ELETTRONICA

CdS Ingegneria Biomedica

LEZIONE A.04

Amplificatori

Caratteristiche degli amplificatori

Tipi di amplificatore

Relazioni tra i parametri dei modelli di amplificatore

Amplificatore in cascata

Risposta in frequenza degli amplificatori

Parte 1

Caratteristiche degli amplificatori

Definizione

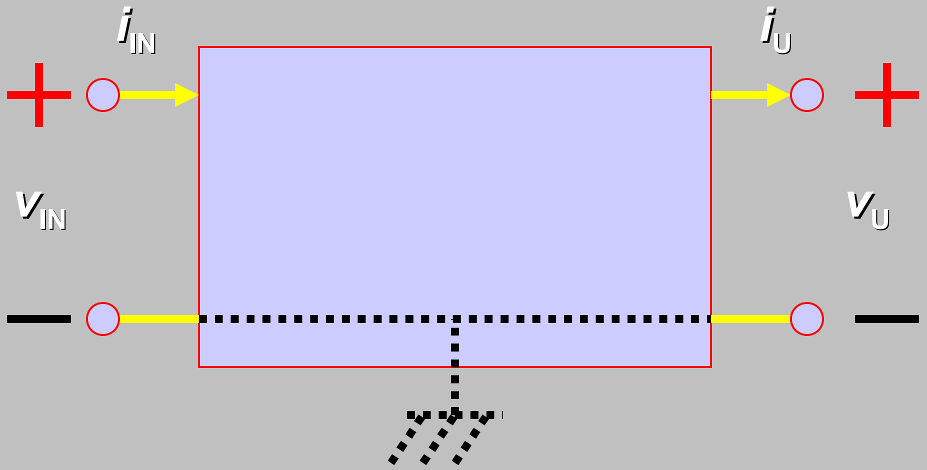
Guadagno di tensione e di corrente

Guadagno di potenza

Decibel (dB)

Definizione

- **Amplificatore**
  - **Si ha un circuito a due porte, di cui si conosce il comportamento in funzione delle grandezze v_{IN}, i_{IN}, v_U, i_U**
  - **Si può definire amplificatore un sistema di questo tipo se all'informazione in uscita è associata una potenza media superiore a quella dell'informazione in ingresso**



Guadagno di tensione

- **Definizione**
  - **Poniamoci nel caso in cui l'informazione è associata a piccoli segnali**
  - **Sappiamo che, nell'intorno del punto di riposo, possiamo linearizzare il circuito per i piccoli segnali**
  - **Il rapporto tra v_u e v_{in} che si ottiene nel circuito linearizzato si definisce guadagno di tensione o, semplicemente, amplificazione A_V**
    - Equivale alla pendenza della caratteristica di trasferimento v_U-v_{IN}
  - **Nel circuito si ha $v_u = A_V\, v_{in}$**

Guadagno di corrente

- **Definizione**
  - **Nello stesso circuito, linearizzato nell'intorno del solito punto di riposo, possiamo determinare, con riferimento a un generatore di corrente in ingresso e alla corrente di uscita, anche il rapporto tra i_u e i_{in}**
  - **Tale rapporto si definisce guadagno o amplificazione di corrente A_I**
  - **Nel circuito si ha $i_u = A_I \, i_{in}$**

Guadagno di potenza

- Potenza totale in ingresso e in uscita
  - $P_{IN} = i_{in}\, v_{in} + I_{in}\, V_{in} + i_{in}\, V_{in} + I_{in}\, v_{in}$
  - $P_{U} = i_{u}\, v_{u} + I_{u}\, V_{u} + i_{u}\, V_{u} + I_{u}\, v_{u}$
- Potenza media associata all'informazione
  - $P_{INm} = i_{in}\, v_{in}$
  - $P_{Um} = i_{u}\, v_{u} = A_I A_V\, i_{in}\, v_{in} = A_P\, P_{INm}$
- Il rapporto A_P tra le potenze medie associate all'informazione si definisce guadagno di potenza
  - Se $A_P < 1$, si parla di attenuatore

Decibel (dB)

- **Spesso si usa esprimere il guadagno in forma logaritmica**
  - **Alcuni organi di senso (es. udito) hanno relazioni logaritmiche tra sensazione e potenza del segnale**
  - **Definisco R_{IN} la resistenza vista dall'ingresso e R_L la resistenza del carico (potrei prenderle uguali)**

$$A_{dB} = 10\log\left(\frac{P_{Um}}{P_{INm}}\right) = 10\log\left(\frac{v_u^2}{R_L}\frac{R_{IN}}{v_{in}^2}\right) = 20\log\left(\frac{v_u}{v_{in}}\right) + 10\log\left(\frac{R_{IN}}{R_L}\right)$$

$$A_{dB} = 10\log\left(\frac{P_{Um}}{P_{INm}}\right) = 10\log\left(\frac{i_u^2 R_L}{i_{in}^2 R_{IN}}\right) = 20\log\left(\frac{i_u}{i_{in}}\right) + 10\log\left(\frac{R_L}{R_{IN}}\right)$$

Parte 2

Tipi di amplificatori

Definizione dei tipi

Equazioni e modelli circuitali

Condizioni per l’unidirezionalità

Equivalenza tra parametri

Rete lineare a due porte

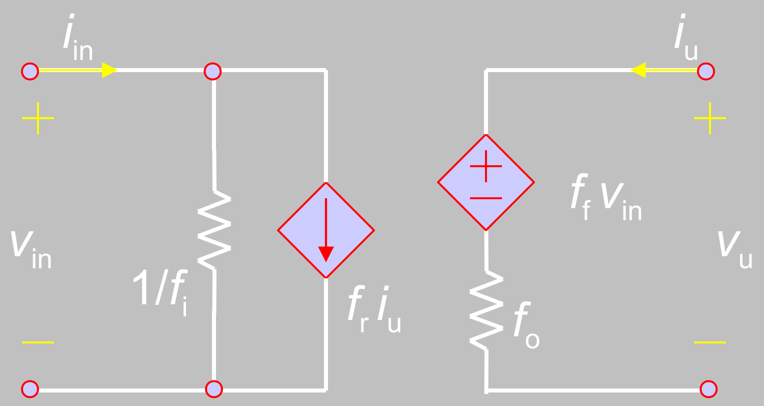
- **Per descrivere completamente una rete lineare a due porte, senza generatori indipendenti interni, occorrono 4 parametri**
  - **Ho 4 grandezze (v_{in}, i_{in}, v_u, i_u)**
  - **Posso scegliere a piacere di esprimere 2 grandezze (una per porta) in funzione delle 2 rimanenti**
  - **A ciascuna scelta corrisponde un modello circuitale e un tipo di amplificatore**
    - Di tensione (in funzione di v_{in}, i_u)
    - Di corrente (in funzione di i_{in}, v_u)
    - Transconduttivo (in funzione di v_{in}, v_u)
    - Transresistivo (in funzione di i_{in}, i_u)

Amplificatore di tensione

Equazioni

$$\begin{cases} v_u = f_f v_{in} + f_o i_u \\ i_{in} = f_i v_{in} + f_r i_u \end{cases}$$

Modello

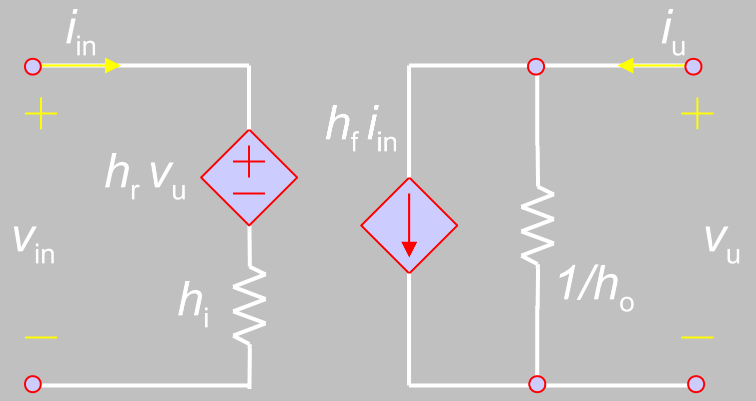


Amplificatore di corrente

Equazioni

$$\begin{cases} i_{\mathrm{u}} = h_{\mathrm{f}} i_{\mathrm{in}} + h_{\mathrm{o}} v_{\mathrm{u}} \\ v_{\mathrm{in}} = h_{\mathrm{i}} i_{\mathrm{in}} + h_{\mathrm{r}} v_{\mathrm{u}} \end{cases}$$

Modello

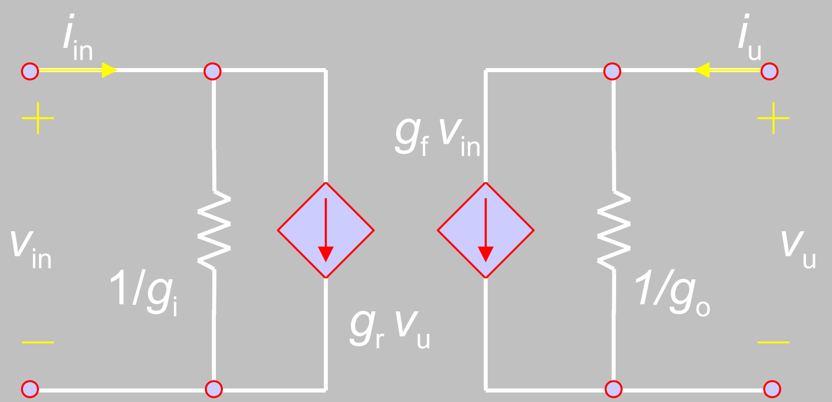


Amplificatore transconduttivo

Equazioni

$$\begin{cases} i_u = g_f v_{in} + g_o v_u \\ i_{in} = g_i v_{in} + g_r v_u \end{cases}$$

Modello

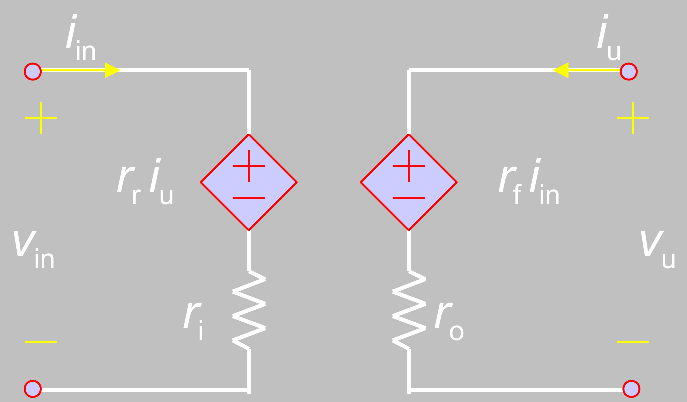


Amplificatore transresistivo

Equazioni

$$\begin{cases} v_{\mathrm{u}} = r_{\mathrm{f}} i_{\mathrm{in}} + r_{\mathrm{o}} i_{\mathrm{u}} \\ v_{\mathrm{in}} = r_{\mathrm{i}} i_{\mathrm{in}} + r_{\mathrm{r}} i_{\mathrm{u}} \end{cases}$$

Modello



Condizioni per l'unidirezionalità

- **Negli amplificatori è desiderabile che le grandezze di uscita non abbiano effetti su quelle di ingresso**
  - **L'amplificatore ideale è unidirezionale**
- **Questo si traduce, per i 4 modelli, in condizioni sui parametri**
  - **Amplificatore di tensione: $f_r = 0$**
  - **Amplificatore di corrente: $h_r = 0$**
  - **Amplificatore transconduttivo: $g_r = 0$**
  - **Amplificatore transresistivo: $r_r = 0$**

Altre condizioni di idealità

- **Negli amplificatori sono inoltre desiderabili altre due cose**
  - **Le grandezze di ingresso che controllano il generatore di uscita dovrebbero essere prelevate senza disturbare il circuito di ingresso**
    - Nei modelli i parametri con pedice “i” dovrebbero tendere a 0
  - **La grandezza prodotta dal generatore di uscita non dovrebbe essere alterata dal circuito in cui esso è inserito**
    - Nei modelli i parametri con pedice “o” dovrebbero tendere a 0

Parte 3

Relazioni tra parametri

Passaggio da un modello all’altro

Condizioni di equivalenza

- **Lo stesso amplificatore può essere modellato in modi diversi**
  - **I sistemi di equazioni possono essere risolti in funzione delle grandezze incognite**
  - **Per trasformare un modello nell'altro conviene definire i parametri tramite esperimenti sui modelli**
    - Rapporto tra grandezze elettriche in particolari condizioni di funzionamento
    - Circuito aperto o cortocircuito

Parametri dell'amplificatore di tensione

$$\begin{cases} v_{\mathrm{u}} = f_{\mathrm{f}} v_{\mathrm{in}} + f_{\mathrm{o}} i_{\mathrm{u}} \\ i_{\mathrm{in}} = f_{\mathrm{i}} v_{\mathrm{in}} + f_{\mathrm{r}} i_{\mathrm{u}} \end{cases}$$

$$f_{\mathrm{f}} = \left.\frac{v_{\mathrm{u}}}{v_{\mathrm{in}}}\right|_{\text{con uscita aperta}} \qquad f_{\mathrm{o}} = \left.\frac{v_{\mathrm{u}}}{i_{\mathrm{u}}}\right|_{\text{con ingresso in cortocircuito}}$$

$$f_{\mathrm{i}} = \left.\frac{i_{\mathrm{in}}}{v_{\mathrm{in}}}\right|_{\text{con uscita aperta}} \qquad f_{\mathrm{r}} = \left.\frac{i_{\mathrm{in}}}{i_{\mathrm{u}}}\right|_{\text{con ingresso in cortocircuito}}$$

Parametri dell'amplificatore di corrente

$$\begin{cases} i_u = h_f i_{in} + h_o v_u \\ v_{in} = h_i i_{in} + h_r v_u \end{cases}$$

$$h_f = \left.\frac{i_u}{i_{in}}\right|_{\text{con uscita in cortocircuito}} \qquad h_o = \left.\frac{i_u}{v_u}\right|_{\text{con ingresso aperto}}$$

$$h_i = \left.\frac{v_{in}}{i_{in}}\right|_{\text{con uscita in cortocircuito}} \qquad h_r = \left.\frac{v_{in}}{v_u}\right|_{\text{con ingresso aperto}}$$

Parametri dell'amplificatore transconduttivo

$$\begin{cases} i_{\mathrm{u}} = g_{\mathrm{f}} v_{\mathrm{in}} + g_{\mathrm{o}} v_{\mathrm{u}} \\ i_{\mathrm{in}} = g_{\mathrm{i}} v_{\mathrm{in}} + g_{\mathrm{r}} v_{\mathrm{u}} \end{cases}$$

$$g_{\mathrm{f}} = \left. \frac{i_{\mathrm{u}}}{v_{\mathrm{in}}} \right|_{\text{con uscita in cortocircuito}}$$

$$g_{\mathrm{o}} = \left. \frac{i_{\mathrm{u}}}{v_{\mathrm{u}}} \right|_{\text{con ingresso in cortocircuito}}$$

$$g_{\mathrm{i}} = \left. \frac{i_{\mathrm{in}}}{v_{\mathrm{in}}} \right|_{\text{con uscita in cortocircuito}}$$

$$g_{\mathrm{r}} = \left. \frac{i_{\mathrm{in}}}{v_{\mathrm{u}}} \right|_{\text{con ingresso in cortocircuito}}$$

Parametri dell'amplificatore transresistivo

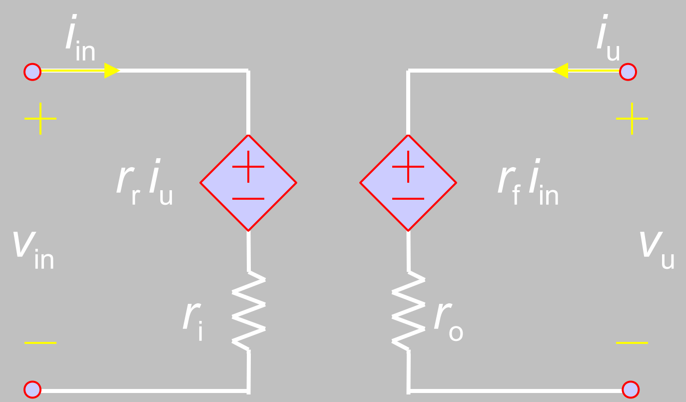
$$\begin{cases} v_{\mathrm{u}} = r_{\mathrm{f}} i_{\mathrm{in}} + r_{\mathrm{o}} i_{\mathrm{u}} \\ v_{\mathrm{in}} = r_{\mathrm{i}} i_{\mathrm{in}} + r_{\mathrm{r}} i_{\mathrm{u}} \end{cases}$$

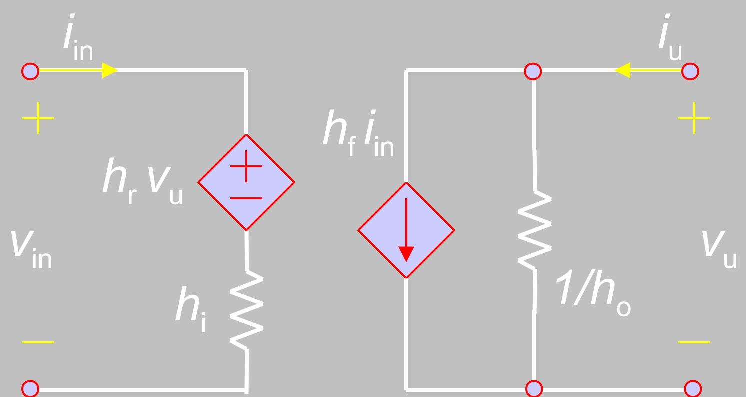
$$r_{\mathrm{f}} = \left.\frac{v_{\mathrm{u}}}{i_{\mathrm{in}}}\right|_{\text{con uscita aperta}} \qquad r_{\mathrm{o}} = \left.\frac{v_{\mathrm{u}}}{i_{\mathrm{u}}}\right|_{\text{con ingresso aperto}}$$

$$r_{\mathrm{i}} = \left.\frac{v_{\mathrm{in}}}{i_{\mathrm{in}}}\right|_{\text{con uscita aperta}} \qquad r_{\mathrm{r}} = \left.\frac{v_{\mathrm{in}}}{i_{\mathrm{u}}}\right|_{\text{con ingresso aperto}}$$

Esempio di passaggio

- **Da transresistivo ad amplificatore di corrente**





$$h_f = \left.\frac{i_u}{i_{in}}\right|_{v_u=0} = -\frac{r_f}{r_o}$$

$$h_o = \left.\frac{i_u}{v_u}\right|_{i_{in}=0} = \frac{1}{r_o}$$

$$h_i = \left.\frac{v_{in}}{i_{in}}\right|_{v_u=0} = r_i - r_r\frac{r_f}{r_o}$$

$$h_r = \left.\frac{v_{in}}{v_u}\right|_{i_{in}=0} = \frac{r_r}{r_o}$$

Parte 5

Amplificatori in cascata

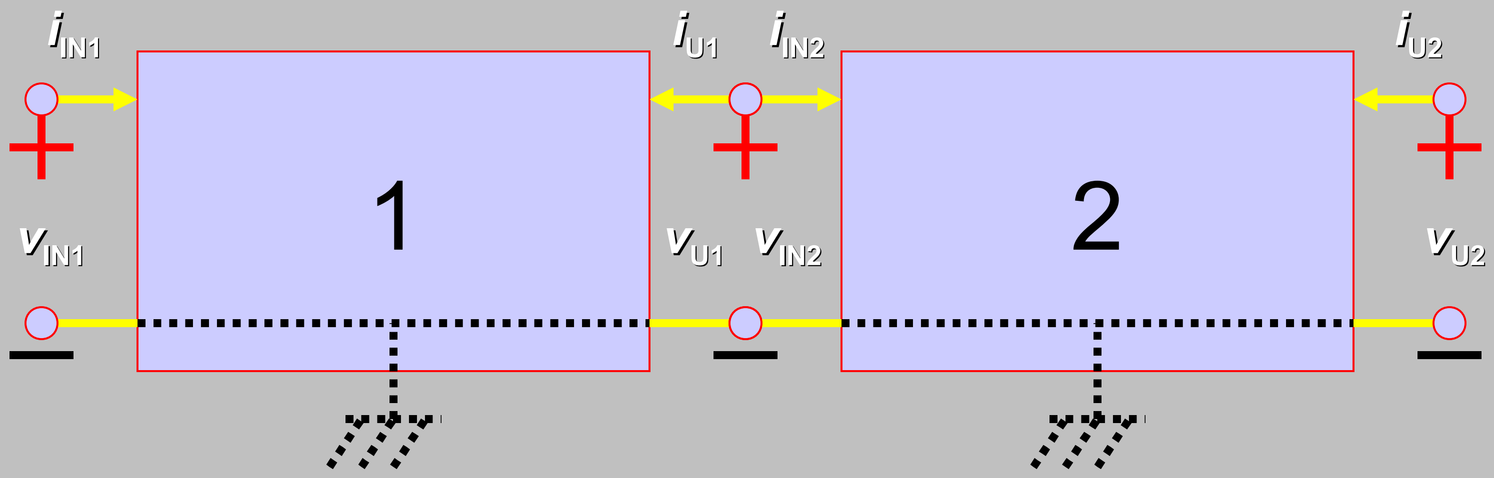
Schema di amplificatori in cascata

Calcolo dei parametri complessivi

Amplificatori in cascata

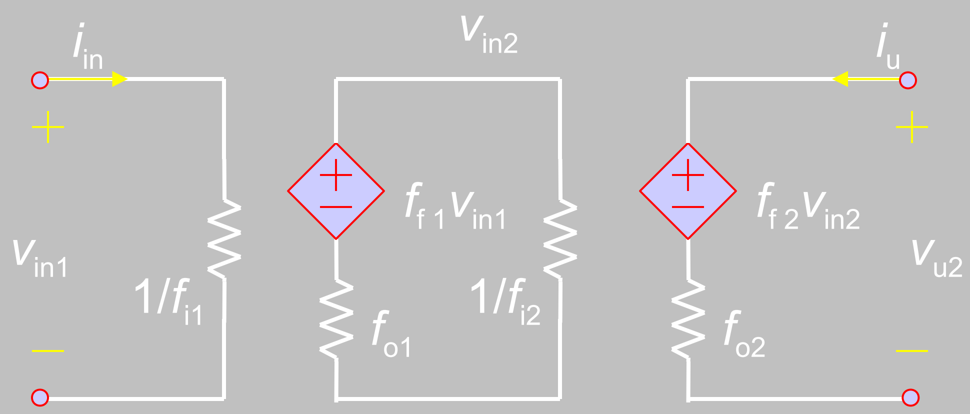
- **Situazione comune nei sistemi elettronici**
  - **Esecuzione di elaborazioni successive**
  - **Relazioni di connessione**

$$\begin{cases} v_{\text{in2}} = v_{\text{u1}} \\ i_{\text{in2}} = -i_{\text{u1}} \end{cases}$$



Calcolo dei parametri complessivi

- **Situazione considerata**
  - **Amplificatori unidirezionali**
  - **Modellati in modo analogo**
    - Per esempio, come amplificatori di tensione
    - Le grandezze che mi interessano sono v_{u2} e i_{in1} rispetto a v_{in1} e i_{u2}



$$\begin{cases} v_{u2} = \dfrac{f_{f2} f_{f1}}{1 + f_{i2} f_{o1}} v_{in1} + f_{o2} i_{u2} \\ i_{in1} = f_{i1} v_{in1} \end{cases}$$

Parte 6

Risposta in frequenza

Gli amplificatori in regime sinusoidale

La funzione di trasferimento

Poli e zeri

Diagramma di bode

Amplificatori in regime sinusoidale

- I modelli visti finora non tengono conto degli elementi induttivi e capacitivi
  - Tutti i parametri sono numeri reali
  - I segnali rappresentano l'ampiezza dei piccoli segnali
- In presenza di elementi reattivi si può ricorrere al calcolo fasoriale
  - I parametri sono operatori complessi, che indicano operazioni di amplificazione e sfasamento di sinusoidi
  - I segnali sono fasori, che rappresentano sinusoidi equifrequenziali, caratterizzate da ampiezza e fase

Calcolo dei parametri

- **Si possono determinare i parametri usando il circuito linearizzato comprensivo di *L* e *C***
  - **La relazione *v-i* è data da operatori complessi che esprimono la derivata e l'integrale di una sinusoide**
    - $V(\omega) = j\omega L\ I(\omega)$
    - $V(\omega) = I(\omega) / (j\omega C)$
  - **Questi operatori, definiti impedenza, possono essere usati per risolvere il circuito a regime sinusoidale**
    - Valgono le leggi di Kirchhoff e tutti i teoremi delle reti lineari

Uso dell'operatore *s*

- **Può convenire rinviare l'elaborazione di questi operatori**
  - **L'uso delle leggi dei numeri complessi ($j^2 = -1$) porta a espressioni (rapporti di polinomi in ω con coefficienti reali o immaginari) di difficile interpretazione**
  - **Si può lasciare indicato l'operatore $j\omega$ in forma simbolica**
- **Per esempio, si può porre nelle impedenze $j\omega = s$**
  - **Si arriva a espressioni per i parametri che sono rapporti di polinomi in *s* a coefficienti reali**
    - Possono essere create metodologie standard di interpretazione di queste quantità, associandole direttamente al comportamento del circuito a una data frequenza

Poli e zeri

- **Dopo avere introdotto l'operatore *s*, ogni parametro è espresso da un rapporto tra polinomi**
  - $A(s) = N(s)/D(s)$
- **Possiamo trovare gli zeri di numeratore (zeri) e denominatore (poli)**
  - **Saranno in generale reali o complessi coniugati, visto che i coefficienti dei polinomi sono reali**
  - **Siano gli zeri z_1, z_2, …, z_n e i poli p_1, p_2, …, p_m; allora i polinomi possono essere scomposti in prodotto di termini del tipo $K(s - z_1)(s - z_2)\ldots(s - z_n)/(s - p_1)\ldots(s - p_m)$**

Osservazioni

- I poli di una funzione di trasferimento (rapporto tra una grandezza e il generatore che l'ha originata) sono una caratteristica del circuito e non dipendono dalla posizione dei generatori
- Un rapporto di polinomi in cui il denominatore è espresso in forma di prodotti di termini elementari può essere scritto come somma di singoli rapporti in cui il denominatore è costituito da ciascuno dei termini

Diagrammi di Bode

- **Sostituiamo di nuovo *s* con *jω* nell'amplificazione**
  - **Otteniamo un rapporto tra polinomi scomposti in termini elementari (uno per ciascuno zero e polo)**
  - **Possiamo valutare l'effetto di ciascun termine del numeratore e del denominatore sul modulo e sulla fase dell'amplificazione**
- **Riportiamo l'ampiezza in dB in funzione del logaritmo della frequenza**
- **Riportiamo la fase in radianti in funzione del logaritmo della frequenza**

Effetto di poli e zeri

$$A(j\omega) = A(0)\frac{\left(\frac{j\omega}{z_1}-1\right)\left(\frac{j\omega}{z_2}-1\right)\ldots\left(\frac{j\omega}{z_n}-1\right)}{\left(\frac{j\omega}{p_1}-1\right)\left(\frac{j\omega}{p_2}-1\right)\ldots\left(\frac{j\omega}{p_m}-1\right)}$$

$$20\log\left[\left|A(j\omega)\right|\right] = 20\log\left[\left|A(0)\right|\right] + 20\log\left[\left|\left(\frac{j\omega}{z_1}-1\right)\right|\right] + \ldots$$

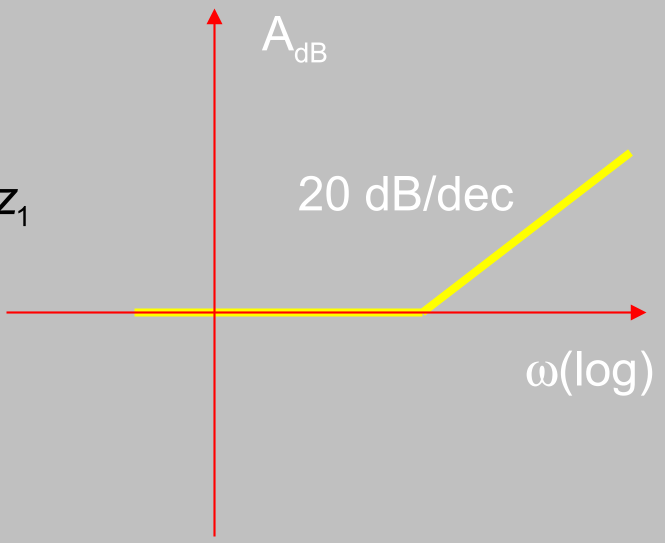
$$+20\log\left[\left|\left(\frac{j\omega}{z_n}-1\right)\right|\right] - 20\log\left[\left|\left(\frac{j\omega}{p_1}-1\right)\right|\right] - \ldots - 20\log\left[\left|\left(\frac{j\omega}{p_m}-1\right)\right|\right]$$

Effetto sull'ampiezza

- Prima della singolarità non si ha effetto
- Dopo si ha una crescita (per lo zero), o decremento (per il polo), di 20 dB per decade di distanza dalla singolarità

$$20\log\left[\left|\left(\frac{j\omega}{z_1}-1\right)\right|\right]=20\log\sqrt{\left(\frac{\omega}{z_1}\right)^2+1}\cong 0 \qquad \text{per } \omega << z_1$$

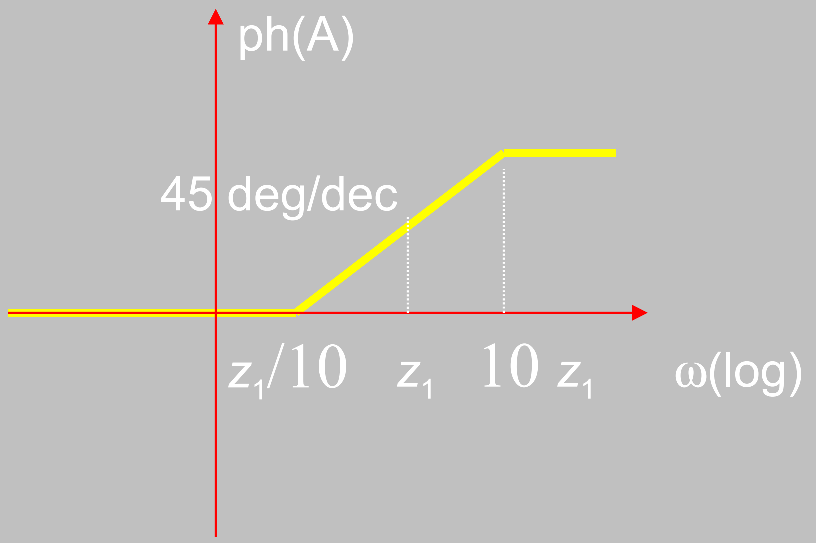
$$20\log\left[\left|\left(\frac{j\omega}{z_1}-1\right)\right|\right]\cong 20\log\left(\frac{\omega}{z_1}\right) \qquad \text{per } \omega >> z_1$$



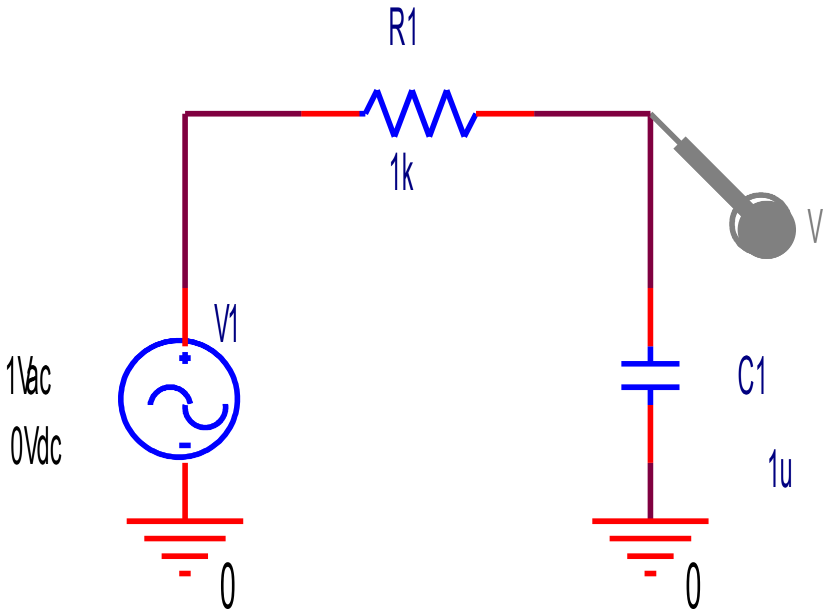
Effetto sulla fase

- Ogni termine può essere espresso in notazione di Eulero, evidenziando il suo contributo di fase
- L'arcotangente ha un effetto sulla fase da una decade prima della singolarità (z_1) a una dopo
  - L'effetto totale di un zero è di introdurre $\pi/2$ (90 deg)
  - Quello di un polo lo toglie

$$\left(\frac{j\omega}{z_1}-1\right)=\left(\sqrt{\left(\frac{\omega}{z_1}\right)^2+1}\right)e^{j\,\mathrm{arctg}\left(\frac{\omega}{z_1}\right)}$$



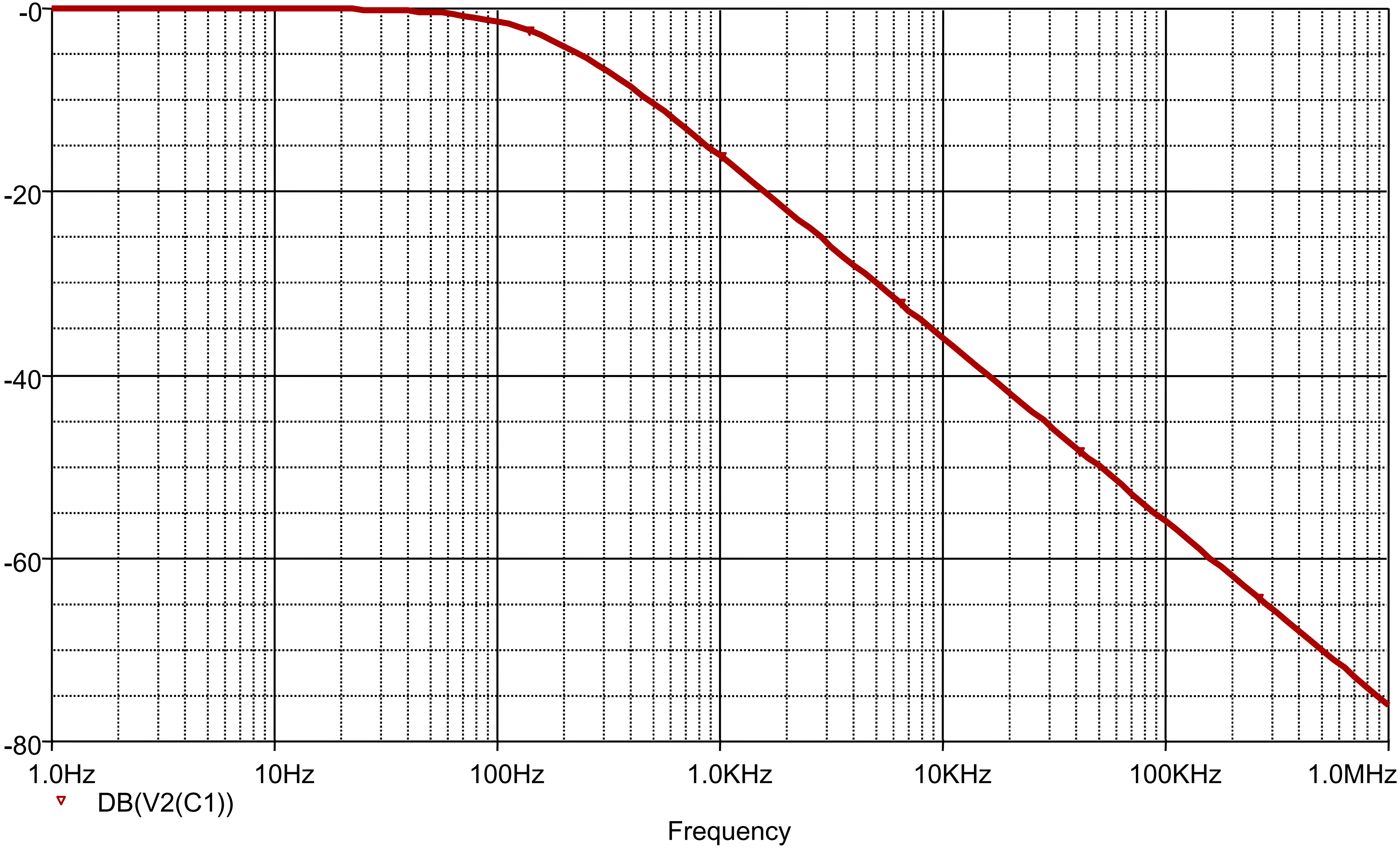
Esempio della squadra *RC*



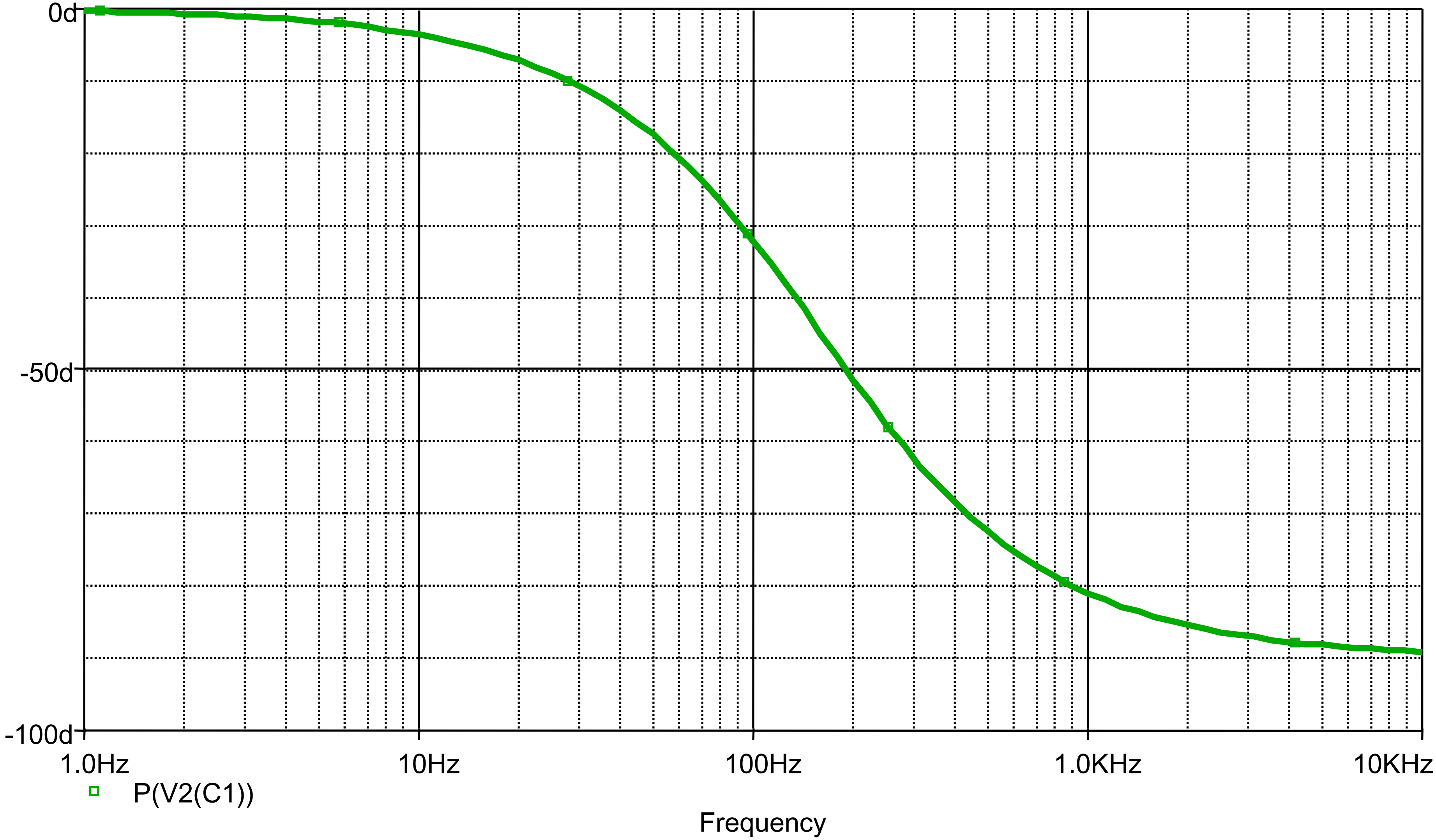
$$\frac{1}{2\pi RC} = 159.1$$

$$A(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega RC} = \frac{1}{1 + j2\pi RCf}$$

Esempio della squadra *RC*



Esempio della squadra *RC*



Fatto & Da fare

- Definizioni relative agli amplificatori
- Tipi di amplificatori
- Unidirezionalità e altre condizioni di idealità
- Equivalenza tra i modelli
- Amplificatori in cascata
- Risposta in frequenza

- Amplificatori a transistori bipolari
- Amplificatori a transistori a effetto di campo