

## La retroazione negli amplificatori

- Retroazionare un amplificatore ( $A$ ) significa sottrarre (o sommare) al segnale d'ingresso ( $S_i$ ) il segnale di retroazione ( $S_r$ ) ottenuto dal segnale d'uscita ( $S_u$ ) mediante un quadripolo di retroazione (*feedback*) ( $\beta$ ), come illustrato nello schema a blocchi di FIGURA 1.

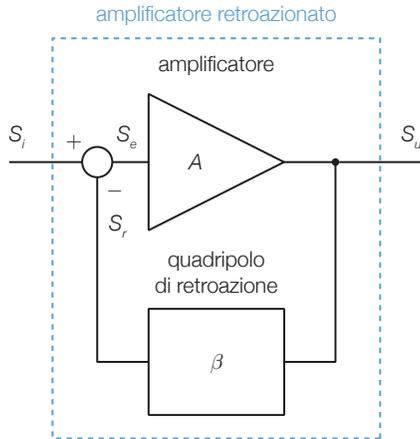


FIGURA 1 Schema a blocchi di un amplificatore retroazionato.

Il segnale errore  $S_e$  all'ingresso dell'amplificatore  $A$  è dato da  $S_e = S_i - S_r$ . I segnali, al momento indicati con i simboli  $S_i$ ,  $S_r$ ,  $S_e$  e  $S_u$ , possono essere tensioni o correnti, tuttavia continueremo a chiamare amplificazione o guadagno il rapporto tra i segnali all'uscita e all'ingresso di un quadripolo, anche se dimensionalmente tale rapporto risulta un'impedenza o un'ammettenza.

Per lo studio della retroazione negli amplificatori si forniscono le seguenti definizioni:

- **Amplificazione ad anello aperto  $A$  (open loop gain):** è il guadagno dell'amplificatore in assenza di retroazione

$$A = \frac{S_u}{S_e} \quad (1)$$

coincidente con il guadagno dell'amplificatore base  $A$ . Infatti se  $S_r = 0$  si ha  $S_e = S_i$ .

- **Fattore di retroazione  $\beta$ :** è il guadagno del quadripolo di retroazione:

$$\beta = \frac{S_r}{S_u} \quad (2)$$

che assume valori reali  $\leq 1$  se, come accade in genere, il quadripolo di retroazione è costituito da resistori.

- **Amplificazione ad anello chiuso  $G$**  (*closed loop gain*): è il guadagno dell'amplificatore retroazionato:

$$G = \frac{S_u}{S_i} \quad (3)$$

La relazione tra il guadagno ad anello chiuso  $G$  e i parametri  $A$  e  $\beta$  è

$$G = \frac{A}{1 + \beta A} \quad (4)$$

#### DIMOSTRAZIONE

Per ricavare il rapporto  $S_u / S_i$  si osserva che:

$$S_u = AS_e = A(S_i - S_r) = A(S_i - \beta S_u)$$

da cui si ricava:

$$S_u = A(S_i - \beta S_u) \rightarrow S_u(1 + \beta A) = AS_i$$

e quindi:

$$\frac{S_u}{S_i} = \frac{A}{1 + \beta A}$$

- **Guadagno d'anello  $\beta A$**  (*loop gain*): rappresenta il guadagno dell'anello costituito dall'amplificatore  $A$  e dal quadripolo di retroazione  $\beta$ .
- **Retroazione negativa**: ha luogo quando si verifica la condizione:

$$|1 + \beta A| > 1 \quad (5)$$

e quindi, per la (4), il guadagno si riduce rispetto a quello dell'amplificatore  $A$ ; risulta così:

$$G < A \quad (6)$$

Ciò succede poiché, a causa della retroazione, l'ampiezza del segnale errore  $S_e$  all'ingresso dell'amplificatore  $A$  è inferiore all'ampiezza del segnale d'ingresso  $S_i$ :  $|S_e| < |S_i|$ .

La retroazione negativa, detta anche controreazione, è impiegata diffusamente negli amplificatori per gli effetti 'positivi' che provoca su alcuni parametri, come è descritto nel corso dell'appendice.

- **Retroazione positiva**: ha luogo quando si verifica la condizione

$$|1 + \beta A| < 1 \quad (7)$$

e quindi, per la (4), risulta

$$G > A \quad (8)$$

Questa condizione può portare all'instabilità dell'amplificatore e quindi, in genere, viene evitata, a meno che non s'intenda realizzare un oscillatore, come descritto nel VOLUME 3 del corso.

### Effetti della retroazione negativa sui parametri degli amplificatori

La retroazione negativa in un amplificatore, modifica alcuni dei suoi parametri di un fattore  $(1 + \beta A)$ , in particolare:

- **il guadagno diminuisce:**

$$G = \frac{A}{1 + \beta A}$$

come si è già dimostrato in precedenza (4). Questo calo del guadagno non rappresenta un problema, in quanto si dispone di amplificatori (operazionali) con guadagno ad anello aperto elevatissimo e, inoltre, è sempre possibile porre più stadi in cascata per raggiungere il guadagno richiesto.

Se si verifica la condizione  $\beta A \gg 1$ , generalmente soddisfatta nei circuiti ad amplificatore operazionale grazie all'elevato valore di  $A$ , si può trascurare l'unità al denominatore e l'espressione del guadagno ad anello chiuso assume la forma

$$G = \frac{1}{\beta} \quad (9)$$

In questo caso il guadagno ad anello chiuso  $G$  non dipende più da  $A$  (il cui valore è generalmente soggetto a dispersione e derive termiche), ma solo dal fattore di retroazione  $\beta$  cioè dai valori di componenti passivi (resistori) relativamente precisi e stabili. È per questo motivo che il funzionamento di tutti i circuiti analogici con amplificatore operazionale studiati nel CAPITOLO 6 è descritto da relazioni in cui compaiono solo i valori dei componenti passivi esterni all'amplificatore operazionale.

- **La distorsione armonica diminuisce:**

$$THD_r = \frac{THD}{1 + \beta A} \quad (10)$$

dove  $THD$  è la distorsione percentuale dell'amplificatore  $A$ , mentre  $THD_r$  è quella dell'amplificatore retroazionato. La retroazione negativa è determinante per mantenere la distorsione a bassi livelli negli amplificatori di potenza.

- **La larghezza di banda aumenta:** si può dimostrare che, se la risposta in frequenza di un amplificatore ( $A$ ) presenta frequenze di taglio  $f_L$  e  $f_H$ , applicando una retroazione negativa tali frequenze assumono i valori:

$$f_{Lr} = \frac{f_L}{1 + \beta A} \quad \text{e} \quad f_{Hr} = f_H(1 + \beta A) \quad (11)$$

determinando un aumento della larghezza di banda  $BW$  (*bandwidth*), come illustrato nella FIGURA 2.

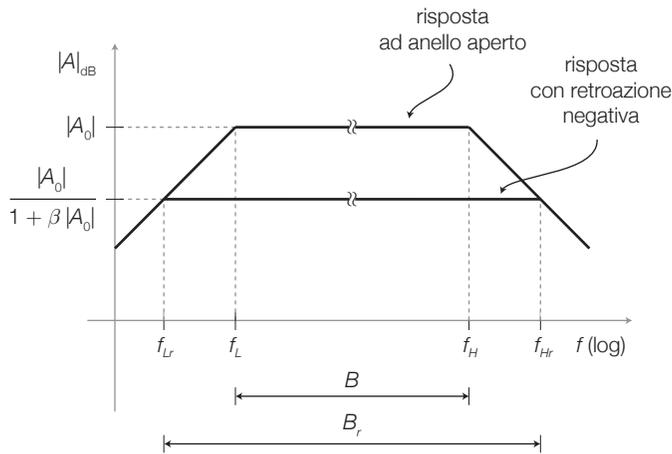


FIGURA 2 Effetto della retroazione negativa sulla larghezza di banda.

Si noti che se  $f_L \ll f_H$ , o in particolare  $f_L = 0$  come succede per gli amplificatori operazionali, si può considerare il valore della larghezza di banda coincidente con la frequenza di taglio superiore:  $BW = f_H$ . In questo caso si verifica che in presenza di retroazione negativa il *prodotto del guadagno per la larghezza di banda* è costante per qualunque valore di  $\beta$ . Tale prodotto costituisce un parametro importante degli amplificatori operazionali (CAPITOLO 6) e viene indicato con *GBW* (*gain bandwidth*):

$$GBW = G \cdot BW_r = A \cdot BW = \text{cost} \quad (12)$$

dove  $BW$  e  $BW_r$  rappresentano la larghezza di banda ad anello aperto e con retroazione negativa (anello chiuso).

#### DIMOSTRAZIONE

Mediante le espressioni (4) e (11) si ricava:

$$G \cdot BW_r = \frac{A}{1 + \beta A} f_H (1 + \beta A) = A f_H = A \cdot BW = GBW$$

- **Diminuisce l'effetto sul segnale dei rumori generati all'interno dell'amplificatore.**
- Le **resistenze d'ingresso e d'uscita** si modificano a seconda del tipo di retroazione, come illustrato in seguito.

Si può quindi concludere che la retroazione negativa riduce il guadagno, rendendolo però preciso e stabile in quanto dipendente solo dai valori dei resistori del quadripolo  $\beta$ , e produce effetti positivi su altri parametri caratteristici degli amplificatori (distorsione, larghezza di banda, rumore).

## I tipi di retroazione negativa

Negli amplificatori, come si è già detto, i segnali  $S_i$ ,  $S_r$ ,  $S_e$  e  $S_u$  possono essere tensioni o correnti.

- ▶ A seconda della grandezza  $S_u$  all'ingresso del quadripolo  $\beta$ , la retroazione si definisce:
  - *retroazione di tensione*: se  $S_u$  è una tensione ( $v_u$ ) e quindi togliendo il carico la retroazione si mantiene;
  - *retroazione di corrente*: se  $S_u$  è una corrente ( $i_u$ ) e quindi togliendo il carico la retroazione si annulla.
- ▶ A seconda delle grandezze  $S_i$  e  $S_r$  che si sommano algebricamente nel nodo di confronto si definisce:
  - *confronto serie*: se nel nodo avviene una somma algebrica di tensioni ( $v_i$  e  $v_r$ );
  - *confronto parallelo*: se nel nodo avviene una somma algebrica di correnti ( $i_i$  e  $i_r$ ).

Combinando le possibilità appena elencate si possono distinguere i seguenti tipi di retroazione (FIGURA 3):

- *tensione – serie*;
- *tensione – parallelo*;
- *corrente – serie*;
- *corrente – parallelo*.

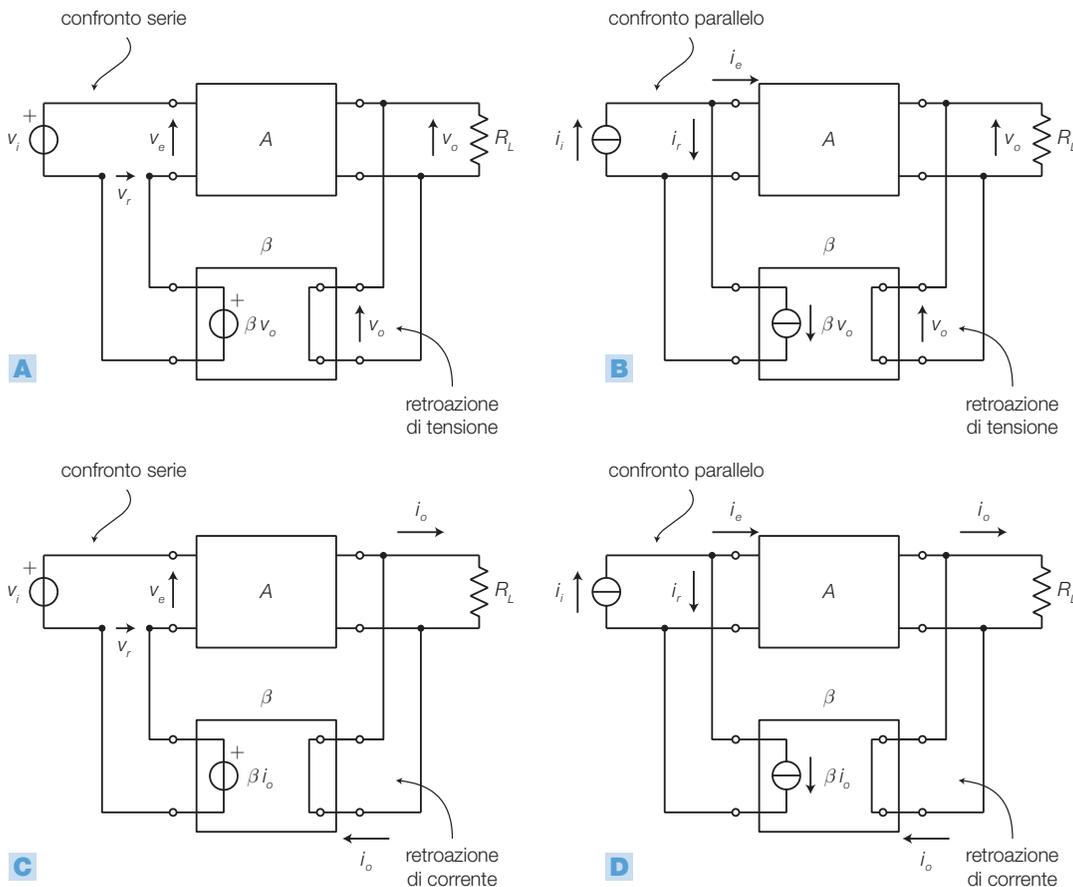


FIGURA 3 Tipi di retroazione:  
**A)** tensione – serie;  
**B)** tensione – parallelo;  
**C)** corrente – serie;  
**D)** corrente – parallelo.

Il tipo di retroazione negativa applicata modifica i valori delle resistenze d'ingresso e d'uscita dell'amplificatore nel modo seguente:

- **Resistenza d'ingresso:**

- *Confronto serie*: la resistenza d'ingresso aumenta

$$R_{ir} = R_i(1 + \beta A) \quad (13)$$

- *Confronto parallelo*: la resistenza d'ingresso diminuisce

$$R_{ir} = \frac{R_i}{(1 + \beta A)} \quad (14)$$

- **Resistenza d'uscita:**

- *Retroazione di tensione*: la resistenza d'uscita diminuisce

$$R_{or} = \frac{R_o}{(1 + \beta A')} \quad (15)$$

- *Retroazione di corrente*: la resistenza d'uscita aumenta

$$R_{or} = R_o(1 + \beta A') \quad (16)$$

dove  $A'$  rappresenta il guadagno a catena aperta dell'amplificatore base in assenza del carico  $R_L$ .

Analizzare la configurazione amplificatore operazionale non invertente in FIGURA 4A.

### SOLUZIONE

Ridisegnando lo schema come in FIGURA 4B si osserva che il circuito realizza una *retroazione tensione - serie*.

Si analizzano i blocchi A e  $\beta$  supponendoli, idealmente, non interagenti e unidirezionali:

- il guadagno A, ad anello aperto, è rappresentato dal guadagno differenziale dell'amplificatore operazionale

$$A = \frac{v_o}{v_e} = \frac{v_o}{v_+ - v_-} = A_{OL}$$

- il quadripolo di retroazione  $\beta$  riceve in ingresso la tensione  $v_o$  e fornisce in uscita la tensione  $v_r$ , localizzata ai capi di  $R_1$ . Osservando che  $R_1$  e  $R_2$  realizzano un partitore di tensione, si ricava il fattore di retroazione

$$\beta = \frac{v_r}{v_o} = \frac{v_o R_1}{R_1 + R_2} = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

Si ricava quindi il guadagno a catena chiusa con la (4):

$$G = \frac{A_{OL}}{1 + \beta A_{OL}} = \frac{A_{OL}}{1 + \frac{R_1}{R_1 + R_2} A_{OL}}$$

Dato il valore elevatissimo di  $A_{OL}$ , si trascura l'unità al denominatore e si ricava

$$G = \frac{1}{\frac{R_1}{R_1 + R_2}} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (17)$$

Si noti che le ipotesi di non interazione tra i blocchi (equivalente a supporre ideali le resistenze d'ingresso e d'uscita dell'amplificatore operazionale) e di guadagno infinito dell'amplificatore operazionale, sono le stesse che hanno permesso di definire il concetto di cortocircuito virtuale, mediante il quale nel PARAGRAFO 6.2 si è ricavata in modo semplice l'espressione (17).

Poiché la retroazione è di tipo tensione - serie, la *resistenza d'ingresso* del circuito retroazionato ( $R_{ir}$ ) è superiore a quella già elevata dell'amplificatore ad anello aperto ( $R_o$ ), e vale (FORMULA 13):

$$R_{ir} = R_i(1 + \beta A_{OL})$$

mentre la *resistenza d'uscita* ( $R_{or}$ ) è inferiore a quella dell'amplificatore ad anello aperto ( $R_o$ ) e vale (FORMULA 15):

$$R_{or} = \frac{R_o}{(1 + \beta A_{OL})}$$

La *larghezza di banda* (BW) dipende dal GBW dell'amplificatore operazionale utilizzato e dal guadagno che s'intende ottenere dall'amplificatore. Supponendo di impiegare un TL081 ( $GBW = 4$  MHz) e di dimensionare  $R_1$  e  $R_2$  per un guadagno  $G = 40$ , si ottiene

$$BW = \frac{GBW}{G} = 100 \text{ kHz}$$

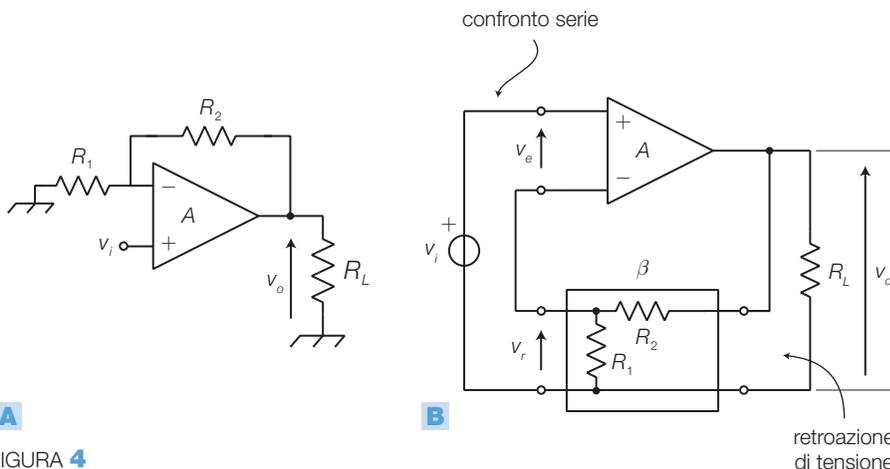


FIGURA 4