

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*) (β), come illustrato nello schema a blocchi di FIGURA 1.

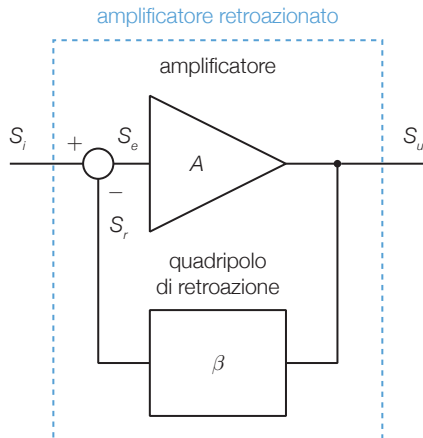


FIGURA 1 Schema a blocchi di un amplificatore retroazionato.

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 β** : è il guadagno del quadripolo di retroazione:

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

che assume valori reali ≤ 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 β 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 βA** (*loop gain*): rappresenta il guadagno dell'anello costituito dall'amplificatore A e dal quadripolo di retroazione β .
- **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 CAPITOLO 5 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 β 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 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.

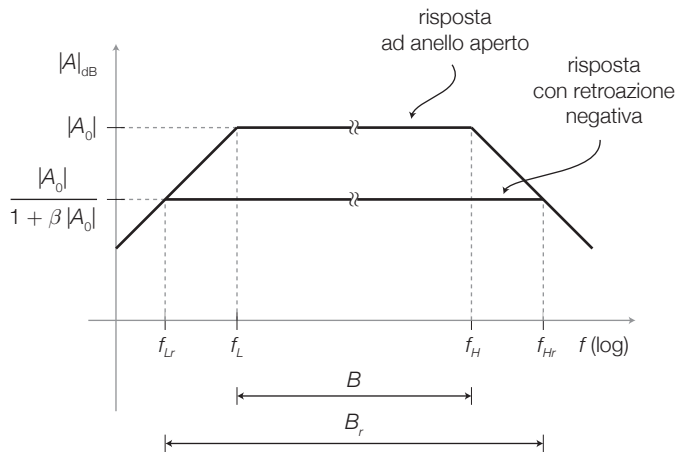


FIGURA 2 Effetto della retroazione negativa sulla larghezza di banda.

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 β . Tale prodotto costituisce un parametro importante degli amplificatori operazionali 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 β , 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 β , 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*.

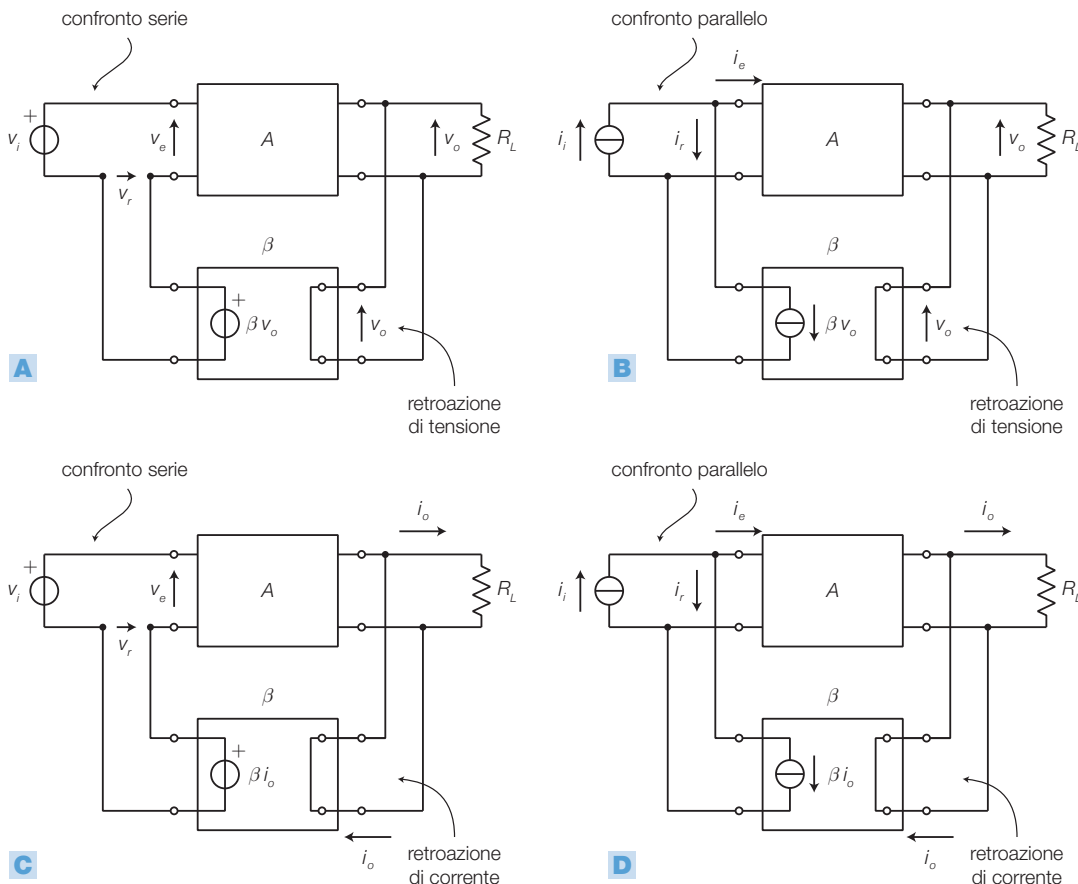


FIGURA 3 Tipi di retroazione:
A) tensione – serie;
B) tensione – parallelo;
C) corrente – serie;
D) corrente – parallelo.

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 β 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 β 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 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_i), 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

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

