

Risposta in frequenza degli amplificatori RC

Abbiamo già avuto occasione di vedere che, al variare della frequenza, l'amplificatore RC si comporta come un filtro passa banda a causa del taglio alle basse frequenze operato dai condensatori esterni e di quello alle alte frequenze, dovuto alle capacità parassite. Lo scopo del nostro studio è quello di ricavare, in modo più o meno approssimato, la frequenza di taglio inferiore f_L e quella superiore f_H .

Comportamento alle basse frequenze

Condensatori non interagenti

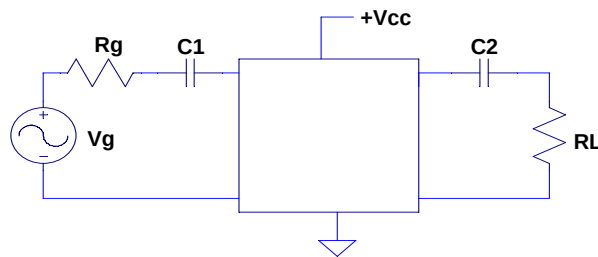


fig.1

Come sappiamo, a causa dei condensatori esterni, il guadagno in tensione degli amplificatori RC (fig.1) diminuisce sensibilmente non appena la frequenza di lavoro diventa sufficientemente bassa; per studiare il fenomeno, occorre disegnare il circuito dinamico dell'amplificatore alle basse frequenze (fig.2)

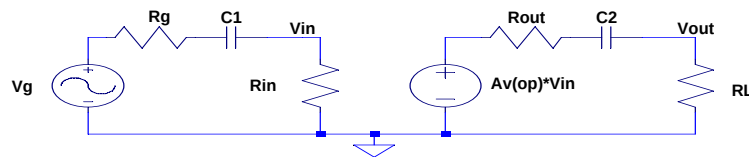


fig. 2

Notiamo che:

- la maglia di ingresso dell'amplificatore è un filtro passa alto con frequenza di taglio

$$f_{L1} = \frac{1}{(2\pi C_1 \cdot (R_g + R_{in}))}$$

- anche la maglia di uscita è un filtro passa alto, la cui frequenza di taglio è $f_{L2} =$

$$\frac{1}{(2\pi C_2 \cdot (R_L + R_{out}))}$$

Ma qual è la frequenza di taglio inferiore complessiva (f_L) dell'intero amplificatore? E' chiaro che, tra i due filtri, si impone quello che smette di tagliare dopo e, di conseguenza, la frequenza di taglio inferiore dell'amplificatore risulta maggiore della frequenza di taglio più grande, perchè anche il filtro che smette di tagliare prima concorre un po' alla determinazione di f_L . Esaminiamo alcune situazioni significative.

Polo dominante

Supponiamo che una delle due frequenze di taglio, poniamo f_{L1} , sia 1Hz, mentre $f_{L2}=10\text{Hz}$; questo significa che:

- il filtro di ingresso taglia i segnali di frequenza inferiore a 1Hz, lasciando passare i

segnali di frequenza superiore

- il filtro di uscita taglia i segnali sino a 10Hz e lascia passare i segnali di frequenza maggiore

In queste condizioni, la frequenza di taglio inferiore dell'amplificatore è 10Hz; infatti, che il filtro di ingresso lasci passare i segnali da partire da 1Hz, serve a poco visto che, poi, questi segnali sono bloccati dal filtro di uscita che, invece, taglia sino a 10Hz. Ciò risulta evidente dalla fig. 3 in cui sono riportate rispettivamente:

- la risposta in ampiezza della sola maglia di ingresso dell'amplificatore (frequenza di taglio 1Hz)
- la risposta in ampiezza della maglia di uscita dell'amplificatore (frequenza di taglio 10Hz)
- la risposta in ampiezza dell'intero amplificatore, la cui frequenza di taglio coincide con quella nettamente dominante (10Hz)

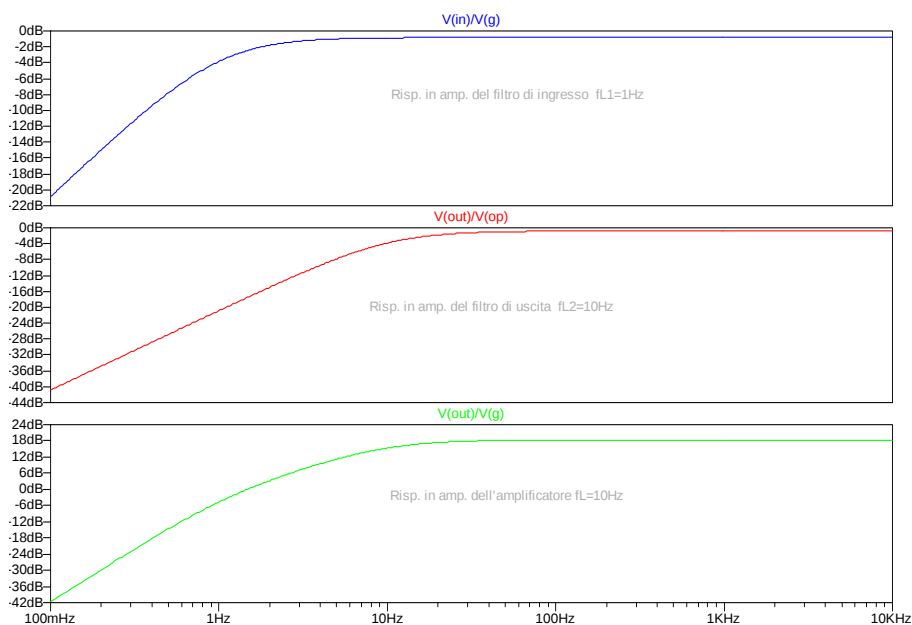


fig. 3

Poli identici

Supponiamo adesso che $f_{L1}=f_{L2}=10\text{Hz}$ (fig.4)

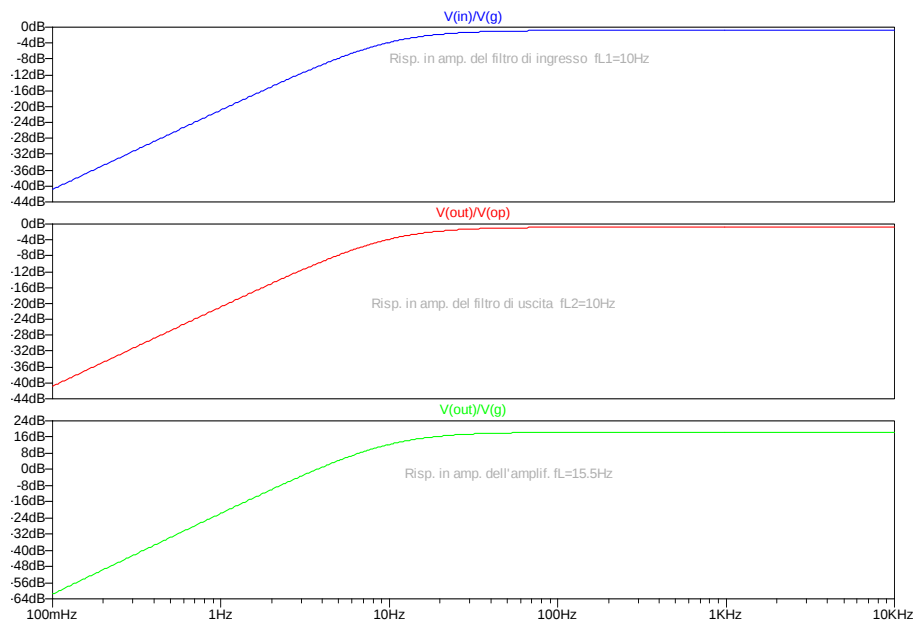


fig. 4

Supponiamo cioè che la maglia di ingresso e quella di uscita abbiano frequenze di taglio identiche. In una situazione come questa, aspettiamoci che la frequenza di taglio complessiva dell'amplificatore sia superiore, anche sensibilmente, a 10Hz; infatti, la frequenza di taglio sarebbe 10 Hz se, a tagliare le basse frequenze, fosse un solo filtro; ma qui i filtri sono due: i loro effetti di taglio si "sommano" e, come risultato, alle medie frequenze ci si arriva dopo e la frequenza di taglio inferiore è maggiore di ciascuna delle due. La fig. 4, relativa alla situazione $f_{L1}=f_{L2}=10\text{Hz}$, evidenzia che la frequenza di taglio inferiore dell'amplificatore è $f_L=15.5\text{Hz}$

Poli paragonabili

La fig. 5 è relativa alla situazione $f_{L1}=15\text{Hz}$, $f_{L2}=10\text{Hz}$; ci troviamo, cioè nella situazione in cui una delle due frequenze di taglio è maggiore dell'altra, ma non nettamente; anche in questo caso, la frequenza di taglio dell'intero amplificatore è maggiore della più grande tra le due (15Hz), per via dell'attenuazione prodotta dal filtro di frequenza di taglio 10Hz . La figura 5 mostra che $f_L=19.5\text{Hz}$.

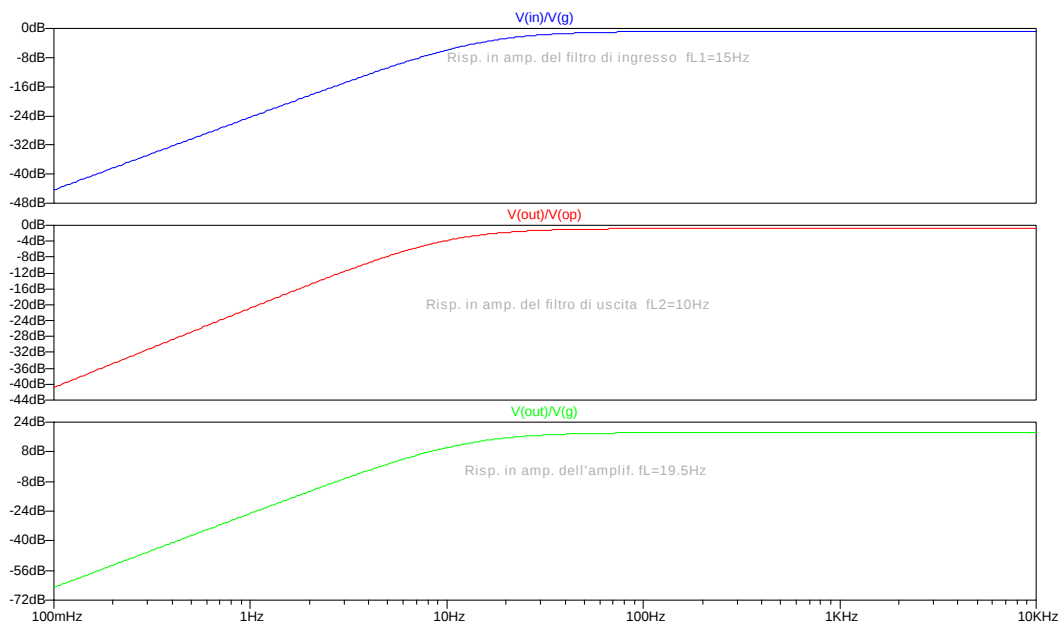


fig. 5

In conclusione, per determinare la frequenza di taglio inferiore di un amplificatore RC si procede come segue:

- si disegna il circuito dinamico alle B.F. dell'amplificatore
- si individuano i filtri passa alto che compongono l'amplificatore
- si determina la frequenza di taglio dei vari filtri ($f_{L1}, f_{L2}, f_{L3}, \dots$)

A questo punto:

- se c'è una frequenza di taglio dominante (almeno quattro volte maggiore delle altre), la frequenza di taglio coincide con la dominante (in realtà è un po' più grande)
- se le frequenze di taglio sono tutte uguali ($f_{L1}=f_{L2}=\dots$), allora la frequenza di taglio inferiore dell'amplificatore è: $f_L = \frac{f_{L1}}{\sqrt{(n\sqrt{2}-1)}}$ dove n è il numero di frequenze di taglio identiche
- se le frequenze di taglio sono paragonabili, nel senso che non c'è una frequenza nettamente prevalente sulle altre, allora per determinare la frequenza di taglio inferiore si usa la seguente approssimazione (non molto accurata, in verità):

$$f_L = \sqrt{(f_{L1}^2 + f_{L2}^2 + \dots)}$$

Condensatori interagenti

Nella situazione appena descritta, i condensatori non interagiscono, nel senso che si trovano in maglie separate e non si "vedono" elettricamente; vi sono situazioni in cui, invece, i condensatori esterni si trovano nella stessa maglia e ciascuno di essi non vede più una resistenza ma un'impedenza. In fig. 6 troviamo il circuito dinamico, relativo alle basse frequenze, di un amplificatore ad emettitore comune; osserviamo che:

- C1 e C3 "si vedono" elettricamente
- C2, in pratica, non interagisce con gli altri due condensatori, dato che la resistenza vista guardando dentro il collettore del BJT è molto elevata

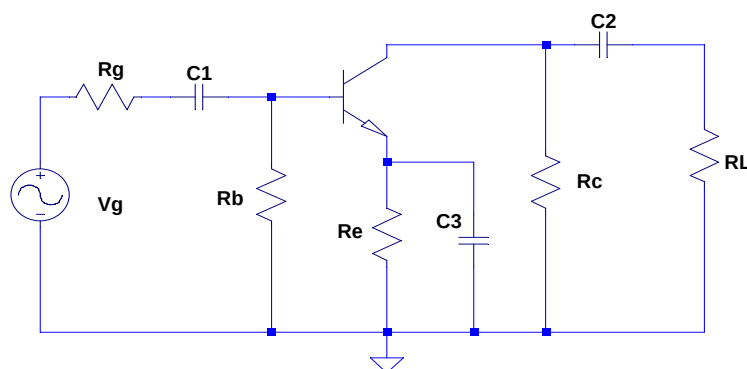


fig. 6

Quando l'amplificatore contiene condensatori interagenti, per determinare f_L , si procede nel modo seguente:

1. si calcola la frequenza di taglio introdotta da ciascuno dei condensatori interagenti, immaginando gli altri in cortocircuito; nel nostro caso si determinano le frequenze

$$f_{L1s} = \frac{1}{(2\pi C_1 \cdot (R_g + R_{in}))}, \text{ introdotta da C1 con C3 in cortocircuito, e } f_{L3s} = \frac{1}{(2\pi C_3 \cdot (R_e \parallel R_{ie}))}, \text{ introdotta da C3 con C1 in cortocircuito}$$

2. i due condensatori interagenti danno luogo ad una frequenza di taglio f_{Li} , data da:

$$f_{Li} \approx f_{L1s} + f_{L3s}$$

3. si determina la frequenza di taglio f_{L2} prodotta da C_2

4. si confrontano f_{Li} e f_{L2} e si vede se c'è una dominante (di solito f_{Li}), se sono uguali o paragonabili e si procede come nella situazione di condensatori non interagenti.

Ad esempio, assumendo $R_g=500\Omega$, $R_b=3k$, $R_e=1k$, $R_c=1.5k$, $R_L=5k$, $h_{fe}=180$, $r_e=10\Omega$, $C_1=C_2=10\mu F$, $C_3=100\mu F$, in fig.6 :

- cortocircuitando C_3 otteniamo $R_{in} = R_b \parallel R_{ib} = R_b \parallel (h_{fe} \cdot r_e) \approx 1.12k\Omega$ e $f_{L1s} = 14.1Hz$
- cortocircuitando C_1 otteniamo $R_{ie} = r_e + \frac{(R_g \parallel R_b)}{h_{fe}} = 12.4\Omega$ e $f_{L3s} = 128.3Hz$
- la frequenza di taglio prodotta dal gruppo di condensatori interagenti C_1 - C_3 è $f_{Li} = f_{L1s} + f_{L3s} = 140.7Hz$
- la frequenza di taglio prodotta da C_2 , che non interagisce, è $f_{L2} = \frac{1}{(2\pi C_2 \cdot (R_L + R_{out}))} \approx \frac{1}{(2\pi C_2 \cdot (R_L + R_c))} = 2.45Hz$

Poiché $f_{Li} \gg f_{L2}$ la frequenza di taglio inferiore dell'amplificatore è $f_L \approx 140.7Hz$

Comportamento alle alte frequenze

Appena la frequenza di lavoro diventa sufficientemente elevata, il guadagno dell'amplificatore comincia a diminuire per via delle inevitabili capacità parassite presenti nel circuito. La frequenza di taglio superiore dell'amplificatore è determinata appunto da queste capacità e dalla loro collocazione. Noi limiteremo la nostra analisi al caso di un amplificatore che ha due capacità parassite non interagenti, una in parallelo all'ingresso ed una in parallelo all'uscita.

Per determinare la frequenza di taglio superiore dell'amplificatore, bisogna disegnare il circuito dinamico relativo alle alte frequenze (fig. 7)

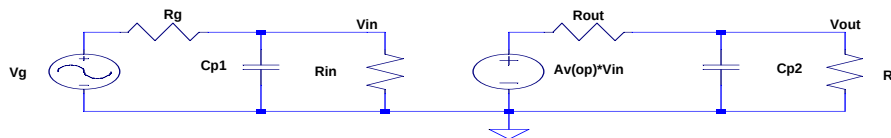


fig. 7

Notiamo che:

- la maglia di ingresso dell'amplificatore è un filtro passa basso con frequenza di taglio
$$f_{H1} = \frac{1}{(2\pi C_{p1} \cdot (R_g \parallel R_{in}))}$$
- anche la maglia di uscita è un filtro passa alto, la cui frequenza di taglio è $f_{H2} = \frac{1}{(2\pi C_{p2} \cdot (R_L \parallel R_{out}))}$

La frequenza di taglio superiore f_H dell'intero amplificatore è determinata sia da f_{H1} che da f_{H2} ma è intuitivo comprendere che il valore di f_H sarà determinato più pesantemente dal filtro che comincia a tagliare prima; di conseguenza, la frequenza di taglio superiore dell'amplificatore risulta minore della più piccola tra le singole frequenze di taglio. Esaminiamo tre situazioni interessanti:

Polo dominante

Supponiamo che una delle due frequenze di taglio, poniamo f_{H1} , sia 1MHz, mentre $f_{H2}=10\text{MHz}$; questo significa che:

- il filtro di ingresso taglia i segnali di frequenza superiore a 1MHz, lasciando passare i segnali di frequenza inferiore
- il filtro di uscita taglia i segnali da 10MHz in su e lascia passare i segnali di frequenza minore

In queste condizioni, la frequenza di taglio superiore dell'amplificatore è 1MHz; infatti, che il filtro di uscita lasci passare i segnali sino a 10MHz, serve a poco visto che i segnali di frequenza superiore a 1MHz sono bloccati dal filtro di ingresso. Ciò risulta evidente dalla fig. 8 in cui sono riportate rispettivamente:

- la risposta in ampiezza della sola maglia di ingresso dell'amplificatore (frequenza di taglio 1MHz)
- la risposta in ampiezza della maglia di uscita dell'amplificatore (frequenza di taglio 10MHz)

- la risposta in ampiezza dell'intero amplificatore, la cui frequenza di taglio coincide (in realtà è un po' minore) con quella nettamente dominante (995kHz)

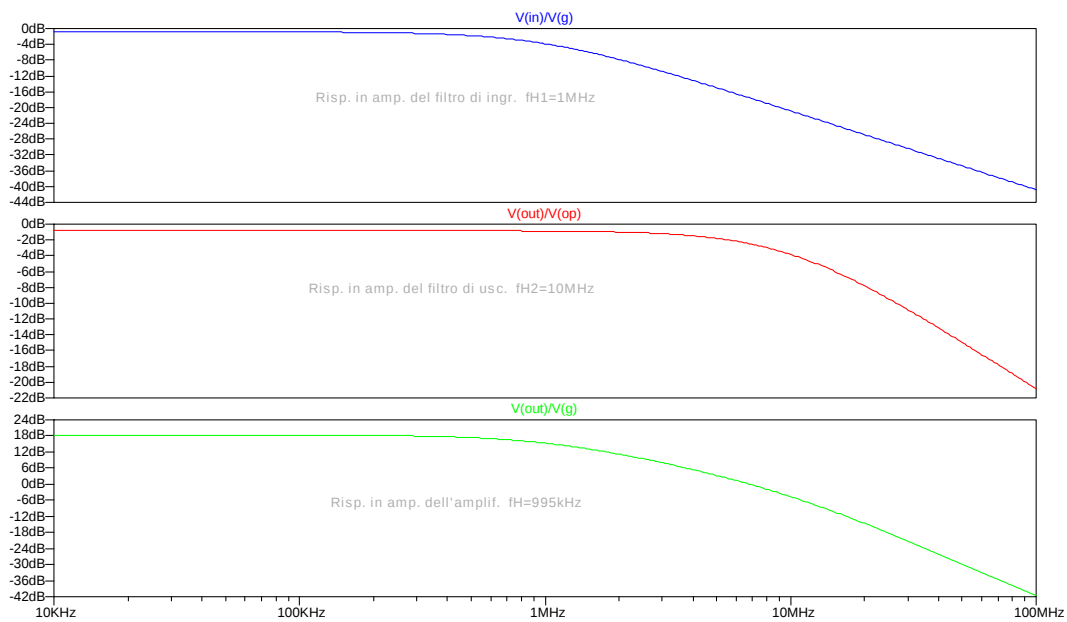


fig. 8

Poli identici

Supponiamo adesso che $f_{H1}=f_{H2}=1\text{MHz}$; cioè che la maglia di ingresso e quella di uscita abbiano frequenze di taglio identiche. In una situazione come questa, aspettiamoci che la frequenza di taglio complessiva dell'amplificatore sia inferiore, anche sensibilmente, a 1MHz; infatti, la frequenza di taglio sarebbe 1MHz se, a tagliare le alte frequenze, fosse un solo filtro; ma i filtri sono due, i loro effetti di taglio si "sommano" e, come risultato, il guadagno dell'amplificatore comincia a calare prima e la frequenza di taglio superiore è minore di ciascuna delle due. La fig. 4, relativa alla situazione $f_{H1}=f_{H2}=1\text{MHz}$, evidenzia che la frequenza di taglio inferiore dell'amplificatore è $f_H=645\text{kHz}$ (fig. 9)

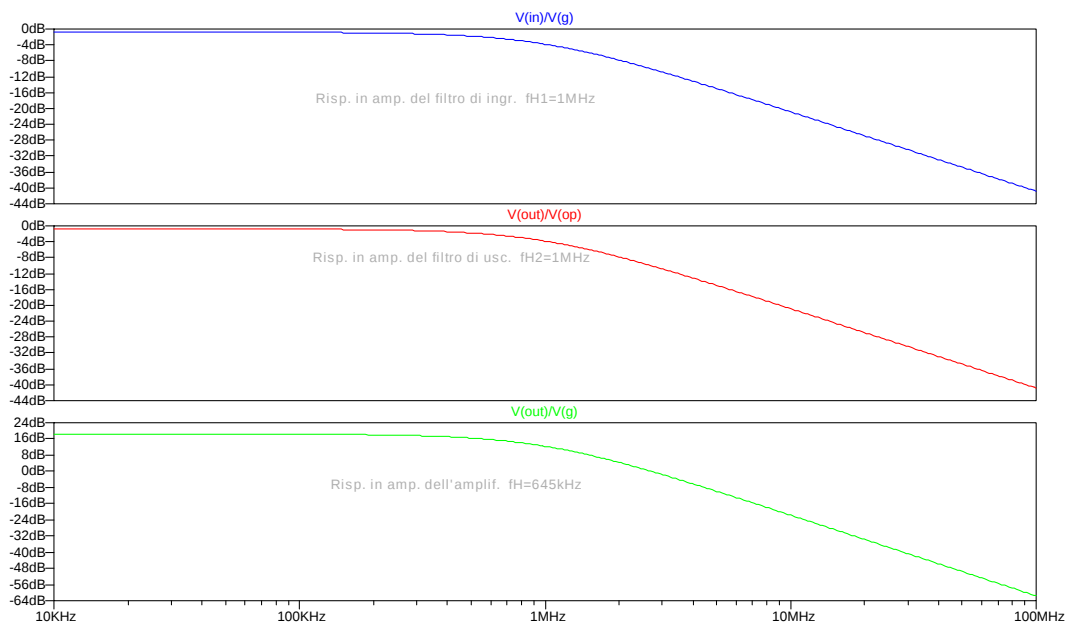


fig.9

Poli paragonabili

La fig. 10 è relativa alla situazione $f_{H1}=1\text{MHz}$, $f_{H2}=2\text{MHz}$; ci troviamo, cioè nella situazione in cui una delle due frequenze di taglio è minore dell'altra, ma non nettamente; anche in questo caso, la frequenza di taglio dell'intero amplificatore è minore della più piccola tra le due (15Hz), per via dell'attenuazione prodotta dal filtro di frequenza di taglio 2MHz .

La figura 10 mostra che $f_H=842\text{kHz}$.

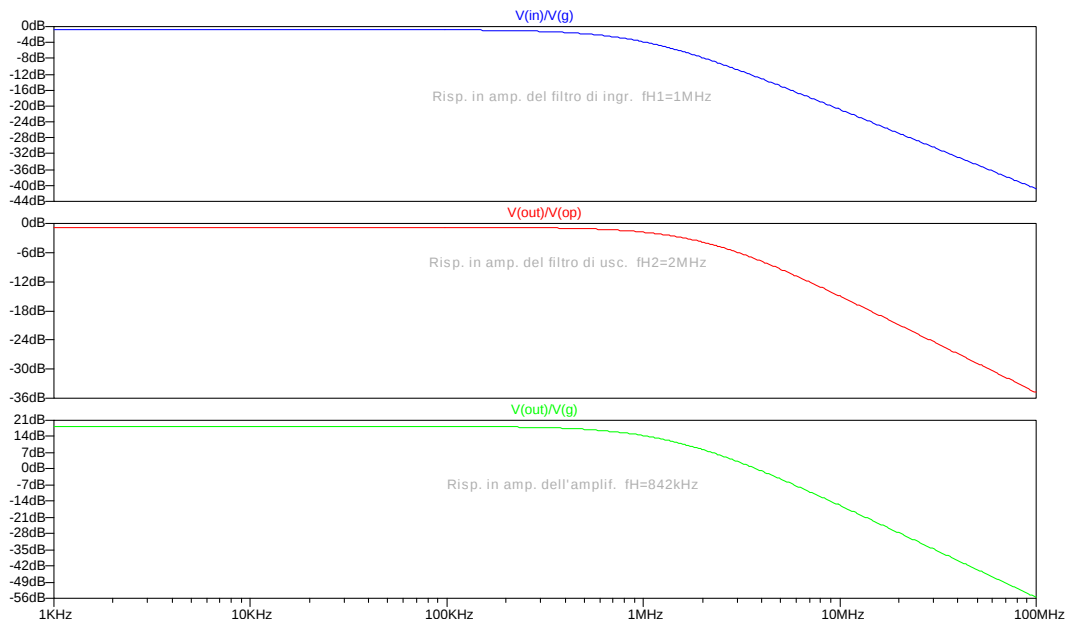


fig. 10

In definitiva, per determinare la frequenza di taglio superiore di un amplificatore RC si procede come segue:

- si disegna il circuito dinamico alle A.F. dell'amplificatore
- si individuano i filtri passa basso che compongono l'amplificatore
- si determina la frequenza di taglio dei vari filtri (f_{H1} , f_{H2} , f_{H3})

A questo punto:

- se c'è una frequenza di taglio dominante (almeno quattro volte più piccola delle altre), la frequenza di taglio coincide con la dominante (in realtà è un po' più minore)
- se le frequenze di taglio sono tutte uguali ($f_{H1}=f_{H2}=...$), allora la frequenza di taglio superiore dell'amplificatore è: $f_L = f_{L1} \cdot \sqrt[n]{\sqrt{2} - 1}$ dove n è il numero di frequenze di taglio uguali
- se le frequenze di taglio sono paragonabili, nel senso che non c'è una frequenza nettamente minore delle altre, allora per determinare la frequenza di taglio superiore si usa la seguente approssimazione (non molto accurata, in verità): $f_H = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{f_{H1}^2} + \frac{1}{f_{H2}^2} + \dots\right)}}$