

Teoria della Reazione

Concetto di reazione

La tecnica della retroazione (o reazione o feedback) è impiegata in moltissime apparecchiature elettroniche (nei motori, nei regolatori di tensione etc...); noi ci occuperemo soprattutto della retroazione negli amplificatori. Accanto è riportato lo schema a blocchi di un amplificatore retroazionato; per semplicità, supporremo che i blocchi non si caricano a vicenda e che siano unidirezionali, nel senso indicato dalle frecce.

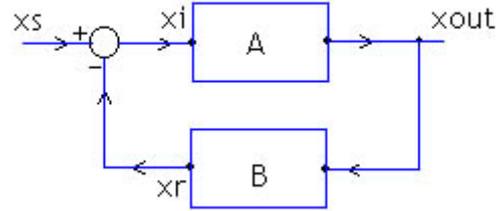


Fig.

1

Nello schema a blocchi distinguiamo:

una catena di andata, il blocco amplificatore A, che trasmette il segnale dall'ingresso verso l'uscita

una catena di ritorno, il blocco B chiamato blocco o quadripolo di reazione, che preleva una parte del segnale xout di uscita e la riporta verso l'ingresso ; il segnale xr uscente dal blocco di reazione si chiama segnale di reazione

un blocco di confronto che effettua, appunto, il confronto tra il segnale xs, fornito dalla sorgente, e il segnale di retroazione; noi supporremo, per convenzione, che il blocco di confronto sia un sottrattore

L'esito del confronto, il segnale xi, è applicato all'ingresso dell'amplificatore. L'amplificatore retroazionato è un esempio di sistema ad anello chiuso; l'anello è quello costituito dalla catena di andata e da quella di ritorno; osserviamo che nei sistemi ad anello chiuso l'uscita xout dell'amplificatore ha la possibilità di modificare il valore del segnale xi che si stabilisce al suo ingresso.

Nei sistemi ad anello aperto l'uscita dell' amplificatore non ha alcun modo di intervenire sul segnale che si stabilisce al suo ingresso; inoltre una variazione percentuale dell'amplificazione A, dovuta alla dispersione delle caratteristiche, all'invecchiamento del dispositivo etc..., si riflette sull'uscita allo stesso modo come mostra la simulazione che segue:



g.2

Fi

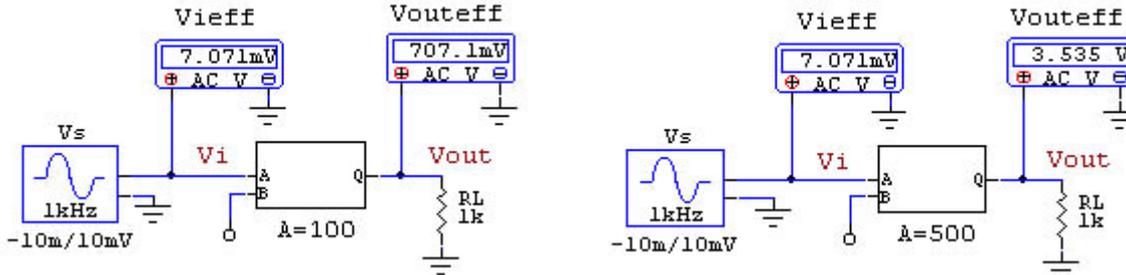


Fig.3

Come possiamo vedere (Fig.3), una variazione di un fattore 5 (del 400%) dell' amplificazione ad anello aperto provoca una variazione di Vouteff nella stessa percentuale.

Negli amplificatori ad anello chiuso dobbiamo distinguere tra:

amplificazione ad anello chiuso (Fig.4); è l'amplificazione complessiva del sistema

$$A_{CL} = \frac{X_{out}}{X_s} \quad \text{Fig.4}$$

amplificazione ad anello aperto (Fig.5); è l'amplificazione del solo blocco A

$$A_{OL} = \frac{X_{out}}{X_i} = A \quad \text{Fig.5}$$

amplificazione di anello (Fig.6); è l'amplificazione che il segnale ottiene nel percorrere l' intero anello di reazione

$$A_{loop} = - \frac{X_r}{X_i} = - A\beta \quad \text{Fig.6}$$

La retroazione è **negativa** quando il segnale Xi che arriva all'ingresso dell'amplificatore è minore di quello fornito dalla sorgente; in questo caso il segnale Xout è minore di quello che avremmo ad anello aperto e risulta: $|A_{cl}| < |A_{ol}|$

La retroazione è **positiva** quando il segnale Xi che arriva all'ingresso dell'amplificatore è maggiore di quello fornito dalla sorgente; in questo caso il segnale Xout è maggiore di quello che avremmo ad anello aperto e risulta: $|A_{cl}| > |A_{ol}|$

Reazione negativa

La simulazione di Fig.7 mostra **un amplificatore reazionato negativamente** in cui l'amplificazione ad anello aperto è 100. Esso è pilotato da una sorgente che fornisce una tensione di valore efficace 7.07mV. La tensione di uscita ha valore efficace **122.7mV**; una parte della tensione di uscita (**5.84mV**) viene riportata verso l'ingresso, mediante il partitore R1-R2, e va a sottrarsi alla tensione fornita dal generatore; il valore efficace del segnale che pilota l'amplificatore è la differenza tra i due (**1.23mV**), decisamente più piccolo di quello fornito dalla sorgente. L'amplificazione ad anello chiuso è allora

$$A_{CL} = \frac{X_{out}}{X_s} = \frac{122.7}{7.07} = 17.3$$

ed è più piccola di quella ad anello aperto.

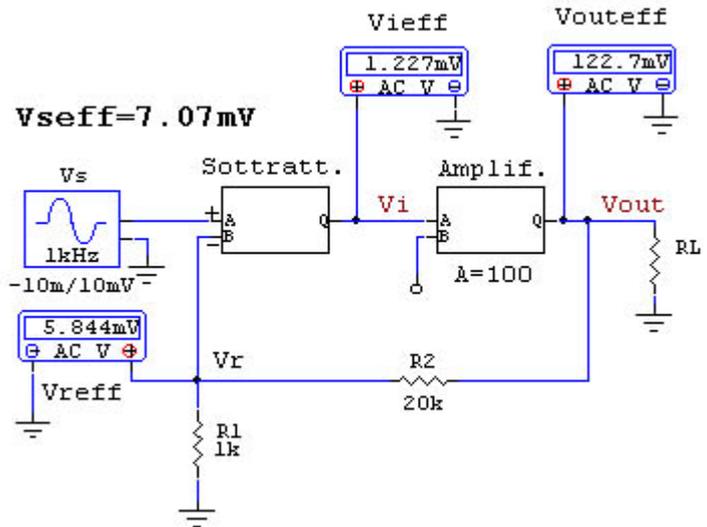


Fig.7

L'amplificazione di anello è : $A_{loop} = \frac{-X_r}{X_i} = -\frac{5.884}{1.227} = -4.79$ ed è negativa; in pratica, in banda passante,

la retroazione è negativa quando l'amplificazione di anello è negativa; quando, cioè, il segnale, nel percorrere l'intero anello di retroazione, subisce uno sfasamento complessivo di 180 gradi.

Osserviamo cosa accade se l'amplificazione ad anello aperto, per un qualunque motivo, aumenta e diventa 500, subendo un aumento del 400%.

Come possiamo notare, l'aumento di A provoca un aumento del segnale di retroazione Vr, che diventa 6.786 mV, e una diminuzione del segnale Vi all'ingresso dell'amplificatore, che diventa 285uV. In sostanza l'aumento di A è contrastato da una diminuzione di Vi e Vout aumenta solo di poco; infatti, il nuovo valore di **Vouteff** è

$$V_{outeff} = A \cdot V_{ieff} = 500 \cdot 285 \mu V = 142.5 mV$$

che corrisponde ad un aumento del 16% soltanto! Il nuovo valore dell'amplificazione ad anello chiuso è:

$$A_{CL} = \frac{V_{out}}{V_s} = \frac{142.5}{7.07} \approx 20.14$$

ed ha subito, anche essa, un aumento del 16%.

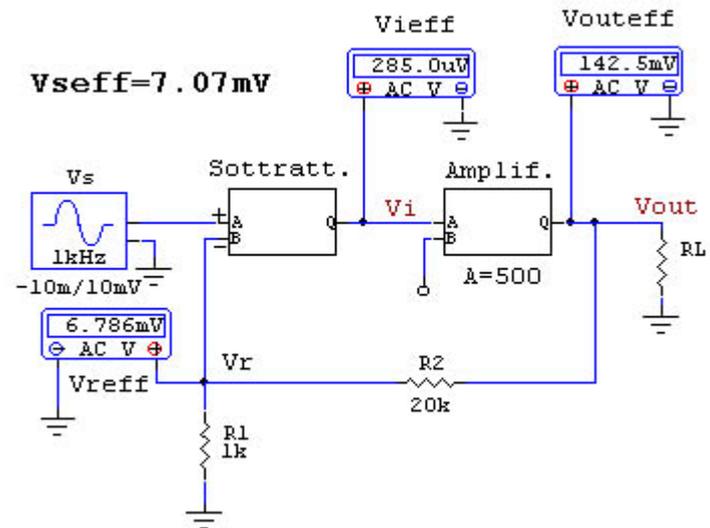


Fig.8

In maniera analoga, se A diminuisce, il sistema si aumenta il segnale di pilotaggio Vi in modo che l'amplificazione ad anello chiuso diminuisca di poco. In definitiva la reazione negativa reagisce alle variazioni di A, variandosi il segnale di pilotaggio in modo opposto; in questo modo la variazione subita dall'amplificazione ad anello chiuso è molto più piccola della variazione subita dall'amplificazione ad anello aperto.

Più in generale la reazione negativa si oppone a tutte le variazioni indesiderate (quelle non provocate da Xs) del segnale di uscita Xout, variandosi il segnale di pilotaggio Xi in modo opposto.

La reazione negativa migliora la stabilità del sistema a spese del guadagno, che diminuisce.

La retroazione positiva si comporta in modo del tutto opposto, come mostra la simulazione di Fig.9, in cui solo una piccola frazione di V_{out}

($1/820$) viene riportata verso l'ingresso e va a sottrarsi al segnale fornito dalla sorgente.

V_r è in opposizione di fase rispetto a V_s perchè l'amplificatore utilizzato è invertente; dalla sottrazione di V_s e V_r risulta un segnale V_i maggiore di V_s ($8.05mV$ di V_i contro $7.07mV$ di V_s) e la retroazione è, perciò, positiva. L'amplificazione ad anello

chiuso è $A_{CL} = \frac{V_{out}}{V_s} = \frac{802.5}{7.07} \approx 114$ ed è maggiore di quella ad anello aperto (100).

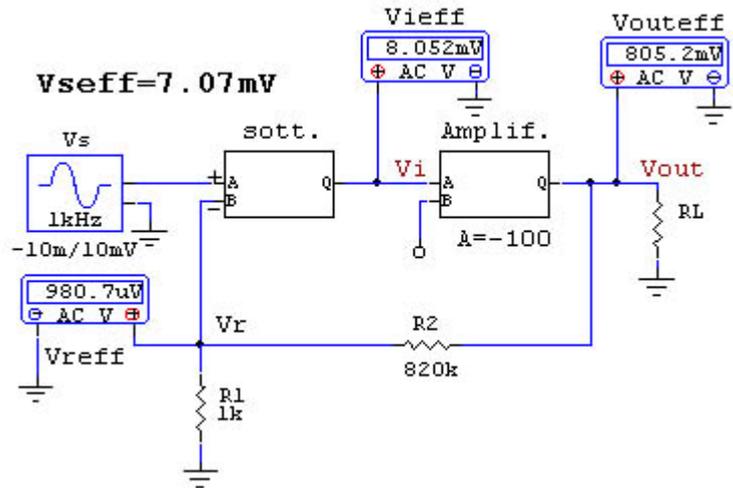


Fig.9

L'amplificazione di anello è : $A_{loop} = \frac{-X_r}{X_i} = -\frac{0.98}{8.052} = 0.12$ ed è positiva; in pratica , in banda passante, la retroazione è positiva quando l'amplificazione di anello è positiva; quando, cioè, il segnale, nel percorrere l'intero anello di retroazione, subisce uno sfasamento complessivo nullo.

Osserviamo cosa accade se l'amplificazione ad anello aperto , per un qualunque motivo, aumenta e diventa 500, subendo un aumento del 400%.

Come possiamo notare, l'aumento di A provoca un aumento del segnale di retroazione V_r , opposto in fase a V_s , che diventa $11.01mV$; e aumenta anche il segnale V_i all' ingresso dell' amplificatore, che diventa $18.08mV$. In sostanza l'aumento di A è accompagnato anche dall' aumento di V_i e V_{out} , perciò, aumenta di molto; infatti, il nuovo valore di **Vouteff** è:

$$V_{outeff} = A V_{ieff} = 500 \times 18.08mV = 9.04V \text{ che}$$

corrisponde ad un aumento del 1023% ! Il nuovo valore dell'amplificazione ad anello chiuso è :

$$A_{CL} = \frac{V_{out}}{V_s} = \frac{9.042}{7.07} \approx 1279$$

ed ha subito, anche essa, un aumento del 1023%

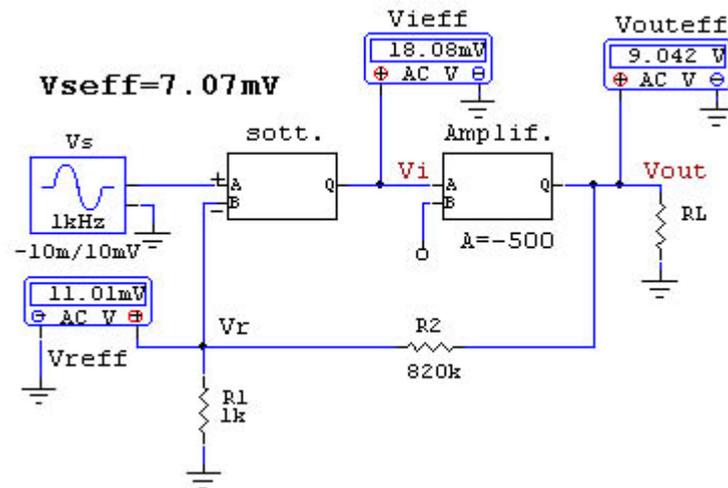


Fig.10

In maniera analoga, se A diminuisce, il sistema si riduce anche il segnale di pilotaggio V_i e l'amplificazione ad anello chiuso diminuisce parecchio. In definitiva la reazione positiva risponde alle variazioni di A , variandosi il segnale di pilotaggio nello stesso senso; in questo modo la variazione subita dalla amplificazione ad anello chiuso è maggiore della variazione subita dall'amplificazione ad anello aperto.

Più in generale la reazione positiva esalta tutte le variazioni indesiderate (quelle non provocate da X_s) del segnale di uscita X_{out} , variandosi il segnale di pilotaggio X_i allo stesso modo.

La reazione positiva aumenta il guadagno ma peggiora la stabilità del sistema. Essa viene impiegata solo in particolari situazioni (ad esempio nei generatori di segnali periodici)

Amplificazione ad anello chiuso

L'amplificazione ad anello chiuso si ricava tenendo presenti le relazioni che caratterizzano i blocchi di Fig.11 :

$$X_{out} = A X_i \quad ; \quad X_r = \beta X_{out} \quad ; \quad X_i = X_s - X_r$$

da cui, per sostituzione, ricaviamo:

$$A_{CL} = \frac{X_{out}}{X_s} = \frac{A}{1 + A\beta} \quad ; \quad X_i = \frac{X_s}{1 + A\beta}$$

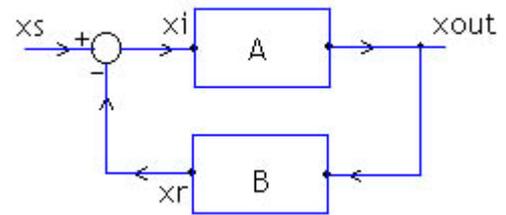


Fig.11

Il termine $1 + A\beta$ si chiama **fattore di reazione** ed è maggiore di 1 se la reazione è negativa ($A_{CL} < A$), minore di 1 se la reazione è positiva ($A_{CL} > A$).

Se nell'amplificatore c'è un forte grado di retroazione negativa ($A\beta \gg 1$) allora $A_{CL} \cong \frac{1}{\beta}$ e quindi l'amplificazione ad anello chiuso, dipendendo quasi esclusivamente da un quadripolo passivo, è molto stabile; nelle stesse condizioni $X_i = \frac{X_s}{1 + A\beta} \approx 0$; ciò significa che, in presenza di un forte grado di retroazione, il segnale che va a pilotare effettivamente l'amplificatore è quasi nullo.

La retroazione positiva è più forte quando $\rightarrow 0$ cioè quando $-A\beta = A_{loop} \rightarrow 1$; in queste condizioni $A_{CL} \rightarrow \infty$ e l'amplificatore, quando $A_{loop} = 1$, è in grado di fornire una tensione di uscita stabile in assenza di sorgente, cioè con $X_s = 0$. Questa è la situazione in cui operano gli oscillatori sinusoidali. Se $A_{loop} > 1$ il segnale, nel percorrere l'anello di retroazione, aumenta continuamente e l'amplificatore diventa instabile.

È interessante stabilire una relazione tra la variazione subita dall'amplificazione ad anello aperto e quella, conseguente, dell'amplificazione ad anello chiuso; per farlo basta derivare l'espressione di A_{CL} ;

si ottiene $\frac{\Delta A_{CL}}{A_{CL}} = \frac{\Delta A / A}{1 + A\beta}$ e si comprende che, in presenza di un forte grado di reazione negativa

($A\beta \gg 1$), l'amplificazione ad anello chiuso varia pochissimo anche quando quella ad anello aperto varia sensibilmente, per qualunque motivo. Da ciò discendono molte proprietà della retroazione negativa.

Effetti della reazione negativa

La reazione negativa **allarga la banda passante**; infatti, sia alle alte frequenze che alle basse, quando l'amplificazione ad anello aperto comincia a diminuire, l'amplificatore, attraverso il blocco di reazione, si aumenta il segnale di pilotaggio; in questo modo A_{CL} rimane costante, entro certi limiti, a spese del guadagno a centro banda, che diminuisce. La larghezza di banda viene aumentata del fattore di reazione $1 + A\beta$; lo stesso di cui viene ridotto il guadagno a centro banda per cui il prodotto tra l'amplificazione a centro banda e la larghezza di banda

(GBW) ha lo stesso valore sia ad anello aperto che ad anello chiuso.

La figura 11 mostra un amplificatore a BJT con uscita sul collettore, in cui la resistenza di emettitore può essere shuntata tutta (S1 spostato verso destra), oppure parzialmente (S1 spostato verso sinistra come in figura).

Nel primo caso l'amplificatore diventa ad emettitore comune ed è ad anello aperto, poichè l'uscita non ha modo di intervenire sul segnale di ingresso. Esso ha guadagno elevato e banda passante piuttosto stretta.

Nel secondo caso otteniamo un amplificatore con retroazione di emettitore, in cui la resistenza R3 effettua una retroazione negativa che riduce il guadagno e allarga la banda passante.

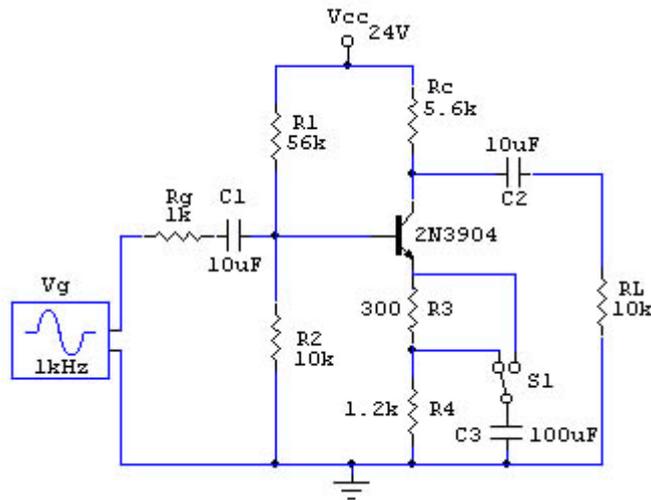


Fig.11

Nella simulazione (Fig. 12), la traccia rossa rappresenta il diagramma di Bode dell'amplificatore ad anello aperto; quella azzurra è relativa all'amplificatore ad anello chiuso .

I risultati della simulazione (Fig. 12) mostrano che l'amplificatore ad anello aperto ha un guadagno di 43.5dB, una frequenza di taglio inferiore di circa 80Hz ed una superiore di circa 650kHz

Nell' amplificatore ad anello chiuso il guadagno a centro banda è circa 20dB, la frequenza di taglio inferiore è circa 7Hz mentre quella di taglio superiore è circa 7MHz. Gli effetti della reazione negativa sulla banda passante e sul guadagno a centro banda sono evidenti.

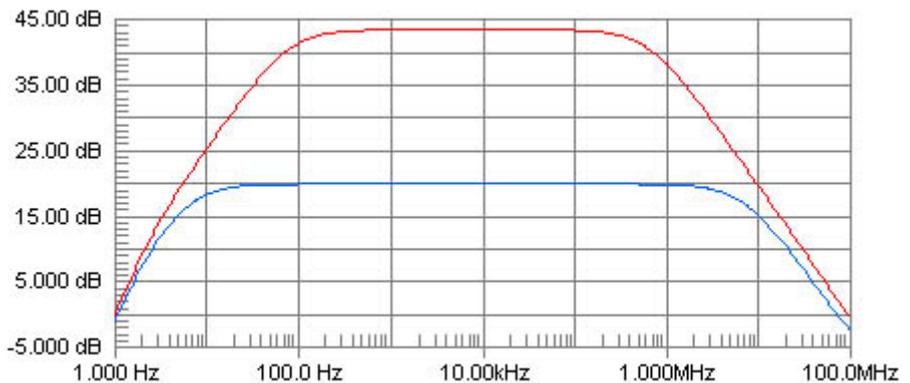


Fig.12

La reazione negativa **riduce la distorsione non lineare** dovuta , appunto, alle non linearità dei dispositivi attivi che compongono gli amplificatori. Essa comporta la dipendenza dell'amplificazione di tensione dalla corrente di collettore (o di drain) . Nell'amplificatore ad emettitore comune, per esempio, l'amplificazione di tensione cresce all'aumentare della corrente di collettore; di conseguenza nella semionda in cui Ic cresce, l'amplificazione aumenta e, viceversa, diminuisce nella semionda in cui Ic diminuisce; l'effetto dalla distorsione è visibile nella forma d'onda della tensione di uscita vout (Fig.13 traccia rossa) perchè una semionda è amplificata più dell'altra.

La reazione negativa riduce la distorsione non lineare, a parità di tensione di uscita, perchè nella semionda in cui l'amplificazione di tensione aumenta, essa provoca una riduzione del segnale di pilotaggio dell' amplificatore; viceversa, nella semionda in cui l'amplificazione di tensione diminuisce, essa provoca un aumento del segnale di pilotaggio. Ciò è visibile nella simulazione di Fig.13 dove le due semionde di vout (tensione di uscita con retroazione, traccia azzurra) sono amplificate pressochè allo stesso modo. Anche la distorsione non lineare viene ridotta del fattore di retroazione; cioè

$$\square D \square_{CL} = \frac{\square D \square_{OL}}{1 \square A\beta}$$

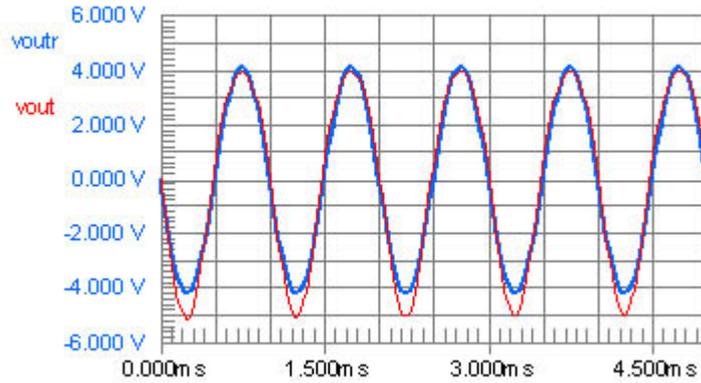


Fig.13

Allo stesso modo, la retroazione negativa riduce tutti i disturbi indesiderati (quelli non provocati dalla sorgente) che hanno origine all'interno dell'anello di retroazione; per esser chiari, il generico disturbo X_n generato all' interno dell'anello viene ridotto del solito fattore di retroazione :

$$\Delta X_n \approx \frac{X_n \Delta OL}{1 \pm AB}$$

Connessione tra amplificatore e blocco di reazione

L'uscita del quadripolo di reazione può essere connessa all'ingresso dell'amplificatore in serie oppure in parallelo.

Nella figura accanto (Fig.14), l'uscita del blocco di reazione è connessa in serie all'ingresso dell' amplificatore.

Come si vede, in questo caso il circuito di ingresso dell'amplificatore è una maglia serie in cui avviene il confronto tra la tensione V_s fornita dalla sorgente e la tensione V_r , fornita dal quadripolo di reazione.

A V_s e V_r sono attribuite polarità tali da rispettare la convenzione del nodo sottrattore.

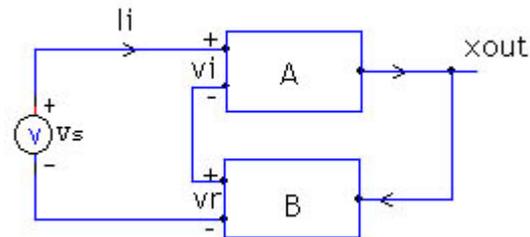


Fig.1

4

La connessione in ingresso ha effetti sulla resistenza di ingresso; più precisamente, nel caso di retroazione negativa, la connessione serie in ingresso, aumenta la resistenza di ingresso del fattore di retroazione:

$$R_{in \approx CL} = \frac{V_s}{I_i} = \frac{V_i + V_r}{I_i} = \frac{V_i + \beta V_i}{I_i} = \frac{V_i (1 + \beta A)}{I_i} = (1 + \beta A) R_{in \approx OL}$$

i

Nella figura accanto (Fig.15), l'uscita del blocco di reazione è connessa in parallelo all'ingresso dell' amplificatore.

Come si vede, in questo caso il circuito di ingresso è una maglia parallelo in cui avviene il confronto tra la corrente I_s fornita dalla sorgente e la corrente I_r , fornita dal quadripolo di reazione. I versi di I_s e I_r sono scelti in modo da rispettare la convenzione del nodo sottrattore.

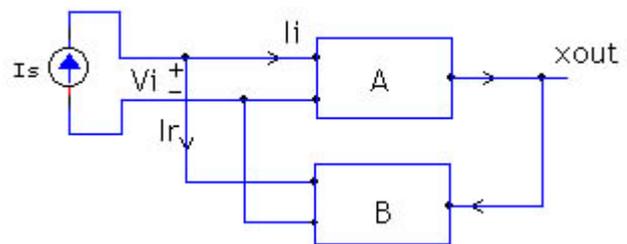


Fig.15

La reazione negativa, di tipo parallelo in ingresso, riduce la resistenza di ingresso del fattore di retroazione:

$$R_{in \approx CL} = \frac{V_i}{I_s} = \frac{V_i}{I_i + I_r} = \frac{V_i}{I_i + \beta I_i} = \frac{V_i}{I_i (1 + \beta A)} = \frac{R_{in \approx OL}}{1 + \beta A}$$

L' ingresso del quadripolo di reazione può essere connesso all' uscita dell'amplificatore in serie oppure in parallelo.

Nella figura accanto l'ingresso del blocco di reazione è connesso in parallelo all'uscita dell'amplificatore; in questa situazione il blocco B, che deve avere resistenza di ingresso molto elevata per non caricare l'uscita dell'amplificatore, preleva la tensione di uscita v_{out} e, in caso di retroazione negativa, la mantiene stabile, a parità di x_s , sia al variare di A che di RL. L'amplificatore, quindi, nei confronti di RL si comporta da buon generatore di tensione.

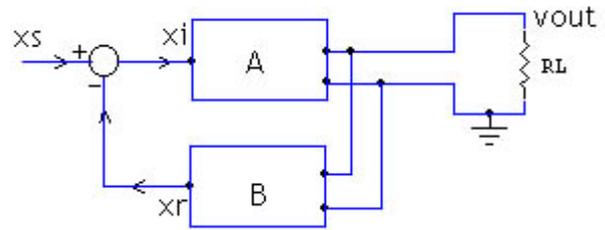


Fig.16

La reazione negativa, di tipo parallelo in uscita, stabilizzando la tensione di uscita, deve ridurre, contestualmente, anche la resistenza di uscita; infatti, si può dimostrare che:

$$R_{in \text{ CL}} = \frac{R_{in \text{ OL}}}{1 + A\beta}$$

Nella figura accanto l'ingresso del blocco di reazione è connesso in serie all'uscita dell'amplificatore; in questa situazione il blocco B, che deve avere resistenza di ingresso molto piccola per non caricare l'uscita dell'amplificatore, preleva la corrente di uscita i_{out} e, in caso di retroazione negativa, la mantiene stabile, a parità di x_s , sia al variare di A che di RL.

L'amplificatore, quindi, nei confronti di RL si comporta da buon generatore di corrente.

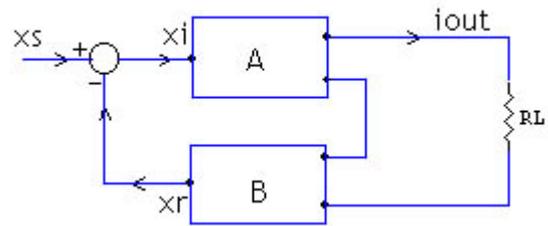


Fig.17

La reazione negativa, di tipo serie in uscita, stabilizzando la corrente di uscita, deve aumentare, contestualmente, anche la resistenza di uscita; infatti, si può dimostrare che:

$$R_{out \text{ CL}} = R_{out \text{ OL}} (1 + AB)$$

In definitiva, la reazione negativa di tipo serie aumenta la resistenza di ingresso e/o di uscita, la reazione negativa di tipo parallelo riduce la resistenza di ingresso e/o di uscita.

A secondo del tipo di confronto in ingresso e della grandezza prelevata in uscita, possiamo avere quattro configurazioni di amplificatori retroazionati.

Nella figura accanto (Fig.18), la reazione è di tipo **serie in ingresso e parallelo in uscita**; in ingresso c'è un confronto fra tensioni, la grandezza prelevata in uscita è la tensione.

Se la retroazione è negativa, essa stabilizza la tensione di uscita v_{out} , regolandosi la tensione di pilotaggio v_i . Quindi l'amplificatore è un buon generatore di tensione comandato da una tensione.

L'amplificazione che viene stabilizzata contro tutte le variazioni è quella di tensione V_{out}/V_s .

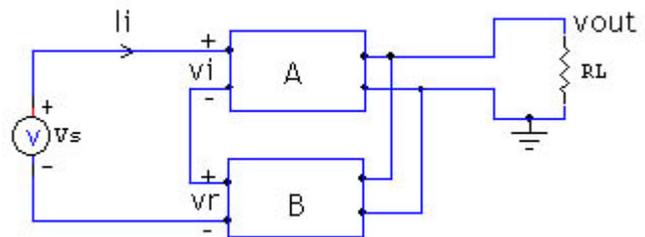


Fig.18

Si suole dire che l'amplificatore ottenuto è un convertitore tensione-tensione (V/V); di sicuro esso è un eccellente amplificatore di tensione; infatti esso ha elevata resistenza di ingresso e piccola resistenza di uscita.

Nella figura accanto (Fig.19), la reazione è di tipo **serie in ingresso e serie in uscita**; in ingresso c'è un confronto fra tensioni, la grandezza prelevata in uscita è la corrente.

Se la retroazione è negativa, essa stabilizza la corrente di uscita i_{out} , regolandosi la tensione di pilotaggio v_i . Quindi l'amplificatore è un buon generatore di corrente comandato da una tensione.

L'amplificazione che viene stabilizzata contro tutte le variazioni è quella di trans-conduttanza i_{out}/I_s .

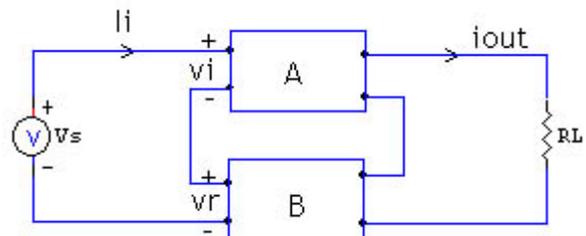


Fig.19

L'amplificatore ottenuto è un convertitore tensione-corrente (V/I); esso è un eccellente amplificatore di transconduttanza ed ha elevata resistenza di ingresso e piccola resistenza di uscita.

Nella figura accanto (Fig.20), la reazione è di tipo **parallelo in ingresso e serie in uscita** ; in ingresso c'è un confronto fra correnti, la grandezza prelevata in uscita è la corrente.

Se la retroazione è negativa, essa stabilizza la corrente di uscita i_{out} , regolandosi la corrente di pilotaggio i_i . Quindi l'amplificatore è un buon generatore di corrente comandato da una corrente.

L' amplificazione che viene stabilizzata contro tutte le variazioni è quella di corrente i_{out}/I_s .

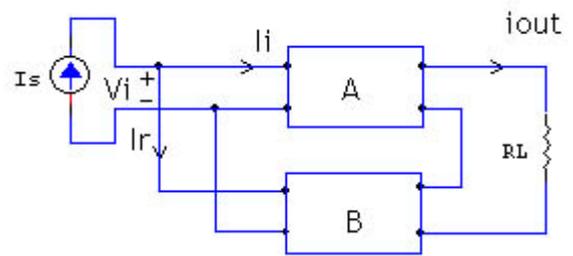


Fig.20

L' amplificatore ottenuto è un convertitore corrente-corrente (**I/I**); esso è un eccellente amplificatore di corrente ed ha piccola resistenza di ingresso ed elevata resistenza di uscita.

Nella figura accanto (Fig.21), la reazione è di tipo **parallelo in ingresso e parallelo in uscita** ; in ingresso c'è un confronto fra correnti, la grandezza prelevata in uscita è la tensione.

Se la retroazione è negativa, essa stabilizza la tensione di uscita v_{out} , regolandosi la corrente di pilotaggio i_i . Quindi l'amplificatore è un buon generatore di tensione comandato da una corrente.

L' amplificazione che viene stabilizzata contro tutte le variazioni è quella di trans-resistenza V_{out}/I_s .

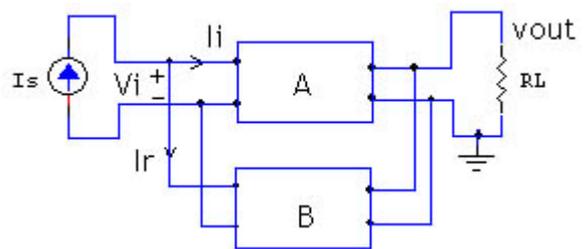


Fig.21

L'amplificatore ottenuto è un convertitore corrente-tensione (**I/V**); esso è un eccellente amplificatore di trans-resistenza ed ha piccola resistenza di ingresso ed piccola resistenza di uscita.