

Amplificatori

Concetti generali

L'amplificatore è un quadripolo che trasmette al carico il segnale di ingresso, lasciandone inalterata la forma, ma elevandone il livello di potenza a spese dell'alimentazione continua.

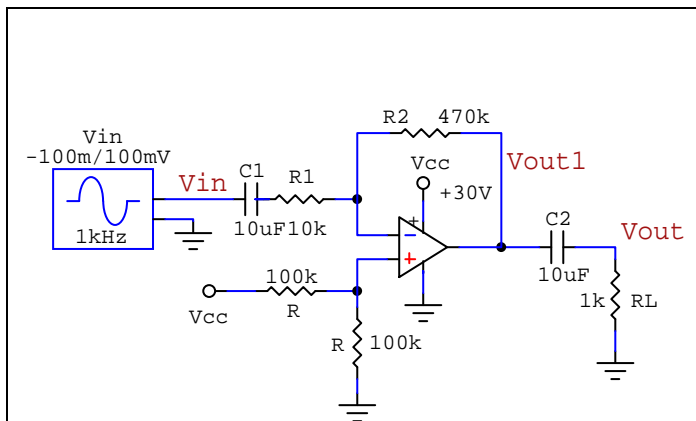


Fig.1

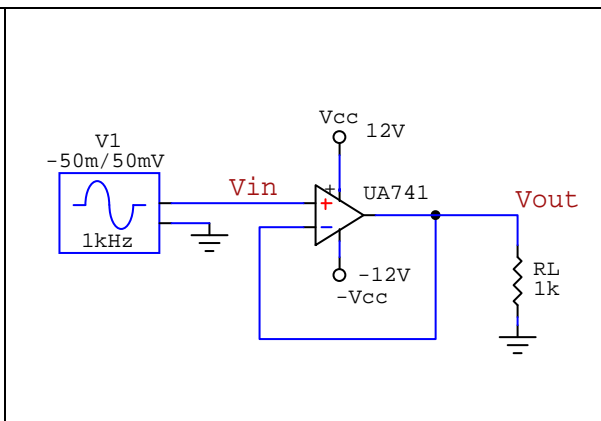


Fig.2

L'alimentazione continua può essere singola o duale. In fig.1 abbiamo un esempio di amplificatore a singola alimentazione; l'amplificatore di fig.2 è a doppia alimentazione. Ovviamente, tutte le volte che si può, si preferisce usare la singola alimentazione.

Per elevare il livello di potenza, l'amplificatore può:

- elevare sensibilmente il livello di tensione, lasciando pressochè inalterato il livello di corrente
- elevare sensibilmente il livello di corrente, lasciando pressochè inalterato quello di tensione
- elevarli entrambi

In definitiva, l'amplificatore può non amplificare in tensione, oppure in corrente purchè amplifichi la potenza del segnale.

Nel corso del nostro studio noi:

- considereremo l'amplificatore come un blocco funzionale, senza preoccuparci della sua costituzione interna, almeno nella fase iniziale
- privilegeremo l'analisi a regime sinusoidale perché anche i segnali più complessi, alla fine, sono costituiti da segnali armonici.

L'amplificatore (Figg.1,2) è pilotato da una sorgente che fornisce il segnale da amplificare e, a sua volta, fornisce il segnale amplificato ad un utilizzatore (o carico); la sorgente, di solito, è rappresentata dal suo bipolo di Thevenin.

Accoppiamento RC e accoppiamento diretto

A secondo dell'accoppiamento tra amplificatore, sorgente e carico gli amplificatori si suddividono in:

- amplificatori in continua, o ad accoppiamento diretto
- amplificatori di tipo RC, o ad accoppiamento capacitivo o in alternata

Negli amplificatori di tipo RC (fig. 3) sorgente e carico sono accoppiati all'amplificatore capacitivamente. Questo tipo di accoppiamento è il più diffuso e va usato senz'altro negli amplificatori a singola alimentazione; in questo caso, infatti, i terminali di ingresso e di uscita dell'amplificatore si trovano ad un potenziale continuo compreso tra zero e +Vcc.

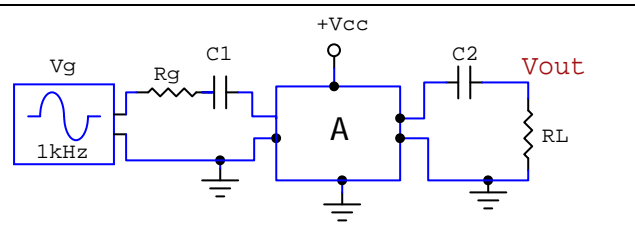


Fig. 3

In queste condizioni, la connessione diretta tra amplificatore, sorgente e carico altererebbe di sicuro la situazione a riposo dell'amplificatore che, con ogni probabilità, malfunzionerebbe; l'inserimento di C1 e C2 risolve il problema poiché essi, a regime continuo, sono dei tasti aperti e staccano, quindi, l'amplificatore da sorgente e carico.

I condensatori C1 e C2 sono estremamente utili perché separano, in continua, l'amplificatore da sorgente e carico; essi devono, però, lasciar passare il segnale lungo il percorso ingresso-uscita; la loro reattanza deve essere, perciò, trascurabile alla più bassa frequenza di uso dell'amplificatore. La capacità di C1 e C2 deve essere, quindi, sufficientemente elevata.

L'accoppiamento RC non si può usare quando il segnale da amplificare varia molto lentamente; i segnali di frequenza molto bassa, infatti, non riescono a passare attraverso i condensatori di accoppiamento. In questo caso si ricorre agli amplificatori in continua (fig. 4) in cui sorgente e carico sono accoppiati direttamente all'amplificatore.

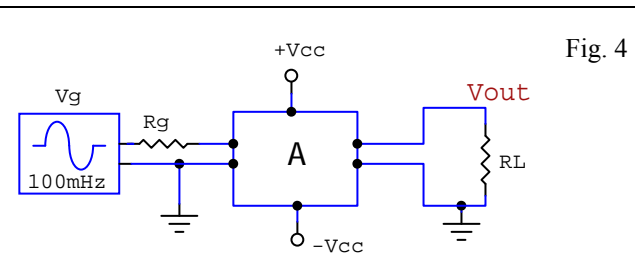


Fig. 4

Negli amplificatori in continua si fa in modo che i terminali di ingresso e di uscita dell'amplificatore si trovino a zero Volt continui; perciò è necessario usare una doppia alimentazione (molto spesso duale). In questo modo l'inserimento di sorgente e carico non altera la situazione a riposo poiché, dal punto di vista della continua, sorgente e carico sono "come cortocircuitati"

I trasduttori di temperatura, di umidità etc forniscono segnali che variano molto lentamente nel tempo; esattamente come le grandezze fisiche da essi convertite in segnali elettrici. I segnali che escono da questi trasduttori non sono in grado di passare attraverso un condensatore di accoppiamento, di capacità usuale, e vanno perciò amplificati da un amplificatore in continua.

In definitiva, il tipo di accoppiamento da utilizzare va scelto in base alla frequenza del segnale da amplificare; negli amplificatori audio ($f > 20\text{Hz}$) si può usare tranquillamente l'accoppiamento RC (e la singola alimentazione)

Comportamento in frequenza

Il comportamento dell'amplificatore a regime sinusoidale è influenzato dalla presenza (eventuale) dei condensatori di accoppiamento e da quella, inevitabile, delle capacità parassite.

Accanto abbiamo lo schema elettrico di un amplificatore RC a BJT; in questo circuito C1 e C2 sono condensatori di accoppiamento (messi da noi e scelti in base a criteri che vedremo). Cp1 e Cp2 rappresentano delle capacità parassite collocate in parallelo all'ingresso e all'uscita; esse, nella realtà, non compaiono negli schemi elettrici e sono dovute ai cavi di connessione, a fenomeni che avvengono nelle giunzioni del BJT etc..

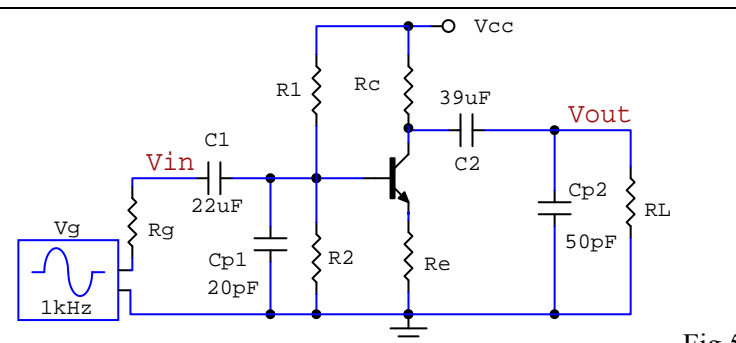


Fig.5

e sono inevitabili (oltre che indesiderate).

C1 e C2 ostacolano il segnale nel suo trasferimento dall'ingresso verso l'uscita, tanto più quanto più elevata è la loro reattanza; cioè quanto più bassa è la frequenza del segnale che stiamo amplificando. In buona sostanza, C1 e C2 tagliano il guadagno dell'amplificatore alle basse frequenze.

Cp1 e Cp2, essendo di piccolo valore, si attivano a frequenze elevate e cominciano a cortocircuitare sia l'ingresso che l'uscita dell'amplificatore; in definitiva, le capacità parassite tagliano il guadagno dello amplificatore alle alte frequenze.

In Fig. 6 è riportato l'andamento del guadagno dell'amplificatore di Fig. 5 al variare della frequenza del segnale applicato in ingresso. L'amplificatore, come i filtri passa banda, ha due frequenze di taglio: una inferiore f_L ed una superiore f_H .

Come abbiamo appena visto, il taglio alle basse frequenze, e quindi la frequenza di taglio inferiore f_L , sono determinati dai condensatori esterni C1 e C2.

La frequenza di taglio superiore f_H , come il taglio alle alte frequenze, è dovuta alle capacità parassite.

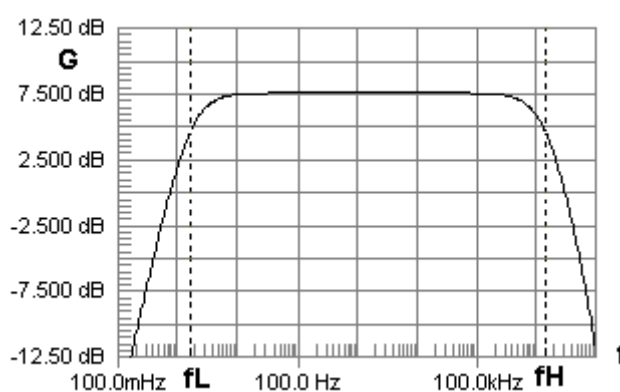


Fig. 6

Alle frequenze di taglio, il guadagno di tensione dell'amplificatore diminuisce del 30% rispetto al suo valore massimo (indicando con A_o l'amplificazione massima, alle due frequenze di taglio l'amplificazione diventa $A_o/\sqrt{2}$)

Se l'amplificazione, o guadagno, è espressa in dB essa, alle due frequenze di taglio, diminuisce di 3 dB rispetto al suo massimo valore.

Negli amplificatori in continua, come quello di Fig. 2, i condensatori di accoppiamento sono assenti; nella risposta in frequenza dell'amplificatore manca, allora, il taglio alle basse frequenze e l'amplificatore si comporta come un filtro passa basso (attivo).

In figura 7 è riportato l'andamento del guadagno di un amplificatore in continua al variare della frequenza del segnale applicato in ingresso; essa evidenzia soltanto il taglio alle alte frequenze e la presenza della sola frequenza di taglio superiore f_H , dovuta alle solite e inevitabili capacità parassite.

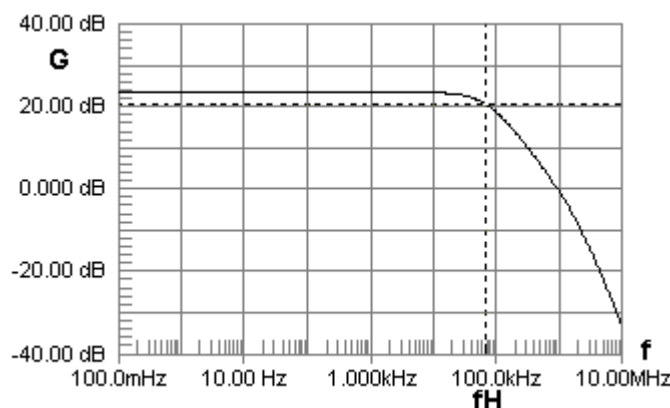


Fig.7

Per larghezza di banda BW , o banda passante, dell'amplificatore, si intende la zona di frequenze compresa tra la frequenza di taglio inferiore e quella superiore, cioè $BW = f_H - f_L$

Il campo di frequenze in cui opera l'amplificatore si può suddividere in tre " sottocampi ":

- le basse frequenze (BF) in cui agiscono solo i condensatori esterni ma non le capacità parassite; per intenderci le BF sono quelle per cui $f < f_L$. Alle BF, le capacità parassite sono, ovviamente, dei tasti aperti.
- le alte frequenze (AF) in cui agiscono solo le capacità parassite; i condensatori esterni a queste frequenze sono ampiamente dei cortocircuiti. Le AF sono quelle per cui $f > f_H$
- le medie frequenze, o frequenze di centro banda, sono le frequenze comprese tra le due frequenze di taglio. Alle medie frequenze, i condensatori esterni sono ormai dei cortocircuiti; le capacità parassite, invece, non hanno ancora cominciato ad agire.

Circuito statico e circuito dinamico

Nell' amplificatore agiscono due sorgenti distinte:

- l'alimentazione continua
- la sorgente che fornisce il segnale da amplificare

Gli effetti delle due sorgenti, punto per punto, si sovrappongono; a noi conviene studiare i singoli effetti separatamente e perciò dell'amplificatore noi tratteremo:

- il circuito statico in cui agisce si fa agire solo l'alimentazione continua
- il circuito dinamico in cui si fa agire soltanto il segnale da amplificare

A sua volta il circuito dinamico si può suddividere in :

- circuito dinamico per le BF in cui compaiono i condensatori esterni; questo circuito viene utilizzato per ricavare la frequenza di taglio inferiore dell'amplificatore
- circuito dinamico alle AF in cui compaiono le capacità parassite; questo circuito viene utilizzato per ricavare la frequenza di taglio superiore dell'amplificatore
- circuito dinamico a centro banda, o alle medie frequenze, in cui non compaiono né i condensatori esterni né le capacità parassite; questo circuito viene tracciato per studiare il comportamento dell'amplificatore in banda passante.

È bene chiarire che il circuito statico e il circuito dinamico dell'amplificatore sono dei circuiti di servizio che noi tracciamo sulla carta per semplificarci lo studio dell'amplificatore; nella realtà, il circuito completo dello amplificatore li contiene entrambi. Inoltre:

- nel circuito statico compaiono solo le tensioni e le correnti continue, quelle provocate dall'alimentazione V_{cc}
- nel circuito dinamico compaiono solo le tensioni e le correnti variabili, cioè quelle provocate dalla sorgente di segnali v_g .

Esempio di circuito statico e dinamico

A titolo di esempio, tratteremo il circuito statico e il circuito dinamico dell'amplificatore di Fig.5

Per tracciare il **circuito statico** lasciamo agire solo l'alimentazione continua V_{cc} , cortocircuitando la sorgente v_g che fornisce il segnale da amplificare; in queste condizioni, lo schema del circuito si può ricondurre a quello di una semplice rete VDB (Fig.8).

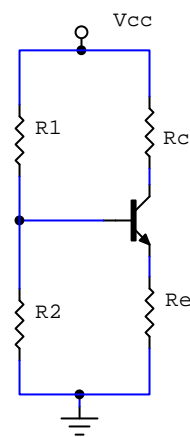


Fig.8

Per tracciare il **circuito dinamico relativo alle medie frequenze**, bisogna:

- cortocircuitare V_{cc} (solo sulla carta!)
 - considerare C_1 e C_2 dei cortocircuiti
 - lasciare aperte le capacità parassite
- In queste condizioni la linea di alimentazione continua diventa massa, dinamicamente; R_1 ed R_2 finiscono in parallelo, lo stesso accade a R_c e R_L e si ottiene il circuito dinamico di Fig.9.

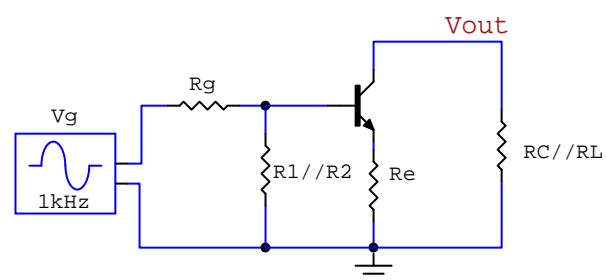


Fig.9

Per tracciare il **circuito dinamico relativo alle basse frequenze**, bisogna:

- cortocircuitare V_{cc} (solo sulla carta!)
- **lasciare agire C1 e C2**
- lasciare aperte le capacità parassite

In queste condizioni, si ottiene il circuito dinamico di Fig.10.

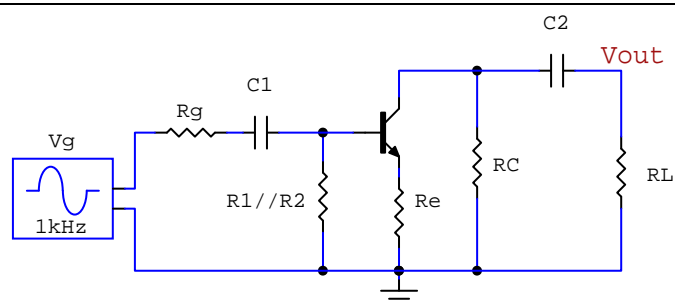


Fig.10

Per tracciare il **circuito dinamico relativo alle alte frequenze**, bisogna:

- cortocircuitare V_{cc} (solo sulla carta!)
- considerare C1 e C2 dei cortocircuiti
- **lasciare agire le capacità parassite**

In queste condizioni, si ottiene il circuito dinamico di Fig.11.

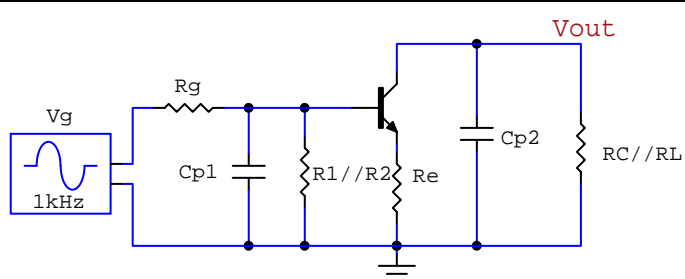


Fig.11

Analisi a centro banda

Effettuare l'analisi a centro banda significa andare a vedere come l'amplificatore si comporta, nei confronti del segnale da amplificare, in banda passante.

Per cominciare, è necessario tracciare il circuito dinamico relativo alle medie frequenze. Noi, anche stavolta, tratteremo l'amplificatore come un blocco funzionale (Fig.12)

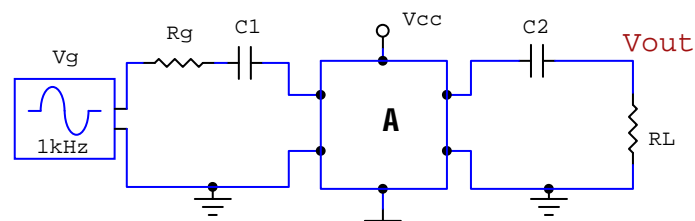


Fig.12

Nel circuito dinamico alle medie frequenze (Fig.13)

- V_{in} e i_{in} sono, rispettivamente, la variazione della tensione e della corrente di ingresso rispetto al valore di riposo
- V_{out} e i_{out} sono, rispettivamente, la variazione della tensione e della corrente di uscita rispetto al valore di riposo

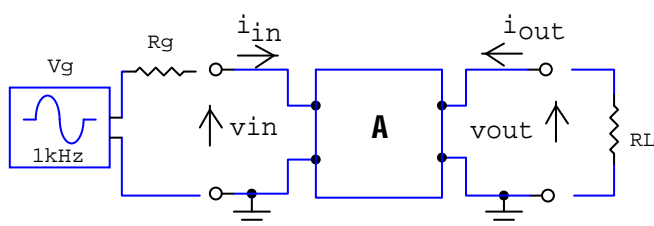


Fig.13

L'amplificatore è pilotato dalla sorgente di segnale, la quale è costretta a fornire all'ingresso dell'amplificatore la tensione V_{in} e la corrente i_{in} , necessari per farlo funzionare. L'ingresso dell'amplificatore si comporta, perciò, come una resistenza, di valore R_{in} , che assorbe tensione e corrente dall'amplificatore; R_{in} è la resistenza di ingresso dell'amplificatore.

La resistenza di ingresso R_{in} dell'amplificatore è il rapporto tra la tensione e la corrente assorbita; cioè:

$$R_{in} = \left. \frac{V_{in}}{i_{in}} \right|_{R_{L \text{ inserita}}}$$

In genere, ma non sempre, il valore di R_{in} varia a secondo del carico inserito.

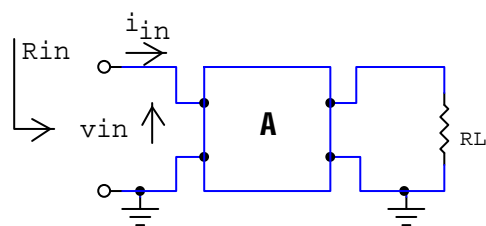


Fig.14

In modo analogo, la resistenza di uscita dell'amplificatore è la resistenza vista dai morsetti di uscita, avendo disattivato la sorgente di segnale; cioè con i morsetti di ingresso chiusi su R_g . Allora:

$$R_{out} = \left. \frac{V_{out}}{i_{out}} \right|_{R_g \text{ inserita}}$$

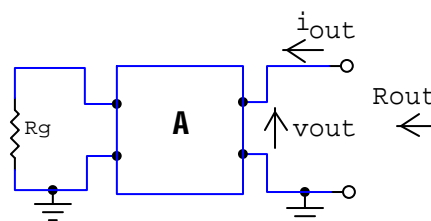


Fig.15

Si definisce amplificazione di tensione intrinseca, o guadagno di tensione intrinseco, il rapporto tra V_{out} e V_{in} ; cioè

$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}}$$

A_v dipende dal valore di R_L ed è massima quando l'uscita è a vuoto.

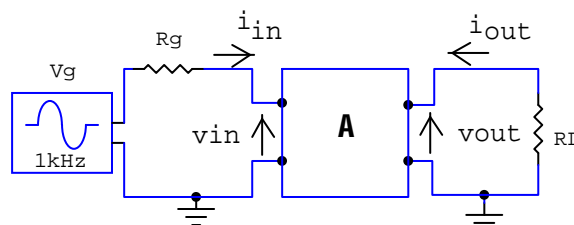


Fig.16

L'amplificazione totale di tensione A_{vt} è il rapporto tra la tensione di uscita e quella fornita dalla sorgente;

cioè: $A_{vt} = \frac{V_{out}}{V_g}$; l'amplificazione totale A_{vt} è minore di quella intrinseca A_v perché la tensione v_g , prima di arrivare all'ingresso dell'amplificatore, viene attenuata (una parte di R_g rimane su R_{in}).

L'amplificazione di corrente, o guadagno di corrente, è il rapporto tra i_{out} e i_{in} (Fig.16); cioè:

$$A_i = \frac{i_{out}}{i_{in}}$$

Anche l'amplificazione di corrente dipende dal carico ed è massima quando l'uscita è in cortocircuito. L'amplificazione di corrente può essere ricavata da quella di tensione; infatti:

$$A_i = \frac{i_{out}}{i_{in}} = \frac{-V_{out}/R_L}{V_{in}/R_{in}} = -A_v * \frac{R_{in}}{R_L}$$

Osserviamo che se $R_L = R_{in}$ l'amplificazione di tensione e quella di corrente sono numericamente uguali; cioè $A_v = |A_i|$

L'amplificazione, o guadagno di potenza, è il rapporto tra la potenza P_{out} , ceduta al carico R_L , e la potenza P_{in} , assorbita dall'ingresso dell'amplificatore; cioè:

$$A_p = G_p = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{V_{outeff}^2 / R_L}{V_{ineff}^2 / R_{in}} = A_v^2 * \frac{R_{in}}{R_L} = A_v * A_v * \frac{R_{in}}{R_L} = A_v * |A_i|$$

Tenendo presente che $A_i = -A_v * \frac{R_{in}}{R_L}$ e quindi $A_v = -A_i * \frac{R_L}{R_{in}}$, il guadagno di potenza si può scrivere anche come :

$$A_p = G_p = \frac{P_{out}}{P_{in}} = A_i^2 * \frac{R_L}{R_{in}}$$

Osserviamo che, se $R_L = R_{in}$, allora $A_p = A_v^2 = A_i^2$

In tutti gli amplificatori, il guadagno di tensione oppure quello di corrente (uno solo dei due) può essere inferiore a 1; il guadagno di potenza, però, deve essere necessariamente maggiore di 1

Le tre amplificazioni appena definite possono essere espresse in decibel (dB)

Il guadagno di tensione in decibel è definito nel modo seguente come $G_{v_{dB}} = 20 \text{Log} A_v$. La scala logaritmica è più compressa rispetto a quella lineare; infatti quando il guadagno di tensione varia di una decade, quello in decibel varia solo di 20dB, come mostra la tabella seguente:

G_v	0.001	0.01	0.1	1	10	100	1000
G_{v_{dB}}}	-60dB	-40dB	-20 dB	0 dB	+20 dB	+40 dB	+60 dB

Il guadagno di corrente in decibel è definito in modo analogo a quello di tensione; cioè :

$G_{i_{dB}} = 20 \text{Log} A_i$; anche in questo caso, quando il guadagno varia di una decade, quello in decibel varia di 20dB.

Il guadagno in dB di potenza è definito dalla relazione $G_{p_{dB}} = 10 \text{Log} A_p$; osserviamo che, quando il guadagno di potenza varia di una decade, il corrispondente guadagno in decibel varia solo di 10dB, come mostra la tabella che segue:

G_p	0.001	0.01	0.1	1	10	100	1000
G_{p_{dB}}}	-30dB	-20dB	-10 dB	0 dB	+10 dB	+20 dB	+30 dB

Alle frequenze di taglio dell'amplificatore (o di un qualsiasi filtro attivo o passivo) il guadagno di tensione

assume, per definizione, il valore $A_v = \frac{A_{v_{max}}}{\sqrt{2}}$, dove $A_{v_{max}}$ è il guadagno in banda passante; in pratica,

alle frequenze di taglio il guadagno di tensione diventa il 70% del valore che ha in banda passante.

Di conseguenza, alle frequenze di taglio, il guadagno in dB assume il valore:

$$G_{v_{dB}} = 20 \text{Log} A_v = 20 \text{Log} \left(\frac{A_{v_{max}}}{\sqrt{2}} \right) = 20 \text{Log} A_{v_{max}} - 20 \text{Log} \sqrt{2} = G_{v_{max}} - 3 \text{dB}$$

In sostanza, alle frequenze di taglio, il guadagno di tensione si riduce di 3dB rispetto al valore che esso assume in banda passante.

Vista la proporzionalità tra il guadagno di tensione e quello di corrente, anche quest'ultimo, alle frequenze di

taglio, assume il valore $Ai = \frac{Ai_{max}}{\sqrt{2}}$, dove Ai_{max} è il guadagno di corrente in banda passante.

Ovviamente, anche il guadagno di corrente in dB, alle frequenze di taglio, si riduce di 3dB rispetto al valore assunto in banda passante.

Alle frequenze di taglio il guadagno di potenza assume il valore:

$$Ap = Av * |Ai| = \frac{Av_{max}}{\sqrt{2}} * \frac{|Ai_{max}|}{\sqrt{2}} = \frac{Ap_{max}}{2}$$

Quindi, alle frequenze di taglio, il guadagno di potenza si **dimezza** rispetto al valore in banda passante. Invece, il guadagno di potenza in decibel assume il valore:

$$Gp_{dB} = 10 \text{Log} Ap = 10 \text{Log} \left(\frac{Ap_{max}}{2} \right) = 10 \text{Log} Ap_{max} - 10 \text{Log} 2 = Gp_{max} - 3 \text{dB}$$

In definitiva, anche il guadagno di potenza in dB, alle frequenze di taglio, si riduce di 3 dB rispetto al valore in banda passante.

Sintetizzando, alle frequenze di taglio:

- il guadagno di tensione e di corrente si riducono del 30% rispetto al valore in banda passante; quello di potenza si dimezza
- i guadagni in dB di tensione, corrente e potenza si riducono di 3dB, sempre rispetto al valore in banda passante.

Circuito equivalente dell'amplificatore

Di ogni amplificatore conviene dare un circuito equivalente che descriva il comportamento, a centro banda, dell'amplificatore stesso nei confronti della sorgente e del carico. Per tracciare questo circuito basta tener presente che:

- l'ingresso dell'amplificatore assorbe tensione e corrente dalla sorgente; quindi si comporta come una resistenza di valore R_{in}
- l'amplificatore fornisce tensione e corrente al carico; quindi, il suo comportamento nei confronti di quest'ultimo può essere descritto da un bipolo equivalente di Thevenin (o di Norton)

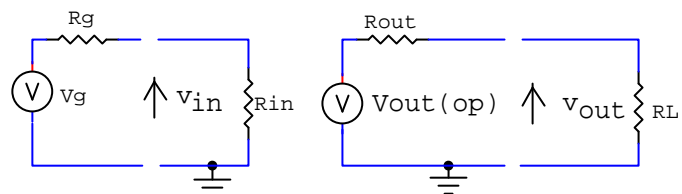


Fig.17

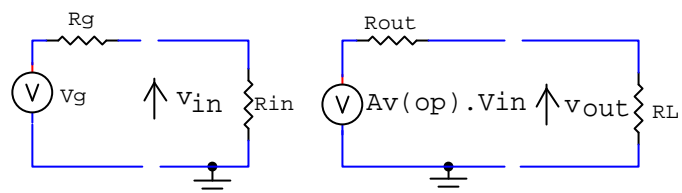


Fig.18

Alla luce di queste considerazioni e del fatto che $Av(op) = \frac{Vout(op)}{Vin}$ e quindi $Vout(op) = Av(op) * Vin$ otteniamo il circuito equivalente di Fig. 17 o, meglio, quello di Fig.18

Nel circuito equivalente di Fig. 18 l'amplificatore è stato descritto come un generatore di tensione comandato

dalla tensione di ingresso; in realtà avremmo potuto descriverlo come un generatore di tensione (o di corrente) comandato dalla tensione (o dalla corrente di ingresso).

A questo punto possiamo calcolare l' amplificazione di tensione intrinseca A_v e quella complessiva A_{vt} al variare di R_L . Osserviamo (Fig.19) che

$$v_{out} = A_{v(op)} * v_{in} * \frac{R_L}{R_{out} + R_L}$$

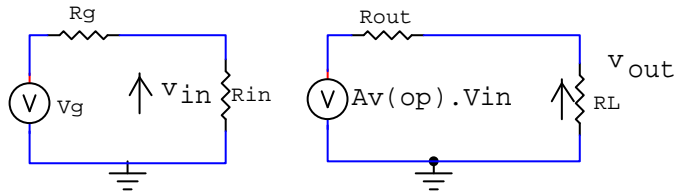


Fig.19

Da qui ricaviamo:

$$A_v = \frac{v_{out}}{v_{in}} = A_{v(op)} * \frac{R_L}{R_{out} + R_L} = A_{v(op)} * \alpha_{out}$$

in cui $\alpha_{out} = \frac{R_L}{R_{out} + R_L}$ rappresenta l'attenuazione di tensione nella maglia di uscita dell' amplificatore.

Se teniamo presente che $v_{in} = v_g * \frac{R_{in}}{R_g + R_{in}}$ otteniamo $v_{out} = A_{v(op)} * v_g * \frac{R_{in}}{R_g + R_{in}} * \frac{R_L}{R_{out} + R_L}$ per cui

$$A_{vt} = \frac{v_{out}}{v_g} = A_{v(op)} * \frac{R_{in}}{R_g + R_{in}} * \frac{R_L}{R_{out} + R_L} = A_{v(op)} * \alpha_{in} * \alpha_{out}$$

in cui $\alpha_{in} = \frac{R_{in}}{R_{in} + R_g}$ è l'attenuazione di tensione subita dal segnale nella maglia di ingresso.

In sintesi:

- l' amplificazione intrinseca di tensione A_v (quella subita da v_{in} nel trasferimento dall' ingresso dell' amplificatore al carico) è data dal prodotto tra l' amplificazione di tensione a vuoto (la massima possibile) e l' attenuazione di tensione α_{out} subita dal segnale nella maglia di uscita
- l' amplificazione complessiva di tensione A_{vt} (quella subita dal segnale nel trasferimento dalla sorgente al carico) è data dal prodotto tra l' amplificazione di tensione a vuoto (la massima possibile) per l' attenuazione di tensione α_{in} subita dal segnale nella maglia di ingresso e l' attenuazione di tensione α_{out} subita dal segnale nella maglia di uscita.