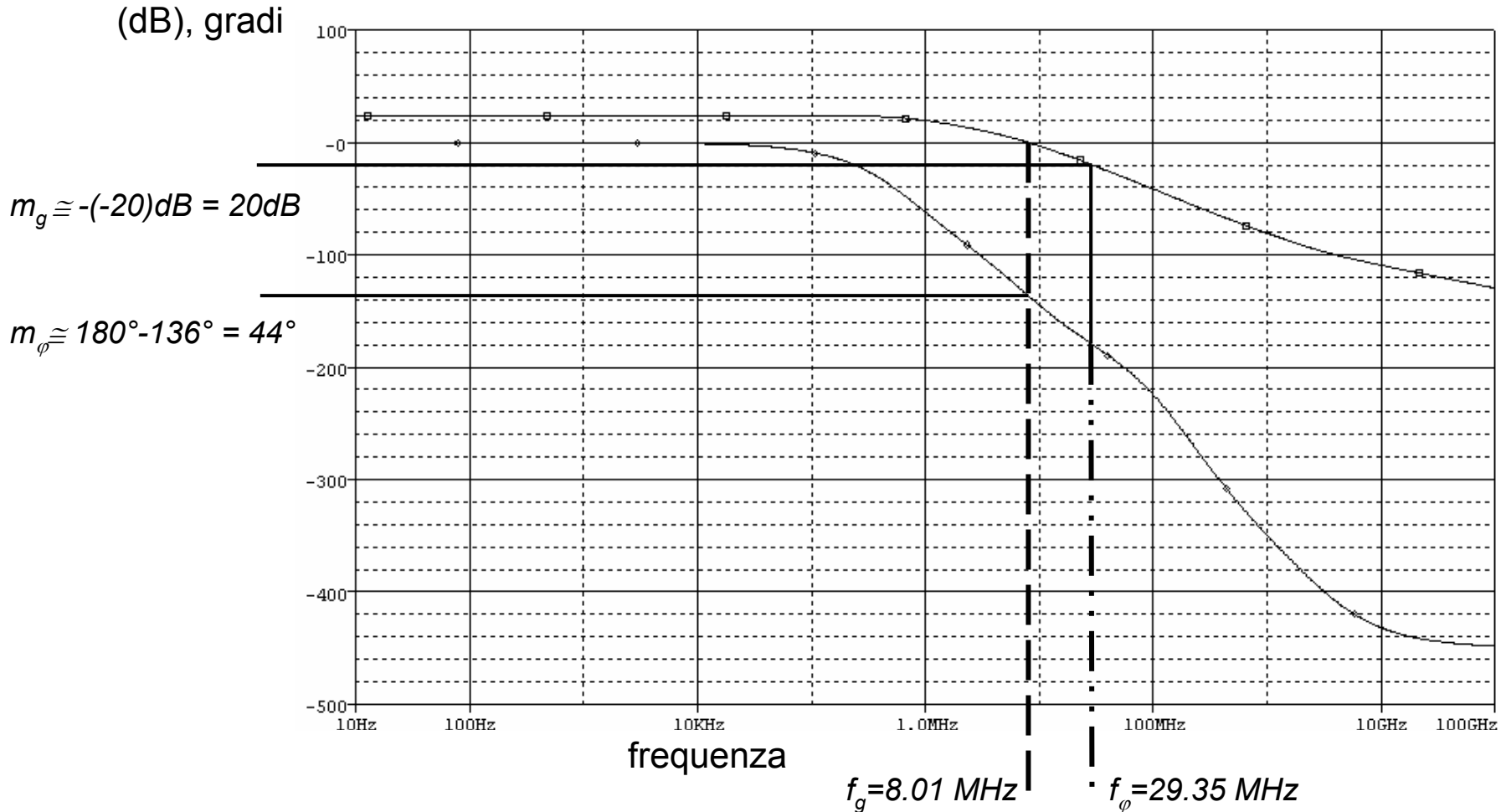


Parallelo di corrente

Resistenza di uscita senza e con reazione

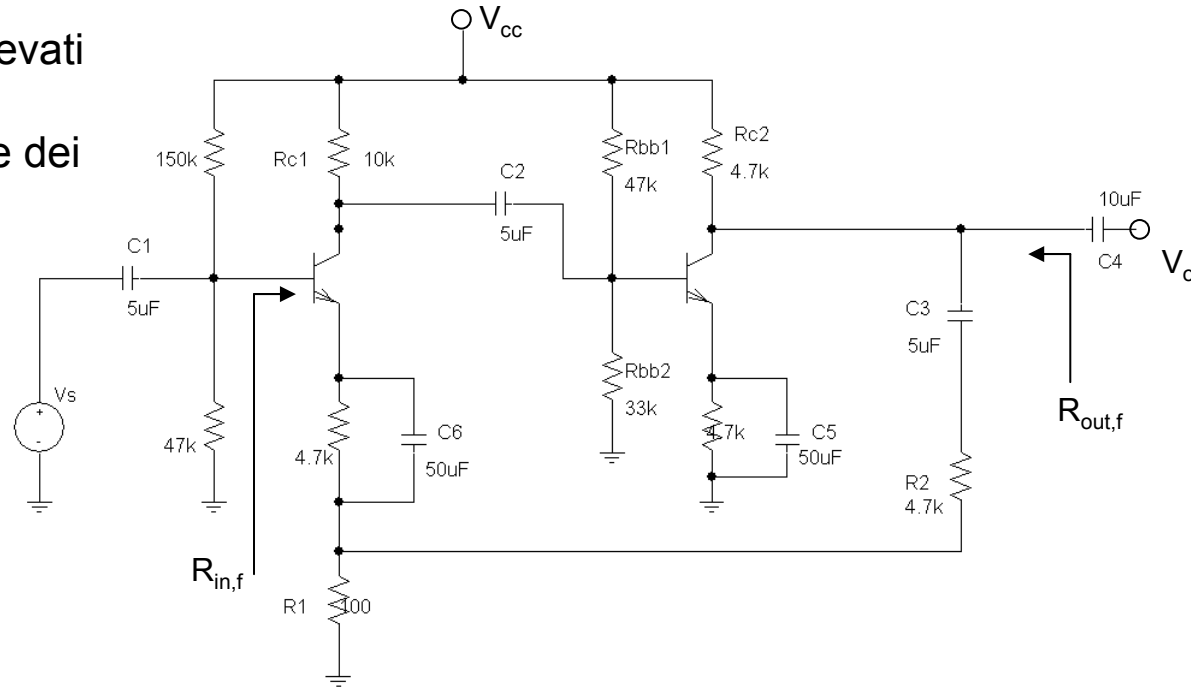


Parallelo di corrente

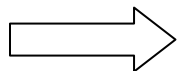


Serie di tensione

- Le capacità hanno tutte elevati valori, quindi alle variazioni possono essere considerate dei cortocircuiti
- Le due resistenze da 150 k Ω e da 47 k Ω sulla base del primo BJT hanno valore molto più elevato della resistenza di ingresso del BJT stesso. Esse servono per la *polarizzazione del BJT*. Possono quindi essere trascurate.



- Si ha una maglia formata da V_s , la giunzione *b-e* del primo BJT e da R_1 . Quindi si ha una reazione serie. In uscita si ha un prelievo parallelo, quindi il campionamento è di tensione.

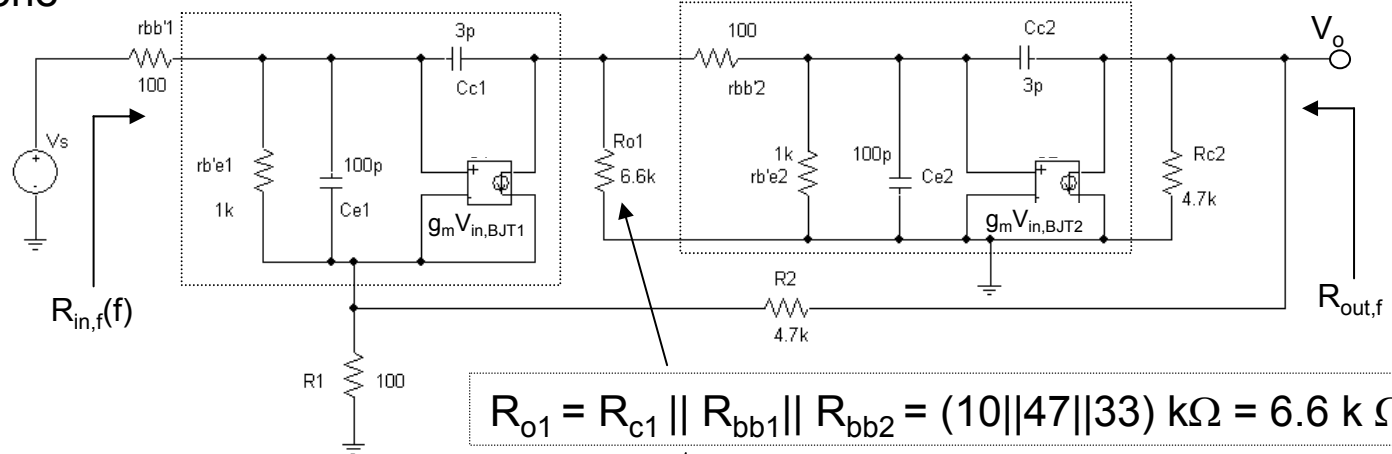


Reazione **serie di tensione**.

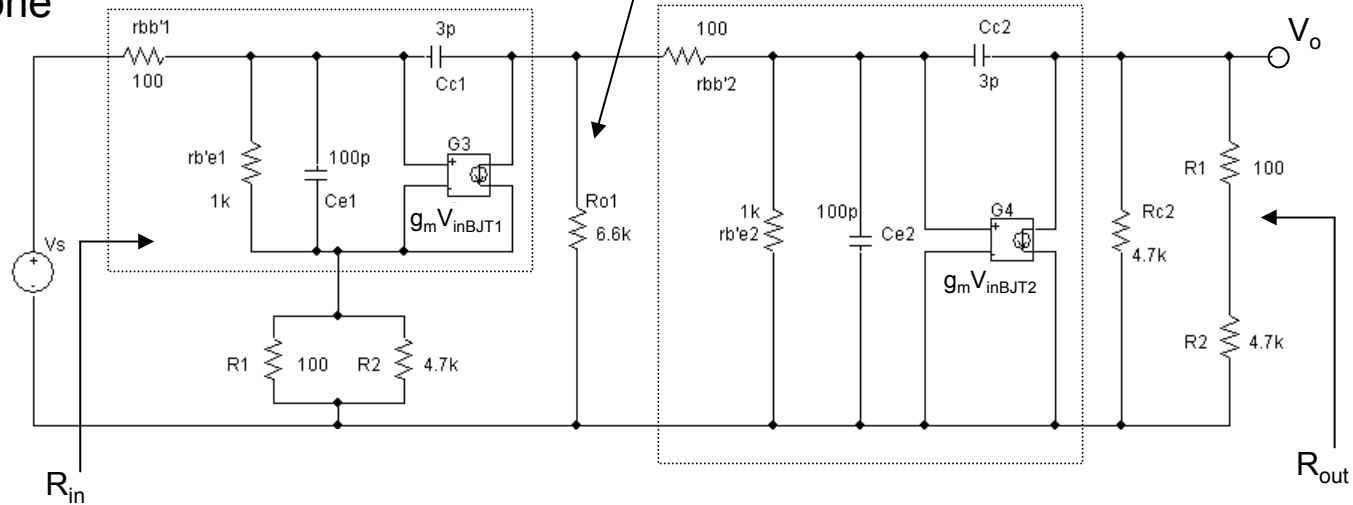
$$\beta = \frac{V_f}{V_o} = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

Serie di tensione

Schema con reazione



Schema senza reazione



Serie di tensione

Funzione di trasferimento $\mathbf{A}_V(\mathbf{f})$

$$A_V = K \frac{(s - z_1) \cdot (s - z_2) \cdot (s - z_3)}{(s - p_1) \cdot (s - p_2) \cdot (s - p_3) \cdot (s - p_4)}$$

dove gli zeri sono:

$$z_1 = 10.3 \times 10^8 \text{ rad / s}, \quad z_2 = 16.6 \times 10^9 \text{ rad / s}$$

$$z_3 = -16.4 \times 10^8 \text{ rad / s}$$

ed i poli sono:

$$p_1 = -24.4 \times 10^5 \text{ rad / s}, \quad p_2 = -26.8 \times 10^7 \text{ rad / s}$$

$$p_3 = -6.45 \times 10^8 \text{ rad / s}, \quad p_4 = -26.3 \times 10^8 \text{ rad / s}$$

Funzione di trasferimento con reazione, $\mathbf{A}_{V,f}(\mathbf{f})$

$$A_{V,f}(f) = K' \frac{(s - z_{1f}) \cdot (s - z_{2f}) \cdot (s - z_{3f})}{(s - p_{1f}) \cdot (s - p_{2f}) \cdot (s - p_{3f}) \cdot (s - p_{4f})}$$

dove gli zeri sono:

$$z_{1f} = -17 \times 10^8 \text{ rad / s}$$

$$z_{2f} = 11.9 \times 10^8 \text{ rad / s}$$

$$z_{3f} = 8.10 \times 10^9 \text{ rad / s}$$

ed i poli sono:

$$p_{1f} = -6.55 \times 10^7 \text{ rad / s}$$

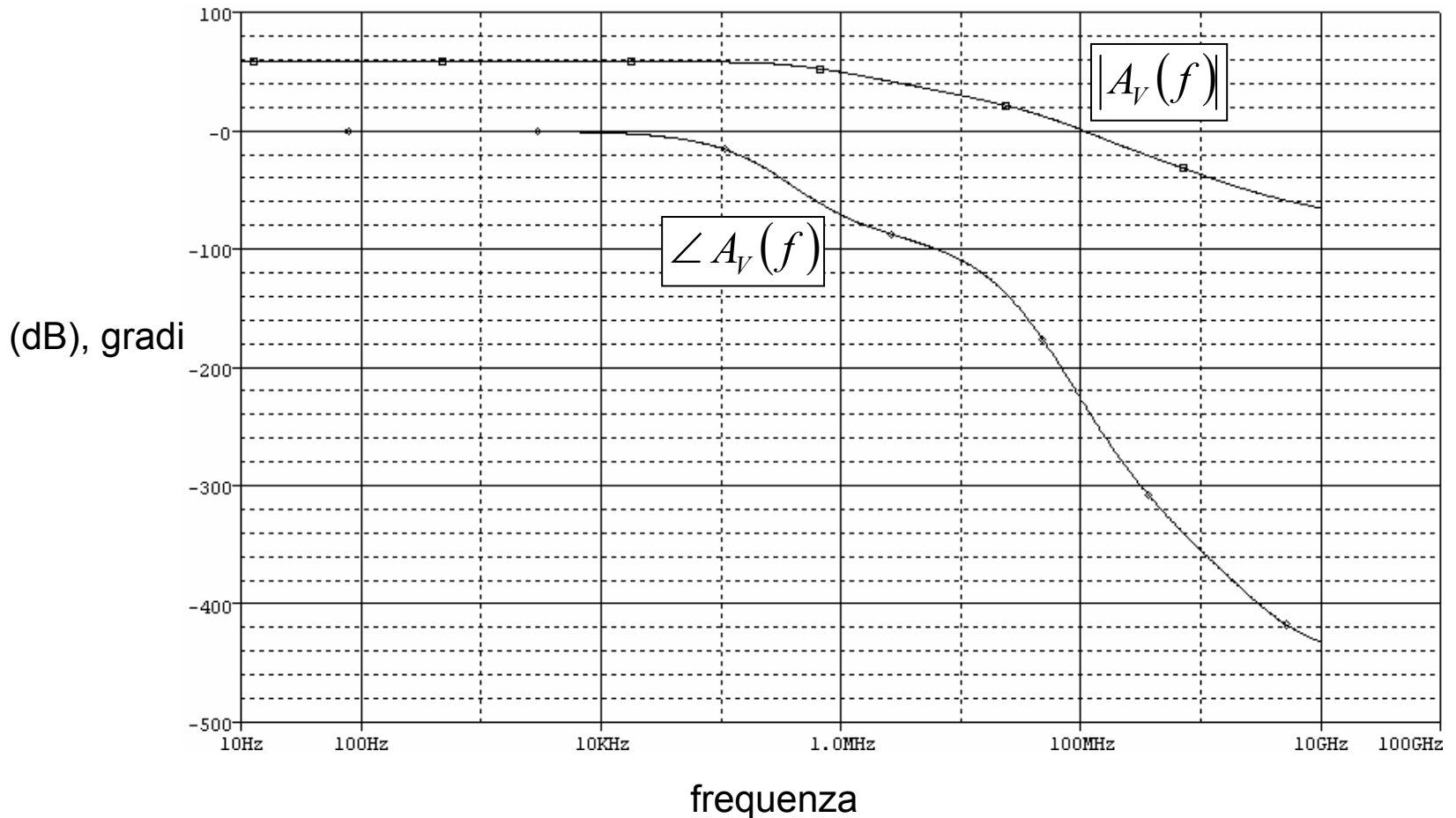
$$p_{2f} = -17.4 \times 10^7 \text{ rad / s}$$

$$p_{3f} = -6.90 \times 10^8 \text{ rad / s}$$

$$p_{4f} = -26.2 \times 10^8 \text{ rad / s}$$

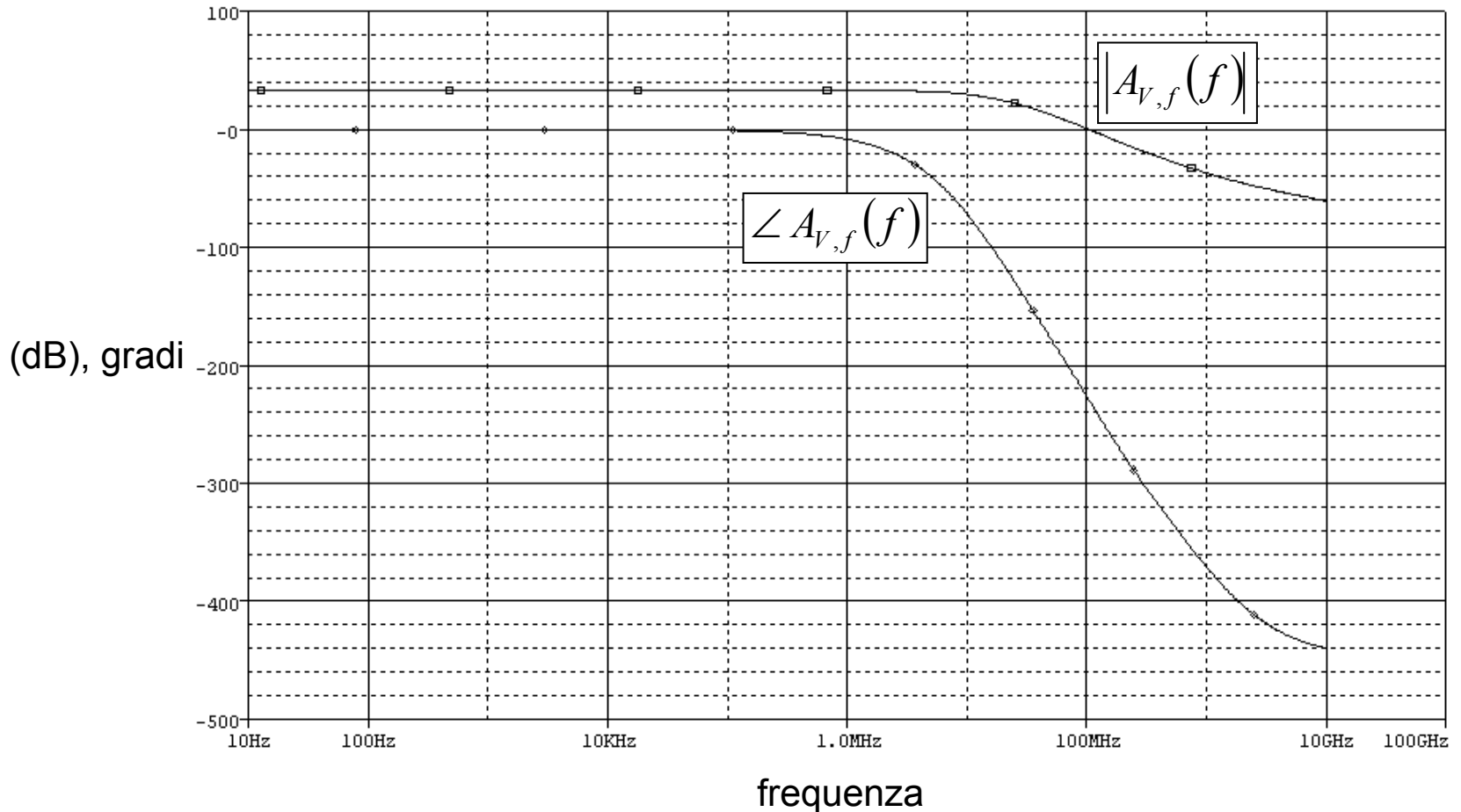
Serie di tensione

Andamento funzione di trasferimento senza reazione, $A_V(f)$



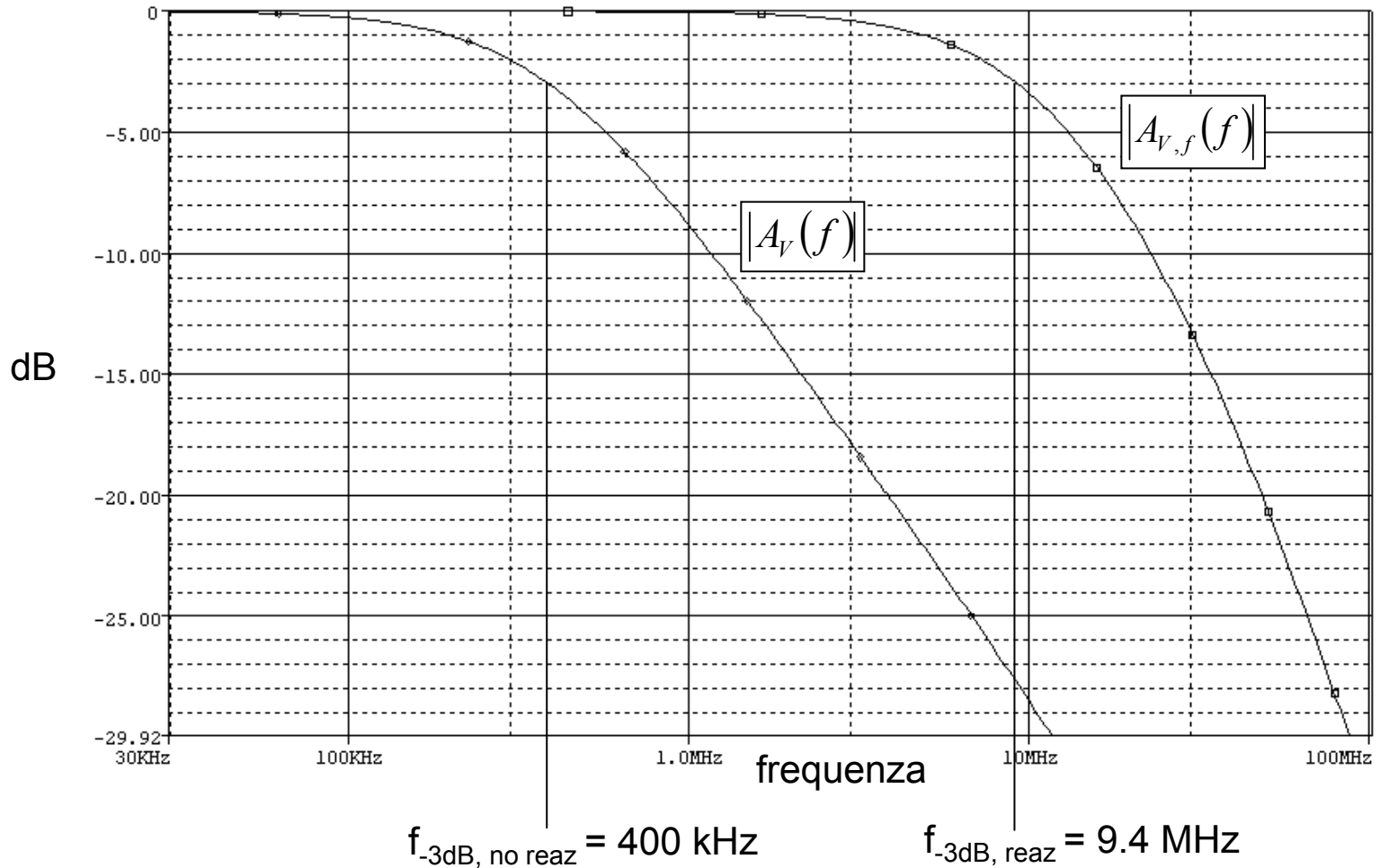
Serie di tensione

Andamento funzione di trasferimento con reazione, $\mathbf{A}_{v,f}(f)$



Serie di tensione

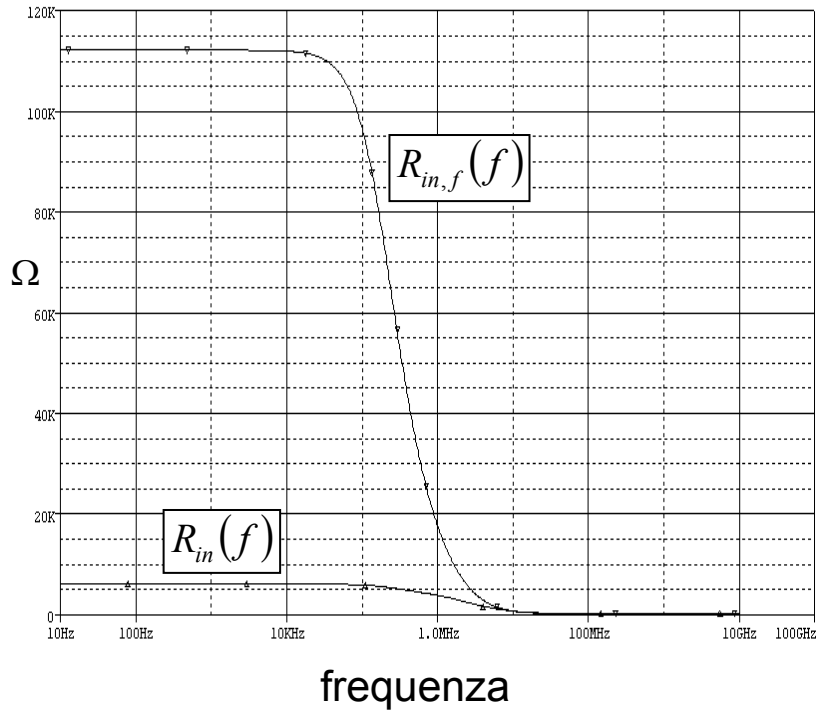
Confronto andamento $|A_V(f)|_{dB}$ e $|A_{V,f}(f)|_{dB}$ normalizzati



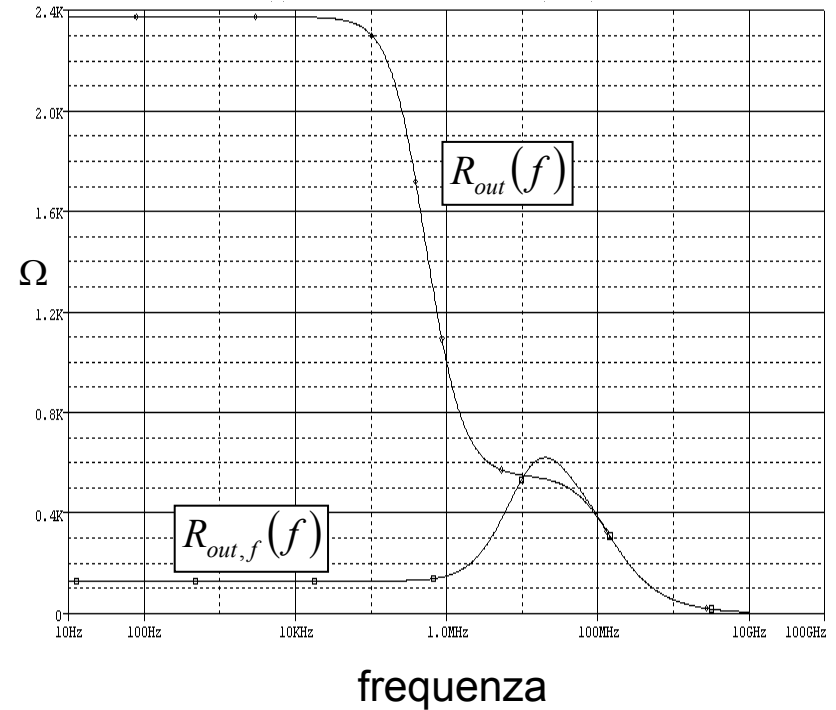
Serie di tensione

Confronto andamento resistenze di ingresso e di uscita

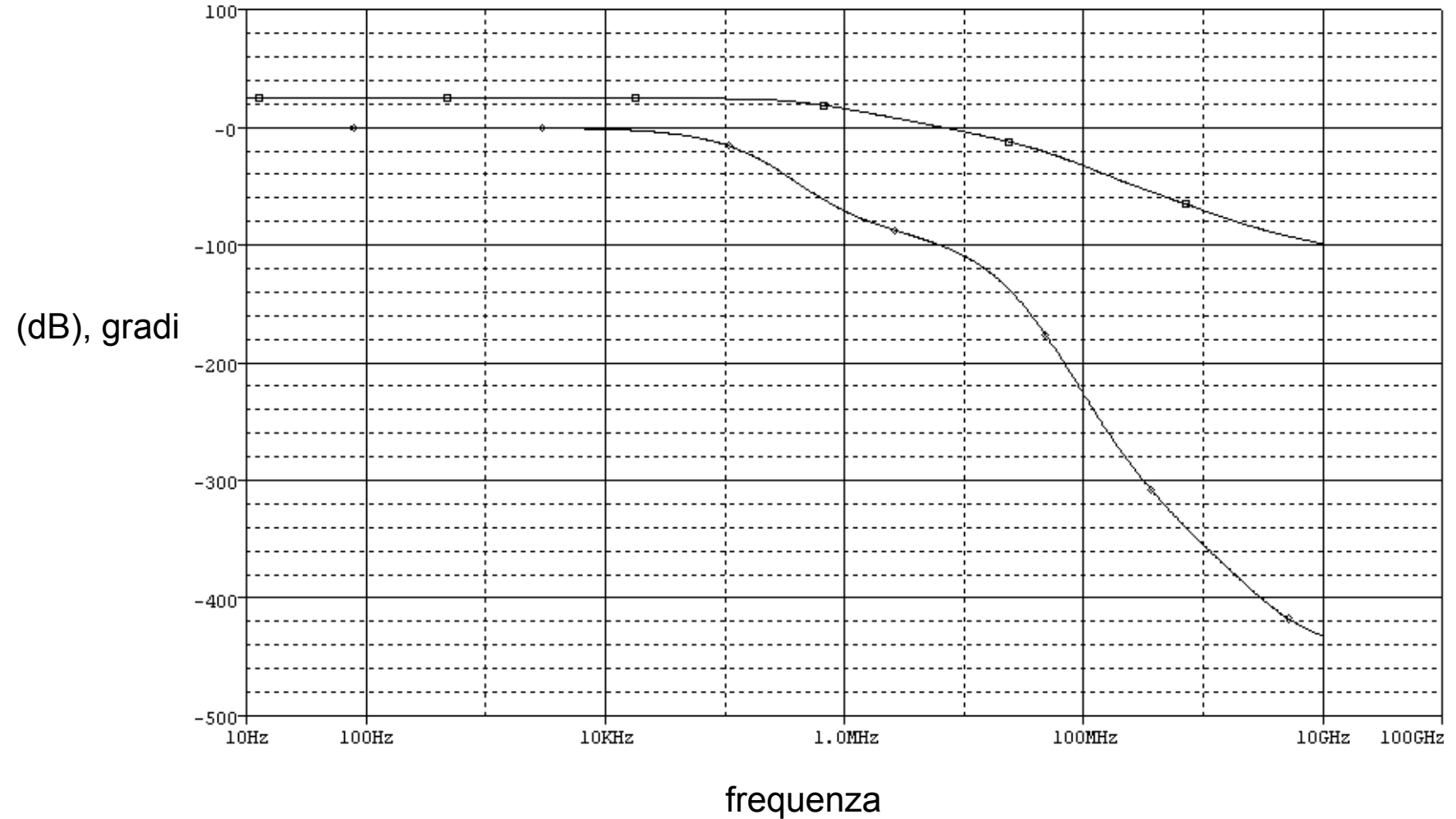
Resistenze di ingresso



Resistenze di uscita



Guadagno di anello – serie di tensione



Bibliografia

1. J. Millman, C. C. Halkias “***Integrated Electronics***” McGraw-Hill, 1972.
2. Lucidi delle lezioni del corso di Elettronica 2 del Prof. Ing. Leonardo Masotti.

Schemi e grafici ottenuti con “*PSPICE 9.1 evaluation*” scaricabile dal sito:

<http://www.engr.uky.edu/~cathey/pspice061301.html>